9
Nueve respuestas (o más) para un par (o menos) de preguntas
una intuición a favor de una teoría general de la forma

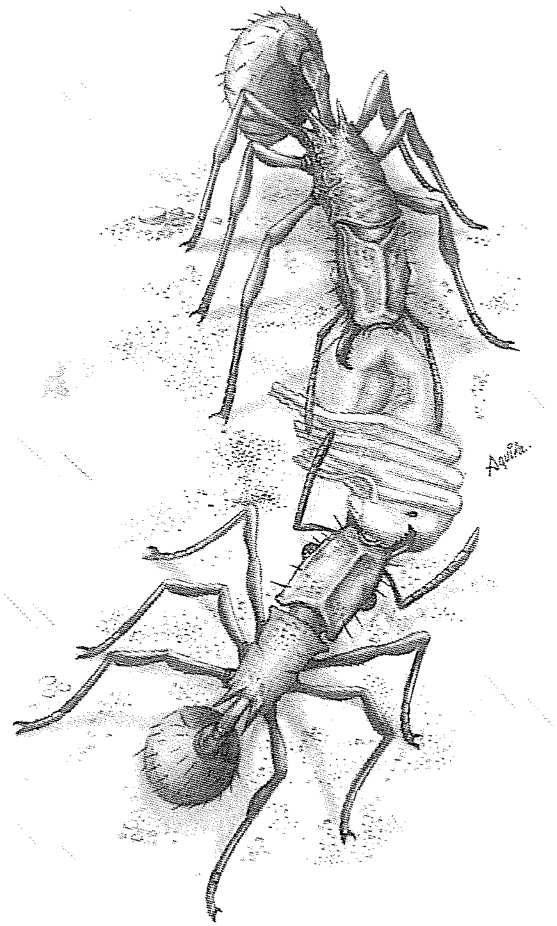


Figura 9.1. Dos obreras de la hormiga *Blepharidatta conops* se disputan (¿) un inmaduro. (Dibujo de Aquila Silva.)

Los objetos tienen forma. Algunos objetos, muy diferentes en muchos aspectos, tienen la misma o parecida forma. Sólo por eso, ya vale la pena embarcarse en la búsqueda de una teoría de la forma. Nada más sensato que acordar cómo nombrar una forma sin aludir al objeto concreto que la exhibe. El lenguaje común ya se ocupa de ello. Usamos la palabra esfera en lugar de decir «forma de planeta», «forma de naranja» o «forma de burbuja». El lenguaje es una construcción mental que sirve para abstraer un concepto asociado a un objeto particular de la realidad. En un idioma moderno hay unas 85.000 palabras, un número mucho menor que el de objetos existentes en la historia de la materia y que el de la inmensidad de propiedades y matices que éstos puedan presentar. El diccionario no está mal para empezar. Sin embargo, y como ocurre siempre en ciencia, el lenguaje de la vida diaria se queda corto. Cualquier teoría necesita construir su propio lenguaje, más manejable, más completo, más abstracto, más flexible, más preciso, más en armonía con el esquema conceptual elegido. Para esto está, por ejemplo, la matemática.

Las tres clases de selección (fundamental, natural y cultural) son los pilares de nuestro esquema conceptual para comprender la forma. Bien, pues la forma matemática también tiene su definición, basada asimismo, curiosamente, en cierta clase de selección. Se trata, podemos llamarla así, de la *selección matemática*, una cuarta clase de selección: de todos los puntos del espacio, pertenecen a la forma en cuestión todos aquellos puntos, y sólo aquellos, que cumplen cierto pliego de condiciones. Este pliego de condiciones se llama, también curiosamente, función matemática y se expresa como un conjunto de relaciones numéricas entre las coordenadas que identifican los puntos del espacio. La función que define un lugar geométrico se puede considerar también una restricción. No hay dos objetos reales idénticos. Sin embargo, todas las esferas de un metro de radio son idénticas. La función matemática supone, pues, una primera forma de compresión, de reducción y, por lo tanto, también de comprensión. La matemática, como toda abstracción, fabrica inteligibilidad.

Muchos investigadores de la forma se contentan con ello: se comprende una forma cuando se consigue una descripción matemática razonable. La idea no es mala para empezar. Sólo hay que procurar no traspasar cierto límite. Es un límite bien reconocible. Es el límite del absurdo, cuando resulta que es mucho más simple y compacta la propia forma del objeto real (que se pretende describir) que su inteligibilidad matemática (la que se propone para describirla). La comprensión no puede pesar más que lo comprendido.

La matemática puede proporcionar incluso modelos que describen mecanismos generadores de forma. También interesa. Sin embargo, todo lo dicho hasta ahora es para convencer de que la comprensión de la forma necesita de algo más, algo relacionado con la observación de las formas reales, con la frecuencia de su presencia y con los tipos de selección que dan sentido a la forma en el contexto general de la evolución. En muchos casos la forma matemática de los datos que proceden de observar un pedazo de realidad puede desvelar el secreto de la comprensión profunda de un fenómeno. No resisto la tentación de contar aquí un caso especialmente querido para mí.

Tuya-mía, el misterioso rito de unas hormigas cautivas

Todo empezó con una visita a mi buen amigo Beto Brandao, entomólogo del Museo de Zoología de São Paulo (Brasil) y, sin duda, uno de los especialistas en hormigas más conocidos del mundo. En Brasil aún se puede entrar en una selva tropical, recoger el primer insecto que salga al paso y dar así con una especie nunca antes descrita. Y si permitimos que el animal siga su camino treinta segundos más, igual observamos un raro comportamiento jamás descifrado hasta entonces. Es el caso de la hormiga *Blepharidatta conops*. Patricia Romano da Silva, una joven doctorando orientada por Brandao, trabaja con varias colonias vivas de esta especie. Una tarde, en su laboratorio, Patricia me muestra el prodigio.

Inmediatamente después de que una obrera decide transportar un inmaduro (huevo, larva o pupa), otra obrera se le echa encima para disputarle el privilegio de tan alta responsabilidad. Se inicia así un rito que dura varios segundos, un sereno y tenso «tuya-mía», un duelo que define una vencedora (véase la figura 9.1). El premio es la responsabilidad de transportar el inmaduro. De vez en cuando, y sin motivo aparente, toda la colonia se dedica a practicar el «tuya-mía» con la inocente población inmadura.

—¿Para qué hacen eso?

—¡No sé!

—Alguna razón habrá, ¿no?

—¡No sé!

—¿Imposible saberlo?

—¡No sé!

Al día siguiente, en una reunión insólita (como mínimo poco frecuente), un físico y dos entomólogos fantasean para diseñar un plan que desentrañe el misterio. ¿Cuál?

—Si pudiéramos marcar individualmente las hormigas...

—Podemos hacerlo...

—Quiero decir como si fueran atletas en unos juegos, que podamos reconocer a cada una de las hormigas, que podamos decir: ¡mira, acaba de pasar la hormiga uno, cero, dos, seis...!

—Podemos hacerlo...

—Si además pudiéramos hacer un seguimiento de todas las disputas que ocurran en la realidad y tomar nota de todos los resultados...

—Podemos hacerlo...

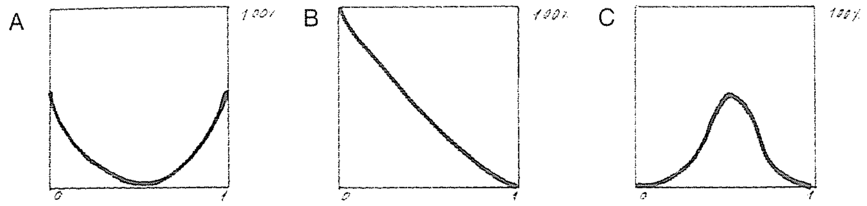
—Pues en ese caso podríamos conseguir unas curvas muy reveladoras: el tanto por ciento del total de hormigas para cada particular tanto por ciento de victorias observadas. Es cuestión de tener un poco de paciencia...

—Podemos tenerla... pero ¿qué nos dirían esas curvas?

—Digamos que sólo podemos encontrarnos con cuatro casos diferentes. Primera posibilidad: las que pierden siempre pierden y las que ganan siempre ganan. La forma de la curva sería inconfundible (figura 9.2a). ¿Sería eso importante para vosotros?

—Lo sería. Y mucho. Equivale a una cierta subdivisión del trabajo. Significaría que existen obreras *sparring* y obreras «transportadoras». En este caso, el ritual del «tuya-mía» tendría una explicación: la fiabilidad del agarre de las mandíbulas, no fuera a ser que éstas cediesen al primer tropiezo o al primer tirón de un ladrón hambriento. Es como el escudero que comprueba el estado de las trinchas de la montura antes de que el caballero arranque a galopar. Sería un importante descubrimiento...

—Segunda posibilidad: las obreras a veces ganan y a veces pierden, de modo que el resultado final determina un *ranking* que permite



Figuras 9.2a, 9.2b y 9.2c. Tanto por ciento de hormigas con probabilidad p de vencer en la disputa (ordenadas) frente a la probabilidad p de vencer (abscisas). Se prevén cuatro casos posibles. *Figura 9.2a.* «Caballeros y escuderos»: las que ganan siempre ganan, las que pierden siempre pierden. *Figura 9.2b.* «Selección preolímpica»: la hormiga número 1 gana a todas, la hormiga número 2 gana a todas menos a una... la hormiga enésima pierde contra todas. *Figura 9.2c.* No hay selección de hormigas: distribución gaussiana, un promedio de la mitad de las hormigas gana un promedio de la mitad de las disputas. D: *Ninguno de los tres anteriores.*

ordenar a las hormigas según sus prestaciones en este tipo de torneos. Algo parecido ocurre con la lista de los tenistas profesionales. Existe la obrera número uno, la número dos, etcétera. La forma de la curva en este caso también sería muy característica (figura 9.2b). ¿Y ahora? ¿Sería un caso de interés?

—Lo sería. Y mucho. Equivale también a una selección de hormigas. En este caso incluso podríamos hablar de una especie de «selección preolímpica» destinada a actualizar continuamente la lista de las mandíbulas más seguras para el transporte de inmaduros. También sería un descubrimiento importante.

—Tercera posibilidad: las obreras ganan o pierden de manera aleatoria. La forma de la curva, curiosamente, no es una cualquiera, sino una forma muy conocida por los físicos. Es la llamada distribución normal o gaussiana (la mitad de las hormigas tiene un cincuenta por ciento de éxito en las disputas) (figura 9.2c). En este caso, el «tuya-mía» o bien es para detectar inmaduros accidentalmente mal agarrados, o bien no se refiere en absoluto a las obreras, sino al propio inmaduro, quizá se trate de un tipo de «agítese antes de usar».

—Cuarta posibilidad: ninguna de las anteriores. La investigación sigue próxima al comienzo, la investigación continúa...

Este plan encaja bien con la metáfora de Feynman: el científico descubre las leyes de la naturaleza como el novato que deduce las reglas de juego del ajedrez tras largas horas de mirón en partidas de café. La inteligibilidad que buscamos en el caso del extraño comportamiento de las hormigas, lo que todas las disputas tienen en común, se compacta, se resume, se reduce, se comprende en la forma de una curva matemática que compacta bien una larga serie de datos sobre la realidad. La forma matemática, tal como ha sido concebida, destaca la esencia mientras amortigua los matices de un fenómeno real.

El resto de la historia se aparta ligeramente de nuestra reflexión sobre la forma matemática, pero no voy a dejar al lector sin saber cómo acabó la investigación [24]. Así que abro un breve paréntesis. La agrupación de todos los resultados de todas las disputas no fue el que más deseábamos, aunque sí debió de ser el que más debíamos de esperar, el más decepcionante de entrada, la alternativa tres. O sea, nada. O, mejor dicho, algo sí: una gaussiana es la forma que indica que el comportamiento no implica ninguna clase de selección de hormigas. Eso es algo. Pronto llegaron los datos que faltaban. Dos datos en especial permiten esbozar una explicación. Primero: el «tuya-mía» se desencadena en toda la colonia simultáneamente, cada vez que el ambiente transmite una vibración. El termostato que daba la señal de arranque al aire acondicionado del laboratorio también daba la señal para una sesión de «tuya-mía». En cambio, en la mesa supermasiva (antivibraciones) del microscopio electrónico del sótano del museo nunca se daba el fenómeno. Es fácil, por otro lado, provocar el fenómeno a voluntad con cualquier vibración artificial. Segundo dato: estas hormigas tienen un enemigo ladrón de inmaduros muy especializado. Se trata de un escarabajo semiesférico que penetra dentro del nido y trata de sorprender a la colonia robando algún tierno inmaduro para comer. Una vez que el escarabajo ha dado el «tirón», ya no hay manera de recuperar la pieza, ya que el depredador la esconde debajo de sí mientras la devora y ofrece una media esfera resbaladiza a las desesperadas hormigas (como veremos más adelante: la esfera protege). He aquí una posible explicación del «tuya-mía».

Por selección natural, el «tuya-mía» favorece que el escarabajo robe lo mínimo. En efecto, el «tuya mía» fija una dirección de entre infinitas posibles. Con esto desaparece el factor sorpresa sobre la dirección que elegirá el coleóptero para dar el tirón. Un inmaduro fuertemente asido por dos obreras tiene menos grados de libertad. Pero aún sería posible sorprender a las obreras si éstas no están del todo por la labor. ¿Cómo mantener su concentración para asir el inmaduro? El «tuya-mía» equivale a una señal mutua para inquirirse mutuamente por la concentración que requiere el caso:

—¿Estás atenta?

—¡Lo estoy! ¿Y tú? ¿Lo estás también?

—¡Claro! ¿Y tú?

—¡Sí! ¿Y tú?

—¡Sí! ¿Y tú?

—Tuya...

—Mía...

—Tuya...

—Mía...

—Tuya...

—Mía...

Comprender la comprensión

Con la forma matemática, el esquema conceptual gana un grado. A la selección fundamental (que regula la emergencia de las formas en la realidad inerte), la selección natural (que las consagra y concentra en la realidad viva) y la selección cultural (que las inventa en la realidad inteligente), se añade ahora una cuarta selección matemática (que las define y las nombra como entidades comunes a una diversidad de objetos). La selección fundamental proporciona mecanismos que generan, con el permiso y la contribución de la incertidumbre reinante del momento y el lugar, cierta variedad de innovaciones (formas, por ejemplo), tanto si después se consagran o no en favor de algún individuo vivo. Tal cosa ocurrirá quizá si la innovación en cuestión ayuda a un individuo a mantener su identidad independiente de la incertidumbre de su entorno. En el lenguaje metafórico de Richard Dawkins [25], los resultados de la selección fundamental equivalen a las montañas, que ahí están para ser escaladas, haya o no alguien dispuesto a escalarlas finalmente. Ciertos pensadores de la biología moderna cargan sobre esta idea casi todo el peso de la inteligibilidad de la evolución biológica. Muchas formas, como se esfuerza en demostrar por ejemplo Brian Goodwin [23], emergen como consecuencia directa de la no linealidad de ciertas dinámicas. Es verdad. Emergen por ésta y otras mil razones físico-químicas del medio, algunas más sencillas y otras más complejas. De acuerdo, pero ¿cómo se consolidan en la realidad viva?, ¿cómo aumenta su frecuencia hasta llegar a merecer una palabra del lenguaje común? ¡Su probabilidad de emergencia en la realidad inerte está muy lejos de coincidir con su probabilidad de presencia en la naturaleza viva! Falta, por lo menos, la otra mitad de la inteligibilidad. Tras la función fundamental emerge la función natural.

Si el darwinismo tiene algún flanco débil, dudo de que esté del lado de la selección natural. Esta polémica, y creo que muchas otras no menos interesantes, se ilumina con sólo volver al objetivo último de toda actividad científica: comprender. Conviene hacer aquí una última parada. ¿Cuál es el grado de comprensión que proporcionan los modelos matemáticos que tanto apasionan a científicos como Goodwin y, en general, a tantos otros estudiosos de la complejidad? La clave, una vez más, está en la compre*n*sión como capacidad de compresión. Cuantos más sucesos o fenómenos de la realidad queden comprehendidos por un modelo, más alto será su grado de comprensión. Si son más bien pocos, el modelo será una ley más bien local; si son muchos, el modelo será una ley más bien universal. Si nos impresionan las leyes de la mecánica de Newton es porque comprenden tanto el vuelo de una mosca como el de una galaxia en su cúmulo. Sin embargo, y como le gustaba decir a mi admirado Ramón Margalef, en biología hay que sospechar de cualquier fórmula matemática de más de diez centímetros. La complejidad matemática de una descripción no puede superar la complejidad de la realidad misma. En ese caso, la mejor comprensión de un fenómeno es el fenómeno mismo, tal cual. El siguiente ejemplo es una metáfora que quizá nos ayude a recordar este matiz esencial de la voluntad de comprender. Se refiere a una complejidad muy útil que todos hemos inventado, muy personalmente, y que, unos más que otros, usamos casi a diario: la firma manuscrita.

La firma, de eso se trata, es una complejidad del mundo real, en particular de su región inteligente. Pero ¿qué significa comprender una complejidad así? ¿Qué significa comprender una firma? Consideremos por ejemplo mi firma (figura 9.3a). Supóngase que buscamos la forma matemática que más se ajusta a este objeto real. La encontraremos con la precisión que deseemos. La matemática tiene varios métodos para conseguirlo, garantizados además por prestigiosos teoremas (polinomios, suma de exponenciales, etcétera). En el límite, podemos tomar una firma particular, acordar el número de puntos que queremos registrar y, sin más, registrarlos. Aun sin llegar al absurdo de dar cuenta con tantos puntos matemáticos como puntos pueden registrarse en la realidad (para ello, para la compresión cero, la propia firma ya se representa bien a sí misma), supongamos que conseguimos un buen ajuste, un modelo con una compresión razonable (figura 9.3m). Nuestra satisfacción se confirma al superponer la complejidad real y su pariente matemática más cercana (figura 9.3am). Pero atención, ¿comprendemos con ello mi firma? Está claro que lo que comprendemos es, como máximo, la particular firma que me ha salido en esta ocasión, ¡pero estamos lejos, muy lejos, de comprender lo que es relevante respecto del concepto «firma»! En efecto, si hago una segunda firma (figura 9.3b) e intento superponerla a la comprensión matemática conseguida antes, el resultado será muy decepcionante, y ello a pesar de que también he sido yo el autor de la segunda firma (figura 9.3bm). Para comprender mi firma, mejor sería fijarse en por lo menos dos de mis firmas y preguntarse qué es lo que estas dos complejidades del mundo tienen en común. Lo que comparten es justamente la inteligibilidad de mi firma. En otras palabras, lo que ambas tienen en común es, ni más ni menos, que... ¡yo mismo! Comprender mi firma lo conseguirá un algoritmo capaz de reconocer mi firma en cualquier garabato. A ello aspira el director del banco donde tengo la cuenta corriente, por ejemplo. En el límite, la mejor compresión y comprensión de mi firma tienen que ver con la intersección de todas las firmas que yo pueda llegar a hacer. ¿Cómo conseguir un algoritmo basado en esta otra idea?

En general, la autentificación de una firma se confía a un experto grafólogo (o a un grafólogo forzosamente improvisado, como ocurre con los dependientes de los comercios que acceden a cobrar con cheques o tarjetas de crédito). ¿En qué principios se basa una tarea de tanta responsabilidad? Básicamente se trata de prescindir de los matices, que varían de una firma a otra, y centrar la atención en la esencia común. Para ello hay que cotejar como mínimo dos firmas, la presunta con la de referencia. Pero mejor si cotejamos con otras dos, y mejor aún con otras tres... En algún número de firmas de referencia se estabilizará sin duda la idoneidad del trabajo, es decir, la fiabilidad del juicio

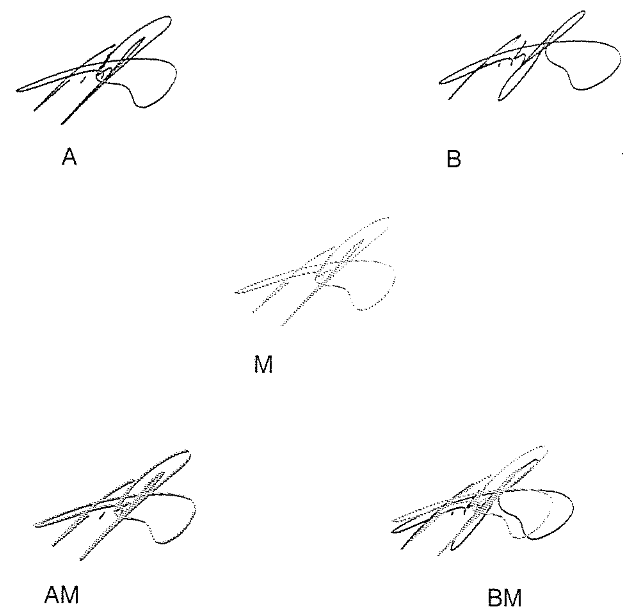


Figura 9.3. Comprender una firma (A) no consiste en obtener la representación (M) que más se ajuste (AM) a tal particular firma, porque el ajuste (BM) con cualquier otra firma (B) del mismo firmante está condenado al fracaso. Comprender la firma de un firmante es conocer lo que hay de común entre todas las firmas que pueda llegar a hacer ese mismo firmante.

del experto alcanzará un límite difícilmente mejorable. Es toda la compresión-comprensión alcanzable de una forma artesanal. Sin embargo, hoy en día proliferan cada vez más las transacciones bancarias y los pagos electrónicos a través de la red en el ciberespacio. Dar con un algoritmo fiable y seguro capaz de garantizar la autenticidad de una firma fresca recibida en un punto de la red que acaba de ser ejecutada en otro punto de la red, debe ser ya un asunto urgente.

Tal como van las cosas, es muy probable que la cuestión ya esté más que resuelta en el momento de escribir estas líneas. En una reciente visita a la Universidad de Campinas (estado de São Paulo, Brasil), me entero, en una charla de café, de la idea de un físico de esta ciudad. Se trata de firmar sobre una plaquita conectada al ordenador sensible a las variaciones de presión que la mano hace en diferentes puntos del espacio durante el proceso mismo de firmar. Firmando varias veces se podría elaborar un mapa en el espacio y en el tiempo de un buen número de presiones. De ese mapa se extrae una información digitalizada que luego se puede analizar por refinados sistemas matemáticos (por transformadas de Fourier, por ejemplo) de modo que una firma, más aún, no sólo el resultado final, sino todo el proceso mismo de firmar, quedaría caracterizado quizá por unas frecuencias y unas amplitudes que harían al autor de la firma insustituible por un posible falsificador. El resto es fácil. Cualquier usuario, comerciante, juez, contratante o contratado, ciudadano en general, podría enviar a una oficina depositaria del algoritmo una presunta firma fresca para solicitar su validación. La seguridad y la fiabilidad aumenta, claro, si en lugar de exigir una firma para rubricar un documento electrónico se exigen dos... El ajuste por polinomios pretende describir la firma sin comprenderla. El algoritmo del físico brasileño no se basa en un análisis visual de la forma de la firma sino en el automatismo que culmina en una cualquiera de las firmas posibles. Es un algoritmo basado en la inteligibilidad del concepto firma: la mínima expresión de lo máximo que todas las posibles firmas tienen en común.

Veamos otro caso bien complejo: el fenómeno religioso. ¿Cómo comprender la religión? ¿Por dónde empezamos? Intentar comprender la religión, como fenómeno, desde el interior de una de ellas es empezar mal. Se estima que desde el amanecer del hombre moderno han existido unas cien mil religiones. La religiosidad, la unión individual y colectiva de los humanos con la divinidad, parece un fenómeno universal ligado a la condición humana. No hay cultura humana sin religión. La clase de inteligibilidad que se gasta en ciencia recomienda abordar la cuestión de otro modo. Mejor centrar nuestro interés en aquello que comparten el máximo número de formas religiosas posibles. Así nos tropezaremos, quizá, con los conceptos clave para comprender el fenómeno (en nuestro sentido de comprensión): la experiencia mística, el éxtasis, las diferentes técnicas para conseguirlo (oración a base de repetir frases, música o bailes que se aceleran lenta y progresivamente, tóxicos, soledad, ayuno...), la omnipresente relación entre la vertiente mística y la vertiente simbólica, la ascética y la jerárquica, la relación de las culturas arcaicas o ágrafas con culturas modernas, las zonas del cerebro donde se mezclan diferentes realidades sin sufrir la menor incomodidad por la emergencia de contradicciones (el sueño y la vida

cotidiana, el arriba y el abajo, seres en los que funden animales de diferentes especies...), elementos del cerebro donde se establece la conexión divina (o infernal), visiones o aprehensiones de distintas clases de infinitudes, como la eternidad... Son los conceptos que se van descolgando en el libro de Francisco J. Rubia titulado *La conexión divina,* un ensayo bien enfocado, creo, desde el punto de vista de la inteligibilidad científica [46]. En el epílogo de la segunda parte aludo a otra buena metáfora de la inteligibilidad científica, una potente intuición de Pablo Picasso.

En el diario *El País* del 1 de abril de 2004, se publicó esta noticia:

> TRES DETENIDOS POR COPIAR LA TARJETA DE CRÉDITO DE LA CONSEJERA DE INTERIOR Y GASTAR 2.874 EUROS.
>
> «...Todo empezó cuando la consejera de Interior se dio cuenta de que su tarjeta de crédito oficial había sido usada en Alicante. ¿Cómo era posible que le cargaran diversas compras hechas en esta ciudad por los citados 2874 euros, si ella no había estado allí?... La policía de la Generalitat ha podido localizar a los autores del presunto delito porque se da la circunstancia de que una cliente de Terrassa (...) también había recibido cargos por compras que tampoco había realizado... Al comparar los cargos bancarios, los investigadores se dieron cuenta de que las dos clientas habían acudido al mismo restaurante. Las investigaciones se centraron entonces en el establecimiento de la calle Ferran, donde fueron detenidos los camareros citados y posteriormente su socio».

La policía resolvió el caso después de comprender, en cuanto detectó lo común entre lo diverso.

Cualquiera de estas metáforas ilustra bien el segundo principio del método científico, el que bien podríamos llamar principio de inteligibilidad. Su enunciado suena más o menos así: de todas las maneras de representar con igual mérito la realidad, la ciencia elige la más breve, la que pesa menos, la más compacta. Está en la esencia misma de lo que significa la abstracción. Para que un conocimiento merezca ser calificado de científico, el principio de inteligibilidad es un requisito irrenunciable. No hay excusa posible. No vale, por ejemplo, elegir una representación menos compacta y menos sintética sólo porque es más intuitiva. Ésa es la grandeza de la ciencia, que puede comprender sin necesidad de intuir. En síntesis:

La mejor comprensión de un pedazo de realidad es la mínima expresión del máximo común denominador de todas sus manifestaciones.

Apliquemos esta idea a la comprensión de un objeto.

Funciones de funciones

El objeto está ahí y lo que deseamos es comprender su existencia. Buscamos una teoría para comprender lo que existe. Y la tendencia a perseverar es, justamente, lo que comparten todos los entes dotados de la propiedad de existir, o de haber existido hasta el punto de merecer trascender (dejar un descendiente, un fósil, un rastro...). Tal es la esencia común compartida. Es el tipo de comprensión que buscamos. En la materia inerte, perseverar significa seguir estable. En la materia viva significa seguir vivo. Y en la materia culta significa seguir inventando. ¿Qué es lo que persevera? Es la identidad de una individualidad. La capacidad para perseverar de una individualidad inerte es la estabilidad, la de una individualidad viva es la adaptabilidad y la de una individualidad culta es la creatividad. En cualquiera de los tres casos existe, como penúltima oportunidad, la de cambiar de identidad (por cierto: si no fuera por ello, hoy aún seríamos todos bacterias procariotas).

Supera la selección fundamental lo que es suficientemente estable, por lo que la estabilidad es la gran función de la materia inerte. Supera la selección natural lo que está suficientemente adaptado, por lo que la adaptabilidad es la gran función de la materia viva. Y supera la selección cultural lo que es suficientemente creativo, por lo que la creatividad es la gran función de la materia culta. Estabilidad, adaptabilidad y creatividad se suceden y superponen. Un ser vivo puede sacrificar su estabilidad en favor de una eventual adaptabilidad y un ser culto su adaptabilidad en favor de una posible creatividad.

Ahora bien, toda gran función está servida a su vez por funciones más específicas (cuesta llamarlas subfunciones o funciones menores), según sean las alternativas disponibles. Por ejemplo, a la gran idea

de seguir vivo (gran función de la materia viva) sirve cierta variedad de posibilidades a modo de funciones parciales: anticipar mejor la incertidumbre u, otra alternativa, moverse mejor u, otra más, mejor tecnología. La inteligencia, la movilidad o la tecnología son subfunciones de la adaptabilidad. Y cada una de estas subfunciones tiene las suyas a su vez, y así sucesivamente con toda una gama de gamas de funciones. Dentro de la anticipación, por ejemplo, se puede ganar independencia mejorando la inteligencia o el sistema inmunológico. Dentro de la movilidad, otro ejemplo, uno puede optar por nadar o dejarse llevar a la deriva. Y dentro de la natación uno puede optar por la propulsión a chorro, como los calamares, a golpe de aleta caudal, como los peces, o por la propulsión a hélice con motor iónico y flagelo como tantos microorganismos. Y dentro de los peces están las alternativas de viajes a grandes distancias, como los atunes, o las excursiones de cercanías, como los peces de arrecife. Etcétera.

He aquí una buena intuición, creo, para plantear lo que podríamos llamar una teoría general de la forma y, por extensión, de cualquier otra propiedad de los objetos y fenómenos reales. Se trata de un mapa ordenado de las funciones que explican el acceso, la permanencia y la frecuencia de una forma en la realidad del mundo. Es todo un plan de investigación que requiere muchas actividades intermedias, como buscar modelos, mecanismos, leyes o grandes principios... pero cuya expresión última sería ese panorama jerarquizado de unas funciones paralelas o alternativas en la dirección horizontal que también pueden derivarse unas de otras, de función en subfunción, en la dirección vertical.

