

Lynn Margulis y Dorion Sagan

¿QUÉ ES EL SEXO?



METATEMAS

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Son muchos los seres vivos que demuestran que el sexo no es necesario para la reproducción. Entonces, ¿por qué existen otros, entre los que nos incluimos, que optan por una vía, en principio, más complicada? ¿Qué hay de poderoso y misterioso en el mecanismo sexual que escapa a cualquier previsión? En *¿Qué es el sexo?* Lynn Margulis y Dorion Sagan explican cómo, para los seres que lo necesitan para reproducirse, el sexo es una parte crucial del proceso constante de transformación de energía mediante el cual, y de manera placentera, esos mismos seres vivos sobreviven y multiplican sus complejidades. Pero no sólo hay un trasfondo termodinámico que, como se nos aclara en el libro, se ha adaptado a una Tierra estacionalmente cambiante, en un universo saturado de energía. También hay que tener en cuenta que, mediante la reproducción sexual, evolucionaron los animales y comenzó la selección de pareja, de manera que los propios organismos, al escoger unos compañeros sexuales y no a otros, influyeron en su propia evolución. La búsqueda de pareja contribuyó asimismo a configurar nuevos tipos de sociedades, algunas incluso en las que el sexo ha sido suprimido, como las de las abejas.

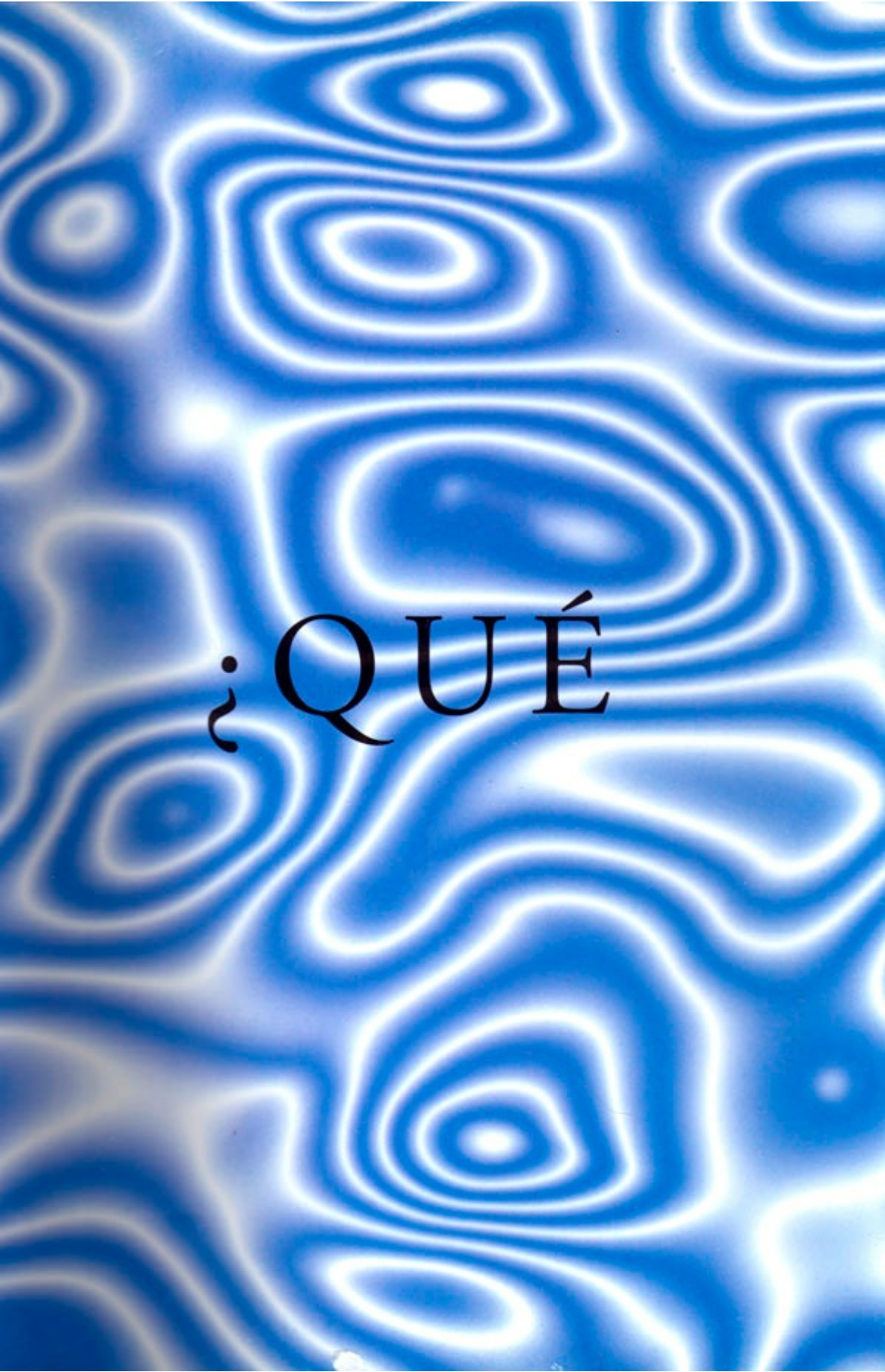
Continuación de *¿Qué es la vida?* (Metatemas 45), el libro donde Margulis y Sagan se adentraron en las bases de la vida siguiendo los pasos de Erwin Schrödinger, *¿Qué es el sexo?* es una investigación biológica y filosófica que emplea la ciencia para desenmascarar concepciones erróneas, tanto populares como científicas, y para exponer ante el lector, con la claridad que merece, la sexualidad y su historia.

Lynn Margulis & Dorion Sagan

¿Qué es el sexo?

Metatemas

Título original: *What is Sex?*
Lynn Margulis & Dorion Sagan, 1997
Traducción: Ambrosio García Leal
Diseño de portada: TaliZorah

An abstract background featuring a complex, organic pattern of blue and white. The pattern consists of numerous overlapping, concentric, and irregular shapes that resemble ripples in water or a topographical map. The colors range from deep blue to bright white, creating a high-contrast, textured effect.

¿QUÉ

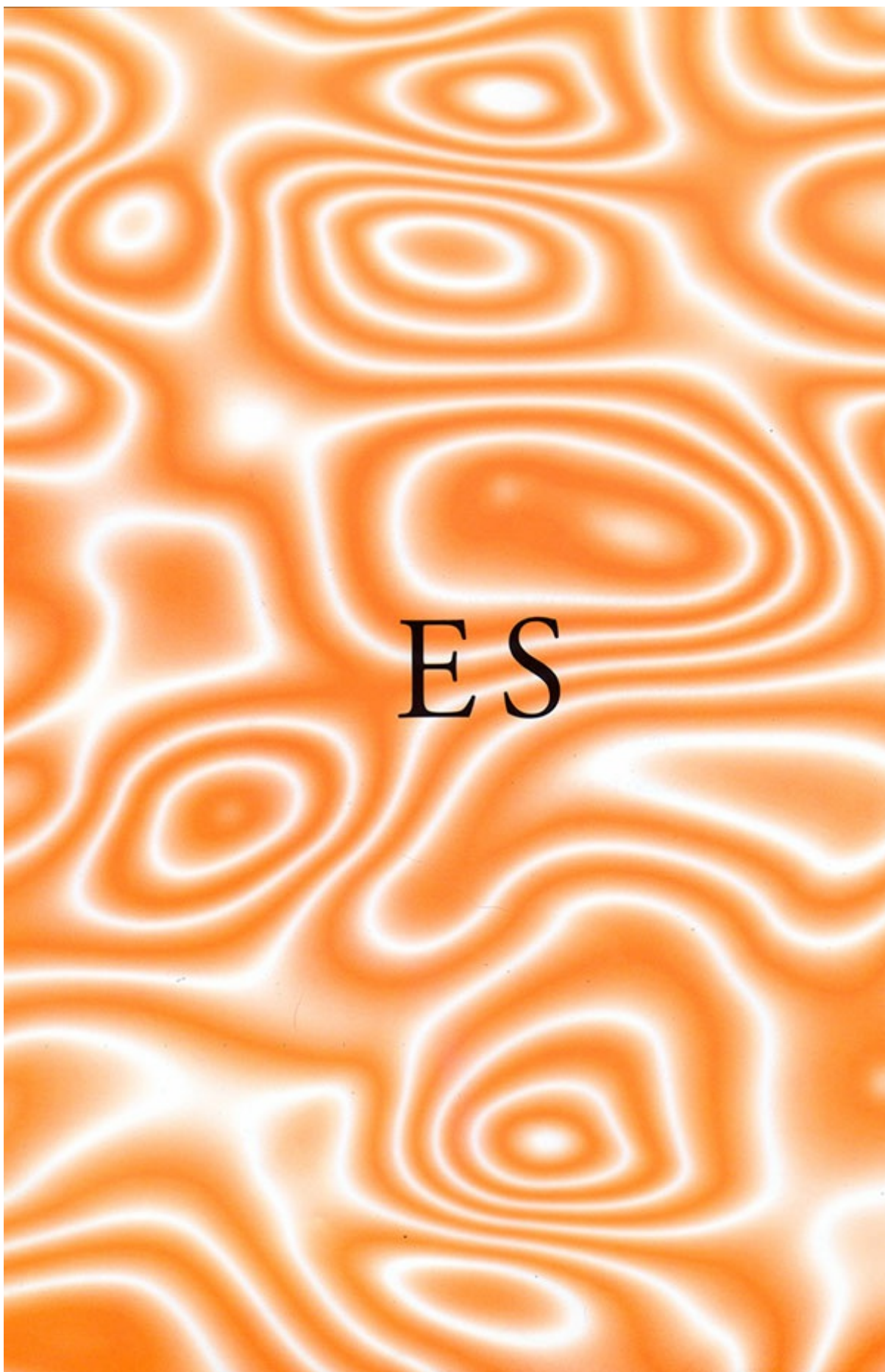
PARA EL GRAN PÚBLICO EL SEXO EQUIVALE A HOMBRES Y MUJERES
COPULANDO;