La consideración de la ley general del cambio comentada en el capítulo séptimo puede ser una buena forma de empezar. En efecto, la estabilidad de la materia inerte (y sus respectivas funciones y subfunciones) tiene una especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia pasiva. La adaptabilidad de la materia viva (y sus funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia activa. Y la creatividad propia de la materia culta (y sus correspondientes funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos dado en llamar independencia nueva.

En la ley general del cambio de un objeto inerte, los términos cruzados (anticipación y acción) son prácticamente nulos, por lo que la complejidad del objeto tiende a coincidir con la complejidad de su entorno. El objeto sigue con mayor o menor inercia los caprichos de su realidad inmediata. Lo que hace es resistir. Las fronteras no son del todo nítidas, y ya hemos comentado que muchas formas vivas en la frontera justamente del no vivir (hibernación, letargo...) se acercan mucho a esta estrategia. También aquí hay varias alternativas donde elegir. La gran función es la estabilidad. Si hablamos de una propiedad como la forma geométrica de un gran cuerpo celeste, como una estrella o un planeta en condiciones de isotropía, entonces la estabilidad obliga a la forma esférica, que es también la más frecuente, la que más se observa. Si hablamos de la posición que ocupa una roca en la ladera de una montaña, desprendida de un estrato más alto, entonces resulta que tal posición no es independiente del tamaño de la roca. Cuanto mayor sea la roca, mayor será la probabilidad de alcanzar las cotas más bajas de la ladera. La roca gana estabilidad cuanto menor sea la pendiente y, en general, cuanto más cerca se encuentre de su situación de mínima energía potencial.

Existen objetos que existen poco. Es decir, existen objetos que no resisten las fluctuaciones de la incertidumbre del mundo, así que, sencillamente, se transforman o desaparecen. Tales objetos no son estables y, por lo tanto, tampoco son muy observables y no trascienden demasiado en la historia del universo. Un cubito de hielo tiene serias dificultades para mantener su identidad como cubito en una copa a pleno sol. El mismo cubito lo tiene mejor en la Antártida. Otros objetos existen algo más. Son objetos que han superado una larga historia de fluctuaciones de la incertidumbre de su realidad inmediata. Es decir, han superado una larga sucesión de selecciones fundamentales, o sea, gozan de cierta estabilidad, la suficiente para trascender en su mundo. Es el caso de la molécula de agua en nuestro planeta. El conjunto de las leyes de la física, y la incertidumbre que éstas permiten, empujan a estas moléculas a formar complejos de distinta índole, copos de nieve, agua líquida, vapor... En las condiciones de nuestro planeta (no así por ejemplo en el centro del Sol) la molécula de agua supera con creces cualquier selección fundamental, es una molécula estable, muy estable... Es estable porque soporta una amplia gama de incertidumbres exteriores sin dejar de ser por ello una molécula de agua. La molécula puede cambiar de estado, puede adquirir más energía, pero

sigue siendo una molécula de agua formada por un átomo de oxígeno enlazado con dos de hidrógeno. De hecho, la molécula sigue mansamente los cambios exteriores, pero es estable en el sentido de que no deja de ser una molécula de agua.

Algo similar puede decirse de los objetos vivos respecto de la independencia activa y de los objetos cultos respecto de la nueva independencia. Para superar la capacidad de resistir el entorno de la materia inerte y acceder a la capacidad de modificarlo, se necesitan los cuatro términos de la ley general del cambio. Siempre existe una frontera en la que se (con)funden las cosas. Es el comportamiento prácticamente inerte de las semillas del mundo vegetal o el comportamiento prácticamente vegetal de algunos animales. Pero por independencia activa, los animales, que no los vegetales, explotan su particular capacidad de movilidad de tecnología y de anticipación. Por nueva independencia, en cambio, se escalan los grados de esas mismas prestaciones.

Los individuos cultos, por su parte, superan la capacidad de modificar el entorno para acceder a la capacidad de crearlo provocando cambios de identidad. Aquí también las fronteras se desdibujan en las inmediaciones de ambos lados. Por el lado de la vida, por ejemplo, la evolución se hace creativa renunciando, de vez en cuando, a ciertas identidades (por simbiosis, por ejemplo). Por el otro lado no hace falta buscar mucho para encontrar ejemplos de cultura adaptativa, bien cómoda y asentada en sus identidades y tradiciones. Casi todas las identidades colectivas humanas se imponen estos límites, el folclore, la identidad nacional, religiosa, deportiva... Incluso manifestaciones tan genuinas de la creatividad como el arte o la ciencia tienen problemas para liberarse de su componente adaptativa.

En esta realidad, que es la que es, y no otra

Todo parece preparado para intentar una teoría de la forma. He aquí las ideas básicas.

Primero, usamos la matemática para nombrar las diferentes formas. No es una casualidad que las formas matemáticas más observables en la naturaleza sean ya, por ese mérito, palabras del lenguaje común: esferas, parábolas, rectas, hexágonos...

Segundo, el resultado de la actividad de las tres selecciones (la fundamental, la natural y la cultural) es, nada menos, la propia realidad, la realidad a la que pertenecemos, la realidad que observamos. Y la realidad es la que es. Podría ser otra, pero no lo es.

Tercero, y resulta que, en esta realidad, que es la que es y no otra, encontramos formas muy cercanas a las formas que nítida y abstractamente define la selección matemática.

Cuarto, la frecuencia con la que se observa una forma matemática particular en la realidad de este mundo se mide por el número de objetos reales que la comparten.

Y quinto, basta un vistazo a la realidad de este mundo, que es la que es y no otra, para constatar que las formas matemáticas presentes en ella no son equiprobables.

Dicho brevemente: en la naturaleza se observan formas matemáticas sencillas como esferas, hexágonos, espirales, hélices, parábolas, conos, ondas, catenarias, fractales... Sin embargo, parece que con distinto peso de su presencia. Se diría por ejemplo que, a primera vista, las esferas son más frecuentes que las parábolas. Ahora, armados con el esquema conceptual que nos hemos regalado, nos disponemos a replantear la cuestión. Nuestro plan para comprender la forma se centra en dos preguntas:

¿Qué formas son las más frecuentes en la naturaleza? ¿Cómo se comprende que sean esas formas y no otras?

La historia de la comprensión en ciencia es más la historia de las preguntas que la historia de las respuestas. Buscar preguntas suele ser un camino cuesta arriba, encontrar respuestas es iniciar el camino cuesta abajo. Lo que queda del libro es una propuesta de respuesta a estas dos preguntas. Responder a la primera pregunta supone un vasto ejercicio de observación en los mundos inerte, vivo e inteligente. Y ello sin olvidar la realidad directamente inaccesible a nuestro sensorio, el mundo invisible por pequeño, el invisible por grande o por lejano, y el invisible por complejo. Responder a la segunda significa concentrar la atención en las formas compartidas por el mayor número de objetos distintos y bucear luego en las funciones y subfunciones asociadas a la emergencia y la perseverancia de tales formas. Parece un buen plan de

morfogénesis. En la segunda parte de este volumen nos proponemos sólo un paseo ligero a través de las formas simples más frecuentes y de sus funciones más visibles. ¡Por algo lo son! Quizá sea suficiente para convencer a alguien más paciente, preparado y riguroso para seguir el camino de esta propuesta.

La tarea de revisar las formas de todos los objetos del mundo parece en principio una proeza cósmica, sí. Pero de momento se trata de especular para una primera aproximación. Empecemos con la pregunta que sigue (y luego ya veremos qué hacemos):

¿Cuál es la forma matemática más probable en la naturaleza?

A lo mejor resulta que la respuesta salta tanto a la vista que ni siquiera se requiere montar una investigación demasiado aparatosa. En efecto, basta entrar en un mercado, mirar el cielo de la noche con un telescopio, observar una arena vieja con el microscopio, bucear en el mar, entrar en una tienda de regalos, atender al tráfico rodado o a la arqueología industrial o, sencillamente, darse una vuelta por el campo, para constatar que el primer premio de frecuencia se lo lleva la simetría circular. Se diría que para esta afirmación no hace falta una exploración demasiado exhaustiva y sistemática de la naturaleza. La simetría circular reina a sus anchas en todos los dominios de la realidad.

Los mecanismos de la emergencia de la esfera ya han asomado en diversos puntos de esta reflexión y volveremos a ello en el próximo capítulo. Tampoco será difícil apostar por la función fundamental y natural que hace comprensible su presencia en el mundo inerte y en el mundo vivo. ¿Y luego? ¿Cuál es la segunda forma más probable? ¿Y la tercera?...

Ante nosotros tenemos dos preguntas: ¿cuáles son las formas más probables en la realidad de este mundo? ¿Cuáles son, en cada caso, las funciones fundamentales, naturales y cultas más convincentes? A estas dos preguntas daremos nueve respuestas que adelantamos aquí sucintamente: la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, el ángulo penetra, la onda desplaza, la parábola emite y recibe, la catenaria aguanta y los fractales colonizan.

Es el sumario de la segunda parte.

Epílogo de la primera parte
Inacabando...

No hay nada como un epílogo para inacabar un libro. El esquema conceptual en él construido se apoya en tres pilares: la materia inerte conducida por la selección fundamental, la materia viva conducida por la selección natural y la materia culta conducida por la selección cultural. ¿Eso es todo? Un esquema conceptual abierto sigue insinuando ideas por extensión y por simetría. Por ejemplo: ¿qué viene después de la selección cultural? ¿Se puede hablar de un cuarto tipo de selección?

Procedamos por extensión. El actor principal de la selección cultural (el individuo relevante) es el organismo dotado de conocimiento abstracto. Preguntarse por el siguiente tipo de selección equivale a preguntarse por el siguiente tipo de individuo. ¿Cuál sería el siguiente? Procedamos por simetría. La individualidad formada por organismos dotados de mente pensante es una colectividad humana dotada de una especie de mente colectiva. Es una mente colectiva que toma decisiones en favor de la nueva individualidad, una individualidad dotada de una especie de identidad, una identidad que merece perseverar a pesar de las fluctuaciones de la incertidumbre. Tal es el nuevo concepto emergente, la identidad colectiva. El ser humano es un organismo culto con gran tendencia a crear identidades colectivas: familias, tribus, etnias, naciones, religiones, clubes deportivos, clubes selectos, clubes gastronómicos, clubes, conventos, sectas, pueblos, barrios, ciudades, culturas... Se diría que en el mismo instante en el que dos mentes descubren que sintonizan (sencillamente, se caen bien), ya empieza a gestarse una nueva identidad colectiva...

Los conceptos y preguntas caen ahora como fruta madura. Tras la selección fundamental, la selección natural y la selección cultural, es el turno ahora de la selección colectiva.

Las preguntas también se desgranan por simetría. ¿Cómo se toma una decisión colectiva? ¡Buena pregunta! ¿Quién vela para que sea en beneficio de la identidad colectiva? Buena pregunta. Pero en la nueva nervura de la realidad, el nuevo individuo vive entre individuos de la nueva nervura. Un ser humano se relaciona con otros seres humanos y una colectividad con otras colectividades. ¿Cómo afecta la perseverancia de la propia identidad colectiva a las identidades colectivas vecinas? Buena pregunta.

Es el origen de un antiguo y siempre nuevo problema: organizar la convivencia humana, la política. La ley general del cambio, comentada en el séptimo capítulo, ofrece ideas que quizá valga la pena tener en cuenta. Hablemos por ejemplo de una colectividad llamada nación. Hablemos de independencia nacional. Hablemos de una nación que contiene una o más nacionalidades y repensemos la cuestión de la independencia nacional. Hablemos de que la independencia puede ser pasiva, activa o nueva. O de cómo evoluciona la independencia. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de la identidad colectiva cuando ésta, inmersa en la incertidumbre del momento y del lugar, no encuentra salida. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de identidad. Mucha. Hablemos de sacrificarla toda, de las alternativas que se presentan cuando se enfrenta la identidad de un individuo con la de una o varias de sus colectividades. Hablemos del progreso colectivo. Hablemos de su relación con el progreso individual. ¿Se mantiene vigente la idea de progreso definida como la ganancia de independencia? Entonces, si una identidad gana independencia, ¿significa que alguna otra la pierde? No hay duda de que el concepto «parásito» resiste el tránsito de la colectividad simplemente viva a la colectividad culta. Pero lo mismo ocurre con la estrategia del pacto simbiótico.

Comprender la identidad colectiva obliga a explorar lo que las identidades colectivas más frecuentes tienen en común, sus conocimientos, sus memorias, sus conceptos, sus mitos, sus dioses, sus memes... sus tácticas y estrategias para perseverar en la realidad de este mundo, sus trucos, ¡sobre todo sus trucos!, o sea, sus himnos, sus símbolos, sus oraciones, sus liturgias... Un buen esquema conceptual proyecta sus conceptos hacia delante. Si la selección fundamental resiste la incertidumbre, si la selección natural la modifica y si la selección

cultural la anticipa, ¿qué es lo propio de la selección colectiva?, ¿cómo se enfrenta la colectividad a su propia incertidumbre? Si la garantía de la perseverancia en el mundo inerte es la estabilidad, en el mundo vivo es la adaptabilidad y en el mundo culto es la creatividad, ¿cuál es la garantía de independencia de las identidades colectivas humanas? Conviene repensar estas preguntas dentro del nuevo esquema conceptual. No sea que algo de todo esto pueda resultar de ayuda.

Segunda parte
La rebelión de las formas

10
La esfera protege...

Figura 10.1. Gotas de agua sobre una palmera (fotografía del autor).

El mundo está bien provisto de circunferencias, círculos, esferas, esferas de esferas... La circunferencia es el perímetro más corto que encierra una superficie plana y la esfera es la menor superficie que encierra un volumen dado. La esfera emerge con facilidad, por selección fundamental, en un mundo inerte con pocas restricciones. Por ejemplo, cuando no hay restricciones en el espacio, es decir, cuando no hay direcciones privilegiadas, cuando todas las direcciones son igualmente probables, se dice que existe isotropía. Cuanto más homogéneo e isótropo es el espacio de la realidad preexistente, más probable es la emergencia de esferas. El espacio que más cumple esas condiciones es la nada. Por eso, la emergencia de esferas es especialmente probable en realidades jóvenes, poco pobladas de fenómenos y de objetos preexistentes.

Lo sabe bien un astronauta cuando vierte el agua de una botella en condiciones de ingravidez (la gravedad rompe la simetría); lo sabe bien el que contempla las gotas de rocío o las gotas de agua sobre una hoja de palmera después de la lluvia (figura 10.1), lo sabe bien el geólogo que contempla la redondez de una bomba volcánica y se imagina la masa de lava ardiente escupida por un volcán enfriándose durante el breve intervalo de condiciones de isotropía de la caída; lo sabe bien un submarinista que espira burbujas bajo el mar y el que tira una piedra a un estanque de aguas tranquilas; lo sabe bien el que fabrica perdigones dejando caer gotas de plomo líquido en el vacío, o el visitante de nuestra exposición de las formas en el museo cuando, pisando un pedal, observa el nacimiento de enormes burbujas (figura 10.2), también lo sabe el físico que estudia el nacimiento de estrellas y planetas... Todos estos sencillos experimentos muestran con qué alta probabilidad la selección fundamental permite la generación de simetrías circulares. La sensación de inteligibilidad es intensa cuando se piensa que el mismo *cómo* se aplica a la esfera de un gigantesco y viejo planeta como Júpiter orbitando en torno al Sol y a la esfera de una modesta burbuja ascendiendo según la vertical en una copa de cava.

El ámbar es resina fósil, un bellísimo material, transparente y dorado, capaz de atrapar el pasado. Entre otras cosas, y para deleite de los paleontólogos, es capaz de conservar insectos y fragmentos vegetales durante millones de años. Pero no sólo eso. También es capaz de convertir en semieternos objetos tan frágiles y efímeros como gotas

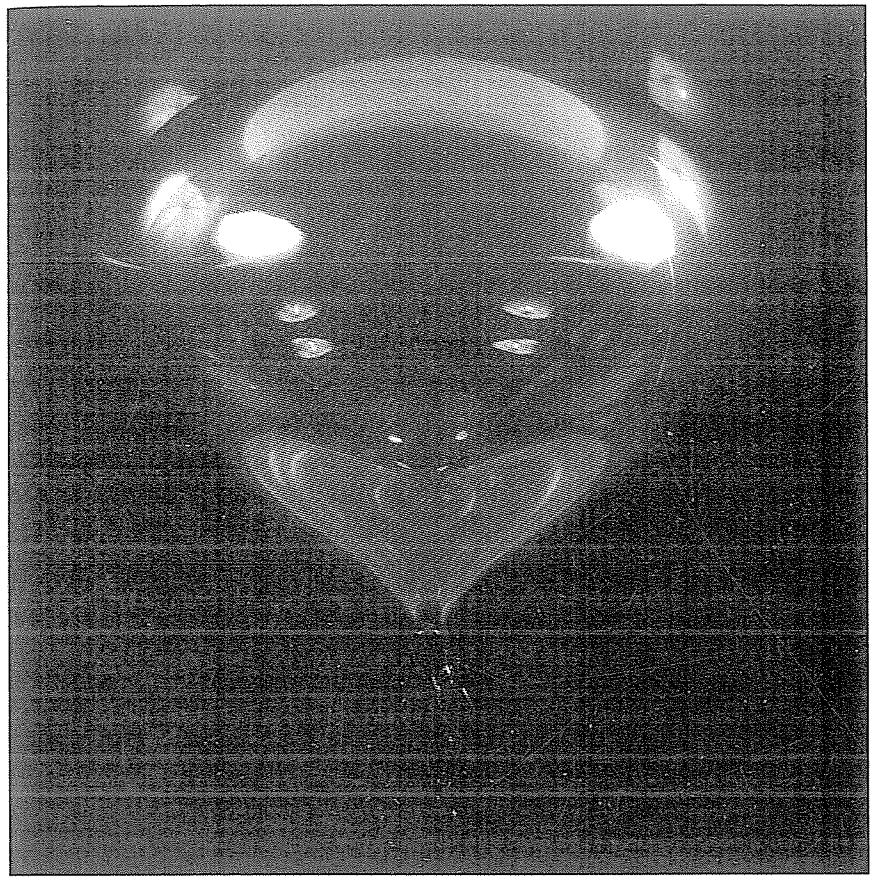


Figura 10.2. Burbuja de aire en el agua. La forma esférica se adopta por selección fundamental. Es la mínima superficie que encierra un volumen (colección MCFLC, fotografía de Sergio Parra).

de agua en el aire y burbujas de gas en el aire. Las termitas, por ejemplo, generan una gran variedad de burbujas esféricas. Poco después de quedar atrapadas por la resina mueren por asfixia. Y a veces, como en la figura 10.3, la presión sobre el cuerpo del insecto hace visible para siempre el último suspiro a modo de una gota de aire (en resina) señalando la posición exacta de cada espiráculo. Los microorganismos que ayudan a que las termitas puedan digerir la madera tardan bastante más en morir y sus restos están aún presentes en los líquidos y gases de descomposición del individuo.

—¿Por qué no te llevas una pieza del museo y los estudias? —le propuse a Lynn Margulis durante una cena en Barcelona—. ¿Por qué no vas ahora mismo a buscarla? Yo te espero para el segundo plato... [47]

En la misma pieza puede observarse algo muy frecuente en termitas presas en ámbar: el gas atrapado dentro de una burbuja esférica se mueve dentro del líquido atrapado dentro del cuerpo de la obrera atrapada en la resina. La esfera de gotas y burbujas es la forma de objetos inertes más frecuente dentro de las piezas de ámbar.

Éstos son casos de simetría por omisión, pero también hay muchos casos de isotropía por acción. Es cuando la isotropía no se debe a la ausencia de asimetrías, sino cuando éstas son tantas y tan bien repartidas que hacen que la globalidad vuelva a ser de nuevo isótropa. Basta

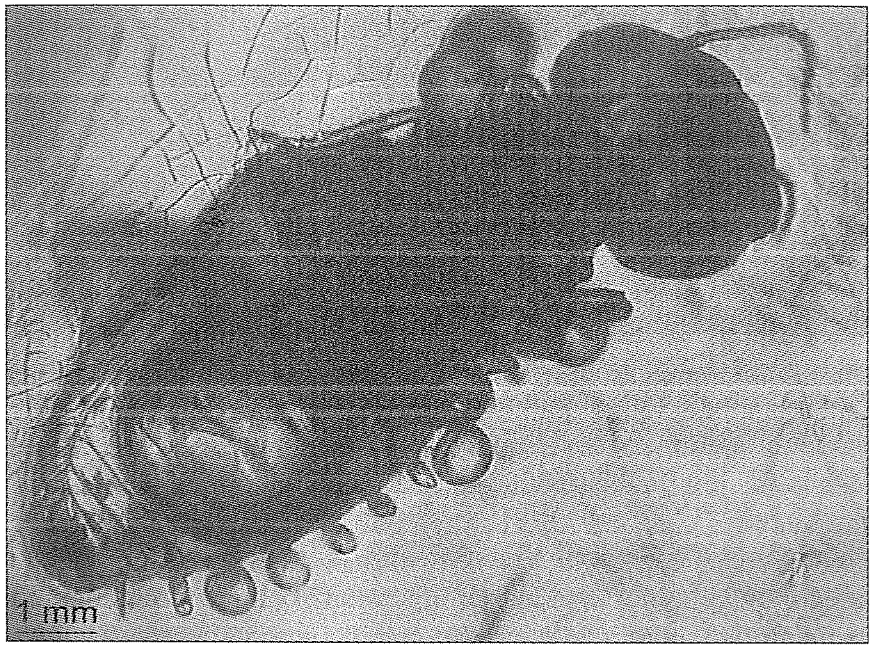


Figura 10.3. Termita *Electrodomenicus mastotermes* atrapada en ámbar dominicano (Mioceno). Una pequeña burbuja de aire señala la posición de cada individuo en lo que bien podría llamarse el «último suspiro». Además, una burbuja de gas se mueve en el líquido de descomposición atrapado dentro del cuerpo del animal. Otras esferas de la pieza corresponden a gotas de agua o a burbujas de aire (colección MCFLC, fotografía del autor).

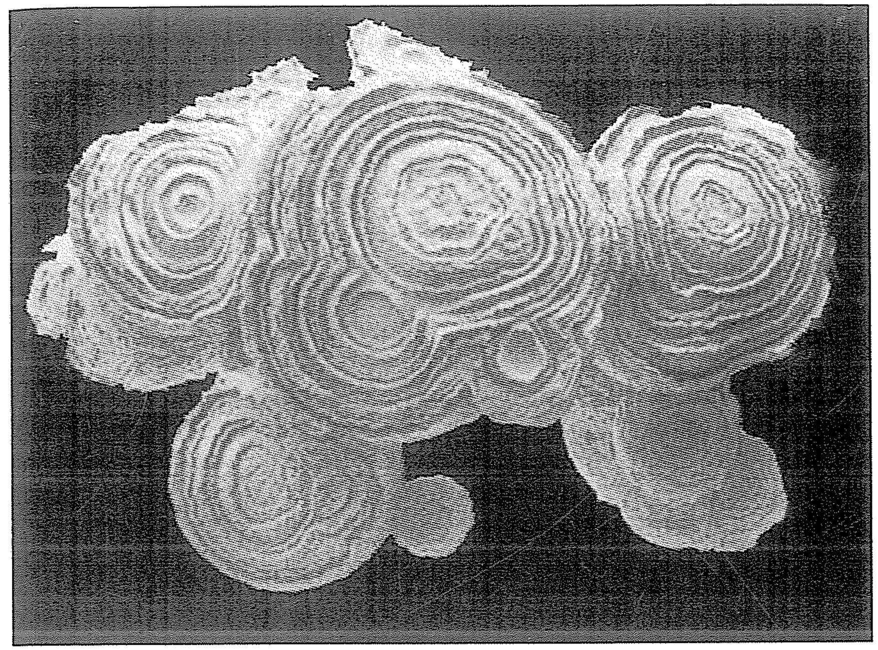


Figura 10.4. Oncolitos (¿?) de un desierto de Marruecos. La simetría esférica corresponde a un crecimiento isótropo de microorganismos sobre cantos rodados en capas sucesivas (colección MCFLC, fotografía del autor).

observar los cantos rodados de un río. La simetría circular no es tan rigurosa y universal como en las burbujas o los astros celestes, pero es sin duda la forma más probable (véase, antes, la figura 8.4b). Estas piedras han rodado tanto desgastándose las unas contra las otras en tantas direcciones diferentes sin privilegiar ninguna que, tras un tiempo largo, y el tiempo geológico sin duda lo es, la isotropía de las asimetrías es notable. Más espectacular aún es observar arena vieja en el microscopio. Los geólogos usan precisamente el grado de redondez de los granos para hacerse una idea de la edad de la arena.

En algunos casos el proceso se invierte y una forma esférica genera isotropía que, a su vez, da lugar a nuevas simetrías esféricas. Es el caso de los llamados oncolitos. Todo empieza con un canto rodado redondo sobre el que crecen microorganismos. La isotropía procede del hecho de que el canto rodado rueda. Rueda en cualquier dirección y, con el tiempo, acaba rodando en todas direcciones por igual. El resultado son

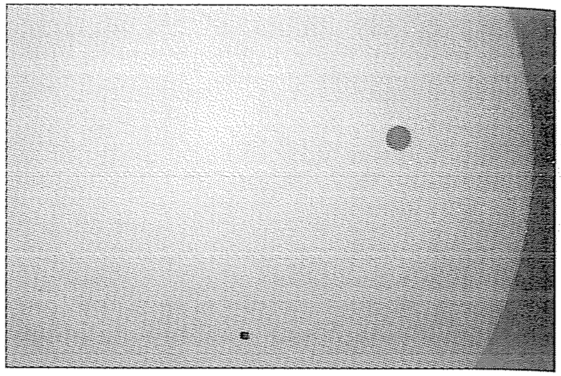


Figura 10.5. La esfericidad de estrellas y planetas. Tránsito de Venus por delante del Sol, el día 8 de junio de 2004, desde la terraza del Museu de la Ciència (fotografía del autor).

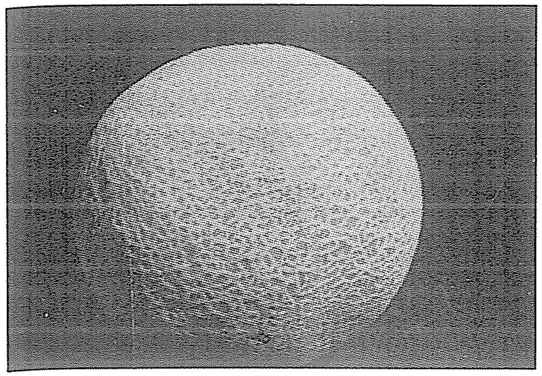


Figura. 10.6. Melón (fotografía del autor).

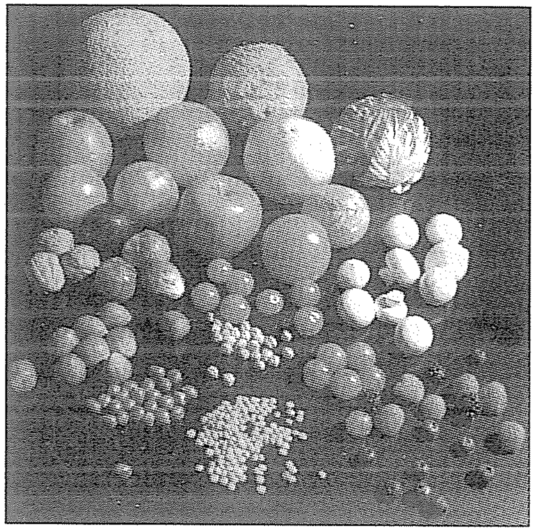


Figura 10.7. Selección de esferas limitada a 15 minutos en el mercado Galvany de Barcelona. La esfera es la forma más probable de frutos y semillas (fotografía del autor).

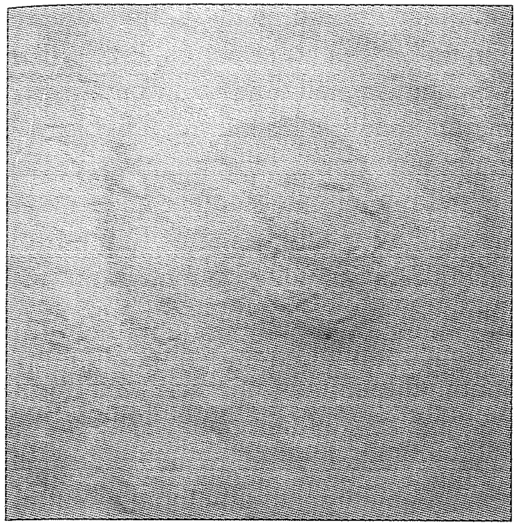


Figura 10.8. Medusoide fósil (Wisconsin, Estados Unidos) del tránsito del Precámbrico al Cámbrico (570 millones de años de antigüedad). Los primeros animales vivían en el agua en condiciones de isotropía. Estaban fijos o iban a la deriva. La movilidad rompe la isotropía con una dirección privilegiada: la del movimiento. Y así surge la simetría bilateral (colección MCFLC, fotografía del autor).

unas estructuras de capas esféricas concéntricas con un guijarro redondo en el centro de cada simetría. En un viaje a un desierto de Marruecos encontramos muchas formaciones en el cauce de un río antiguo que parecían oncolitos (figura 10.4). Lynn Margulis es una antigua y fiel amiga del museo que, de vez en cuando, se entusiasma con alguna pieza y nos ayuda a estudiarla. En una ocasión, una pieza de ámbar del museo, con inclusiones de termitas y de burbujas de gases de la descomposición, dio lugar a una interesante investigación interdisciplinar [47]. Una exposición es una actividad científica como otra y no hay actividad científica bien hecha que, tarde o temprano, no sugiera una investigación. El presunto oncolito está en plena investigación desde hace años. Lynn ha enviado muestras a todos sus amigos geólogos. Todavía no tenemos pruebas concluyentes para identificar la pieza. La duda está entre un origen orgánico (oncolito) o un origen puramente geológico. Un museo puede exhibir su ignorancia, siempre provisional, sin problemas. Algún día conoceremos el mecanismo concreto. De momento estamos ante un caso más de simetría esférica debida a alguna clase de isotropía por selección fundamental.