PARA LOS MÉDICOS EL SEXO ES LA CAUSA DEL SIDA;

PARA LOS MORALISTAS, CONSTREÑIDOS POR RÍGIDAS DICOTOMÍAS,
EL SEXO SIGNIFICA SÓLO DOS ALTERNATIVAS: MACHO O HEMBRA.

¿POR QUÉ EL SEXO SE COMPRENDE TAN MAL?

¿ACASO ES PORQUE NADIE CONOCE SU HISTORIA?



¿POR QUÉ NOSOTROS LOS CIENTÍFICOS IGNORAMOS LA ARITMÉTICA
BÁSICA DE LA VIDA?

EN BIOLOGÍA, $1 + 1$ NO ES IGUAL A 2.

MÁS BIEN $1 + 1 = 1$, PUES UN ESPERMATOZOIDE

MÁS UN HUEVO EQUIVALE A UN HUEVO FECUNDADO.

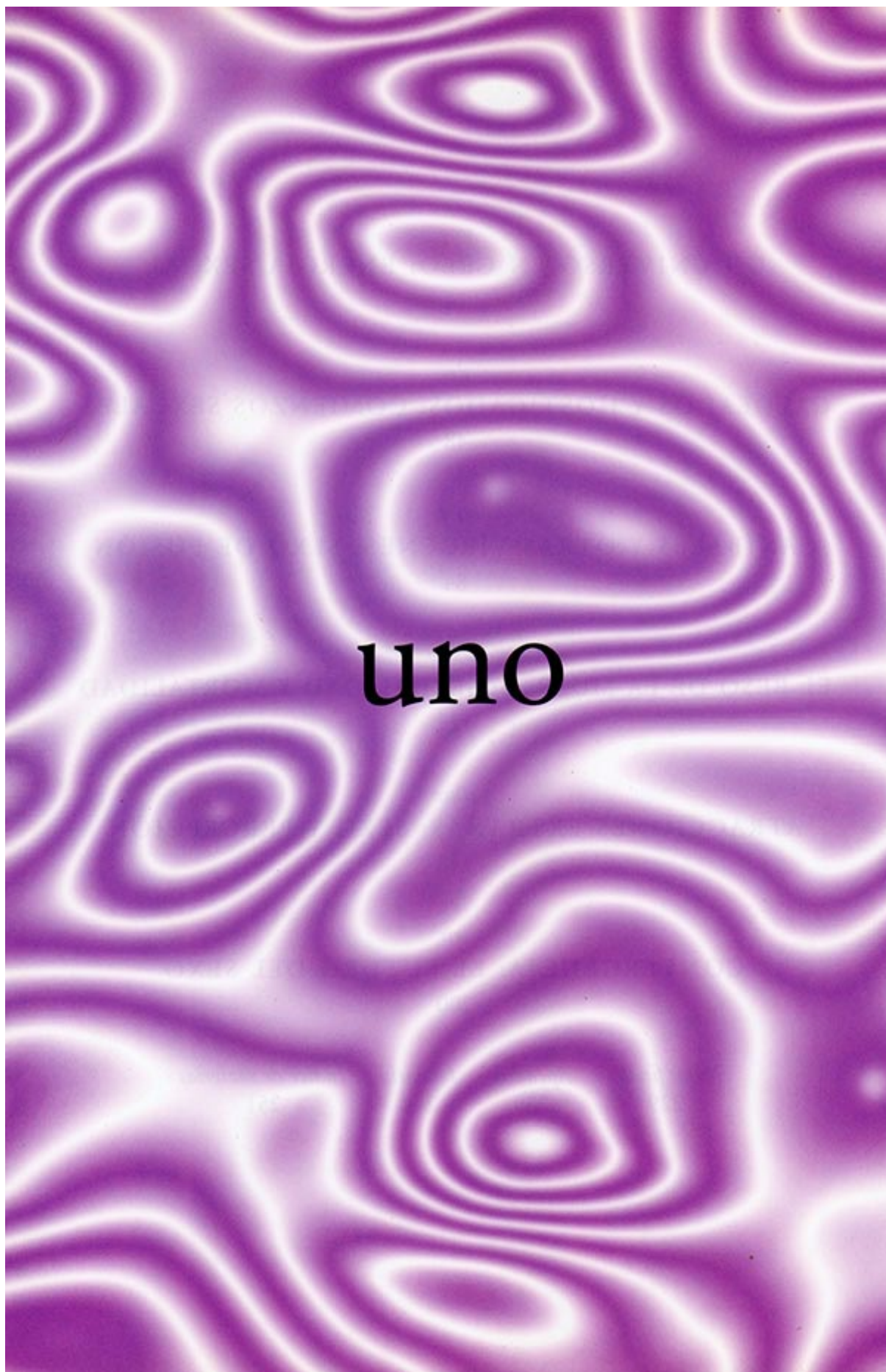
¿SERÁ POR ESO POR LO QUE ESTÁN ABOCADOS AL FRACASO NUESTROS
ESFUERZOS PARA

PREDECIR LA CONDUCTA SEXUAL MEDIANTE CAPRICHIOSOS MODELOS
INFORMÁTICOS?

The background of the slide is a full-page abstract pattern. It consists of numerous concentric, irregular white rings and lines of varying thickness, set against a vibrant green background. These lines flow and swirl across the entire frame, creating a complex, organic texture that resembles a topographical map or a microscopic view of a liquid crystal.

EL SEXO?

EL SEXO DESATA LA REBELIÓN ADOLESCENTE,
LA IRA DE LOS CELOS, LA FANTASÍA ROMÁNTICA,
APUESTAS TEMERARIAS Y NIÑOS RECIÉN NACIDOS.
¿POR QUÉ EL SEXO ES UNA FUERZA TAN PODEROSA
Y MISTERIOSA EN NUESTRAS VIDAS?



UN UNIVERSO
EN CELO:
ENERGÍA SEXUAL^[0]

Puedo resistirlo todo, excepto la tentación.

Oscar Wilde^[1]

DELEITES ETERNOS | El universo es un horno de luz estelar, saturado, consumido por el tiempo. Las cosas arden, cambian, se degradan y mueren. La vida que nuestros ancestros detectaron en cada ente animado, terrenal o celestial, es una rareza cósmica. Y lo es en el sentido más fundamental: toda forma de vida, terrestre o extraterrestre, antigua o moderna, únicamente es concebible como un fenómeno de flujo de energía, de intercambio material en un cosmos bañado por la vasta energía estelar. Las estrellas —nuestro Sol en el caso de la vida terrestre— proporcionan la energía para el funcionamiento de la vida. La operación básica de la vida consiste en atrapar, almacenar y convertir la luz estelar en energía utilizable. En la fotosíntesis se incorporan fotones para la construcción de cuerpos y la producción de alimento; son la principal fuente de energía para los dos placeres más básicos y naturales, el sexo y la comida.

La vida sensible se siente atraída por el sexo y la comida porque a base de amar y devorar se mantiene y se multiplica. No todas las especies, sin embargo, necesitan del sexo para reproducirse. En aquéllas que dependen de él, el sexo es una parte crucial del proceso de transformación de energía mediante el cual, y de forma placentera, mantienen y multiplican sus complejidades en este universo saturado de energía. Es más, la inevitabilidad de la muerte era algo ajeno a los primeros cuerpos vivos, que en origen eran inmortales. La muerte que temerosamente contemplamos como el fin de nuestra existencia individual está, como veremos, íntimamente relacionada con la evolución, hace alrededor de mil millones de años, de organismos con reproducción sexual.

A pesar de la mortalidad que recibimos en herencia por nuestra condición de criaturas que se reproducen sexualmente, el sexo es magnífico. Nos da placer y produce niños —el futuro de la humanidad—. Sin el acto sexual de nuestros padres, ninguno de nosotros estaría aquí. En virtud del sexo, cada uno de nosotros es una entidad que no sólo vive, respira y piensa, sino que constituye una mezcla única de genes provenientes de fuentes separadas; en pocas palabras, un individuo único. La evolución del sexo fue la mayor contribución a la individualidad que el mundo ha contemplado. Aunque no representa lo mismo para todos los organismos, a los animales el sexo nos liga a lugares y tiempos remotos,

pues lo requerimos para reproducirnos. La repetición química implicada en la reproducción, por su parte, satisface una función de disipación de energía y degradación material en un cosmos constreñido —desde nuestra perspectiva animal— por el flujo unidireccional del tiempo.

¿Qué es el sexo? Es algo que nos confunde no sólo porque tiene que ver literalmente con la confusión de dos seres diferentes, que se revelan así el uno al otro de la manera más profunda, sino también porque tendemos a hacer extrapolaciones erróneas acerca de la importancia de la sexualidad. Nuestra existencia biológicamente restringida como seres que se reproducen sexualmente no significa, por ejemplo, que el sexo copulatorio, genital, sea el único existente, o que el sexo esté necesariamente ligado a la reproducción. De hecho, la mayor parte de los miembros de cuatro de los cinco reinos de seres vivos no requiere del sexo para su reproducción^[2].