Lo dicho, la esfera emerge con facilidad en el mundo inerte. Es la forma más simétrica y es especialmente estable en ambientes isótropos, homogéneos, simétricos... En tales condiciones la selección fundamental la favorece, de modo que el mundo inerte se llena de esas formas tan perfectas. Es el turno de la siguiente selección, la selección natural. En efecto, la simetría circular también se prodiga con insistencia en el mundo vivo: las frutas, las semillas, los huevos, los primeros animales como los erizos, las medusas, ciertas esponjas... Basta plantarse delante de un puesto de frutas de un mercado cualquiera, para convencerse de la superioridad de la esfera (figuras 10.5, 10.6 y 10.7) en materia de frutas y semillas. Sin embargo, ahora la función no es la estabilidad.

Lo que se produce en un volumen interior (calor, materia, información, etcétera) sale al exterior atravesando una superficie (o, inversamente, lo que entra desde el exterior atraviesa una superficie para repartirse por un volumen interior). Si esa superficie frontera es mínima (la esfera), entonces el flujo entre el interior y el exterior se ralentiza. Es el efecto contrario de un radiador doméstico encargado de calentar una habitación lo más rápidamente posible. Este detalle termodinámico se convierte así en una función que hace que muchas esferas vivas sean comprensibles. Pero no es el único.

Para empezar, hablemos de animales, de animales del principio de la animalidad. Todo empezó en el agua. Y en el agua, donde la asimetría de la gravedad suele anularse con el empuje de Arquímedes, y donde la absorción y la difusión amortiguan la de la luz, triunfa la simetría circular. Es el caso de los antiquísimos medusoides (figura 10.8). La isotropía se aplica muy especialmente para los animales fijos en una posición del espacio o que vagan a la deriva. En ambos casos, el acto de alimentarse es un episodio casual. El animal come simplemente cuando la partícula alimenticia resulta que choca con él. Todo va bien mientras haya suficientes partículas nutritivas vagando en el entorno inmediato. Pero si la incertidumbre del alimento aumenta, lo vivo entra en crisis. Un salto importante para vencer esta crisis se da con la movilidad (capacidad para cambiar de entorno en nuestra ley general del cambio). Con ella, el animal en cuestión pasa a tomar la iniciativa y si la partícula alimenticia no tiene a bien chocar con él, entonces el animal va ¡y se mueve en dirección a la partícula! Pero atención. Se acaba de romper la isotropía porque acaba de aparecer una dirección privilegiada, la del movimiento. Surge entonces la máxima simetría posible (la máxima esfericidad posible, si se quiere) teniendo

en cuenta que predomina una dirección particular. Es la simetría bilateral. Aparece ya en los erizos, que incrementan su movilidad cuando la boca (orificio inferior) tiende a la parte delantera al tiempo que el ano (orificio superior) tiende a la parte trasera. Este tipo de simetría de los animales «automóviles» ya no se perderá nunca más (en su aspecto básico) en la lenta pero tremenda escalada que el reino animal vivirá a través de los sucesivos logros de independencia. Digamos de paso que la movilidad necesita anticipación, por lo que una independencia puede generar otras independencias que la selección natural puede continuar bendiciendo. Para moverse hay que percibir el mundo exterior, interpretarlo y coordinar luego las decisiones motoras. Los animales con simetría circular, los animales con poca o ninguna movilidad perciben poco o nada y no tienen cerebro. Ni falta que les hace... Los animales con simetría bilateral, en cambio, inician la carrera de la inteligencia con entusiasmo. Es la capacidad estrella para anticipar la incertidumbre, la que llevará hasta la noción misma de conocimiento y, haciendo volar el comentario, hasta la noción misma de conocimiento científico, la forma de conocimiento que se propone, por oficio, anticipar la incertidumbre del medio.

Pero volvamos a las formas. Moverse en el aire o en el agua a según qué velocidades favorece las formas que generen menos turbulencias en el medio (las que menos contribuyan a generar incertidumbre en el medio). Emergen así otras formas de simetría bilateral derivadas de la esfera, como son las célebres formas aerodinámicas (o, más propiamente, fluido-dinámicas), las de tantos peces y pájaros. No así los insectos, que se desplazan a velocidades mucho menores. Algunos insectos incluso generan turbulencias para usarlas como método de vuelo. La selección natural distorsiona la frecuencia de esferas cuando las favorece en el mundo vivo.

Otro caso notable es el del ojo de los animales. El ojo es una parte muy importante del ser vivo. Sirve para captar información del entorno, y ello, a su vez, es imprescindible para anticipar la incertidumbre. La selección natural ha favorecido diferentes ojos esféricos: los de los vertebrados (un gato), moluscos (el pulpo), artrópodos (araña) e insectos (hormiga). En los vertebrados el globo ocular es eso, un globo, una esfera, el iris un círculo, dentro del cual hay otro círculo, la pupila... No sabemos bien cuántas veces ha intervenido la selección natural para

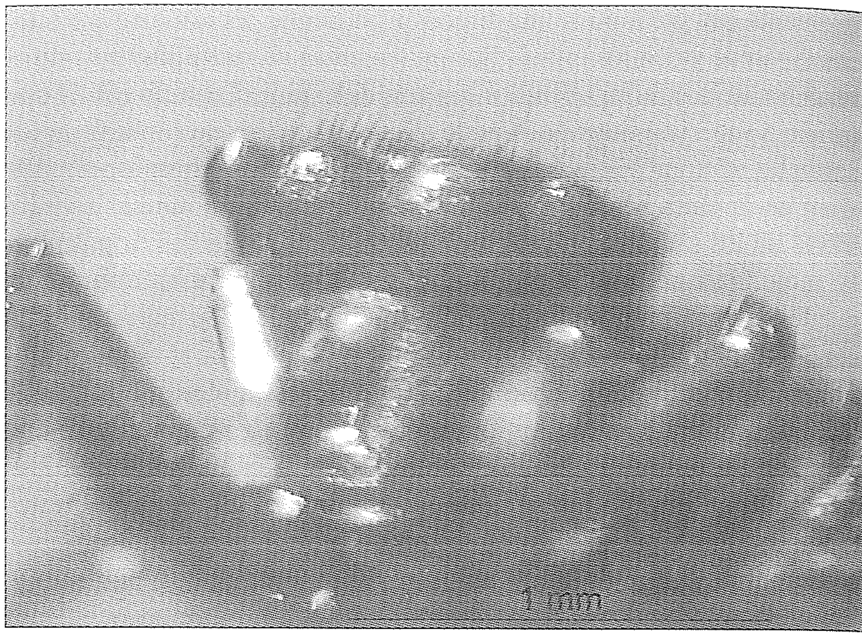


Figura 10.9. Ojos de una araña atrapada en ámbar dominicano (colección MCFLC, fotografía del autor).

reinventar la simetría circular del ojo. La isotropía de la simetría circular del ojo funciona de maravilla a la hora de escrutar la incertidumbre del paisaje. El caso de las arañas es más curioso: tienen cinco o más ojos y, a pesar de ello, no muy buena vista (figura 10.9). Tampoco es casualidad que la primera idea base para el ratón de ordenador fuese una esfera.

La copa de los árboles (el penacho de ramas y hojas) es también una parte trascendente de un individuo vivo. Un árbol en un entorno con luz suficiente e isótropa (en una latitud no lejana de los trópicos y sin sombra de otros vecinos) encuentra en la forma esférica un excelente captador de luz. Por eso en los trópicos domina esa forma para la copa de los árboles. Nótese algo curioso. Cuando dos árboles en esta situación están demasiado cerca el uno del otro, crecen de manera que tienden a construir, juntos, una sola copa esférica (véase la figura 10.10). Si se trata de una selva tropical con mucha competencia, entonces la simetría circular más favorable tiende al círculo. Para una luz

Figura. 10.10. Una misma encina vista desde dos ángulos diferentes: dos árboles demasiado próximos tienden a compartir una sola copa de simetría esférica (Calaceite, Teruel, fotografía del autor).

muy vertical y con competidores a los lados, lo más eficaz es una copa tipo boina. Para una luz muy oblicua, como ocurre en latitudes más próximas a los polos, la simetría circular se distorsiona y aparece una forma que capta mejor la luz por término medio: el cono. Es un nuevo estilo de copa de árbol que da nombre a una gran familia, las coníferas.

Ahora hablemos de huevos. Todos los animales empiezan su vida desde el concepto «huevo». Durante los primeros cientos de millones de años, el entorno natural de los huevos fue el agua (o sea, un medio con buena isotropía ambiental). Centremos nuestra atención en los huevos que, todavía hoy, se desarrollan en el agua, como los huevos de peces o los de las tortugas acuáticas. Su forma es la de una esfera casi perfecta. La esfera ya es altamente probable en el mundo inerte pero ¿por qué favorece la selección natural su permanencia? Si admitimos que la selección natural favorece todo aquello que mejora la independencia del objeto vivo, entonces digamos que la esfera ofrece como mínimo dos ventajas. Ya han asomado hace unas páginas. Por un lado, la esfera es la forma más difícil de morder por unas fauces cuyo diámetro sea comparable al de la esfera. No hay donde agarrarse bien. Sólo por eso el huevo esférico se libra de un buen número de enemigos (se independiza). Y no es poca ventaja si tenemos en cuenta la cantidad de comehuevos que rondan por todos los paisajes.

La redondez es, además, la mejor protección de todos los que tienen dificultades para huir ante una súbita amenaza (una alternativa a la movilidad). El escarabajo que entra en el hormiguero para robar inmaduros (la historia del «tuya-mía» relatada en el capítulo anterior) es, para desesperación de los soldados, una semiesfera perfecta sobre la que resbala cualquier intento de recuperar la presa. Animales no esféricos con la misma dificultad para poner tierra de por medio adoptan la simetría circular cuando se ven en peligro. Es el caso de ciempiés, armadillos o erizos terrestres. La esfera es la referencia de todo caparazón rígido y la tendencia de toda protección articulada.

La otra ventaja de la esfera es la de ralentizar el intercambio de energías y materiales. Ya hemos comentado que es el huevo el que calienta a la gallina y que la esfericidad del huevo cumple, por forma, la misma función que la gallina, perder el calor despacio. Es también el sentido del concepto «acurrucarse». Pero la selección natural no tiene por qué detenerse en la esfera. Echemos un vistazo a las distorsiones posteriores más probables. En el agua todos los huevos son esféricos. Sin embargo, fuera del agua el entorno cambia. Cambia su incertidumbre y la nueva incertidumbre puede presionar para que la selección natural favorezca variaciones hacia otras formas. En efecto, fuera del agua, la madre puede tener más problemas de lubricación para expulsar el huevo y, sobre todo, fuera del agua el huevo puede rodar fácil y fatalmente fuera del nido. Es una desventaja (en otros casos, como la del escarabajo pelotero, claramente ventaja) de la esfera. La esfera sólo tiene un punto de contacto con una superficie plana. Allí se aplica el peso del huevo, y respecto de ese punto la esfera rueda fácilmente sin deslizarse. Tal es el inconveniente, la esfera rueda. Digamos que todos los huevos esféricos de un nido construido en un acantilado ya han tenido ocasión de estrellarse contra las rocas y no han dejado descendencia para contarlo. En cambio, cualquier distorsión desde el huevo esférico hacia el huevo de forma *ovoide* puede suponer una ganancia de independencia respecto de este tipo de accidentes. Un huevo ovoide ya no rueda en las infinitas direcciones posibles como lo hace una esfera, sino sólo en una, la perpendicular al eje de simetría. Pasar de infinito a uno es una mejora significativa...

Con el intercambio de materiales, como el agua, ocurre algo muy similar. En el desierto, por ejemplo, es muy importante conservar y administrar el agua al máximo. Por ello muchas especies de cacto tienden a la forma esférica, la forma que más retarda la pérdida del preciosísimo elemento. El cacto ya reduce la superficie de las hojas hasta convertirlas en espinas (volveremos sobre este caso a propósito de otra

forma simple emergente), y la tendencia de la planta a la esfericidad se explica con la misma idea. A veces se llega a situaciones de verdadera esquizofrenia de la forma porque, por un lado, la esfera interesa para no perder agua, pero, por otro, lo que interesa es la máxima superficie, por ejemplo para aprovechar al máximo los raros veinte minutos de lluvia que hay en todo el año. De nuevo la selección natural favorece un compromiso, como el que representa una forma esférica que minimiza la superficie recorrida por una profusión de contradictorios entrantes y salientes que tienden a maximizarla. Con algunos corales, como los caribeños corales cerebro, ocurre algo parecido aunque por otras razones. Algunos cactos no esféricos tienden a recuperar la forma de la esfera al agruparse en colonias. Es un caso de ganancia de independencia por asociación, porque aquí la protección contra la pérdida de agua o contra el exceso de insolación se consigue para el concepto «colonia». La emergencia de una nueva individualidad asoma por el horizonte. La arquitectura animal exhibe una gran profusión de simetrías circulares. Piénsese en el concepto «nido», ya sea un nido de pájaros o un nido de dinosaurios o en la entrada-salida de nidos y madrigueras. En el mundo vivo y en el mundo inteligente los agujeros suelen ser redondos.

A veces, la esfera escala los niveles jerárquicos y una población de esferas se reúne para dar lugar a una esfera mayor. Ocurre en el mundo inerte, en ciertas concreciones minerales, y también en diferentes y variadas situaciones del mundo vivo. Las arañas, por ejemplo, no sólo hacen huevos redondos, sino paquetes redondos de huevos redondos. El paquete de huevos es redondo por la misma razón que son redondos los huevos (figura 10.11). Algo muy similar ocurre con ciertos nódulos de marcasita (figura 10.12), ciertos frutos como moras y frambuesas (figura 10.13) y ciertas colonias esféricas de cactos esféricos.

En el mundo inteligente, la circunferencia, el círculo y la esfera también triunfan con claridad indiscutible. Sin embargo, la función que consagra la esfera no es tanto la protección. La arquitectura es un reductor animal de la incertidumbre ambiental. Se trata del término tecnología: cambiar el entorno para amortiguar las fluctuaciones de su incertidumbre. El llamado aire acondicionado se sitúa casi en el límite de esta idea: mantener dentro la temperatura constante, cualesquiera que sean los caprichos de la temperatura exterior. No hay duda. Una vi-

vienda amortigua las fluctuaciones de la meteorología. Bien pensado, cuanto más duras sean las condiciones exteriores de temperatura, por ejemplo, más apropiada sería la forma esférica (o parte de ella), ya que en un caso se trataría de no dejar escapar el calor interior (en el Ártico) y en el otro de no dejar que entre (en el desierto). Los iglúes de los esquimales se ajustan a la idea, pero extraña que la arquitectura popular del desierto o la tradicional mediterránea en particular y la arquitectura en general (siempre se trata de independizar el interior del exterior) prefiera usar las líneas rectas, salvo en solemnes cúpulas de iglesias, mezquitas y palacios y demás gestos en honor de la gloria humana. La omnipresencia de lo horizontal y vertical en la superficie del planeta, algún sentido no muy claro de lo racional, una noción sobria de la estética y una fuerte herencia euclídea, han impuesto la línea recta y el ángulo recto durante milenios. Las puertas y ventanas no son redondas como en la, digamos, naturaleza natural, sino rectangulares y en torno a la llamada proporción áurea. Corresponde a los arquitectos hacerse la pregunta: ¿no es demasiada línea recta en una naturaleza donde ésta destaca por su ausencia? Gaudí fue un arquitecto genial que se asoma aquí ahora por primera vez, pero cuya obra vamos a consultar a partir de ahora en cada una de las formas que proponemos. Tuvo, como veremos, una fuerte intuición científica a la hora de seleccionar las formas para su arquitectura.

Si la esfera triunfa en el mundo culto, no es tanto por la función protectora como por otra ventaja antes considerada como desventaja (el huevo fugándose del nido). La simetría circular ofrece interesantes alternativas de movimiento, de rotación de una figura en torno de un punto o de un eje. La circunferencia (el círculo, la esfera) rueda. Rueda sin deslizar para desplazarse, como la rueda de un carro, de un patinete, de una bicicleta, o rueda en torno de un eje fijo, como una noria o una turbina, como todo aquello que interesa que se mueva pero que no se pierda de vista. La simetría circular inteligente triunfa por rotación generando superficies de revolución. La idea del torno se inicia con la cerámica y acaba fabricando toda clase de piezas. Cualquier máquina de cualquier momento de la historia de la tecnología está repleta de circunferencias, discos y esferas y, en general, de piezas torneadas, piezas de simetría circular. Desmontemos, por ejemplo, un automóvil en todas y cada una de sus piezas. Y tomemos nota de todas las piezas

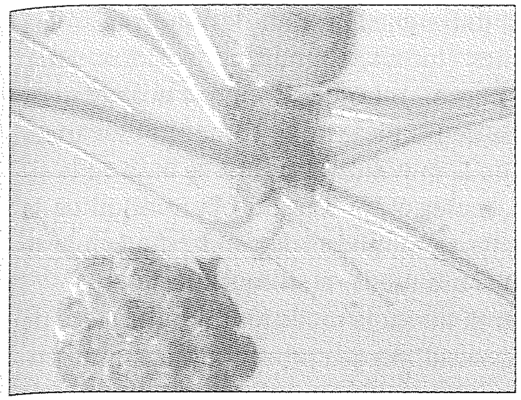


Figura 10.11. Paquete de huevos de araña en ámbar atrapado en el Mioceno, 20 millones de años (República Dominicana). Todos los huevos son esféricos o de origen esférico. En muchos casos similares, la selección natural favorece una esfera de esferas, un paquete esférico de huevos esféricos (colección MCFLC, fotografía del autor).

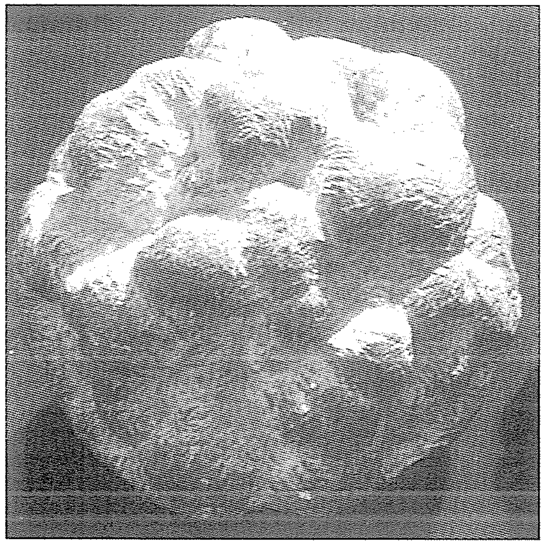


Figura 10.12. Nódulos de marcasita (Estados Unidos). Una esfera de esferas por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

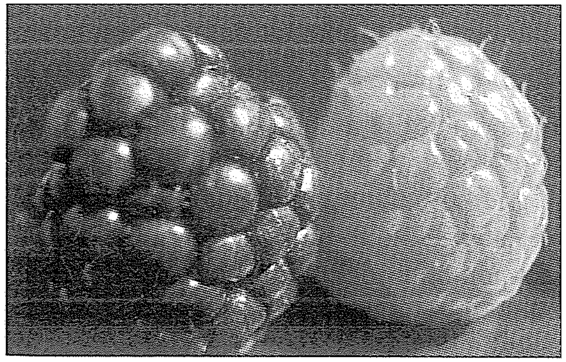


Figura 10.13. Mora y frambuesa (fotografía del autor).

con simetría circular, es decir, todas aquellas para las que existe una rotación que las deja invariantes (ruedas, engranajes, volantes, aros, arandelas, tornillos, cilindros, conos...). Lo cierto es que acabaríamos mucho antes si tomáramos nota de las piezas que no tienen esta simetría. No hay duda, el progreso de la movilidad humana se basa en la simetría circular. Un arquitecto, molesto por nuestra observación de la escasez de líneas rectas en la naturaleza, podría demandar aquí en justa venganza: ¿y qué planta o animal usa ruedas o su equivalente?

Pero ¿por qué no descubrieron nunca la rueda los incas? La idea de la rueda la tenían, con toda seguridad, porque producían cuentas circulares con un orificio perfecto en su centro para collares. Su tecnología para perforar con dos fresas cónicas por las caras opuestas era muy sofisticada. Obsérvese si no la extraordinaria colección privada de Ernesto Leichtenshneider (búsquesele en Lima, Perú). Hay trabajos que hoy son impensables sin la ayuda de la combinación de un láser y una computadora. ¿Cuántas cuentas se escapaban cada día rodando por el suelo del taller de uno de estos antiguos bisuteros? ¿Es posible que tantos indios geniales se resistieran ante una pista tan insistente sobre la definitiva aplicación de la simetría circular? Quizá nunca sepamos la respuesta, quizás hace falta más poder de abstracción del que pensamos para ver rodar una cuenta de collar y correr luego a casa del herrero para proponerle una revolución. Quizá, después de todo, la rueda no fuera tan útil en aquellos terrenos escarpados... Parece, eso sí, un buen misterio de la selección cultural.

En el mundo de la imaginación humana, la simetría circular es una metáfora en sí misma, un símbolo de la perfección, incluso de la divinidad. Estos fragmentos de «La esfera de Pascal», en *Otras inquisiciones* de Borges (1952), son una buena muestra:

> «Seis siglos antes de la era cristiana, el rapsoda Jenófanes de Colofón, harto de los versos homéricos que recitaba de ciudad en ciudad, fustigó a los poetas que atribuyeron rasgos antropomórficos a los dioses y propuso a los griegos un solo Dios, que era una esfera eterna. En el *Timeo,* de Platón, se lee que la esfera es la figura más perfecta y más uniforme, porque todos los puntos de la superficie equidistan del centro; Olof Gigon *(Ursprung der griechischen Philosophie,* 183) entiende que Jenófanes habló analógicamente; el

> Dios era esferoide, porque esa forma es la mejor, o la menos mala, para representar la divinidad. Parménides, cuarenta años después, repitió la imagen ("el Ser es semejante a la masa de una esfera bien redondeada, cuya fuerza es constante desde el centro en cualquier dirección"); Calogero y Mondolfo razonan que intuyó una esfera infinita, o infinitamente creciente, y que las palabras que acabo de transcribir tienen un sentido dinámico (Albertelli: *Gli Eleati,* 148). Parménides enseñó en Italia; a pocos años de su muerte, el siciliano Empédocles de Agrigento urdió una laboriosa cosmogonía; hay una etapa en que las partículas de tierra, de agua, de aire y de fuego, integran una esfera sin fin, "el *Sphairos* redondo, que exulta en su soledad circular".
>
> »(...)
>
> »"Un Aristóteles no fue sino los escombros de Adán, y Atenas, los rudimentos del Paraíso". En aquel siglo desanimado, el espacio absoluto que inspiró los hexámetros de Lucrecio, el espacio absoluto que había sido una liberación para Bruno, fue un laberinto y un abismo para Pascal. Éste aborrecía el universo y hubiera querido adorar a Dios, pero Dios, para él, era menos real que el aborrecido universo. Deploró que no hablara el firmamento, comparó nuestra vida con la de náufragos en una isla desierta. Sintió el peso incesante del mundo físico, sintió vértigo, miedo y soledad, y los puso en otras palabras: "La naturaleza es una esfera infinita, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna". Así publica Brunschvicg el texto, pero la edición crítica de Tourneur (París, 1941), que reproduce las tachaduras y vacilaciones del manuscrito, revela que Pascal empezó a escribir *effroyable:* "Una esfera espantosa, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna"».

La simetría circular está tan presente en el arte, que casi no diremos nada. Sólo unas pinceladas. El 23 de noviembre de 1999 se inauguró en el Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona la exposición *Cosmos. Del Romanticismo a la vanguardia 1801-2001.* Los organizadores resumían así sus intenciones: «Percibir el Cosmos, estudiarlo, cuestionar cuáles son sus límites... han sido aspectos fundamentales tratados por las artes, la ciencia y la historia de las ideas de los últimos dos siglos». Vale la pena recorrer el catálogo que ha quedado de esta muestra extraordinaria, [48] porque circunferencias, discos y esferas destacan claramente sobre las demás formas en las distintas pinturas, esculturas, fotografías y montajes.

No es difícil tropezarse con esferas de selección cultural. La imagen 10.14 está tomada a poco más de cien metros de mi mesa de trabajo. Como puede apreciarse, existe una línea de observación según la cual se observa la cúpula esférica del Observatorio Fabra amaneciendo por detrás de la cúpula esférica del planetario.

Maurits Cornelius Escher es un artista de fuertes intuiciones científicas. Su interés para *deformar* la realidad euclídea en una realidad de simetría esférica es una de las constantes de su obra. Contémplese, asimismo, la evolución de la obra de Muixart en los últimos tiempos. Recuérdese la Galatea de las esferas de Dalí y otros estudios en los que la esfera es el elemento de construcción (figuras 10.14, 10.15, 10.16 y 10.17). Visítese el Parque Güell de Antoni Gaudí, donde una formación de esferas de piedra da la bienvenida al visitante... o los bellos e inteligentes espectáculos de Pep Bou con burbujas de jabón (figura 10.18).

Veamos un último ejemplo. Existen objetos que se pueden encontrar en las tiendas de regalos y recuerdos de todo el mundo. Como esas cucharillas de café con el escudo de la ciudad o del paisaje del lugar.

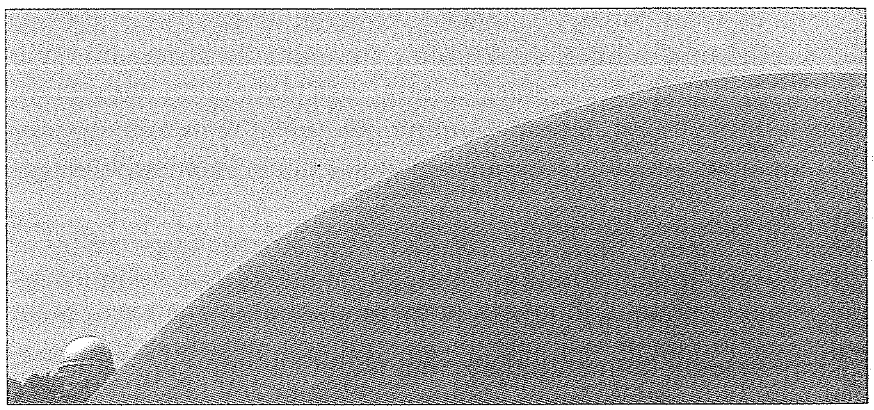


Figura 10.14. La cúpula esférica del Observatorio Fabra *amaneciendo* por detrás de la cúpula esférica del planetario. Esferas por selección cultural (fotografía del autor).

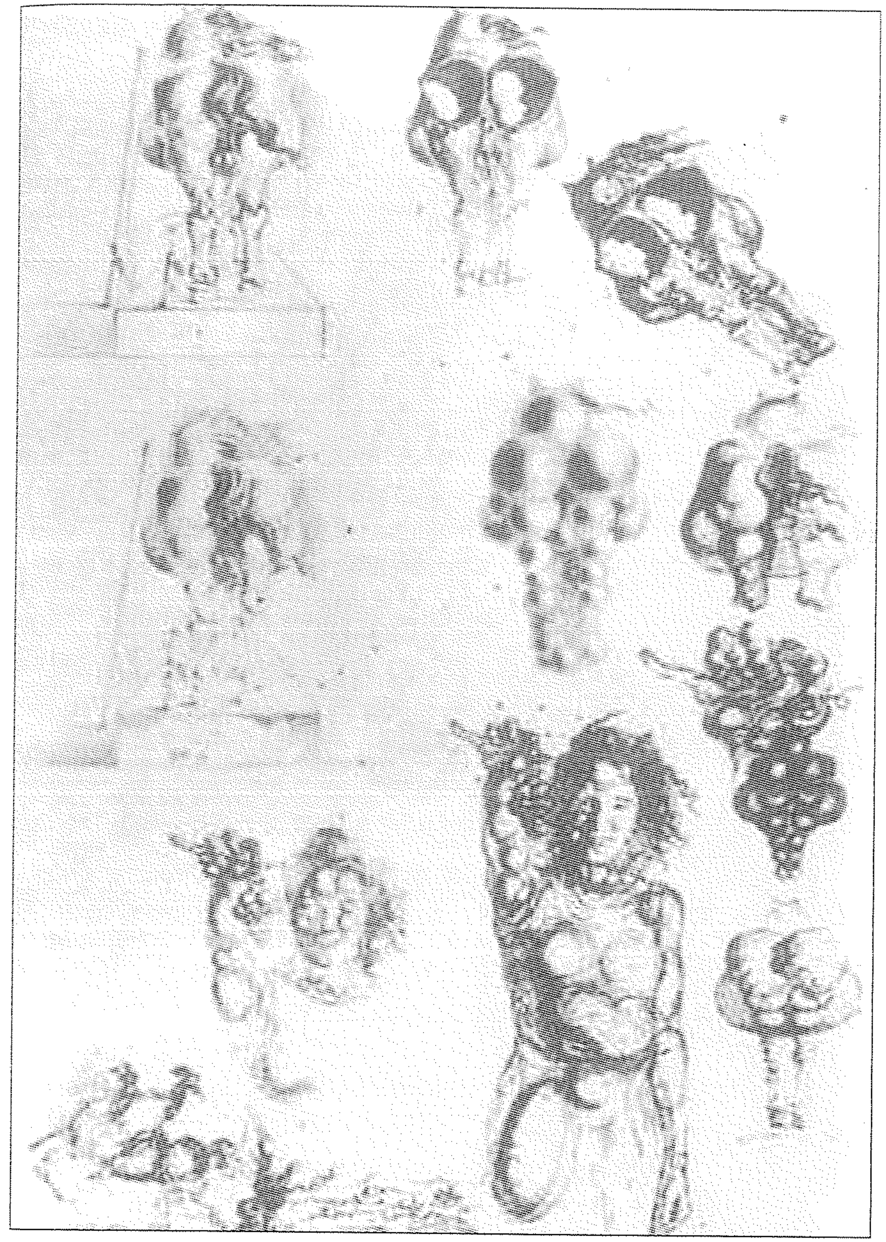


Figura 10.15. Dalí estudió la esfera como elemento generador de formas. Salvador Dalí, *Étude pour les environs de la ville paranoïaque-critique,* 1935. Tinta y lápiz sobre papel.