Al nivel más básico, el sexo es recombinación genética, la mezcla o unión de genes —esto es, moléculas de ADN— procedentes de más de una fuente, [LÁMINA 1] Cuando una molécula de ADN crea otra molécula igual que ella, los biólogos hablan de replicación. En cambio, cuando un ser vivo, como una célula o un cuerpo compuesto de células, genera otro ser vivo similar, los biólogos hablan de reproducción, [LÁMINA 2] Biológicamente, y en sentido amplio, el sexo significa simplemente la recombinación de genes de fuentes separadas para producir un nuevo individuo. Sexo no equivale a reproducción. Por un lado, cualquier organismo puede recibir nuevos genes —puede entregarse al sexo— sin reproducirse. Por otro lado, las plantas producen brotes, las bacterias se dividen y las células nucleadas se reproducen sin ninguna necesidad de sexo. Entre estos reproductores asexuados se encuentran incluso las células que constituyen nuestros cuerpos. Asociamos el sexo con la reproducción no porque estén necesaria o lógicamente ligados, sino porque quedaron ligados de manera contingente durante la evolución de nuestros ancestros animales. Como veremos en el último capítulo, la desconexión entre sexo y reproducción a través del cibersexo y la tecnología contraceptiva es una muestra de lo que nos depara el futuro.

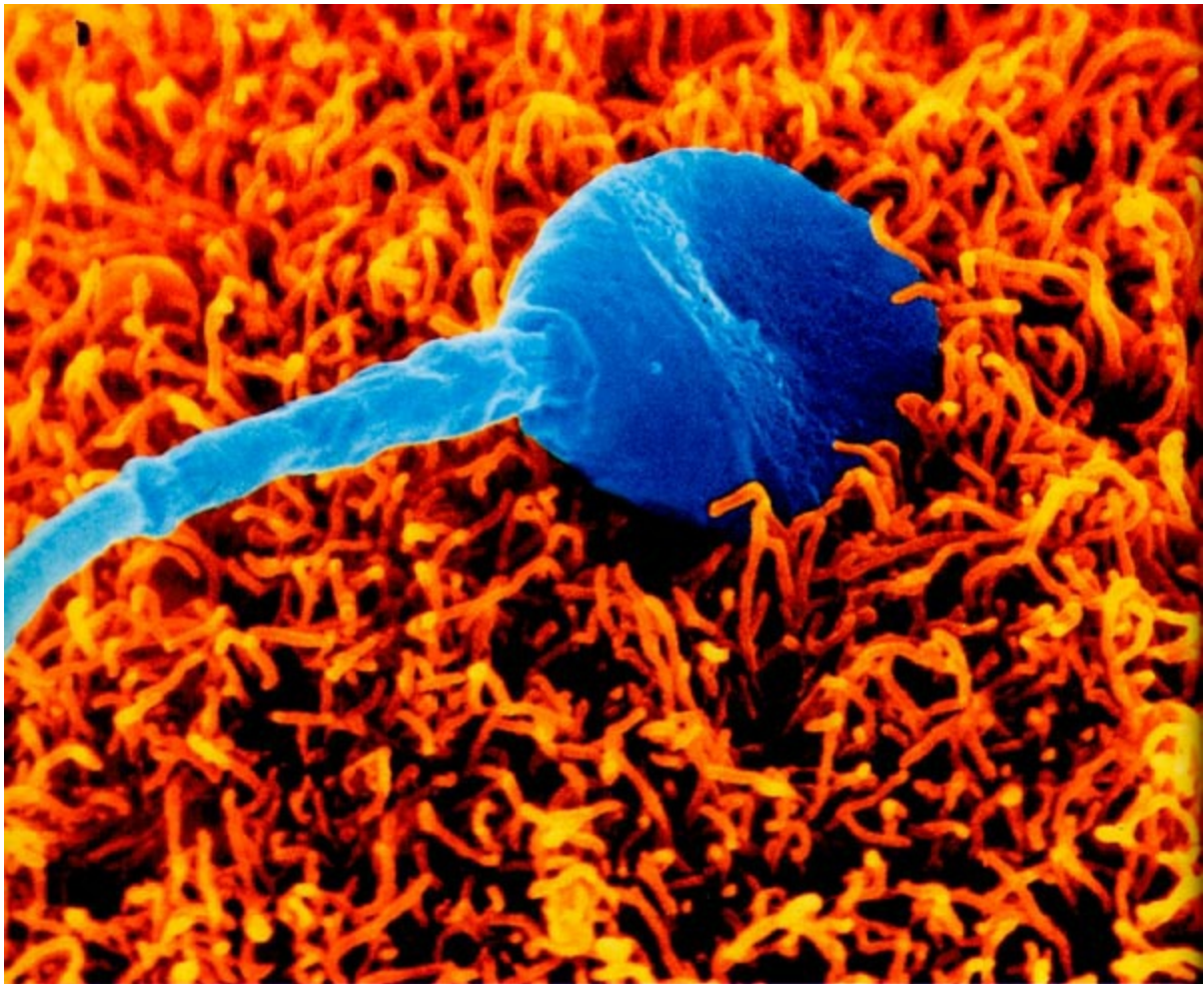


LÁMINA 1

Espermatozoide humano intentando fecundar un óvulo femenino. Micrografía electrónica de barrido coloreada.