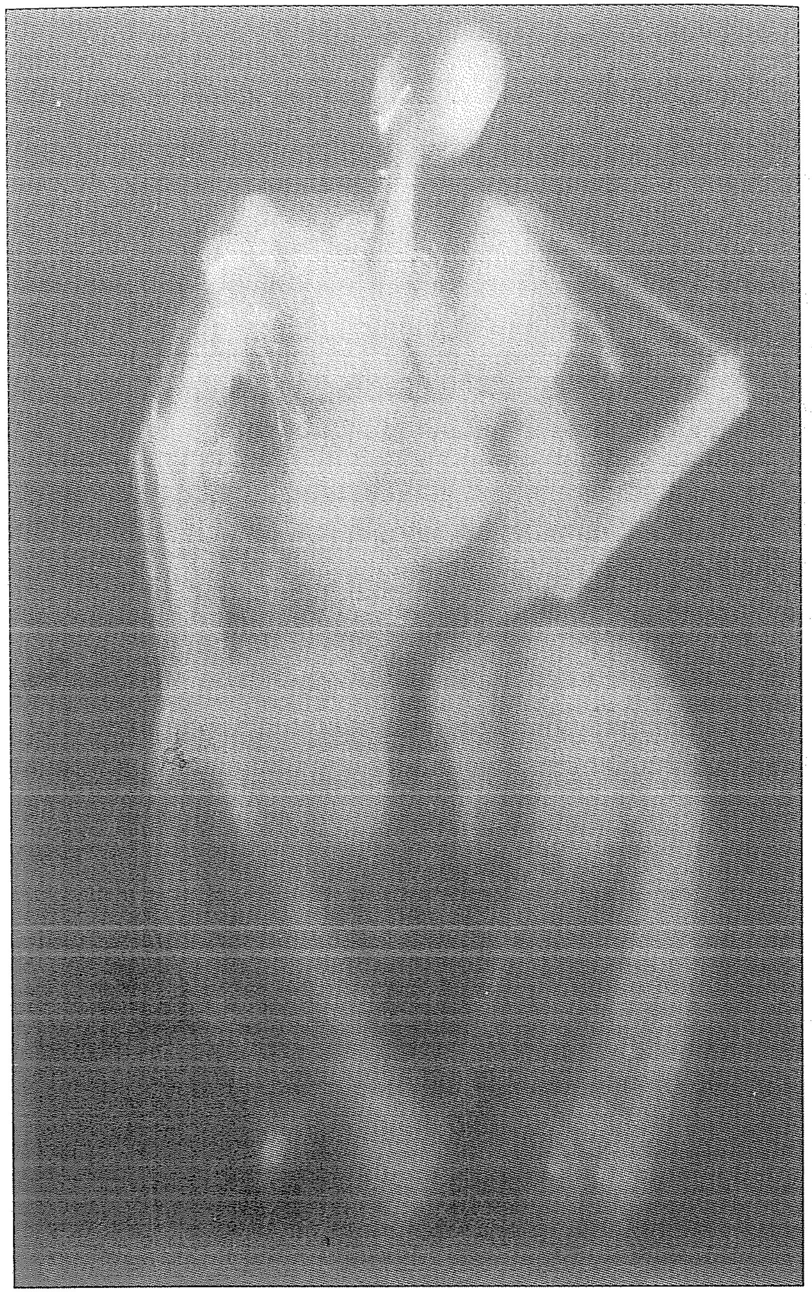


Figura 10.16. Dalí se mueve ante el obturador abierto de la cámara del fotógrafo con una esfera en la mano e inventa una figura.

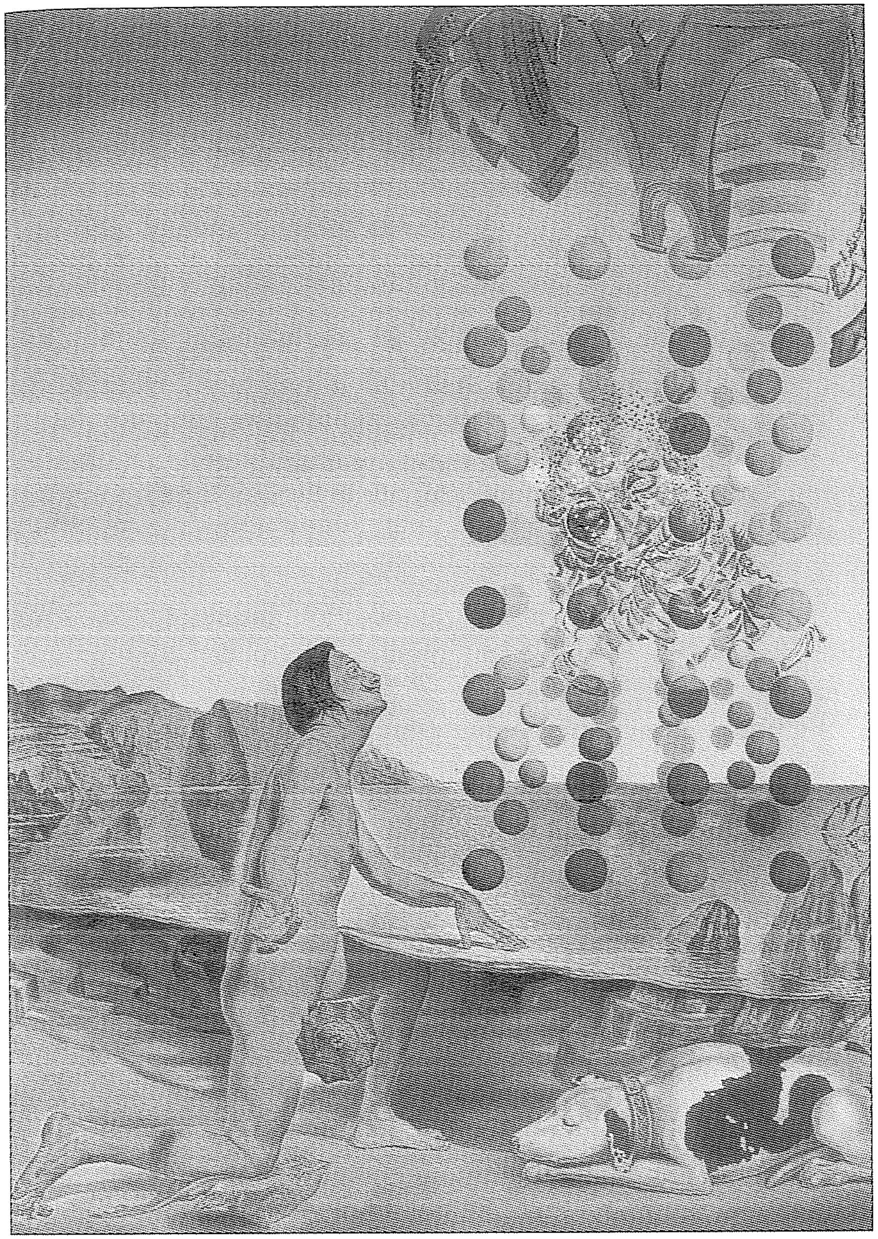


Figura 10.17. Dalí desnudo, en estado de contemplación delante de cinco cuerpos metamorfoseados en corpúsculos entre los cuales aparece, de repente, la Leda de Leonardo cromosomatizada por el rostro de Gala (1945).

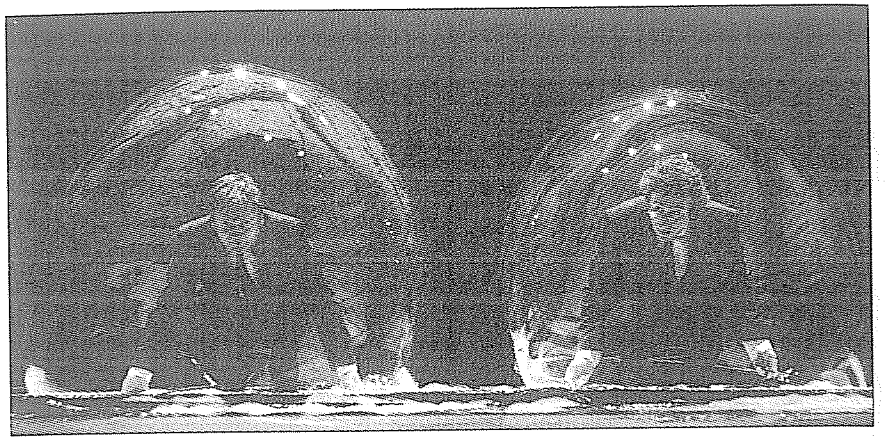


Figura 10.18. Pep Bou, el rey de las burbujas, y su colaborador Lluís Beiva, en sendas semiesferas cultas y efímeras (fotografía de Roberto Ramos).

¡Y esferas! Simplemente esferas. De todos los tamaños. De todos los materiales: cuarzo, cristal, resinas, plásticos, hierro, níquel, cobre, oro, plomo, madera, mármol...

En suma, la esfera emerge por isotropía en el mundo inerte. En el mundo vivo la esfera, sobre todo, *protege*. Y en el mundo culto *protege, rueda, genera, simboliza la perfección*... Todo eso, y no otra cosa, significa empezar a comprender la esfera.

11
El hexágono pavimenta...

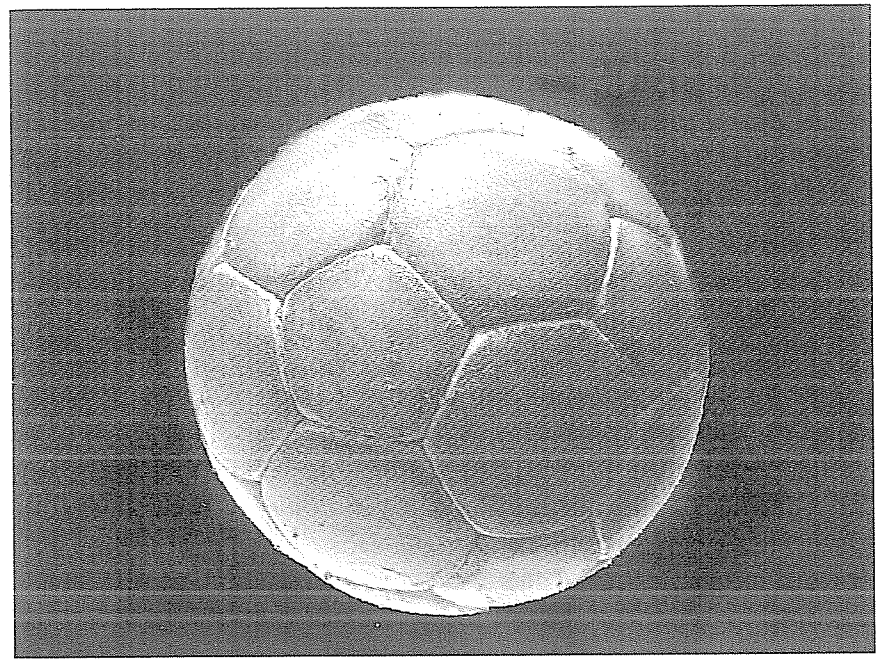


Figura 11.1. Balón de fútbol. Si el espacio disponible no es plano sino esférico, la mejor pavimentación se consigue con pentágonos rodeados de cinco hexágonos. De ahí tal vez el número cinco que surge en algunos equinodermos, como las estrellas de mar (fotografía del autor).

Acabamos de verlo. La simetría circular emerge con mucha facilidad. Esto es así porque la probabilidad es alta en ambientes uniformes e isótropos, porque tal es el caso de la nada y porque el universo está lleno de espacios llenos de nada. Esto es así también porque el agua en reposo es isótropa y uniforme y porque mucha es la cantidad de agua presente en el planeta.

Imaginemos ahora el fenómeno de la profusión de simetrías circulares restringida a un plano. Por ejemplo, las burbujas de la espuma de un detergente tienden a ser esféricas en el espacio de tres dimensiones. Sin embargo, si constreñimos una solución jabonosa entre dos vidrios planos, tendremos ante nosotros burbujas circulares de diámetro parecido compitiendo entre sí por ocupar el espacio plano disponible (figura 11.2). Una burbuja sin otras vecinas en su entorno inmediato presentará una forma de disco perfecto. Si la población de burbujas vecinas aumenta, cada disco tenderá a rodearse de hasta otros seis discos tangentes. El plano tenderá entonces a llenarse de círculos. Sólo quedarán libres unos característicos intersticios entre los puntos de tangencia. Pero atención: si la presión de la población de círculos sigue creciendo, el espacio *perdido* de los intersticios tenderá a desaparecer porque los círculos se deforman hasta que el plano queda perfectamente pavimentado con una nueva forma emergente: el hexágono.

En el experimento de las pompas planas de jabón se pueden observar todas las formas intermedias que van desde el círculo perfecto hasta el hexágono perfecto. La isotropía daba el círculo; la presión isótropa, el hexágono. La palabra clave ya ha surgido y nuestro esquema conceptual nos permite reconocerla y valorarla para afirmar solemnemente que ya hemos dado con la función fundamental: el hexágono pavimenta.

Cuando el origen del fenómeno está en una superpoblación de círculos, es fácil constatar que el hexágono pavimenta. Basta tomar un puñado de cigarrillos (o cualquier conjunto de cilindros blandos) y apretarlos suavemente los unos contra los otros. Al poco, los cilindros se habrán convertido en prismas hexagonales (figura 11.3).

En el mundo inerte se pueden encontrar bellas pavimentaciones hexagonales. La más espectacular es sin duda la llamada convección de Rayleigh-Bénard [49]. Se trata de un curioso fenómeno descrito por primera vez en 1790 por Benjamin Thomson. El longevo Henri Bénard

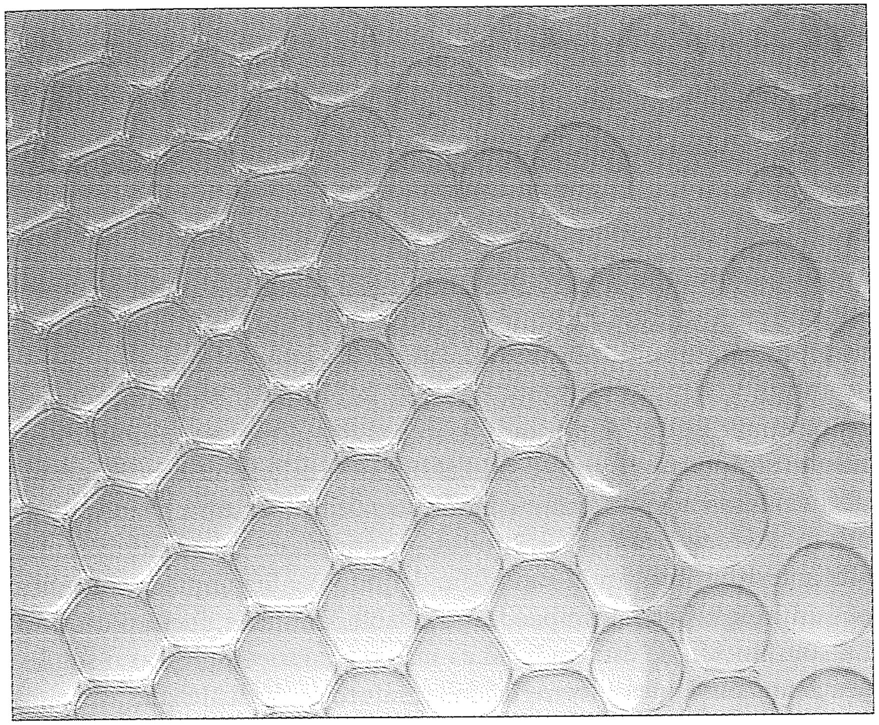


Figura 11.2. La competencia de los círculos por el espacio plano genera hexágonos. Son hexágonos por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

fue el primero en organizar una experimentación sistemática hacia finales del siglo XVIII, y el Nobel Lord Rayleigh el primero que lo explicó definitiva y convincentemente a principios del XX. Hacia los años setenta, los físicos de la termodinámica del no equilibrio lo adoptaron como ejemplo estrella de un nuevo concepto: la autoorganización de la materia (en lo que creo que es un ligero abuso de lenguaje). El interés del ejemplo reside, claro, en que se trata de un caso de autoorganización *no viva*. En realidad, se trata de una curiosa adaptación de la estructura de un líquido cuando se le calienta ligeramente por la parte inferior. El líquido del fondo se dilata al calentarse, con lo que su densidad disminuye y asciende. A medida que se acerca a la superficie libre, el líquido vuelve a enfriarse, con lo que su densidad aumenta y vuelve a hundirse. Así se crean unos rollos de circulación cuyo movi-

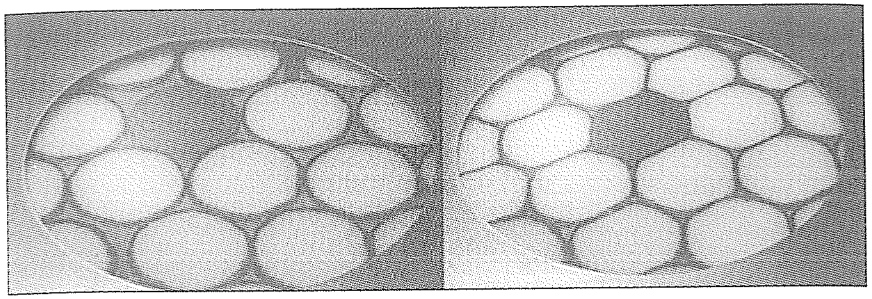


Figura 11.3. Los hexágonos invaden los intersticios que los círculos tangentes no pueden ocupar (colección MCFLC, fotografía del autor).

miento se opone a la viscosidad del líquido y a la tendencia de la conducción térmica a suavizar los gradientes de temperatura. En condiciones más o menos críticas, los rollos se aprietan en celdas hexagonales claramente visibles en la superficie del líquido. Según tales condiciones críticas, el fenómeno puede ser estable, inestable, incluso caótico. La constitución de esta realidad es más o menos compleja con sus leyes fenomenológicas (convección, conducción, turbulencias, tensión superficial, etcétera), sus fluctuaciones y sus inestabilidades. Pero cualquiera que sea el mecanismo de la nervura de esta realidad, se trata, para lo que aquí nos ocupa, de un bello ejemplo de emergencia de hexágonos por selección fundamental, cuya función es cubrir el plano, pavimentar.

Otros casos de hexágonos más imperfectos visibles en la materia inerte no se explican fácilmente a partir de una superpoblación de círculos. Es la bien conocida estructura de grietas en un terreno cuando se reseca o las figuras de luz que el sol crea en el fondo de una piscina (que tanto gustan al pintor inglés David Hockney). Otro caso muy espectacular lejanamente relacionado con los cuasihexágonos de una superficie de un paisaje seco (que una vez fue húmedo) es el paisaje de las columnas cuasihexagonales de basalto. El más bello y conocido es sin duda el de Antrim (Irlanda del Norte). Y no es el único caso. Castellfullit de la Roca es un originalísimo pueblo del Ampurdán (Girona, España) que se encarama sobre una gran roca de columnas basálticas hexagonales. En el museo tenemos, por gentileza de su Ayuntamiento, tres magníficas piezas que se desprendieron y cayeron al río (figura 11.4). Un corte perpendicular de las columnas verticales tiene, en efecto, el aspecto típico de una pavimentación muy próxima a la hexagonal. La tentación más inmediata es relacionar este caso con el de la convección de Raileigh-Bénard discutido más arriba. Un gradiente vertical de temperatura (como el que se creó en la lava del Terciario del caso irlandés cuando ésta entró en contacto con el aire) equivale quizás a un plato de aceite calentado debajo para crear las células de convección de Rayleigh-Bénard. La idea no es mala y hasta el año 2002 se podía sugerir como una posibilidad investigable. Pero en ese año apareció en *Physical Review* un modelo convincente de otro mecanismo bien distinto [50].

El proceso funciona más o menos como sigue: el enfriamiento de la lava provoca fuertes gradientes de temperatura, pero no para inducir el movimiento de partículas sino para fracturar las partes sólidas más superficiales. Estas fracturas tienden a propagarse hacia el interior del material y a formar figuras poligonales cada vez más regulares. Al final, el límite de más estabilidad corresponde a una configuración de mínima energía, la pavimentación cuasihexagonal que se observa en los paisajes de Antrim y Castellfullit. El proceso se parece mucho al caso de las grietas de desecación. Si la desecación es muy rápida, los polígonos son irregulares, como en las primeras capas de la simulación numérica de Jagla y Rojo. Sin embargo, cuando la desecación es lenta (la evaporación de un lago, por ejemplo), entonces los polígonos tienen tiempo de ir acomodándose a una situación de mínima energía. En el último capítulo, a la hora de hablar de las formas fractales, citaremos otro asombroso caso de hexágonos en la materia inerte: el de los copos de nieve. Aquí la forma última es fractal, pero lo es sobre una simetría hexagonal que también minimiza la energía. Los mecanismos de emergencia de estas estructuras hexagonales son distintos (compresión de simetrías circulares, propagación de fracturas, cristalización del agua...). Lo que tienen en común es la selección fundamental que los favorece en nombre de la estabilidad y su correspondiente función: pavimentar. He aquí la mayor inteligibilidad del, digamos, hexágono inerte. Cuesta emplear la palabra «función» para un objeto inerte, pero recordemos que en nuestro esquema conceptual hemos limpiado este término de toda connotación intencional o teleológica. Ni siquiera en el mundo vivo se puede hablar de este significado de función. Pasemos

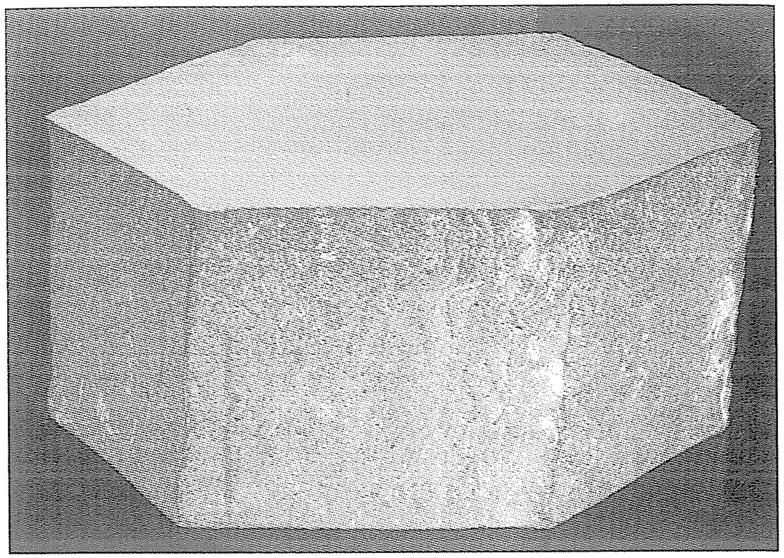


Figura 11.4. Columna hexagonal (por selección fundamental) de basalto de Castellfullit de la Roca (Girona, colección particular, fotografía del autor).

a la materia viva. Aprovechar el espacio es un concepto de alto interés en un mundo habitado por entes vivos. Por ello no es de extrañar que la función fundamental de pavimentar se sostenga muy bien como función natural.

En efecto, la naturaleza viva está trufada de hexágonos que pavimentan. Primer ejemplo: el ojo facetado de los insectos presenta una superficie pavimentada de hexágonos (figura 11.5). Nada más sencillo de explicar. El principal problema físico para fabricar un ojo consiste en que el objeto (que ver) forme una imagen en la retina del ojo del sujeto (que debe ver). Para ello, hay que conseguir que por cada rayo de luz emitido desde un punto del objeto llegue sólo un rayo a cada punto de esa especie de pantalla llamada retina. Eso es justamente lo que se consigue con el sistema de lentes de una cámara fotográfica. Sin su ayuda sería como exponer la película sensible directamente a la luz, no se formaría una imagen. El ojo de los vertebrados se basa en la misma idea de concentrar rayos con lentes. Sin embargo, los artrópodos apostaron por la solución más sencilla: el tubo. Un tubo es, en efecto, un seleccionador de rayos de luz: sólo pasan por el tubo los rayos que le

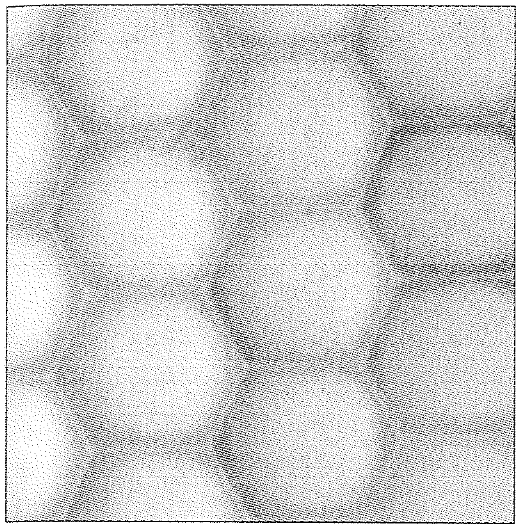


Figura 11.5. Pavimentación hexagonal del ojo de un insecto. Un hexágono significa un píxel en la imagen (colección MCFLC).

son paralelos. Pero atención: un tubo fabrica una imagen de una sola mancha de luz. Digamos, en el lenguaje actual, un tubo forma una imagen de un solo píxel. Un tubo, un píxel; dos tubos, dos píxeles; tres tubos, tres píxeles. El ojo de los artrópodos, y en particular, de los insectos, es un manojo de tubos que crean una imagen con tantos píxeles como tubos tiene el manojo. Y ya lo sabemos: cuantos más píxeles, mejor imagen.

La selección natural favorece la independencia del individuo, y en este caso esto significa la mejor imagen posible. Cuanto mejor se perciba el entorno, mejor se come y peor se es comido, menos se depende de las sorpresas que pueda deparar la incertidumbre del entorno, mejor se percibirá la posición de la partícula alimenticia por capturar, mejor se anticipará la amenaza de alguien que considere partícula alimenticia al propietario del ojo. O sea, que cuantos más tubos existan por unidad de superficie de ojo, mejor. En último término, siempre se puede dar un paso más sacrificando los intersticios de los cilindros. Así emerge algo que comparte la casi totalidad de los artrópodos (digo casi pero ni siquiera conozco una excepción): las facetas de los ojos hexagonales. Así pues, el hexágono pavimenta los ojos de los animales pluricelulares más frecuentes en la naturaleza. Son hexágonos de una perfección sublime (como se puede observar con la ayuda de una sim-

9
Nueve respuestas (o más) para un par (o menos) de preguntas
una intuición a favor de una teoría general de la forma

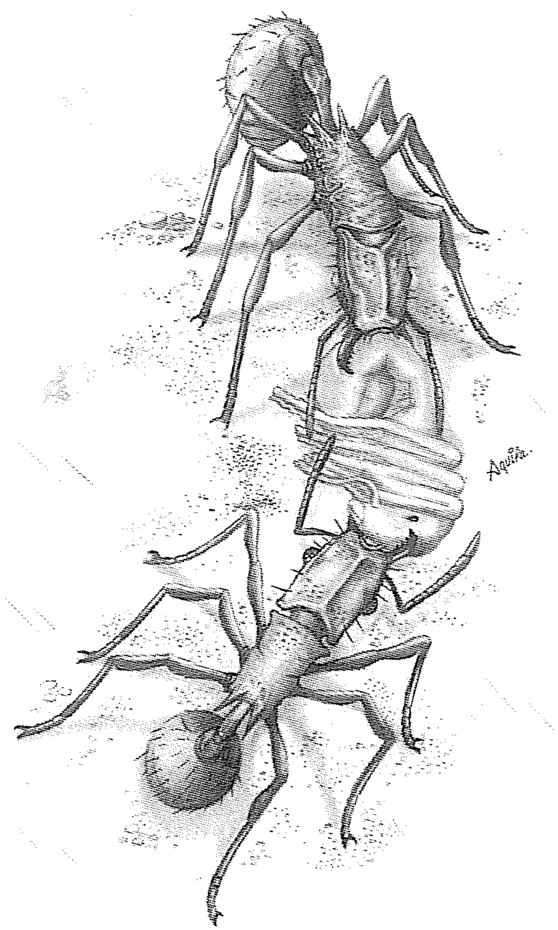


Figura 9.1. Dos obreras de la hormiga *Blepharidatta conops* se disputan (¿) un inmaduro. (Dibujo de Aquila Silva.)

Los objetos tienen forma. Algunos objetos, muy diferentes en muchos aspectos, tienen la misma o parecida forma. Sólo por eso, ya vale la pena embarcarse en la búsqueda de una teoría de la forma. Nada más sensato que acordar cómo nombrar una forma sin aludir al objeto concreto que la exhibe. El lenguaje común ya se ocupa de ello. Usamos la palabra esfera en lugar de decir «forma de planeta», «forma de naranja» o «forma de burbuja». El lenguaje es una construcción mental que sirve para abstraer un concepto asociado a un objeto particular de la realidad. En un idioma moderno hay unas 85.000 palabras, un número mucho menor que el de objetos existentes en la historia de la materia y que el de la inmensidad de propiedades y matices que éstos puedan presentar. El diccionario no está mal para empezar. Sin embargo, y como ocurre siempre en ciencia, el lenguaje de la vida diaria se queda corto. Cualquier teoría necesita construir su propio lenguaje, más manejable, más completo, más abstracto, más flexible, más preciso, más en armonía con el esquema conceptual elegido. Para esto está, por ejemplo, la matemática.

Las tres clases de selección (fundamental, natural y cultural) son los pilares de nuestro esquema conceptual para comprender la forma. Bien, pues la forma matemática también tiene su definición, basada asimismo, curiosamente, en cierta clase de selección. Se trata, podemos llamarla así, de la *selección matemática*, una cuarta clase de selección: de todos los puntos del espacio, pertenecen a la forma en cuestión todos aquellos puntos, y sólo aquellos, que cumplen cierto pliego de condiciones. Este pliego de condiciones se llama, también curiosamente, función matemática y se expresa como un conjunto de relaciones numéricas entre las coordenadas que identifican los puntos del espacio. La función que define un lugar geométrico se puede considerar también una restricción. No hay dos objetos reales idénticos. Sin embargo, todas las esferas de un metro de radio son idénticas. La función matemática supone, pues, una primera forma de compresión, de reducción y, por lo tanto, también de comprensión. La matemática, como toda abstracción, fabrica inteligibilidad.

Muchos investigadores de la forma se contentan con ello: se comprende una forma cuando se consigue una descripción matemática razonable. La idea no es mala para empezar. Sólo hay que procurar no traspasar cierto límite. Es un límite bien reconocible. Es el límite del absurdo, cuando resulta que es mucho más simple y compacta la propia forma del objeto real (que se pretende describir) que su inteligibilidad matemática (la que se propone para describirla). La comprensión no puede pesar más que lo comprendido.

La matemática puede proporcionar incluso modelos que describen mecanismos generadores de forma. También interesa. Sin embargo, todo lo dicho hasta ahora es para convencer de que la comprensión de la forma necesita de algo más, algo relacionado con la observación de las formas reales, con la frecuencia de su presencia y con los tipos de selección que dan sentido a la forma en el contexto general de la evolución. En muchos casos la forma matemática de los datos que proceden de observar un pedazo de realidad puede desvelar el secreto de la comprensión profunda de un fenómeno. No resisto la tentación de contar aquí un caso especialmente querido para mí.

Tuya-mía, el misterioso rito de unas hormigas cautivas

Todo empezó con una visita a mi buen amigo Beto Brandao, entomólogo del Museo de Zoología de São Paulo (Brasil) y, sin duda, uno de los especialistas en hormigas más conocidos del mundo. En Brasil aún se puede entrar en una selva tropical, recoger el primer insecto que salga al paso y dar así con una especie nunca antes descrita. Y si permitimos que el animal siga su camino treinta segundos más, igual observamos un raro comportamiento jamás descifrado hasta entonces. Es el caso de la hormiga *Blepharidatta conops*. Patricia Romano da Silva, una joven doctorando orientada por Brandao, trabaja con varias colonias vivas de esta especie. Una tarde, en su laboratorio, Patricia me muestra el prodigio.

Inmediatamente después de que una obrera decide transportar un inmaduro (huevo, larva o pupa), otra obrera se le echa encima para disputarle el privilegio de tan alta responsabilidad. Se inicia así un rito que dura varios segundos, un sereno y tenso «tuya-mía», un duelo que define una vencedora (véase la figura 9.1). El premio es la responsabilidad de transportar el inmaduro. De vez en cuando, y sin motivo aparente, toda la colonia se dedica a practicar el «tuya-mía» con la inocente población inmadura.

—¿Para qué hacen eso?

—¡No sé!

—Alguna razón habrá, ¿no?

—¡No sé!

—¿Imposible saberlo?

—¡No sé!

Al día siguiente, en una reunión insólita (como mínimo poco frecuente), un físico y dos entomólogos fantasean para diseñar un plan que desentrañe el misterio. ¿Cuál?

—Si pudiéramos marcar individualmente las hormigas...

—Podemos hacerlo...

—Quiero decir como si fueran atletas en unos juegos, que podamos reconocer a cada una de las hormigas, que podamos decir: ¡mira, acaba de pasar la hormiga uno, cero, dos, seis...!

—Podemos hacerlo...

—Si además pudiéramos hacer un seguimiento de todas las disputas que ocurran en la realidad y tomar nota de todos los resultados...

—Podemos hacerlo...

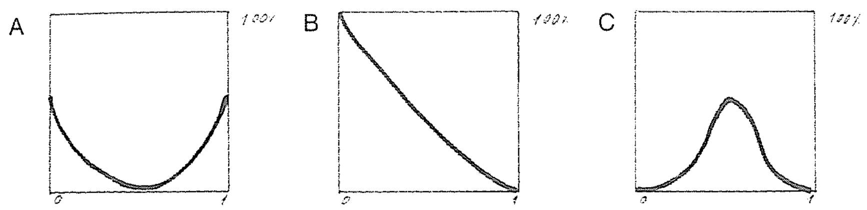
—Pues en ese caso podríamos conseguir unas curvas muy reveladoras: el tanto por ciento del total de hormigas para cada particular tanto por ciento de victorias observadas. Es cuestión de tener un poco de paciencia...

—Podemos tenerla... pero ¿qué nos dirían esas curvas?

—Digamos que sólo podemos encontrarnos con cuatro casos diferentes. Primera posibilidad: las que pierden siempre pierden y las que ganan siempre ganan. La forma de la curva sería inconfundible (figura 9.2a). ¿Sería eso importante para vosotros?

—Lo sería. Y mucho. Equivale a una cierta subdivisión del trabajo. Significaría que existen obreras *sparring* y obreras «transportadoras». En este caso, el ritual del «tuya-mía» tendría una explicación: la fiabilidad del agarre de las mandíbulas, no fuera a ser que éstas cediesen al primer tropiezo o al primer tirón de un ladrón hambriento. Es como el escudero que comprueba el estado de las trinchas de la montura antes de que el caballero arranque a galopar. Sería un importante descubrimiento...

—Segunda posibilidad: las obreras a veces ganan y a veces pierden, de modo que el resultado final determina un *ranking* que permite



Figuras 9.2a, 9.2b y 9.2c. Tanto por ciento de hormigas con probabilidad p de vencer en la disputa (ordenadas) frente a la probabilidad p de vencer (abscisas). Se prevén cuatro casos posibles. *Figura 9.2a.* «Caballeros y escuderos»: las que ganan siempre ganan, las que pierden siempre pierden. *Figura 9.2b.* «Selección preolímpica»: la hormiga número 1 gana a todas, la hormiga número 2 gana a todas menos a una... la hormiga enésima pierde contra todas. *Figura 9.2c.* No hay selección de hormigas: distribución gaussiana, un promedio de la mitad de las hormigas gana un promedio de la mitad de las disputas. D: *Ninguno de los tres anteriores.*

ordenar a las hormigas según sus prestaciones en este tipo de torneos. Algo parecido ocurre con la lista de los tenistas profesionales. Existe la obrera número uno, la número dos, etcétera. La forma de la curva en este caso también sería muy característica (figura 9.2b). ¿Y ahora? ¿Sería un caso de interés?

—Lo sería. Y mucho. Equivale también a una selección de hormigas. En este caso incluso podríamos hablar de una especie de «selección preolímpica» destinada a actualizar continuamente la lista de las mandíbulas más seguras para el transporte de inmaduros. También sería un descubrimiento importante.

—Tercera posibilidad: las obreras ganan o pierden de manera aleatoria. La forma de la curva, curiosamente, no es una cualquiera, sino una forma muy conocida por los físicos. Es la llamada distribución normal o gaussiana (la mitad de las hormigas tiene un cincuenta por ciento de éxito en las disputas) (figura 9.2c). En este caso, el «tuya-mía» o bien es para detectar inmaduros accidentalmente mal agarrados, o bien no se refiere en absoluto a las obreras, sino al propio inmaduro, quizá se trate de un tipo de «agítese antes de usar».

—Cuarta posibilidad: ninguna de las anteriores. La investigación sigue próxima al comienzo, la investigación continúa...

Este plan encaja bien con la metáfora de Feynman: el científico descubre las leyes de la naturaleza como el novato que deduce las reglas de juego del ajedrez tras largas horas de mirón en partidas de café. La inteligibilidad que buscamos en el caso del extraño comportamiento de las hormigas, lo que todas las disputas tienen en común, se compacta, se resume, se reduce, se comprende en la forma de una curva matemática que compacta bien una larga serie de datos sobre la realidad. La forma matemática, tal como ha sido concebida, destaca la esencia mientras amortigua los matices de un fenómeno real.

El resto de la historia se aparta ligeramente de nuestra reflexión sobre la forma matemática, pero no voy a dejar al lector sin saber cómo acabó la investigación [24]. Así que abro un breve paréntesis. La agrupación de todos los resultados de todas las disputas no fue el que más deseábamos, aunque sí debió de ser el que más debíamos de esperar, el más decepcionante de entrada, la alternativa tres. O sea, nada. O, mejor dicho, algo sí: una gaussiana es la forma que indica que el comportamiento no implica ninguna clase de selección de hormigas. Eso es algo. Pronto llegaron los datos que faltaban. Dos datos en especial permiten esbozar una explicación. Primero: el «tuya-mía» se desencadena en toda la colonia simultáneamente, cada vez que el ambiente transmite una vibración. El termostato que daba la señal de arranque al aire acondicionado del laboratorio también daba la señal para una sesión de «tuya-mía». En cambio, en la mesa supermasiva (antivibraciones) del microscopio electrónico del sótano del museo nunca se daba el fenómeno. Es fácil, por otro lado, provocar el fenómeno a voluntad con cualquier vibración artificial. Segundo dato: estas hormigas tienen un enemigo ladrón de inmaduros muy especializado. Se trata de un escarabajo semiesférico que penetra dentro del nido y trata de sorprender a la colonia robando algún tierno inmaduro para comer. Una vez que el escarabajo ha dado el «tirón», ya no hay manera de recuperar la pieza, ya que el depredador la esconde debajo de sí mientras la devora y ofrece una media esfera resbaladiza a las desesperadas hormigas (como veremos más adelante: la esfera protege). He aquí una posible explicación del «tuya-mía».

Por selección natural, el «tuya-mía» favorece que el escarabajo robe lo mínimo. En efecto, el «tuya mía» fija una dirección de entre infinitas posibles. Con esto desaparece el factor sorpresa sobre la dirección que elegirá el coleóptero para dar el tirón. Un inmaduro fuertemente asido por dos obreras tiene menos grados de libertad. Pero aún sería posible sorprender a las obreras si éstas no están del todo por la labor. ¿Cómo mantener su concentración para asir el inmaduro? El «tuya-mía» equivale a una señal mutua para inquirirse mutuamente por la concentración que requiere el caso:

—¿Estás atenta?

—¡Lo estoy! ¿Y tú? ¿Lo estás también?

—¡Claro! ¿Y tú?

—¡Sí! ¿Y tú?

—¡Sí! ¿Y tú?

—Tuya...

—Mía...

—Tuya...

—Mía...

—Tuya...

—Mía...

Comprender la comprensión

Con la forma matemática, el esquema conceptual gana un grado. A la selección fundamental (que regula la emergencia de las formas en la realidad inerte), la selección natural (que las consagra y concentra en la realidad viva) y la selección cultural (que las inventa en la realidad inteligente), se añade ahora una cuarta selección matemática (que las define y las nombra como entidades comunes a una diversidad de objetos). La selección fundamental proporciona mecanismos que generan, con el permiso y la contribución de la incertidumbre reinante del momento y el lugar, cierta variedad de innovaciones (formas, por ejemplo), tanto si después se consagran o no en favor de algún individuo vivo. Tal cosa ocurrirá quizá si la innovación en cuestión ayuda a un individuo a mantener su identidad independiente de la incertidumbre de su entorno. En el lenguaje metafórico de Richard Dawkins [25], los resultados de la selección fundamental equivalen a las montañas, que ahí están para ser escaladas, haya o no alguien dispuesto a escalarlas finalmente. Ciertos pensadores de la biología moderna cargan sobre esta idea casi todo el peso de la inteligibilidad de la evolución biológica. Muchas formas, como se esfuerza en demostrar por ejemplo Brian Goodwin [23], emergen como consecuencia directa de la no linealidad de ciertas dinámicas. Es verdad. Emergen por ésta y otras mil razones físico-químicas del medio, algunas más sencillas y otras más complejas. De acuerdo, pero ¿cómo se consolidan en la realidad viva?, ¿cómo aumenta su frecuencia hasta llegar a merecer una palabra del lenguaje común? ¡Su probabilidad de emergencia en la realidad inerte está muy lejos de coincidir con su probabilidad de presencia en la naturaleza viva! Falta, por lo menos, la otra mitad de la inteligibilidad. Tras la función fundamental emerge la función natural.

Si el darwinismo tiene algún flanco débil, dudo de que esté del lado de la selección natural. Esta polémica, y creo que muchas otras no menos interesantes, se ilumina con sólo volver al objetivo último de toda actividad científica: comprender. Conviene hacer aquí una última parada. ¿Cuál es el grado de comprensión que proporcionan los modelos matemáticos que tanto apasionan a científicos como Goodwin y, en general, a tantos otros estudiosos de la complejidad? La clave, una vez más, está en la compre*n*sión como capacidad de compresión. Cuantos más sucesos o fenómenos de la realidad queden comprehendidos por un modelo, más alto será su grado de comprensión. Si son más bien pocos, el modelo será una ley más bien local; si son muchos, el modelo será una ley más bien universal. Si nos impresionan las leyes de la mecánica de Newton es porque comprenden tanto el vuelo de una mosca como el de una galaxia en su cúmulo. Sin embargo, y como le gustaba decir a mi admirado Ramón Margalef, en biología hay que sospechar de cualquier fórmula matemática de más de diez centímetros. La complejidad matemática de una descripción no puede superar la complejidad de la realidad misma. En ese caso, la mejor comprensión de un fenómeno es el fenómeno mismo, tal cual. El siguiente ejemplo es una metáfora que quizá nos ayude a recordar este matiz esencial de la voluntad de comprender. Se refiere a una complejidad muy útil que todos hemos inventado, muy personalmente, y que, unos más que otros, usamos casi a diario: la firma manuscrita.

La firma, de eso se trata, es una complejidad del mundo real, en particular de su región inteligente. Pero ¿qué significa comprender una complejidad así? ¿Qué significa comprender una firma? Consideremos por ejemplo mi firma (figura 9.3a). Supóngase que buscamos la forma matemática que más se ajusta a este objeto real. La encontraremos con la precisión que deseemos. La matemática tiene varios métodos para conseguirlo, garantizados además por prestigiosos teoremas (polinomios, suma de exponenciales, etcétera). En el límite, podemos tomar una firma particular, acordar el número de puntos que queremos registrar y, sin más, registrarlos. Aun sin llegar al absurdo de dar cuenta con tantos puntos matemáticos como puntos pueden registrarse en la realidad (para ello, para la compresión cero, la propia firma ya se representa bien a sí misma), supongamos que conseguimos un buen ajuste, un modelo con una compresión razonable (figura 9.3m). Nuestra satisfacción se confirma al superponer la complejidad real y su pariente matemática más cercana (figura 9.3am). Pero atención, ¿comprendemos con ello mi firma? Está claro que lo que comprendemos es, como máximo, la particular firma que me ha salido en esta ocasión, ¡pero estamos lejos, muy lejos, de comprender lo que es relevante respecto del concepto «firma»! En efecto, si hago una segunda firma (figura 9.3b) e intento superponerla a la comprensión matemática conseguida antes, el resultado será muy decepcionante, y ello a pesar de que también he sido yo el autor de la segunda firma (figura 9.3bm). Para comprender mi firma, mejor sería fijarse en por lo menos dos de mis firmas y preguntarse qué es lo que estas dos complejidades del mundo tienen en común. Lo que comparten es justamente la inteligibilidad de mi firma. En otras palabras, lo que ambas tienen en común es, ni más ni menos, que... ¡yo mismo! Comprender mi firma lo conseguirá un algoritmo capaz de reconocer mi firma en cualquier garabato. A ello aspira el director del banco donde tengo la cuenta corriente, por ejemplo. En el límite, la mejor compresión y comprensión de mi firma tienen que ver con la intersección de todas las firmas que yo pueda llegar a hacer. ¿Cómo conseguir un algoritmo basado en esta otra idea?

En general, la autentificación de una firma se confía a un experto grafólogo (o a un grafólogo forzosamente improvisado, como ocurre con los dependientes de los comercios que acceden a cobrar con cheques o tarjetas de crédito). ¿En qué principios se basa una tarea de tanta responsabilidad? Básicamente se trata de prescindir de los matices, que varían de una firma a otra, y centrar la atención en la esencia común. Para ello hay que cotejar como mínimo dos firmas, la presunta con la de referencia. Pero mejor si cotejamos con otras dos, y mejor aún con otras tres... En algún número de firmas de referencia se estabilizará sin duda la idoneidad del trabajo, es decir, la fiabilidad del juicio

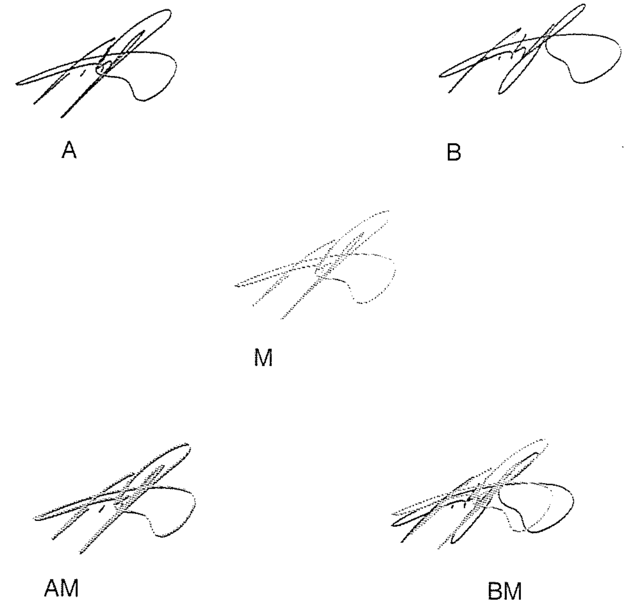


Figura 9.3. Comprender una firma (A) no consiste en obtener la representación (M) que más se ajuste (AM) a tal particular firma, porque el ajuste (BM) con cualquier otra firma (B) del mismo firmante está condenado al fracaso. Comprender la firma de un firmante es conocer lo que hay de común entre todas las firmas que pueda llegar a hacer ese mismo firmante.

del experto alcanzará un límite difícilmente mejorable. Es toda la compresión-comprensión alcanzable de una forma artesanal. Sin embargo, hoy en día proliferan cada vez más las transacciones bancarias y los pagos electrónicos a través de la red en el ciberespacio. Dar con un algoritmo fiable y seguro capaz de garantizar la autenticidad de una firma fresca recibida en un punto de la red que acaba de ser ejecutada en otro punto de la red, debe ser ya un asunto urgente.

Tal como van las cosas, es muy probable que la cuestión ya esté más que resuelta en el momento de escribir estas líneas. En una reciente visita a la Universidad de Campinas (estado de São Paulo, Brasil), me entero, en una charla de café, de la idea de un físico de esta ciudad. Se trata de firmar sobre una plaquita conectada al ordenador sensible a las variaciones de presión que la mano hace en diferentes puntos del espacio durante el proceso mismo de firmar. Firmando varias veces se podría elaborar un mapa en el espacio y en el tiempo de un buen número de presiones. De ese mapa se extrae una información digitalizada que luego se puede analizar por refinados sistemas matemáticos (por transformadas de Fourier, por ejemplo) de modo que una firma, más aún, no sólo el resultado final, sino todo el proceso mismo de firmar, quedaría caracterizado quizá por unas frecuencias y unas amplitudes que harían al autor de la firma insustituible por un posible falsificador. El resto es fácil. Cualquier usuario, comerciante, juez, contratante o contratado, ciudadano en general, podría enviar a una oficina depositaria del algoritmo una presunta firma fresca para solicitar su validación. La seguridad y la fiabilidad aumenta, claro, si en lugar de exigir una firma para rubricar un documento electrónico se exigen dos... El ajuste por polinomios pretende describir la firma sin comprenderla. El algoritmo del físico brasileño no se basa en un análisis visual de la forma de la firma sino en el automatismo que culmina en una cualquiera de las firmas posibles. Es un algoritmo basado en la inteligibilidad del concepto firma: la mínima expresión de lo máximo que todas las posibles firmas tienen en común.

Veamos otro caso bien complejo: el fenómeno religioso. ¿Cómo comprender la religión? ¿Por dónde empezamos? Intentar comprender la religión, como fenómeno, desde el interior de una de ellas es empezar mal. Se estima que desde el amanecer del hombre moderno han existido unas cien mil religiones. La religiosidad, la unión individual y colectiva de los humanos con la divinidad, parece un fenómeno universal ligado a la condición humana. No hay cultura humana sin religión. La clase de inteligibilidad que se gasta en ciencia recomienda abordar la cuestión de otro modo. Mejor centrar nuestro interés en aquello que comparten el máximo número de formas religiosas posibles. Así nos tropezaremos, quizá, con los conceptos clave para comprender el fenómeno (en nuestro sentido de comprensión): la experiencia mística, el éxtasis, las diferentes técnicas para conseguirlo (oración a base de repetir frases, música o bailes que se aceleran lenta y progresivamente, tóxicos, soledad, ayuno...), la omnipresente relación entre la vertiente mística y la vertiente simbólica, la ascética y la jerárquica, la relación de las culturas arcaicas o ágrafas con culturas modernas, las zonas del cerebro donde se mezclan diferentes realidades sin sufrir la menor incomodidad por la emergencia de contradicciones (el sueño y la vida

cotidiana, el arriba y el abajo, seres en los que funden animales de diferentes especies...), elementos del cerebro donde se establece la conexión divina (o infernal), visiones o aprehensiones de distintas clases de infinitudes, como la eternidad... Son los conceptos que se van descolgando en el libro de Francisco J. Rubia titulado *La conexión divina,* un ensayo bien enfocado, creo, desde el punto de vista de la inteligibilidad científica [46]. En el epílogo de la segunda parte aludo a otra buena metáfora de la inteligibilidad científica, una potente intuición de Pablo Picasso.

En el diario *El País* del 1 de abril de 2004, se publicó esta noticia:

TRES DETENIDOS POR COPIAR LA TARJETA DE CRÉDITO
DE LA CONSEJERA DE INTERIOR Y GASTAR 2.874 EUROS.

> «...Todo empezó cuando la consejera de Interior se dio cuenta de que su tarjeta de crédito oficial había sido usada en Alicante. ¿Cómo era posible que le cargaran diversas compras hechas en esta ciudad por los citados 2874 euros, si ella no había estado allí?... La policía de la Generalitat ha podido localizar a los autores del presunto delito porque se da la circunstancia de que una cliente de Terrassa (...) también había recibido cargos por compras que tampoco había realizado... Al comparar los cargos bancarios, los investigadores se dieron cuenta de que las dos clientas habían acudido al mismo restaurante. Las investigaciones se centraron entonces en el establecimiento de la calle Ferran, donde fueron detenidos los camareros citados y posteriormente su socio».

La policía resolvió el caso después de comprender, en cuanto detectó lo común entre lo diverso.

Cualquiera de estas metáforas ilustra bien el segundo principio del método científico, el que bien podríamos llamar principio de inteligibilidad. Su enunciado suena más o menos así: de todas las maneras de representar con igual mérito la realidad, la ciencia elige la más breve, la que pesa menos, la más compacta. Está en la esencia misma de lo que significa la abstracción. Para que un conocimiento merezca ser calificado de científico, el principio de inteligibilidad es un requisito irrenunciable. No hay excusa posible. No vale, por ejemplo, elegir una representación menos compacta y menos sintética sólo porque es más intuitiva. Ésa es la grandeza de la ciencia, que puede comprender sin necesidad de intuir. En síntesis:

La mejor comprensión de un pedazo de realidad es la mínima expresión del máximo común denominador de todas sus manifestaciones.

Apliquemos esta idea a la comprensión de un objeto.

Funciones de funciones

El objeto está ahí y lo que deseamos es comprender su existencia. Buscamos una teoría para comprender lo que existe. Y la tendencia a perseverar es, justamente, lo que comparten todos los entes dotados de la propiedad de existir, o de haber existido hasta el punto de merecer trascender (dejar un descendiente, un fósil, un rastro...). Tal es la esencia común compartida. Es el tipo de comprensión que buscamos. En la materia inerte, perseverar significa seguir estable. En la materia viva significa seguir vivo. Y en la materia culta significa seguir inventando. ¿Qué es lo que persevera? Es la identidad de una individualidad. La capacidad para perseverar de una individualidad inerte es la estabilidad, la de una individualidad viva es la adaptabilidad y la de una individualidad culta es la creatividad. En cualquiera de los tres casos existe, como penúltima oportunidad, la de cambiar de identidad (por cierto: si no fuera por ello, hoy aún seríamos todos bacterias procariotas).

Supera la selección fundamental lo que es suficientemente estable, por lo que la estabilidad es la gran función de la materia inerte. Supera la selección natural lo que está suficientemente adaptado, por lo que la adaptabilidad es la gran función de la materia viva. Y supera la selección cultural lo que es suficientemente creativo, por lo que la creatividad es la gran función de la materia culta. Estabilidad, adaptabilidad y creatividad se suceden y superponen. Un ser vivo puede sacrificar su estabilidad en favor de una eventual adaptabilidad y un ser culto su adaptabilidad en favor de una posible creatividad.

Ahora bien, toda gran función está servida a su vez por funciones más específicas (cuesta llamarlas subfunciones o funciones menores), según sean las alternativas disponibles. Por ejemplo, a la gran idea

de seguir vivo (gran función de la materia viva) sirve cierta variedad de posibilidades a modo de funciones parciales: anticipar mejor la incertidumbre u, otra alternativa, moverse mejor u, otra más, mejor tecnología. La inteligencia, la movilidad o la tecnología son subfunciones de la adaptabilidad. Y cada una de estas subfunciones tiene las suyas a su vez, y así sucesivamente con toda una gama de gamas de funciones. Dentro de la anticipación, por ejemplo, se puede ganar independencia mejorando la inteligencia o el sistema inmunológico. Dentro de la movilidad, otro ejemplo, uno puede optar por nadar o dejarse llevar a la deriva. Y dentro de la natación uno puede optar por la propulsión a chorro, como los calamares, a golpe de aleta caudal, como los peces, o por la propulsión a hélice con motor iónico y flagelo como tantos microorganismos. Y dentro de los peces están las alternativas de viajes a grandes distancias, como los atunes, o las excursiones de cercanías, como los peces de arrecife. Etcétera.

He aquí una buena intuición, creo, para plantear lo que podríamos llamar una teoría general de la forma y, por extensión, de cualquier otra propiedad de los objetos y fenómenos reales. Se trata de un mapa ordenado de las funciones que explican el acceso, la permanencia y la frecuencia de una forma en la realidad del mundo. Es todo un plan de investigación que requiere muchas actividades intermedias, como buscar modelos, mecanismos, leyes o grandes principios... pero cuya expresión última sería ese panorama jerarquizado de unas funciones paralelas o alternativas en la dirección horizontal que también pueden derivarse unas de otras, de función en subfunción, en la dirección vertical.

La consideración de la ley general del cambio comentada en el capítulo séptimo puede ser una buena forma de empezar. En efecto, la estabilidad de la materia inerte (y sus respectivas funciones y subfunciones) tiene una especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia pasiva. La adaptabilidad de la materia viva (y sus funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia activa. Y la creatividad propia de la materia culta (y sus correspondientes funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos dado en llamar independencia nueva.

En la ley general del cambio de un objeto inerte, los términos cruzados (anticipación y acción) son prácticamente nulos, por lo que la complejidad del objeto tiende a coincidir con la complejidad de su entorno. El objeto sigue con mayor o menor inercia los caprichos de su realidad inmediata. Lo que hace es resistir. Las fronteras no son del todo nítidas, y ya hemos comentado que muchas formas vivas en la frontera justamente del no vivir (hibernación, letargo...) se acercan mucho a esta estrategia. También aquí hay varias alternativas donde elegir. La gran función es la estabilidad. Si hablamos de una propiedad como la forma geométrica de un gran cuerpo celeste, como una estrella o un planeta en condiciones de isotropía, entonces la estabilidad obliga a la forma esférica, que es también la más frecuente, la que más se observa. Si hablamos de la posición que ocupa una roca en la ladera de una montaña, desprendida de un estrato más alto, entonces resulta que tal posición no es independiente del tamaño de la roca. Cuanto mayor sea la roca, mayor será la probabilidad de alcanzar las cotas más bajas de la ladera. La roca gana estabilidad cuanto menor sea la pendiente y, en general, cuanto más cerca se encuentre de su situación de mínima energía potencial.

Existen objetos que existen poco. Es decir, existen objetos que no resisten las fluctuaciones de la incertidumbre del mundo, así que, sencillamente, se transforman o desaparecen. Tales objetos no son estables y, por lo tanto, tampoco son muy observables y no trascienden demasiado en la historia del universo. Un cubito de hielo tiene serias dificultades para mantener su identidad como cubito en una copa a pleno sol. El mismo cubito lo tiene mejor en la Antártida. Otros objetos existen algo más. Son objetos que han superado una larga historia de fluctuaciones de la incertidumbre de su realidad inmediata. Es decir, han superado una larga sucesión de selecciones fundamentales, o sea, gozan de cierta estabilidad, la suficiente para trascender en su mundo. Es el caso de la molécula de agua en nuestro planeta. El conjunto de las leyes de la física, y la incertidumbre que éstas permiten, empujan a estas moléculas a formar complejos de distinta índole, copos de nieve, agua líquida, vapor... En las condiciones de nuestro planeta (no así por ejemplo en el centro del Sol) la molécula de agua supera con creces cualquier selección fundamental, es una molécula estable, muy estable... Es estable porque soporta una amplia gama de incertidumbres exteriores sin dejar de ser por ello una molécula de agua. La molécula puede cambiar de estado, puede adquirir más energía, pero

sigue siendo una molécula de agua formada por un átomo de oxígeno enlazado con dos de hidrógeno. De hecho, la molécula sigue mansamente los cambios exteriores, pero es estable en el sentido de que no deja de ser una molécula de agua.