[David Phillips/Photo Researchers]

El sexo implica la adquisición de nuevos genes, una mezcla de información genética que a veces, como en un juego de naipes, produce una combinación más eficiente —el equivalente biológico de una mano mejor—. El sexo, como se comprueba cuando nos comparamos con nuestros padres, produce variación. Sin embargo, muchos otros procesos —como la irradiación cósmica, la adquisición de virus o simbioses, o la exposición a compuestos químicos— son también fuente de variación al alterar la estructura del ADN o aportar ADN adicional. Cuando contemplamos la vida en su escenario cósmico, lo que llama la atención no es tanto la capacidad de las formas vivas de producir variación como la de

generar copias casi perfectas de sí mismas. En las especies con reproducción sexual, que suman decenas de millones, el sexo mismo es el medio para producir tales copias. Los organismos son capaces de reconocer a los miembros de su propia especie y seleccionar los del género^[3] opuesto mediante claves muy sutiles. Ya seamos machos o hembras, ya tengamos el pelo castaño, rubio o rojo, somos —desde una perspectiva cósmica— casi exactamente iguales a nuestros padres. Se reproduzcan sexualmente o no, los organismos transfieren su identidad a sus descendientes con cambios apenas reseñables.

El fuerte interés humano por el sexo está directamente relacionado con su condición de elemento fundamental en nuestra historia biológica. Nuestros ancestros han venido reproduciéndose sexualmente desde hace quizá 600 millones de años, desde el origen mismo de los animales. Para comprender nuestra pasión por el sexo tenemos que comprender su papel en la reproducción y más allá de ella. Aparte de su aspecto reproductor, el sexo es, como veremos, una manifestación de la tendencia natural a mezclar las cosas, a volverlas aleatorias, a la pérdida de la identidad discreta por la tendencia de los sistemas materiales a derivar hacia estados más probables. Pero en nosotros el sexo está íntimamente ligado a la reproducción, y como tal adopta un aspecto diferente, que tiene que ver tanto con la preservación de la identidad como con su destrucción. En última instancia, la reproducción sexual es el proceso biológico fundamental para el mantenimiento y la reproducción de la identidad.

Aunque el proceso reproductivo de generar copias vivas pueda parecer el rasgo más fundamental de la vida, de hecho es secundario. La reproducción se basa en la autopoyesis. Palabra de raíces griegas que significa «autocreación», la autopoyesis es la propiedad fundamental de los seres vivos. Conceptualmente, la reproducción —la generación de iguales— es una derivación del automantenimiento. A diferencia de los objetos inertes, los seres vivos están expuestos a flujos materiales y energéticos continuos. Empleando energía para efectuar nuestros numerosos procesos bioquímicos, las redes autopoyéticas —seres vivos— reciclan continuamente sus componentes para automantenerse. Es lo que llamamos metabolismo. La capacidad de cambiar para que nada cambie, de emplear flujos de energía para impulsar el recambio cíclico de materia

necesario para mantener un ente individual, es el truco bioquímico básico de la autopoyesis.

De acuerdo con el biólogo y filósofo Gail Fleischaker, todos los sistemas autopoyéticos comparten tres rasgos: autolimitación, autogeneración y autoperpetuación. Son autolimitados en el sentido de que están rodeados de una membrana celular, piel o cáscara que encierra el sistema a la vez que permite una continuidad energética y material con el mundo exterior. Son autogenerados porque el sistema entero, límites incluidos, es creado por él mismo. Finalmente, son sistemas que se autoperpetúan, lo que quiere decir que los sistemas autopoyéticos, aun cuando no estén creciendo o reproduciéndose, usan continuamente energía para mantener sus formas relativamente complejas. Humberto Maturana, el biólogo chileno que introdujo la noción de autopoyesis, señala que el comportamiento de un organismo vivo, como el de otros objetos naturales, está determinado. La diferencia es que el ser vivo está determinado en gran medida por sus propios procesos internos más que por cualquier fuerza externa. Una bola de billar, ese objeto paradigmático de la física clásica newtoniana, únicamente reacciona. Los seres vivos también podemos actuar, y no sólo en referencia al mundo exterior, sino también a nuestra propia identidad. Tenemos una libertad, una complejidad autorreferencial, que no se observa en los objetos inertes. Esta libertad y complejidad es el resultado de nuestra clausura autopoyética, una separación del mundo exterior que constituye un rasgo vital aún más fundamental que la comúnmente citada propiedad de la reproducción. La autopoyesis es como un restaurante próspero, mientras que el crecimiento y la reproducción son como las ampliaciones y franquicias del mismo.