Algo similar puede decirse de los objetos vivos respecto de la independencia activa y de los objetos cultos respecto de la nueva independencia. Para superar la capacidad de resistir el entorno de la materia inerte y acceder a la capacidad de modificarlo, se necesitan los cuatro términos de la ley general del cambio. Siempre existe una frontera en la que se (con)funden las cosas. Es el comportamiento prácticamente inerte de las semillas del mundo vegetal o el comportamiento prácticamente vegetal de algunos animales. Pero por independencia activa, los animales, que no los vegetales, explotan su particular capacidad de movilidad de tecnología y de anticipación. Por nueva independencia, en cambio, se escalan los grados de esas mismas prestaciones.

Los individuos cultos, por su parte, superan la capacidad de modificar el entorno para acceder a la capacidad de crearlo provocando cambios de identidad. Aquí también las fronteras se desdibujan en las inmediaciones de ambos lados. Por el lado de la vida, por ejemplo, la evolución se hace creativa renunciando, de vez en cuando, a ciertas identidades (por simbiosis, por ejemplo). Por el otro lado no hace falta buscar mucho para encontrar ejemplos de cultura adaptativa, bien cómoda y asentada en sus identidades y tradiciones. Casi todas las identidades colectivas humanas se imponen estos límites, el folclore, la identidad nacional, religiosa, deportiva... Incluso manifestaciones tan genuinas de la creatividad como el arte o la ciencia tienen problemas para liberarse de su componente adaptativa.

En esta realidad, que es la que es, y no otra

Todo parece preparado para intentar una teoría de la forma. He aquí las ideas básicas.

Primero, usamos la matemática para nombrar las diferentes formas. No es una casualidad que las formas matemáticas más observables en la naturaleza sean ya, por ese mérito, palabras del lenguaje común: esferas, parábolas, rectas, hexágonos...

Segundo, el resultado de la actividad de las tres selecciones (la fundamental, la natural y la cultural) es, nada menos, la propia realidad, la realidad a la que pertenecemos, la realidad que observamos. Y la realidad es la que es. Podría ser otra, pero no lo es.

Tercero, y resulta que, en esta realidad, que es la que es y no otra, encontramos formas muy cercanas a las formas que nítida y abstractamente define la selección matemática.

Cuarto, la frecuencia con la que se observa una forma matemática particular en la realidad de este mundo se mide por el número de objetos reales que la comparten.

Y quinto, basta un vistazo a la realidad de este mundo, que es la que es y no otra, para constatar que las formas matemáticas presentes en ella no son equiprobables.

Dicho brevemente: en la naturaleza se observan formas matemáticas sencillas como esferas, hexágonos, espirales, hélices, parábolas, conos, ondas, catenarias, fractales... Sin embargo, parece que con distinto peso de su presencia. Se diría por ejemplo que, a primera vista, las esferas son más frecuentes que las parábolas. Ahora, armados con el esquema conceptual que nos hemos regalado, nos disponemos a replantear la cuestión. Nuestro plan para comprender la forma se centra en dos preguntas:

¿Qué formas son las más frecuentes en la naturaleza? ¿Cómo se comprende que sean esas formas y no otras?

La historia de la comprensión en ciencia es más la historia de las preguntas que la historia de las respuestas. Buscar preguntas suele ser un camino cuesta arriba, encontrar respuestas es iniciar el camino cuesta abajo. Lo que queda del libro es una propuesta de respuesta a estas dos preguntas. Responder a la primera pregunta supone un vasto ejercicio de observación en los mundos inerte, vivo e inteligente. Y ello sin olvidar la realidad directamente inaccesible a nuestro sensorio, el mundo invisible por pequeño, el invisible por grande o por lejano, y el invisible por complejo. Responder a la segunda significa concentrar la atención en las formas compartidas por el mayor número de objetos distintos y bucear luego en las funciones y subfunciones asociadas a la emergencia y la perseverancia de tales formas. Parece un buen plan de

morfogénesis. En la segunda parte de este volumen nos proponemos sólo un paseo ligero a través de las formas simples más frecuentes y de sus funciones más visibles. ¡Por algo lo son! Quizá sea suficiente para convencer a alguien más paciente, preparado y riguroso para seguir el camino de esta propuesta.

La tarea de revisar las formas de todos los objetos del mundo parece en principio una proeza cósmica, sí. Pero de momento se trata de especular para una primera aproximación. Empecemos con la pregunta que sigue (y luego ya veremos qué hacemos):

¿Cuál es la forma matemática más probable en la naturaleza?

A lo mejor resulta que la respuesta salta tanto a la vista que ni siquiera se requiere montar una investigación demasiado aparatosa. En efecto, basta entrar en un mercado, mirar el cielo de la noche con un telescopio, observar una arena vieja con el microscopio, bucear en el mar, entrar en una tienda de regalos, atender al tráfico rodado o a la arqueología industrial o, sencillamente, darse una vuelta por el campo, para constatar que el primer premio de frecuencia se lo lleva la simetría circular. Se diría que para esta afirmación no hace falta una exploración demasiado exhaustiva y sistemática de la naturaleza. La simetría circular reina a sus anchas en todos los dominios de la realidad.

Los mecanismos de la emergencia de la esfera ya han asomado en diversos puntos de esta reflexión y volveremos a ello en el próximo capítulo. Tampoco será difícil apostar por la función fundamental y natural que hace comprensible su presencia en el mundo inerte y en el mundo vivo. ¿Y luego? ¿Cuál es la segunda forma más probable? ¿Y la tercera?...

Ante nosotros tenemos dos preguntas: ¿cuáles son las formas más probables en la realidad de este mundo? ¿Cuáles son, en cada caso, las funciones fundamentales, naturales y cultas más convincentes? A estas dos preguntas daremos nueve respuestas que adelantamos aquí sucintamente: la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, el ángulo penetra, la onda desplaza, la parábola emite y recibe, la catenaria aguanta y los fractales colonizan.

Es el sumario de la segunda parte.

Epílogo de la primera parte
Inacabando...

No hay nada como un epílogo para inacabar un libro. El esquema conceptual en él construido se apoya en tres pilares: la materia inerte conducida por la selección fundamental, la materia viva conducida por la selección natural y la materia culta conducida por la selección cultural. ¿Eso es todo? Un esquema conceptual abierto sigue insinuando ideas por extensión y por simetría. Por ejemplo: ¿qué viene después de la selección cultural? ¿Se puede hablar de un cuarto tipo de selección?

Procedamos por extensión. El actor principal de la selección cultural (el individuo relevante) es el organismo dotado de conocimiento abstracto. Preguntarse por el siguiente tipo de selección equivale a preguntarse por el siguiente tipo de individuo. ¿Cuál sería el siguiente? Procedamos por simetría. La individualidad formada por organismos dotados de mente pensante es una colectividad humana dotada de una especie de mente colectiva. Es una mente colectiva que toma decisiones en favor de la nueva individualidad, una individualidad dotada de una especie de identidad, una identidad que merece perseverar a pesar de las fluctuaciones de la incertidumbre. Tal es el nuevo concepto emergente, la identidad colectiva. El ser humano es un organismo culto con gran tendencia a crear identidades colectivas: familias, tribus, etnias, naciones, religiones, clubes deportivos, clubes selectos, clubes gastronómicos, clubes, conventos, sectas, pueblos, barrios, ciudades, culturas... Se diría que en el mismo instante en el que dos mentes descubren que sintonizan (sencillamente, se caen bien), ya empieza a gestarse una nueva identidad colectiva...

Los conceptos y preguntas caen ahora como fruta madura. Tras la selección fundamental, la selección natural y la selección cultural, es el turno ahora de la selección colectiva.

Las preguntas también se desgranan por simetría. ¿Cómo se toma una decisión colectiva? ¡Buena pregunta! ¿Quién vela para que sea en beneficio de la identidad colectiva? Buena pregunta. Pero en la nueva nervura de la realidad, el nuevo individuo vive entre individuos de la nueva nervura. Un ser humano se relaciona con otros seres humanos y una colectividad con otras colectividades. ¿Cómo afecta la perseverancia de la propia identidad colectiva a las identidades colectivas vecinas? Buena pregunta.

Es el origen de un antiguo y siempre nuevo problema: organizar la convivencia humana, la política. La ley general del cambio, comentada en el séptimo capítulo, ofrece ideas que quizá valga la pena tener en cuenta. Hablemos por ejemplo de una colectividad llamada nación. Hablemos de independencia nacional. Hablemos de una nación que contiene una o más nacionalidades y repensemos la cuestión de la independencia nacional. Hablemos de que la independencia puede ser pasiva, activa o nueva. O de cómo evoluciona la independencia. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de la identidad colectiva cuando ésta, inmersa en la incertidumbre del momento y del lugar, no encuentra salida. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de identidad. Mucha. Hablemos de sacrificarla toda, de las alternativas que se presentan cuando se enfrenta la identidad de un individuo con la de una o varias de sus colectividades. Hablemos del progreso colectivo. Hablemos de su relación con el progreso individual. ¿Se mantiene vigente la idea de progreso definida como la ganancia de independencia? Entonces, si una identidad gana independencia, ¿significa que alguna otra la pierde? No hay duda de que el concepto «parásito» resiste el tránsito de la colectividad simplemente viva a la colectividad culta. Pero lo mismo ocurre con la estrategia del pacto simbiótico.

Comprender la identidad colectiva obliga a explorar lo que las identidades colectivas más frecuentes tienen en común, sus conocimientos, sus memorias, sus conceptos, sus mitos, sus dioses, sus memes... sus tácticas y estrategias para perseverar en la realidad de este mundo, sus trucos, ¡sobre todo sus trucos!, o sea, sus himnos, sus símbolos, sus oraciones, sus liturgias... Un buen esquema conceptual proyecta sus conceptos hacia delante. Si la selección fundamental resiste la incertidumbre, si la selección natural la modifica y si la selección

cultural la anticipa, ¿qué es lo propio de la selección colectiva?, ¿cómo se enfrenta la colectividad a su propia incertidumbre? Si la garantía de la perseverancia en el mundo inerte es la estabilidad, en el mundo vivo es la adaptabilidad y en el mundo culto es la creatividad, ¿cuál es la garantía de independencia de las identidades colectivas humanas? Conviene repensar estas preguntas dentro del nuevo esquema conceptual. No sea que algo de todo esto pueda resultar de ayuda.

Segunda parte
La rebelión de las formas

10
La esfera protege...

Figura 10.1. Gotas de agua sobre una palmera (fotografía del autor).

El mundo está bien provisto de circunferencias, círculos, esferas, esferas de esferas... La circunferencia es el perímetro más corto que encierra una superficie plana y la esfera es la menor superficie que encierra un volumen dado. La esfera emerge con facilidad, por selección fundamental, en un mundo inerte con pocas restricciones. Por ejemplo, cuando no hay restricciones en el espacio, es decir, cuando no hay direcciones privilegiadas, cuando todas las direcciones son igualmente probables, se dice que existe isotropía. Cuanto más homogéneo e isótropo es el espacio de la realidad preexistente, más probable es la emergencia de esferas. El espacio que más cumple esas condiciones es la nada. Por eso, la emergencia de esferas es especialmente probable en realidades jóvenes, poco pobladas de fenómenos y de objetos preexistentes.

Lo sabe bien un astronauta cuando vierte el agua de una botella en condiciones de ingravidez (la gravedad rompe la simetría); lo sabe bien el que contempla las gotas de rocío o las gotas de agua sobre una hoja de palmera después de la lluvia (figura 10.1), lo sabe bien el geólogo que contempla la redondez de una bomba volcánica y se imagina la masa de lava ardiente escupida por un volcán enfriándose durante el breve intervalo de condiciones de isotropía de la caída; lo sabe bien un submarinista que espira burbujas bajo el mar y el que tira una piedra a un estanque de aguas tranquilas; lo sabe bien el que fabrica perdigones dejando caer gotas de plomo líquido en el vacío, o el visitante de nuestra exposición de las formas en el museo cuando, pisando un pedal, observa el nacimiento de enormes burbujas (figura 10.2), también lo sabe el físico que estudia el nacimiento de estrellas y planetas... Todos estos sencillos experimentos muestran con qué alta probabilidad la selección fundamental permite la generación de simetrías circulares. La sensación de inteligibilidad es intensa cuando se piensa que el mismo *cómo* se aplica a la esfera de un gigantesco y viejo planeta como Júpiter orbitando en torno al Sol y a la esfera de una modesta burbuja ascendiendo según la vertical en una copa de cava.

El ámbar es resina fósil, un bellísimo material, transparente y dorado, capaz de atrapar el pasado. Entre otras cosas, y para deleite de los paleontólogos, es capaz de conservar insectos y fragmentos vegetales durante millones de años. Pero no sólo eso. También es capaz de convertir en semieternos objetos tan frágiles y efímeros como gotas

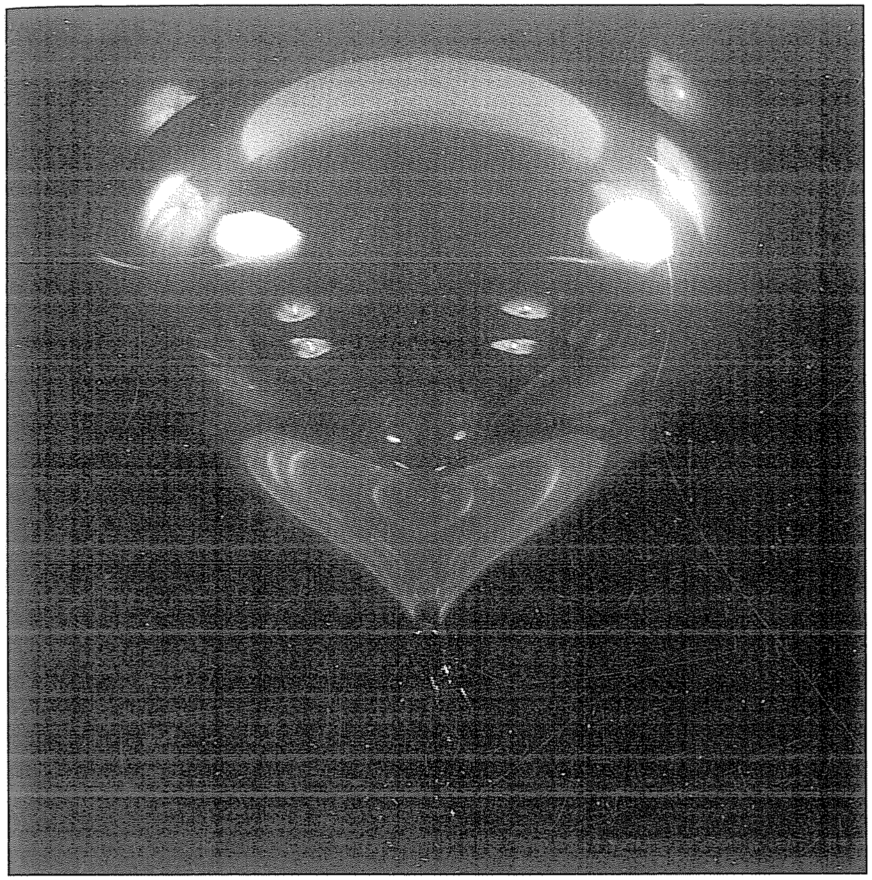


Figura 10.2. Burbuja de aire en el agua. La forma esférica se adopta por selección fundamental. Es la mínima superficie que encierra un volumen (colección MCFLC, fotografía de Sergio Parra).

de agua en el aire y burbujas de gas en el aire. Las termitas, por ejemplo, generan una gran variedad de burbujas esféricas. Poco después de quedar atrapadas por la resina mueren por asfixia. Y a veces, como en la figura 10.3, la presión sobre el cuerpo del insecto hace visible para siempre el último suspiro a modo de una gota de aire (en resina) señalando la posición exacta de cada espiráculo. Los microorganismos que ayudan a que las termitas puedan digerir la madera tardan bastante más en morir y sus restos están aún presentes en los líquidos y gases de descomposición del individuo.

—¿Por qué no te llevas una pieza del museo y los estudias? —le propuse a Lynn Margulis durante una cena en Barcelona—. ¿Por qué no vas ahora mismo a buscarla? Yo te espero para el segundo plato... [47]

En la misma pieza puede observarse algo muy frecuente en termitas presas en ámbar: el gas atrapado dentro de una burbuja esférica se mueve dentro del líquido atrapado dentro del cuerpo de la obrera atrapada en la resina. La esfera de gotas y burbujas es la forma de objetos inertes más frecuente dentro de las piezas de ámbar.

Éstos son casos de simetría por omisión, pero también hay muchos casos de isotropía por acción. Es cuando la isotropía no se debe a la ausencia de asimetrías, sino cuando éstas son tantas y tan bien repartidas que hacen que la globalidad vuelva a ser de nuevo isótropa. Basta

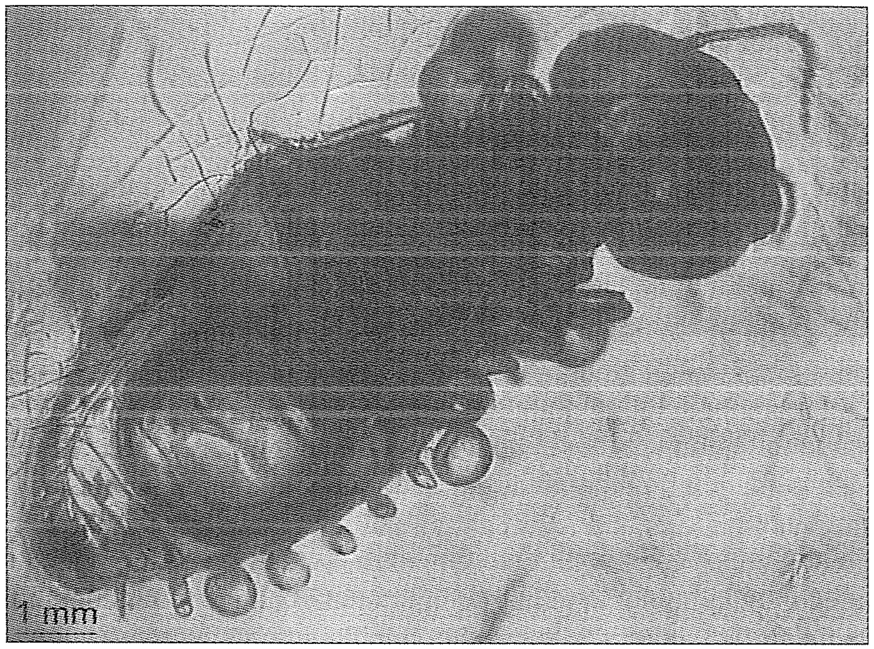


Figura 10.3. Termita *Electrodomenicus mastotermes* atrapada en ámbar dominicano (Mioceno). Una pequeña burbuja de aire señala la posición de cada individuo en lo que bien podría llamarse el «último suspiro». Además, una burbuja de gas se mueve en el líquido de descomposición atrapado dentro del cuerpo del animal. Otras esferas de la pieza corresponden a gotas de agua o a burbujas de aire (colección MCFLC, fotografía del autor).

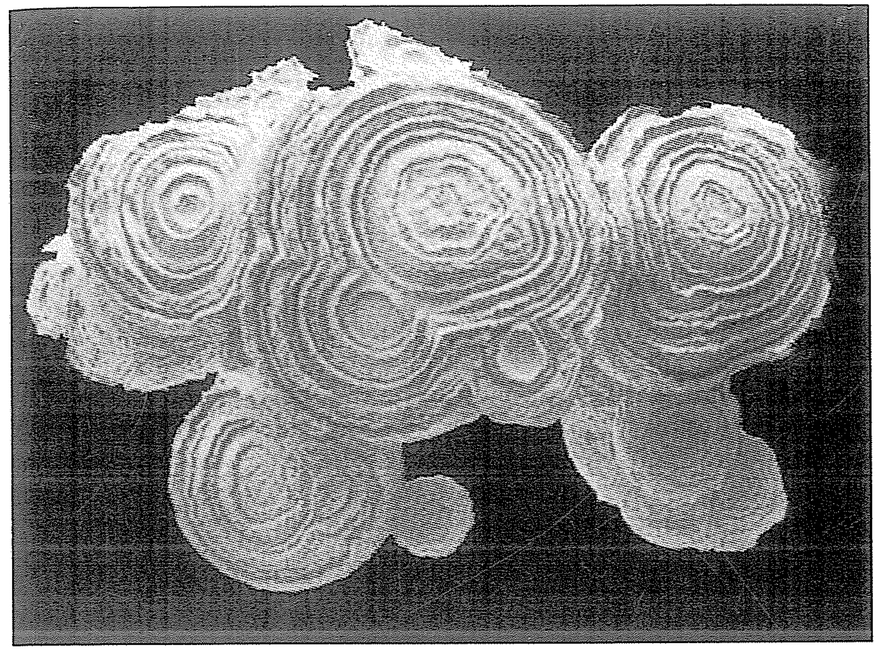


Figura 10.4. Oncolitos (¿?) de un desierto de Marruecos. La simetría esférica corresponde a un crecimiento isótropo de microorganismos sobre cantos rodados en capas sucesivas (colección MCFLC, fotografía del autor).

observar los cantos rodados de un río. La simetría circular no es tan rigurosa y universal como en las burbujas o los astros celestes, pero es sin duda la forma más probable (véase, antes, la figura 8.4b). Estas piedras han rodado tanto desgastándose las unas contra las otras en tantas direcciones diferentes sin privilegiar ninguna que, tras un tiempo largo, y el tiempo geológico sin duda lo es, la isotropía de las asimetrías es notable. Más espectacular aún es observar arena vieja en el microscopio. Los geólogos usan precisamente el grado de redondez de los granos para hacerse una idea de la edad de la arena.

En algunos casos el proceso se invierte y una forma esférica genera isotropía que, a su vez, da lugar a nuevas simetrías esféricas. Es el caso de los llamados oncolitos. Todo empieza con un canto rodado redondo sobre el que crecen microorganismos. La isotropía procede del hecho de que el canto rodado rueda. Rueda en cualquier dirección y, con el tiempo, acaba rodando en todas direcciones por igual. El resultado son

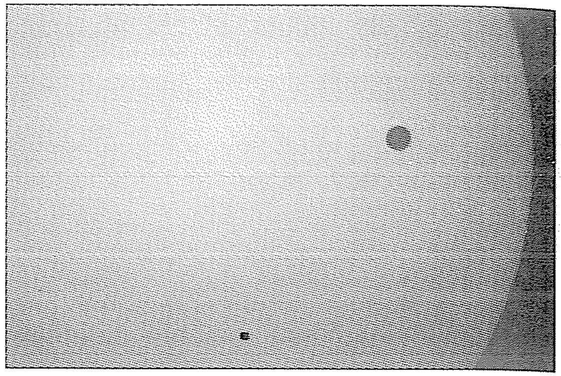


Figura 10.5. La esfericidad de estrellas y planetas. Tránsito de Venus por delante del Sol, el día 8 de junio de 2004, desde la terraza del Museu de la Ciència (fotografía del autor).

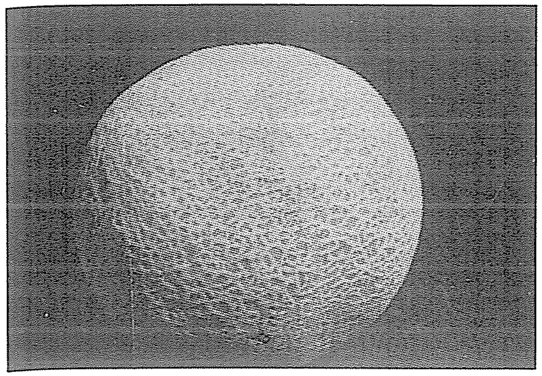


Figura. 10.6. Melón (fotografía del autor).

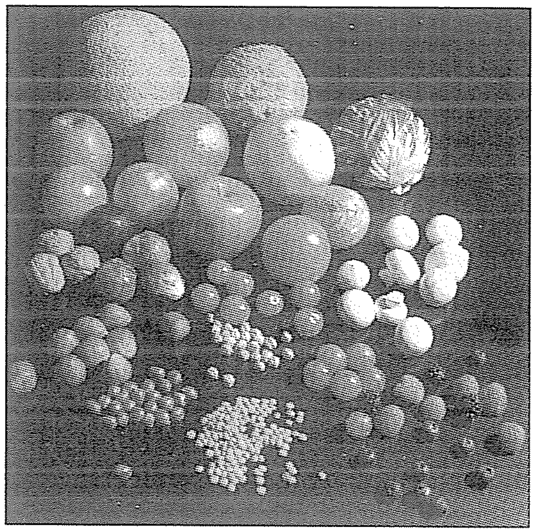


Figura 10.7. Selección de esferas limitada a 15 minutos en el mercado Galvany de Barcelona. La esfera es la forma más probable de frutos y semillas (fotografía del autor).

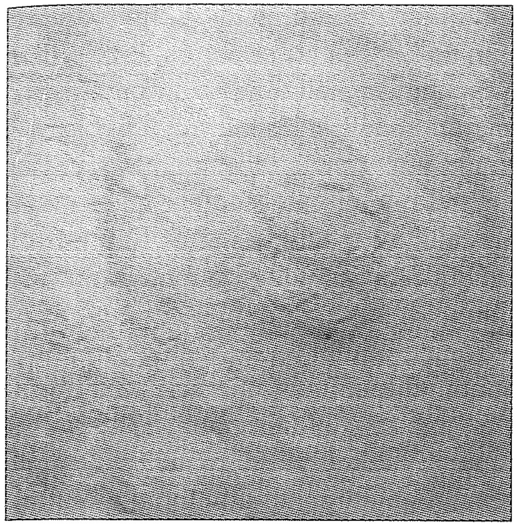


Figura 10.8. Medusoide fósil (Wisconsin, Estados Unidos) del tránsito del Precámbrico al Cámbrico (570 millones de años de antigüedad). Los primeros animales vivían en el agua en condiciones de isotropía. Estaban fijos o iban a la deriva. La movilidad rompe la isotropía con una dirección privilegiada: la del movimiento. Y así surge la simetría bilateral (colección MCFLC, fotografía del autor).

unas estructuras de capas esféricas concéntricas con un guijarro redondo en el centro de cada simetría. En un viaje a un desierto de Marruecos encontramos muchas formaciones en el cauce de un río antiguo que parecían oncolitos (figura 10.4). Lynn Margulis es una antigua y fiel amiga del museo que, de vez en cuando, se entusiasma con alguna pieza y nos ayuda a estudiarla. En una ocasión, una pieza de ámbar del museo, con inclusiones de termitas y de burbujas de gases de la descomposición, dio lugar a una interesante investigación interdisciplinar [47]. Una exposición es una actividad científica como otra y no hay actividad científica bien hecha que, tarde o temprano, no sugiera una investigación. El presunto oncolito está en plena investigación desde hace años. Lynn ha enviado muestras a todos sus amigos geólogos. Todavía no tenemos pruebas concluyentes para identificar la pieza. La duda está entre un origen orgánico (oncolito) o un origen puramente geológico. Un museo puede exhibir su ignorancia, siempre provisional, sin problemas. Algún día conoceremos el mecanismo concreto. De momento estamos ante un caso más de simetría esférica debida a alguna clase de isotropía por selección fundamental.

Lo dicho, la esfera emerge con facilidad en el mundo inerte. Es la forma más simétrica y es especialmente estable en ambientes isótropos, homogéneos, simétricos... En tales condiciones la selección fundamental la favorece, de modo que el mundo inerte se llena de esas formas tan perfectas. Es el turno de la siguiente selección, la selección natural. En efecto, la simetría circular también se prodiga con insistencia en el mundo vivo: las frutas, las semillas, los huevos, los primeros animales como los erizos, las medusas, ciertas esponjas... Basta plantarse delante de un puesto de frutas de un mercado cualquiera, para convencerse de la superioridad de la esfera (figuras 10.5, 10.6 y 10.7) en materia de frutas y semillas. Sin embargo, ahora la función no es la estabilidad.

Lo que se produce en un volumen interior (calor, materia, información, etcétera) sale al exterior atravesando una superficie (o, inversamente, lo que entra desde el exterior atraviesa una superficie para repartirse por un volumen interior). Si esa superficie frontera es mínima (la esfera), entonces el flujo entre el interior y el exterior se ralentiza. Es el efecto contrario de un radiador doméstico encargado de calentar una habitación lo más rápidamente posible. Este detalle termodinámico se convierte así en una función que hace que muchas esferas vivas sean comprensibles. Pero no es el único.

Para empezar, hablemos de animales, de animales del principio de la animalidad. Todo empezó en el agua. Y en el agua, donde la asimetría de la gravedad suele anularse con el empuje de Arquímedes, y donde la absorción y la difusión amortiguan la de la luz, triunfa la simetría circular. Es el caso de los antiquísimos medusoides (figura 10.8). La isotropía se aplica muy especialmente para los animales fijos en una posición del espacio o que vagan a la deriva. En ambos casos, el acto de alimentarse es un episodio casual. El animal come simplemente cuando la partícula alimenticia resulta que choca con él. Todo va bien mientras haya suficientes partículas nutritivas vagando en el entorno inmediato. Pero si la incertidumbre del alimento aumenta, lo vivo entra en crisis. Un salto importante para vencer esta crisis se da con la movilidad (capacidad para cambiar de entorno en nuestra ley general del cambio). Con ella, el animal en cuestión pasa a tomar la iniciativa y si la partícula alimenticia no tiene a bien chocar con él, entonces el animal va ¡y se mueve en dirección a la partícula! Pero atención. Se acaba de romper la isotropía porque acaba de aparecer una dirección privilegiada, la del movimiento. Surge entonces la máxima simetría posible (la máxima esfericidad posible, si se quiere) teniendo

en cuenta que predomina una dirección particular. Es la simetría bilateral. Aparece ya en los erizos, que incrementan su movilidad cuando la boca (orificio inferior) tiende a la parte delantera al tiempo que el ano (orificio superior) tiende a la parte trasera. Este tipo de simetría de los animales «automóviles» ya no se perderá nunca más (en su aspecto básico) en la lenta pero tremenda escalada que el reino animal vivirá a través de los sucesivos logros de independencia. Digamos de paso que la movilidad necesita anticipación, por lo que una independencia puede generar otras independencias que la selección natural puede continuar bendiciendo. Para moverse hay que percibir el mundo exterior, interpretarlo y coordinar luego las decisiones motoras. Los animales con simetría circular, los animales con poca o ninguna movilidad perciben poco o nada y no tienen cerebro. Ni falta que les hace... Los animales con simetría bilateral, en cambio, inician la carrera de la inteligencia con entusiasmo. Es la capacidad estrella para anticipar la incertidumbre, la que llevará hasta la noción misma de conocimiento y, haciendo volar el comentario, hasta la noción misma de conocimiento científico, la forma de conocimiento que se propone, por oficio, anticipar la incertidumbre del medio.

Pero volvamos a las formas. Moverse en el aire o en el agua a según qué velocidades favorece las formas que generen menos turbulencias en el medio (las que menos contribuyan a generar incertidumbre en el medio). Emergen así otras formas de simetría bilateral derivadas de la esfera, como son las célebres formas aerodinámicas (o, más propiamente, fluido-dinámicas), las de tantos peces y pájaros. No así los insectos, que se desplazan a velocidades mucho menores. Algunos insectos incluso generan turbulencias para usarlas como método de vuelo. La selección natural distorsiona la frecuencia de esferas cuando las favorece en el mundo vivo.

Otro caso notable es el del ojo de los animales. El ojo es una parte muy importante del ser vivo. Sirve para captar información del entorno, y ello, a su vez, es imprescindible para anticipar la incertidumbre. La selección natural ha favorecido diferentes ojos esféricos: los de los vertebrados (un gato), moluscos (el pulpo), artrópodos (araña) e insectos (hormiga). En los vertebrados el globo ocular es eso, un globo, una esfera, el iris un círculo, dentro del cual hay otro círculo, la pupila... No sabemos bien cuántas veces ha intervenido la selección natural para

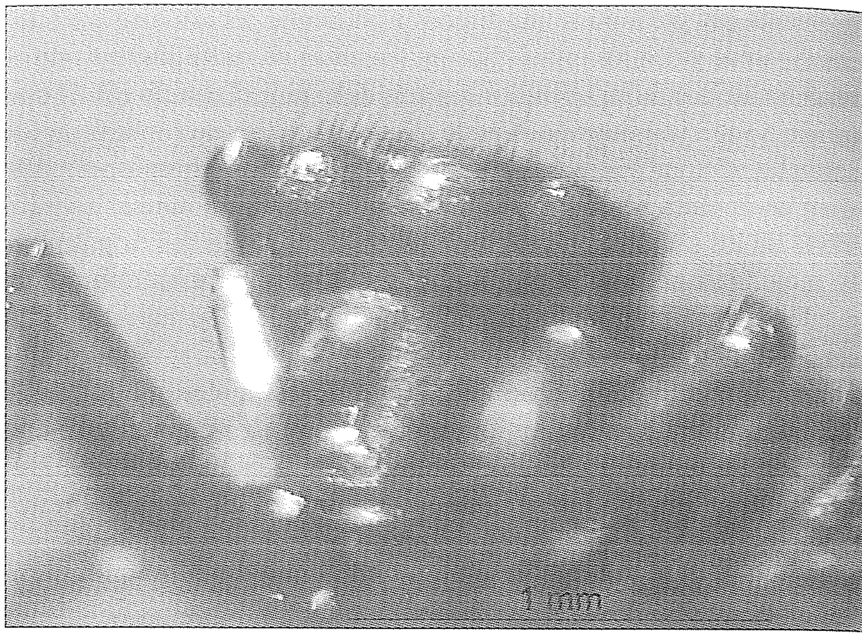


Figura 10.9. Ojos de una araña atrapada en ámbar dominicano (colección MCFLC, fotografía del autor).

reinventar la simetría circular del ojo. La isotropía de la simetría circular del ojo funciona de maravilla a la hora de escrutar la incertidumbre del paisaje. El caso de las arañas es más curioso: tienen cinco o más ojos y, a pesar de ello, no muy buena vista (figura 10.9). Tampoco es casualidad que la primera idea base para el ratón de ordenador fuese una esfera.

La copa de los árboles (el penacho de ramas y hojas) es también una parte trascendente de un individuo vivo. Un árbol en un entorno con luz suficiente e isótropa (en una latitud no lejana de los trópicos y sin sombra de otros vecinos) encuentra en la forma esférica un excelente captador de luz. Por eso en los trópicos domina esa forma para la copa de los árboles. Nótese algo curioso. Cuando dos árboles en esta situación están demasiado cerca el uno del otro, crecen de manera que tienden a construir, juntos, una sola copa esférica (véase la figura 10.10). Si se trata de una selva tropical con mucha competencia, entonces la simetría circular más favorable tiende al círculo. Para una luz

Figura. 10.10. Una misma encina vista desde dos ángulos diferentes: dos árboles demasiado próximos tienden a compartir una sola copa de simetría esférica (Calaceite, Teruel, fotografía del autor).

muy vertical y con competidores a los lados, lo más eficaz es una copa tipo boina. Para una luz muy oblicua, como ocurre en latitudes más próximas a los polos, la simetría circular se distorsiona y aparece una forma que capta mejor la luz por término medio: el cono. Es un nuevo estilo de copa de árbol que da nombre a una gran familia, las coníferas.

Ahora hablemos de huevos. Todos los animales empiezan su vida desde el concepto «huevo». Durante los primeros cientos de millones de años, el entorno natural de los huevos fue el agua (o sea, un medio con buena isotropía ambiental). Centremos nuestra atención en los huevos que, todavía hoy, se desarrollan en el agua, como los huevos de peces o los de las tortugas acuáticas. Su forma es la de una esfera casi perfecta. La esfera ya es altamente probable en el mundo inerte pero ¿por qué favorece la selección natural su permanencia? Si admitimos que la selección natural favorece todo aquello que mejora la independencia del objeto vivo, entonces digamos que la esfera ofrece como mínimo dos ventajas. Ya han asomado hace unas páginas. Por un lado, la esfera es la forma más difícil de morder por unas fauces cuyo diámetro sea comparable al de la esfera. No hay donde agarrarse bien. Sólo por eso el huevo esférico se libra de un buen número de enemigos (se independiza). Y no es poca ventaja si tenemos en cuenta la cantidad de comehuevos que rondan por todos los paisajes.

La redondez es, además, la mejor protección de todos los que tienen dificultades para huir ante una súbita amenaza (una alternativa a la movilidad). El escarabajo que entra en el hormiguero para robar inmaduros (la historia del «tuya-mía» relatada en el capítulo anterior) es, para desesperación de los soldados, una semiesfera perfecta sobre la que resbala cualquier intento de recuperar la presa. Animales no esféricos con la misma dificultad para poner tierra de por medio adoptan la simetría circular cuando se ven en peligro. Es el caso de ciempiés, armadillos o erizos terrestres. La esfera es la referencia de todo caparazón rígido y la tendencia de toda protección articulada.

La otra ventaja de la esfera es la de ralentizar el intercambio de energías y materiales. Ya hemos comentado que es el huevo el que calienta a la gallina y que la esfericidad del huevo cumple, por forma, la misma función que la gallina, perder el calor despacio. Es también el sentido del concepto «acurrucarse». Pero la selección natural no tiene por qué detenerse en la esfera. Echemos un vistazo a las distorsiones posteriores más probables. En el agua todos los huevos son esféricos. Sin embargo, fuera del agua el entorno cambia. Cambia su incertidumbre y la nueva incertidumbre puede presionar para que la selección natural favorezca variaciones hacia otras formas. En efecto, fuera del agua, la madre puede tener más problemas de lubricación para expulsar el huevo y, sobre todo, fuera del agua el huevo puede rodar fácil y fatalmente fuera del nido. Es una desventaja (en otros casos, como la del escarabajo pelotero, claramente ventaja) de la esfera. La esfera sólo tiene un punto de contacto con una superficie plana. Allí se aplica el peso del huevo, y respecto de ese punto la esfera rueda fácilmente sin deslizarse. Tal es el inconveniente, la esfera rueda. Digamos que todos los huevos esféricos de un nido construido en un acantilado ya han tenido ocasión de estrellarse contra las rocas y no han dejado descendencia para contarlo. En cambio, cualquier distorsión desde el huevo esférico hacia el huevo de forma *ovoide* puede suponer una ganancia de independencia respecto de este tipo de accidentes. Un huevo ovoide ya no rueda en las infinitas direcciones posibles como lo hace una esfera, sino sólo en una, la perpendicular al eje de simetría. Pasar de infinito a uno es una mejora significativa...

Con el intercambio de materiales, como el agua, ocurre algo muy similar. En el desierto, por ejemplo, es muy importante conservar y administrar el agua al máximo. Por ello muchas especies de cacto tienden a la forma esférica, la forma que más retarda la pérdida del preciosísimo elemento. El cacto ya reduce la superficie de las hojas hasta convertirlas en espinas (volveremos sobre este caso a propósito de otra

forma simple emergente), y la tendencia de la planta a la esfericidad se explica con la misma idea. A veces se llega a situaciones de verdadera esquizofrenia de la forma porque, por un lado, la esfera interesa para no perder agua, pero, por otro, lo que interesa es la máxima superficie, por ejemplo para aprovechar al máximo los raros veinte minutos de lluvia que hay en todo el año. De nuevo la selección natural favorece un compromiso, como el que representa una forma esférica que minimiza la superficie recorrida por una profusión de contradictorios entrantes y salientes que tienden a maximizarla. Con algunos corales, como los caribeños corales cerebro, ocurre algo parecido aunque por otras razones. Algunos cactos no esféricos tienden a recuperar la forma de la esfera al agruparse en colonias. Es un caso de ganancia de independencia por asociación, porque aquí la protección contra la pérdida de agua o contra el exceso de insolación se consigue para el concepto «colonia». La emergencia de una nueva individualidad asoma por el horizonte. La arquitectura animal exhibe una gran profusión de simetrías circulares. Piénsese en el concepto «nido», ya sea un nido de pájaros o un nido de dinosaurios o en la entrada-salida de nidos y madrigueras. En el mundo vivo y en el mundo inteligente los agujeros suelen ser redondos.

A veces, la esfera escala los niveles jerárquicos y una población de esferas se reúne para dar lugar a una esfera mayor. Ocurre en el mundo inerte, en ciertas concreciones minerales, y también en diferentes y variadas situaciones del mundo vivo. Las arañas, por ejemplo, no sólo hacen huevos redondos, sino paquetes redondos de huevos redondos. El paquete de huevos es redondo por la misma razón que son redondos los huevos (figura 10.11). Algo muy similar ocurre con ciertos nódulos de marcasita (figura 10.12), ciertos frutos como moras y frambuesas (figura 10.13) y ciertas colonias esféricas de cactos esféricos.

En el mundo inteligente, la circunferencia, el círculo y la esfera también triunfan con claridad indiscutible. Sin embargo, la función que consagra la esfera no es tanto la protección. La arquitectura es un reductor animal de la incertidumbre ambiental. Se trata del término tecnología: cambiar el entorno para amortiguar las fluctuaciones de su incertidumbre. El llamado aire acondicionado se sitúa casi en el límite de esta idea: mantener dentro la temperatura constante, cualesquiera que sean los caprichos de la temperatura exterior. No hay duda. Una vi-

vienda amortigua las fluctuaciones de la meteorología. Bien pensado, cuanto más duras sean las condiciones exteriores de temperatura, por ejemplo, más apropiada sería la forma esférica (o parte de ella), ya que en un caso se trataría de no dejar escapar el calor interior (en el Ártico) y en el otro de no dejar que entre (en el desierto). Los iglúes de los esquimales se ajustan a la idea, pero extraña que la arquitectura popular del desierto o la tradicional mediterránea en particular y la arquitectura en general (siempre se trata de independizar el interior del exterior) prefiera usar las líneas rectas, salvo en solemnes cúpulas de iglesias, mezquitas y palacios y demás gestos en honor de la gloria humana. La omnipresencia de lo horizontal y vertical en la superficie del planeta, algún sentido no muy claro de lo racional, una noción sobria de la estética y una fuerte herencia euclídea, han impuesto la línea recta y el ángulo recto durante milenios. Las puertas y ventanas no son redondas como en la, digamos, naturaleza natural, sino rectangulares y en torno a la llamada proporción áurea. Corresponde a los arquitectos hacerse la pregunta: ¿no es demasiada línea recta en una naturaleza donde ésta destaca por su ausencia? Gaudí fue un arquitecto genial que se asoma aquí ahora por primera vez, pero cuya obra vamos a consultar a partir de ahora en cada una de las formas que proponemos. Tuvo, como veremos, una fuerte intuición científica a la hora de seleccionar las formas para su arquitectura.

Si la esfera triunfa en el mundo culto, no es tanto por la función protectora como por otra ventaja antes considerada como desventaja (el huevo fugándose del nido). La simetría circular ofrece interesantes alternativas de movimiento, de rotación de una figura en torno de un punto o de un eje. La circunferencia (el círculo, la esfera) rueda. Rueda sin deslizar para desplazarse, como la rueda de un carro, de un patinete, de una bicicleta, o rueda en torno de un eje fijo, como una noria o una turbina, como todo aquello que interesa que se mueva pero que no se pierda de vista. La simetría circular inteligente triunfa por rotación generando superficies de revolución. La idea del torno se inicia con la cerámica y acaba fabricando toda clase de piezas. Cualquier máquina de cualquier momento de la historia de la tecnología está repleta de circunferencias, discos y esferas y, en general, de piezas torneadas, piezas de simetría circular. Desmontemos, por ejemplo, un automóvil en todas y cada una de sus piezas. Y tomemos nota de todas las piezas

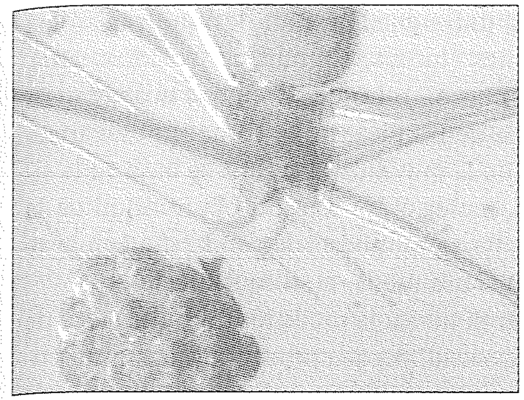


Figura 10.11. Paquete de huevos de araña en ámbar atrapado en el Mioceno, 20 millones de años (República Dominicana). Todos los huevos son esféricos o de origen esférico. En muchos casos similares, la selección natural favorece una esfera de esferas, un paquete esférico de huevos esféricos (colección MCFLC, fotografía del autor).

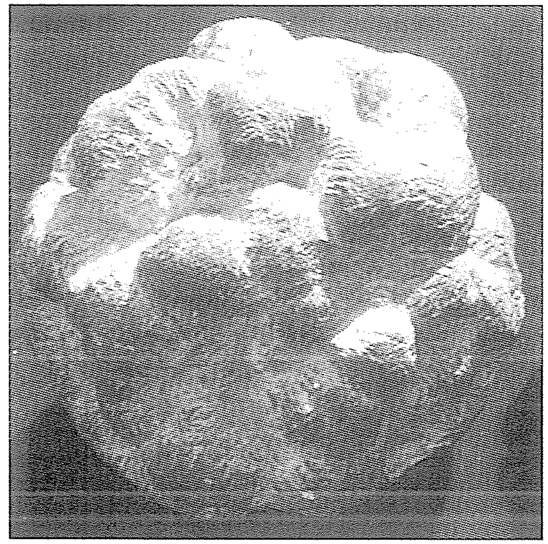


Figura 10.12. Nódulos de marcasita (Estados Unidos). Una esfera de esferas por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

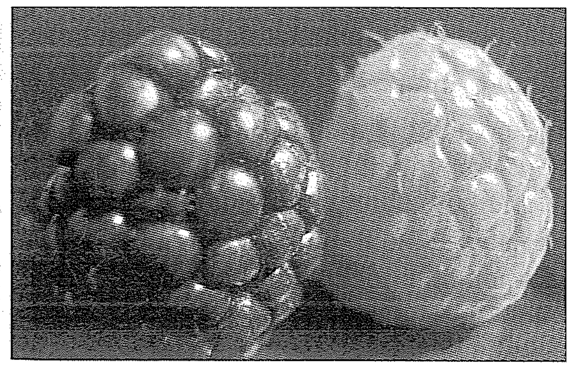


Figura 10.13. Mora y frambuesa (fotografía del autor).

con simetría circular, es decir, todas aquellas para las que existe una rotación que las deja invariantes (ruedas, engranajes, volantes, aros, arandelas, tornillos, cilindros, conos...). Lo cierto es que acabaríamos mucho antes si tomáramos nota de las piezas que no tienen esta simetría. No hay duda, el progreso de la movilidad humana se basa en la simetría circular. Un arquitecto, molesto por nuestra observación de la escasez de líneas rectas en la naturaleza, podría demandar aquí en justa venganza: ¿y qué planta o animal usa ruedas o su equivalente?

Pero ¿por qué no descubrieron nunca la rueda los incas? La idea de la rueda la tenían, con toda seguridad, porque producían cuentas circulares con un orificio perfecto en su centro para collares. Su tecnología para perforar con dos fresas cónicas por las caras opuestas era muy sofisticada. Obsérvese si no la extraordinaria colección privada de Ernesto Leichtenshneider (búsquesele en Lima, Perú). Hay trabajos que hoy son impensables sin la ayuda de la combinación de un láser y una computadora. ¿Cuántas cuentas se escapaban cada día rodando por el suelo del taller de uno de estos antiguos bisuteros? ¿Es posible que tantos indios geniales se resistieran ante una pista tan insistente sobre la definitiva aplicación de la simetría circular? Quizá nunca sepamos la respuesta, quizás hace falta más poder de abstracción del que pensamos para ver rodar una cuenta de collar y correr luego a casa del herrero para proponerle una revolución. Quizá, después de todo, la rueda no fuera tan útil en aquellos terrenos escarpados... Parece, eso sí, un buen misterio de la selección cultural.

En el mundo de la imaginación humana, la simetría circular es una metáfora en sí misma, un símbolo de la perfección, incluso de la divinidad. Estos fragmentos de «La esfera de Pascal», en *Otras inquisiciones* de Borges (1952), son una buena muestra:

> «Seis siglos antes de la era cristiana, el rapsoda Jenófanes de Colofón, harto de los versos homéricos que recitaba de ciudad en ciudad, fustigó a los poetas que atribuyeron rasgos antropomórficos a los dioses y propuso a los griegos un solo Dios, que era una esfera eterna. En el *Timeo,* de Platón, se lee que la esfera es la figura más perfecta y más uniforme, porque todos los puntos de la superficie equidistan del centro; Olof Gigon *(Ursprung der griechischen Philosophie,* 183) entiende que Jenófanes habló analógicamente; el Dios era esferoide, porque esa forma es la mejor, o la menos mala, para representar la divinidad. Parménides, cuarenta años después, repitió la imagen ("el Ser es semejante a la masa de una esfera bien redondeada, cuya fuerza es constante desde el centro en cualquier dirección"); Calogero y Mondolfo razonan que intuyó una esfera infinita, o infinitamente creciente, y que las palabras que acabo de transcribir tienen un sentido dinámico (Albertelli: *Gli Eleati,* 148). Parménides enseñó en Italia; a pocos años de su muerte, el siciliano Empédocles de Agrigento urdió una laboriosa cosmogonía; hay una etapa en que las partículas de tierra, de agua, de aire y de fuego, integran una esfera sin fin, "el *Sphairos* redondo, que exulta en su soledad circular".
>
> »(...)
>
> »"Un Aristóteles no fue sino los escombros de Adán, y Atenas, los rudimentos del Paraíso". En aquel siglo desanimado, el espacio absoluto que inspiró los hexámetros de Lucrecio, el espacio absoluto que había sido una liberación para Bruno, fue un laberinto y un abismo para Pascal. Éste aborrecía el universo y hubiera querido adorar a Dios, pero Dios, para él, era menos real que el aborrecido universo. Deploró que no hablara el firmamento, comparó nuestra vida con la de náufragos en una isla desierta. Sintió el peso incesante del mundo físico, sintió vértigo, miedo y soledad, y los puso en otras palabras: "La naturaleza es una esfera infinita, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna". Así publica Brunschvicg el texto, pero la edición crítica de Tourneur (París, 1941), que reproduce las tachaduras y vacilaciones del manuscrito, revela que Pascal empezó a escribir *effroyable:* "Una esfera espantosa, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna"».

La simetría circular está tan presente en el arte, que casi no diremos nada. Sólo unas pinceladas. El 23 de noviembre de 1999 se inauguró en el Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona la exposición *Cosmos. Del Romanticismo a la vanguardia 1801-2001.* Los organizadores resumían así sus intenciones: «Percibir el Cosmos, estudiarlo, cuestionar cuáles son sus límites... han sido aspectos fundamentales tratados por las artes, la ciencia y la historia de las ideas de los últimos dos siglos». Vale la pena recorrer el catálogo que ha quedado de esta muestra extraordinaria, [48] porque circunferencias, discos y esferas destacan claramente sobre las demás formas en las distintas pinturas, esculturas, fotografías y montajes.

No es difícil tropezarse con esferas de selección cultural. La imagen 10.14 está tomada a poco más de cien metros de mi mesa de trabajo. Como puede apreciarse, existe una línea de observación según la cual se observa la cúpula esférica del Observatorio Fabra amaneciendo por detrás de la cúpula esférica del planetario.

Maurits Cornelius Escher es un artista de fuertes intuiciones científicas. Su interés para *deformar* la realidad euclídea en una realidad de simetría esférica es una de las constantes de su obra. Contémplese, asimismo, la evolución de la obra de Muixart en los últimos tiempos. Recuérdese la Galatea de las esferas de Dalí y otros estudios en los que la esfera es el elemento de construcción (figuras 10.14, 10.15, 10.16 y 10.17). Visítese el Parque Güell de Antoni Gaudí, donde una formación de esferas de piedra da la bienvenida al visitante... o los bellos e inteligentes espectáculos de Pep Bou con burbujas de jabón (figura 10.18).

Veamos un último ejemplo. Existen objetos que se pueden encontrar en las tiendas de regalos y recuerdos de todo el mundo. Como esas cucharillas de café con el escudo de la ciudad o del paisaje del lugar.

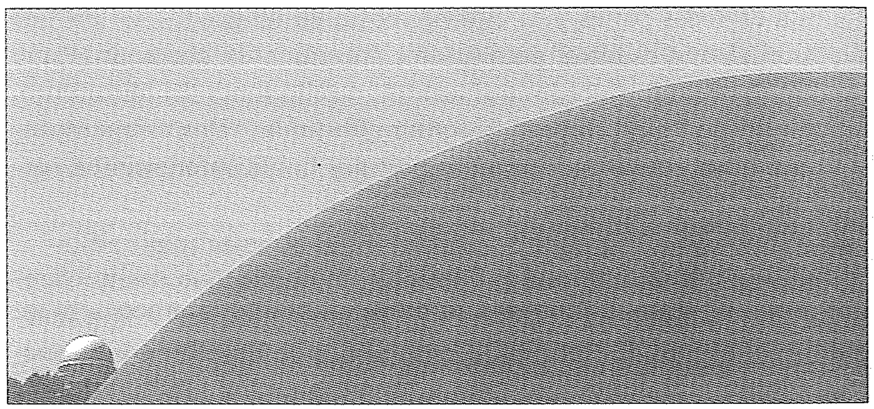


Figura 10.14. La cúpula esférica del Observatorio Fabra *amaneciendo* por detrás de la cúpula esférica del planetario. Esferas por selección cultural (fotografía del autor).

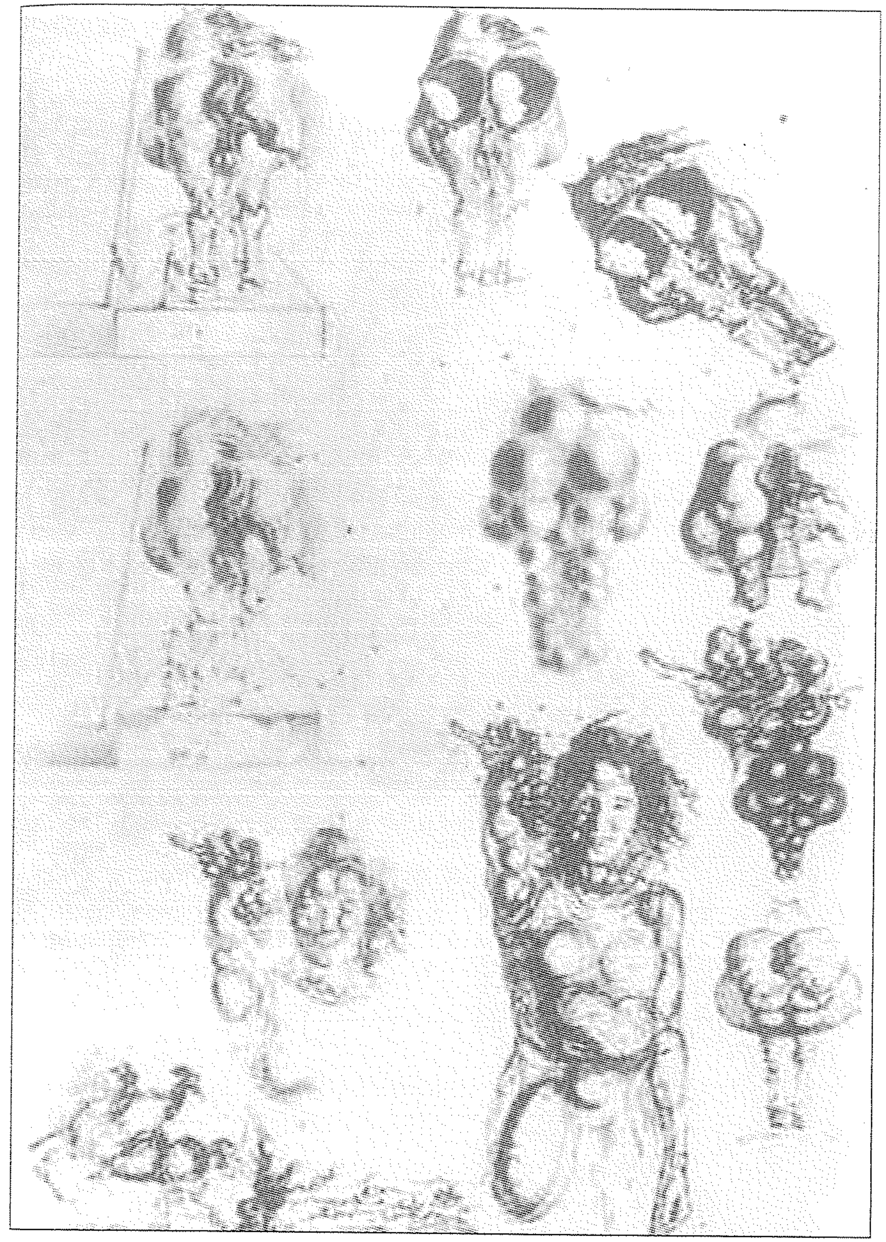


Figura 10.15. Dalí estudió la esfera como elemento generador de formas. Salvador Dalí, *Étude pour les environs de la ville paranoïaque-critique,* 1935. Tinta y lápiz sobre papel.