LÁMINA 2

Células hijas derivadas de una división reciente, todavía unidas por un delgado filamento.

[Keith Porter/Photo Researchers]

Pero la clausura y la identidad de los sistemas vivos es parcial. Estamos conectados con el cosmos. El requisito autopoyético para la reproducción, incluida la sexual, depende decisivamente de los flujos de energía. Las islas que denominamos vida son concebibles únicamente en el contexto de un océano cósmico de transformación energética. A principios del siglo XX, el científico ruso Vladimir Vernadsky (1863-1945), divulgador del término «biosfera», describió la materia viva como un «fuego verde» que sólo podía entenderse en términos de una transformación de la energía del Sol. La energía solar, «radiante y química, en conjunción con la energía de los elementos químicos, es la fuente primaria de la creación de materia viva^[4]».

Influido por su profesor V.V. Dokuchaev, quien sugirió que el suelo era un fenómeno biológico además de geológico, Vernadsky amplió esta visión biológica de la Tierra física para abarcar por entero la capa superficial viviente del planeta. Evitando el término vida, con sus connotaciones teológicas, filosóficas e históricas, Vernadsky, un disciplinado materialista, siempre habló de materia viva. La primera guerra mundial, con su transporte de municiones, aviones y tropas, inspiró en Vernadsky la idea de que la actividad humana podía contemplarse también como un fenómeno geológico. La energía del crecimiento y la reproducción de los seres vivos, así como la de su movimiento y acción, era energía bioquímica, que en última instancia era una transmutación de la luz solar. Los combustibles fósiles, por ejemplo, fueron depositados en el periodo Carbonífero por fotosintetizadores tales como los helechos gigantes con semillas (cicadofilicales), que captaban luz solar autopoyéticamente y la convertían en materia viva basada en el carbono. Las energías de la vida, incluida la necesaria para su evolución y para la colonización de la biosfera, eran de origen solar. Aunque comunes en el universo, los átomos básicos de la materia viva —carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, nitrógeno y fósforo— adoptan sobre la superficie de

nuestro planeta una organización peculiarmente rica en energía.

Los animales, con sus complejos tejidos y órganos, y sus cuerpos inexorablemente envejecientes, evolucionaron a partir de los protoctistas, colonias de microbios con reproducción sexual. Estos evolucionaron a su vez a partir de uniones íntimas entre formas bacterianas muy diferentes. Las uniones bacterianas que, a través de los protoctistas, condujeron a los animales eran más que sexuales. Organismos muy distintos se fundieron y comenzaron a compartir un mismo cuerpo no de manera efímera, sino para siempre. Dentro de prácticamente todas las células que componen nuestros tejidos hay partes, las llamadas mitocondrias, heredadas exclusivamente de nuestra madre. Hace alrededor de dos mil millones de años, sus promiscuos ancestros, en un proceso que evoca tanto el sexo como la infección, penetraron y comenzaron a vivir dentro de células mayores. Por fortuna para la prole de tales seres, nunca se volvieron a separar, sino que se convirtieron en socios permanentes de las células de plantas, animales y protoctistas^[5].

De acuerdo con la mayoría de cosmólogos, físicos nucleares, astrónomos y científicos espaciales, el universo comenzó en una singularidad, la explosión de todo a partir de un punto inmensamente caliente e infinitamente denso hace unos 13 500 millones de años. Al cabo de un segundo, la materia originada en esta «Gran Explosión» o Big Bang se había expandido hasta la inmensa distancia de tres años luz, pero el universo era todavía demasiado caliente para que pudiese haber átomos. Al cabo de tres minutos, las partículas subatómicas se habían «enfriado» hasta mil millones de grados y abarcaban unos cuarenta años luz. Cuando los científicos observaron lo que se conoce como corrimiento hacia el rojo — el desplazamiento de la distribución de frecuencias de la luz estelar—, encontraron que aún hoy las galaxias siguen alejándose unas de otras a velocidades inmensas. El Big Bang no ha acabado. En cualquier dirección del cielo se detecta una débil radiación de microondas. Esta radiación de fondo es el «eco» distante de la gigantesca explosión que significó el comienzo de todo. Parte de los elementos más pesados que finalmente recalarían en la materia viva, como el carbono, no se formaron hasta más tarde, como resultado de una auténtica alquimia en los hornos nucleares naturales de estrellas que luego explotaron. Somos los descendientes de

bombardeos e interacciones de partículas, de uniones presexuales y de una violencia sobrehumana.