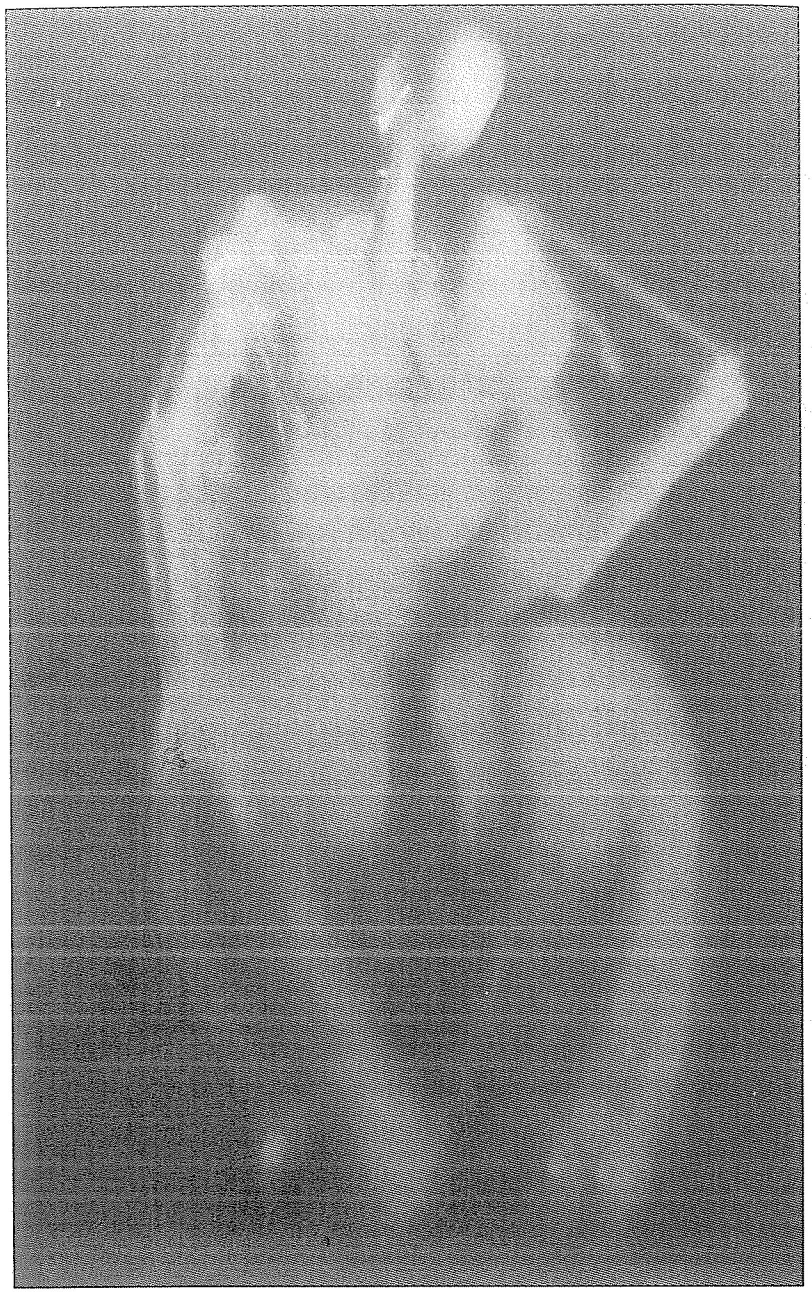


Figura 10.16. Dalí se mueve ante el obturador abierto de la cámara del fotógrafo con una esfera en la mano e inventa una figura.

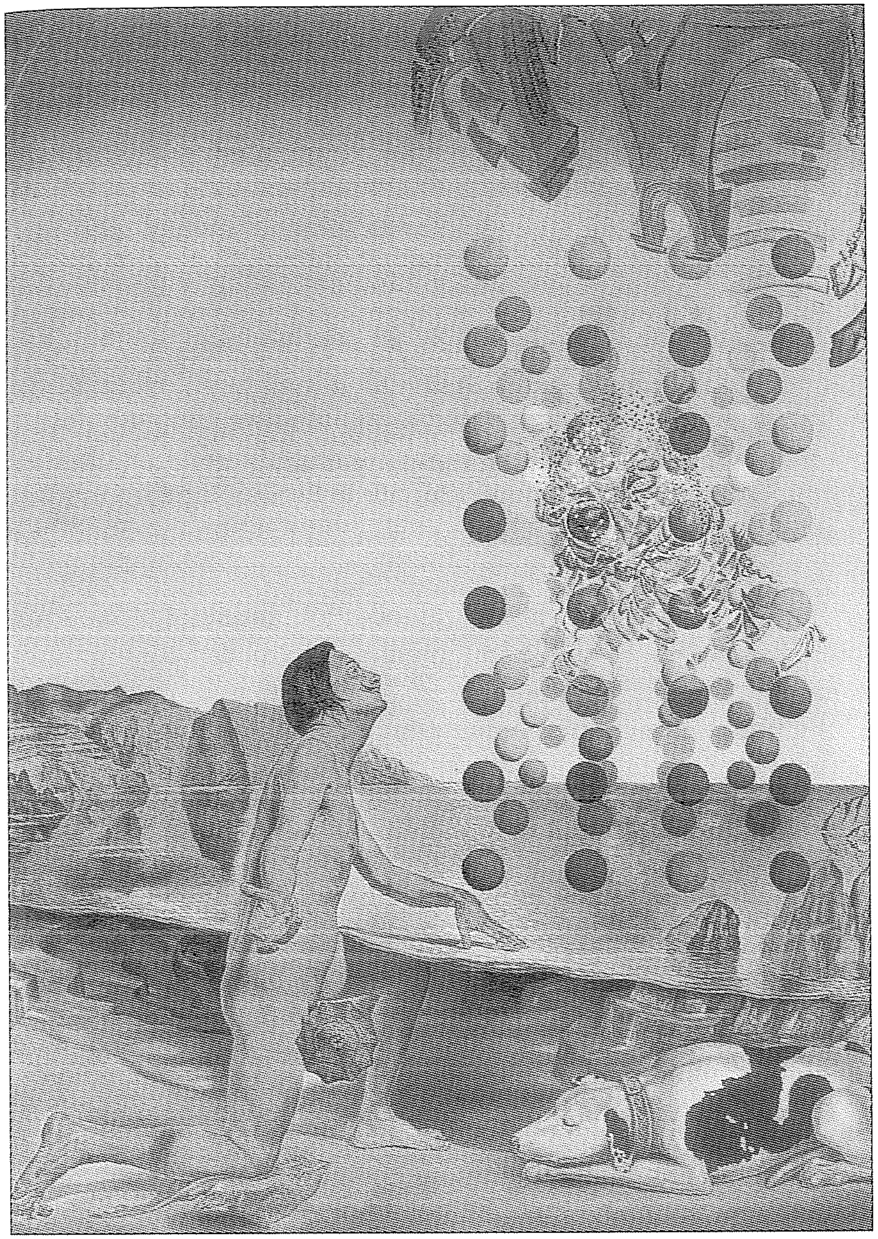


Figura 10.17. Dalí desnudo, en estado de contemplación delante de cinco cuerpos metamorfoseados en corpúsculos entre los cuales aparece, de repente, la Leda de Leonardo cromosomatizada por el rostro de Gala (1945).

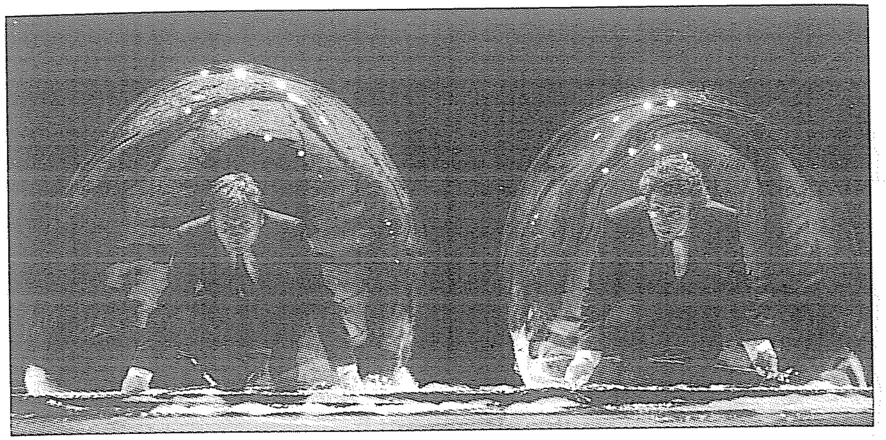


Figura 10.18. Pep Bou, el rey de las burbujas, y su colaborador Lluís Beiva, en sendas semiesferas cultas y efímeras (fotografía de Roberto Ramos).

¡Y esferas! Simplemente esferas. De todos los tamaños. De todos los materiales: cuarzo, cristal, resinas, plásticos, hierro, níquel, cobre, oro, plomo, madera, mármol...

En suma, la esfera emerge por isotropía en el mundo inerte. En el mundo vivo la esfera, sobre todo, *protege*. Y en el mundo culto *protege, rueda, genera, simboliza la perfección*... Todo eso, y no otra cosa, significa empezar a comprender la esfera.

11
El hexágono pavimenta...

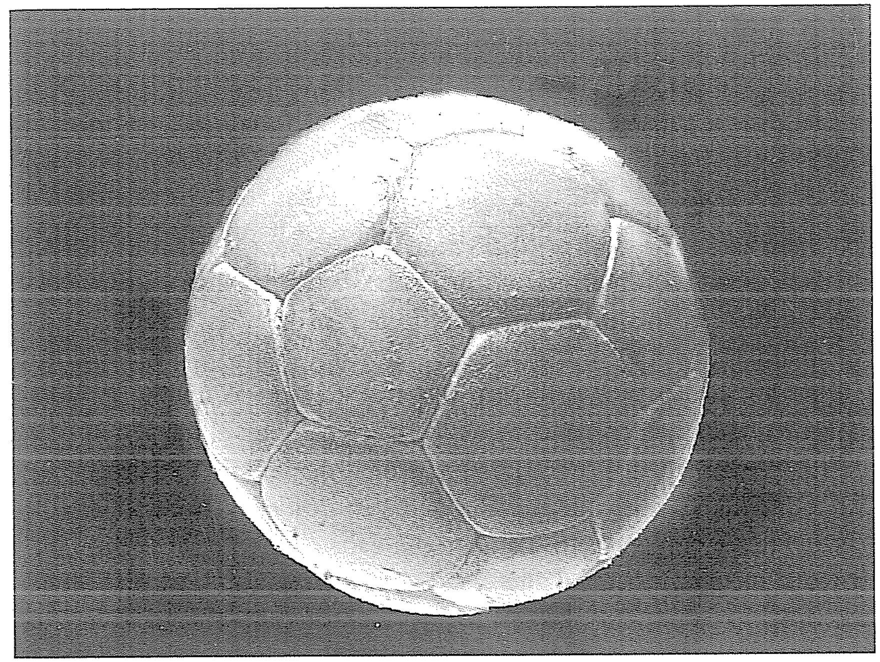


Figura 11.1. Balón de fútbol. Si el espacio disponible no es plano sino esférico, la mejor pavimentación se consigue con pentágonos rodeados de cinco hexágonos. De ahí tal vez el número cinco que surge en algunos equinodermos, como las estrellas de mar (fotografía del autor).

Acabamos de verlo. La simetría circular emerge con mucha facilidad. Esto es así porque la probabilidad es alta en ambientes uniformes e isótropos, porque tal es el caso de la nada y porque el universo está lleno de espacios llenos de nada. Esto es así también porque el agua en reposo es isótropa y uniforme y porque mucha es la cantidad de agua presente en el planeta.

Imaginemos ahora el fenómeno de la profusión de simetrías circulares restringida a un plano. Por ejemplo, las burbujas de la espuma de un detergente tienden a ser esféricas en el espacio de tres dimensiones. Sin embargo, si constreñimos una solución jabonosa entre dos vidrios planos, tendremos ante nosotros burbujas circulares de diámetro parecido compitiendo entre sí por ocupar el espacio plano disponible (figura 11.2). Una burbuja sin otras vecinas en su entorno inmediato presentará una forma de disco perfecto. Si la población de burbujas vecinas aumenta, cada disco tenderá a rodearse de hasta otros seis discos tangentes. El plano tenderá entonces a llenarse de círculos. Sólo quedarán libres unos característicos intersticios entre los puntos de tangencia. Pero atención: si la presión de la población de círculos sigue creciendo, el espacio *perdido* de los intersticios tenderá a desaparecer porque los círculos se deforman hasta que el plano queda perfectamente pavimentado con una nueva forma emergente: el hexágono.

En el experimento de las pompas planas de jabón se pueden observar todas las formas intermedias que van desde el círculo perfecto hasta el hexágono perfecto. La isotropía daba el círculo; la presión isótropa, el hexágono. La palabra clave ya ha surgido y nuestro esquema conceptual nos permite reconocerla y valorarla para afirmar solemnemente que ya hemos dado con la función fundamental: el hexágono pavimenta.

Cuando el origen del fenómeno está en una superpoblación de círculos, es fácil constatar que el hexágono pavimenta. Basta tomar un puñado de cigarrillos (o cualquier conjunto de cilindros blandos) y apretarlos suavemente los unos contra los otros. Al poco, los cilindros se habrán convertido en prismas hexagonales (figura 11.3).

En el mundo inerte se pueden encontrar bellas pavimentaciones hexagonales. La más espectacular es sin duda la llamada convección de Rayleigh-Bénard [49]. Se trata de un curioso fenómeno descrito por primera vez en 1790 por Benjamin Thomson. El longevo Henri Bénard

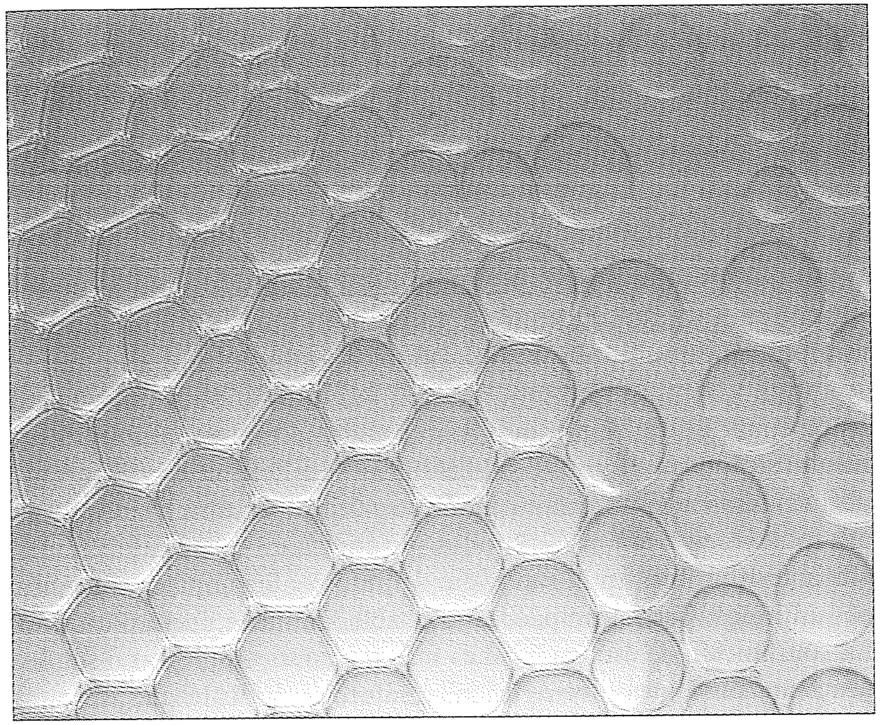


Figura 11.2. La competencia de los círculos por el espacio plano genera hexágonos. Son hexágonos por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

fue el primero en organizar una experimentación sistemática hacia finales del siglo XVIII, y el Nobel Lord Rayleigh el primero que lo explicó definitiva y convincentemente a principios del XX. Hacia los años setenta, los físicos de la termodinámica del no equilibrio lo adoptaron como ejemplo estrella de un nuevo concepto: la autoorganización de la materia (en lo que creo que es un ligero abuso de lenguaje). El interés del ejemplo reside, claro, en que se trata de un caso de autoorganización *no viva*. En realidad, se trata de una curiosa adaptación de la estructura de un líquido cuando se le calienta ligeramente por la parte inferior. El líquido del fondo se dilata al calentarse, con lo que su densidad disminuye y asciende. A medida que se acerca a la superficie libre, el líquido vuelve a enfriarse, con lo que su densidad aumenta y vuelve a hundirse. Así se crean unos rollos de circulación cuyo movi-

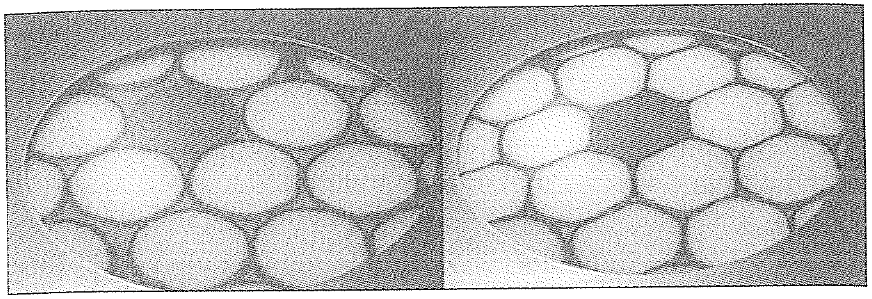


Figura 11.3. Los hexágonos invaden los intersticios que los círculos tangentes no pueden ocupar (colección MCFLC, fotografía del autor).

miento se opone a la viscosidad del líquido y a la tendencia de la conducción térmica a suavizar los gradientes de temperatura. En condiciones más o menos críticas, los rollos se aprietan en celdas hexagonales claramente visibles en la superficie del líquido. Según tales condiciones críticas, el fenómeno puede ser estable, inestable, incluso caótico. La constitución de esta realidad es más o menos compleja con sus leyes fenomenológicas (convección, conducción, turbulencias, tensión superficial, etcétera), sus fluctuaciones y sus inestabilidades. Pero cualquiera que sea el mecanismo de la nervura de esta realidad, se trata, para lo que aquí nos ocupa, de un bello ejemplo de emergencia de hexágonos por selección fundamental, cuya función es cubrir el plano, pavimentar.

Otros casos de hexágonos más imperfectos visibles en la materia inerte no se explican fácilmente a partir de una superpoblación de círculos. Es la bien conocida estructura de grietas en un terreno cuando se reseca o las figuras de luz que el sol crea en el fondo de una piscina (que tanto gustan al pintor inglés David Hockney). Otro caso muy espectacular lejanamente relacionado con los cuasihexágonos de una superficie de un paisaje seco (que una vez fue húmedo) es el paisaje de las columnas cuasihexagonales de basalto. El más bello y conocido es sin duda el de Antrim (Irlanda del Norte). Y no es el único caso. Castellfullit de la Roca es un originalísimo pueblo del Ampurdán (Girona, España) que se encarama sobre una gran roca de columnas basálticas hexagonales. En el museo tenemos, por gentileza de su Ayuntamiento, tres magníficas piezas que se desprendieron y cayeron al río (figura 11.4). Un corte perpendicular de las columnas verticales tiene, en efecto, el aspecto típico de una pavimentación muy próxima a la hexagonal. La tentación más inmediata es relacionar este caso con el de la convección de Raileigh-Bénard discutido más arriba. Un gradiente vertical de temperatura (como el que se creó en la lava del Terciario del caso irlandés cuando ésta entró en contacto con el aire) equivale quizás a un plato de aceite calentado debajo para crear las células de convección de Rayleigh-Bénard. La idea no es mala y hasta el año 2002 se podía sugerir como una posibilidad investigable. Pero en ese año apareció en *Physical Review* un modelo convincente de otro mecanismo bien distinto [50].

El proceso funciona más o menos como sigue: el enfriamiento de la lava provoca fuertes gradientes de temperatura, pero no para inducir el movimiento de partículas sino para fracturar las partes sólidas más superficiales. Estas fracturas tienden a propagarse hacia el interior del material y a formar figuras poligonales cada vez más regulares. Al final, el límite de más estabilidad corresponde a una configuración de mínima energía, la pavimentación cuasihexagonal que se observa en los paisajes de Antrim y Castellfullit. El proceso se parece mucho al caso de las grietas de desecación. Si la desecación es muy rápida, los polígonos son irregulares, como en las primeras capas de la simulación numérica de Jagla y Rojo. Sin embargo, cuando la desecación es lenta (la evaporación de un lago, por ejemplo), entonces los polígonos tienen tiempo de ir acomodándose a una situación de mínima energía. En el último capítulo, a la hora de hablar de las formas fractales, citaremos otro asombroso caso de hexágonos en la materia inerte: el de los copos de nieve. Aquí la forma última es fractal, pero lo es sobre una simetría hexagonal que también minimiza la energía. Los mecanismos de emergencia de estas estructuras hexagonales son distintos (compresión de simetrías circulares, propagación de fracturas, cristalización del agua...). Lo que tienen en común es la selección fundamental que los favorece en nombre de la estabilidad y su correspondiente función: pavimentar. He aquí la mayor inteligibilidad del, digamos, hexágono inerte. Cuesta emplear la palabra «función» para un objeto inerte, pero recordemos que en nuestro esquema conceptual hemos limpiado este término de toda connotación intencional o teleológica. Ni siquiera en el mundo vivo se puede hablar de este significado de función. Pasemos

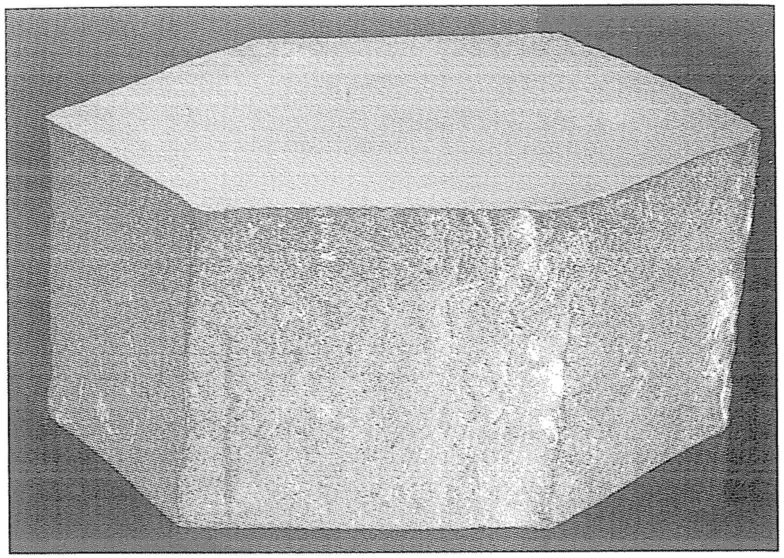


Figura 11.4. Columna hexagonal (por selección fundamental) de basalto de Castellfullit de la Roca (Girona, colección particular, fotografía del autor).

a la materia viva. Aprovechar el espacio es un concepto de alto interés en un mundo habitado por entes vivos. Por ello no es de extrañar que la función fundamental de pavimentar se sostenga muy bien como función natural.

En efecto, la naturaleza viva está trufada de hexágonos que pavimentan. Primer ejemplo: el ojo facetado de los insectos presenta una superficie pavimentada de hexágonos (figura 11.5). Nada más sencillo de explicar. El principal problema físico para fabricar un ojo consiste en que el objeto (que ver) forme una imagen en la retina del ojo del sujeto (que debe ver). Para ello, hay que conseguir que por cada rayo de luz emitido desde un punto del objeto llegue sólo un rayo a cada punto de esa especie de pantalla llamada retina. Eso es justamente lo que se consigue con el sistema de lentes de una cámara fotográfica. Sin su ayuda sería como exponer la película sensible directamente a la luz, no se formaría una imagen. El ojo de los vertebrados se basa en la misma idea de concentrar rayos con lentes. Sin embargo, los artrópodos apostaron por la solución más sencilla: el tubo. Un tubo es, en efecto, un seleccionador de rayos de luz: sólo pasan por el tubo los rayos que le

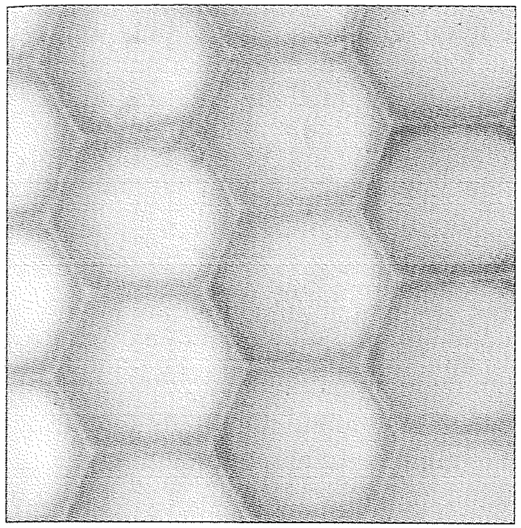


Figura 11.5. Pavimentación hexagonal del ojo de un insecto. Un hexágono significa un píxel en la imagen (colección MCFLC).

son paralelos. Pero atención: un tubo fabrica una imagen de una sola mancha de luz. Digamos, en el lenguaje actual, un tubo forma una imagen de un solo píxel. Un tubo, un píxel; dos tubos, dos píxeles; tres tubos, tres píxeles. El ojo de los artrópodos, y en particular, de los insectos, es un manojo de tubos que crean una imagen con tantos píxeles como tubos tiene el manojo. Y ya lo sabemos: cuantos más píxeles, mejor imagen.

La selección natural favorece la independencia del individuo, y en este caso esto significa la mejor imagen posible. Cuanto mejor se perciba el entorno, mejor se come y peor se es comido, menos se depende de las sorpresas que pueda deparar la incertidumbre del entorno, mejor se percibirá la posición de la partícula alimenticia por capturar, mejor se anticipará la amenaza de alguien que considere partícula alimenticia al propietario del ojo. O sea, que cuantos más tubos existan por unidad de superficie de ojo, mejor. En último término, siempre se puede dar un paso más sacrificando los intersticios de los cilindros. Así emerge algo que comparte la casi totalidad de los artrópodos (digo casi pero ni siquiera conozco una excepción): las facetas de los ojos hexagonales. Así pues, el hexágono pavimenta los ojos de los animales pluricelulares más frecuentes en la naturaleza. Son hexágonos de una perfección sublime (como se puede observar con la ayuda de una sim-

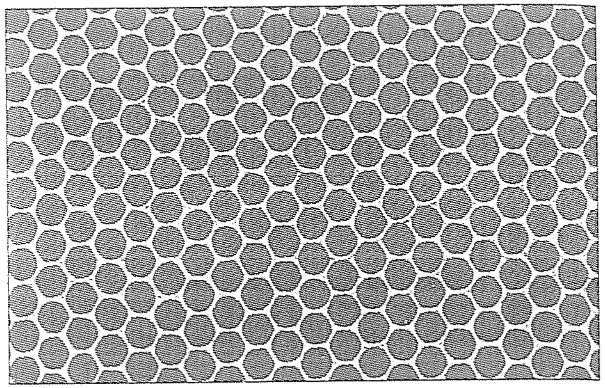


Figura 11.6. Celdas hexagonales de colmena de abejas.

ple lupa), de modo que en el caso del hexágono parece que pavimentar es tanto una función fundamental como una función natural. En efecto, el hexágono sigue pavimentando en el mundo natural incluso fuera del concepto «ojo».

Las celdas hexagonales de las abejas (avispas y otros himenópteros) son probablemente los hexágonos más conocidos de la naturaleza (figuras 11.6 y 11.7). Queda poco que comentar aquí. Estos insectos no tienen espacio que perder y mucho material (como la cera) que ahorrar a la hora de construir los presuntos cilindros originarios para alojar reservas y población inmadura. Así que ahí están los preciosos y rítmicos hexágonos. Pero en la naturaleza los hexágonos se encuentran pavimentando muchas otras superficies, sobre todo unas muy especiales y trascendentes: las que separan el interior del exterior de los indivi-

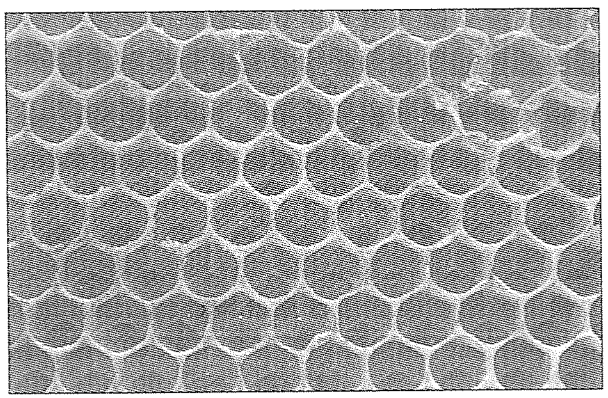


Figura 11.7. Disposición de celdas hexagonales en capas sucesivas de una colmena (fotografía de Sergio Parra).

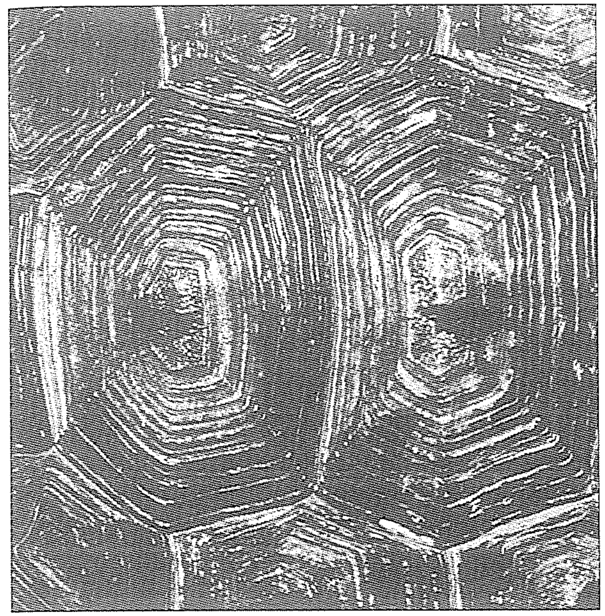


Figura 11.8. Caparazón de tortuga. Los hexágonos quizás empezaron siendo placas circulares por cuyos intersticios penetraban los dientes y las garras de los depredadores (colección MCFLC).

duos, la primera fila en contacto con la incertidumbre del medio. Son las pieles, las cortezas, los escudos, los caparazones... Obsérvense los caparazones de la mayoría de tortugas (figura 11.8): hexágonos. No son tan perfectos y homogéneos como los de un ojo facetado o un panal de abejas, pero son hexágonos. Si el origen de los hexágonos que pavimentan son placas circulares en competencia tangencial, se comprende que la selección natural favorezca la operación de eliminar los intersticios por donde podían colarse los afilados dientes de los depredadores. Pasar de un escudo de discos a un escudo de hexágonos es ganar independencia respecto de la incertidumbre de posibles depredadores. Obsérvense los caparazones de los armadillos y sus ilustres y gigantescos antecesores, los gliptodontes (figura 11.9). Obsérvense las pieles de tantos reptiles y peces. La piel del pez cofre no tiene desperdicio: no sólo presenta hexágonos sino hexágonos desconstruidos en triángulos isósceles, un caso que encontrará enseguida una sabrosa convergencia culta. Obsérvese la corteza de la celebrada piña tropical y de tantas otras cortezas vegetales. Son hexágonos que pavimentan, siempre hexágonos. Siempre pavimentando. En estos casos parece que no sólo se comparte la función natural, sino el mecanismo de comprimir simetrías circulares.