La Vía Láctea, la galaxia espiral en cuyos remotos confines reside nuestro sistema solar, suministró los detritos cósmicos, el material nebuloso a partir del cual se agregaron gravitatoriamente las partículas que iban a constituir el Sol. El hidrógeno, el elemento más abundante en el universo, proporcionó la materia prima para la poderosa reacción de fusión nuclear cuya cegadora radiación —la luz solar— han venerado tantas culturas humanas. De haber sido sólo un poco mayor, la enorme masa de hidrógeno del planeta Júpiter —el más masivo de nuestro sistema solar— se habría convertido en un segundo sol, dando lugar a un sistema solar binario. La Tierra, aún en estado de fusión, se formó en órbita alrededor del Sol hace unos 5000 millones de años. Las rocas sólidas más antiguas conocidas en el sistema solar —procedentes de cometas, meteoritos y la Luna— tienen unos 4600 millones de años de edad. El pensamiento astronómico vigente sugiere que la propia Luna se originó de un fragmento desprendido de la Tierra a consecuencia de un poderoso impacto. Las evidencias de la genética, los fósiles y la morfología comparada sugieren con fuerza que la vida evolucionó poco después de que la superficie de la Tierra se enfriara para formar una corteza sólida. El hidrógeno gaseoso tiende a escapar al espacio en razón de su leve peso, pero la vida ha impedido en parte su vuelo. Mediante el reciclado autopoyético y reproductivo la Tierra ha preservado un medio ambiente rico en hidrógeno —un lugar que bulle de cuerpos—. Nuestro planeta acuoso con su superficie cargada de carbono, fósforo y azufre es único en el sistema solar. Nuestra Tierra viviente comenzó a diverger claramente de sus planetas vecinos hace unos cuatro mil millones de años, cuando apareció la vida.

En la actualidad, el contexto cósmico del origen de la vida continúa ejerciendo una poderosa influencia sobre nuestra existencia, incluyendo nuestras vidas sexuales. La melatonina, una hormona implicada en la cronología de la procreación, desencadena el celo estacional en muchos animales, nosotros incluidos. La libera la glándula pineal del cerebro, estimulada por la luz solar. El gruñón del Pacífico se aparea en la orilla a la luz de la luna llena de primavera. Aunque la astrología sea una

insensatez, los movimientos planetarios y lunares, los ciclos estacionales, y en especial la radiación solar, continúan marcando e influenciando las vidas de los organismos sobre la superficie terrestre. Los estudiosos de la ritmicidad biológica distinguen entre ritmos exógenos (desencadenados por estímulos externos) y ritmos endógenos (desencadenados internamente). Con el tiempo, a medida que los seres vivos se han ido independizando del medio ambiente en el que evolucionaron, los ritmos naturales desencadenados por circunstancias externas se han interiorizado convirtiéndose en relojes biológicos.

Todos nosotros nos desenvolvemos en un omnipresente, si bien ignorado, contexto cósmico. *Gonyaulax*, un protoctista luminiscente estudiado por J. Woodie Hastings, un experto en ritmos diarios (circadianos) de la Universidad de Harvard, fosforesce en la oscuridad cada noche como un reloj. Aunque se lo aisle en un laboratorio para privarlo de indicios externos obvios como la puesta y la salida del sol, *Gonyaulax* se acuerda de fosforescer. Con toda la lúdica lucubración de un prodigio musical, la materia viva ha tendido, a lo largo de sus más de cuatro mil millones de años de evolución, a remodelar los ritmos marcados por el exterior cósmico para interiorizarlos en relojes propios cada vez más independientes. Una ritmicidad genética profunda genera los cambios de la pubertad, anuncia las urgencias y defensas de la maternidad, y desencadena los cambios de la menopausia. La morbilidad de la puesta del sol y la cobertura de la noche predisponen a los seres sexuales cíclicos que somos para la música, la danza y el jolgorio —preludios del apareamiento en tantas culturas—. El tema de la materia viva que interioriza, con variación creciente, el carácter cíclico de su entorno cósmico se aplica también al ritmo del amor sexual como permutación de la música primordial del universo.

La musicalidad nos retrotrae a la importancia de la energía para la comprensión de la vida y el sexo. Aunque ni con mucho tan divulgada como la teoría del caos, los fractales, las redes booleanas y otros modelos matemáticos y simulaciones informáticas de patrones complejos, la ciencia de los flujos de energía —la termodinámica— nos proporciona una perspectiva teórica en desarrollo junto con ejemplos fascinantes de complejidad emergente. Es más, las estructuras complejas estudiadas por

la termodinámica no son dibujos en la pantalla de una computadora programada, sino estructuras tridimensionales reales que surgen de forma natural en el mundo físico de la realidad cotidiana.

Dado que las ciencias de la complejidad pretenden, por encima de todo, modelar la emergencia y evolución de la vida y la inteligencia, parecería que los patrones de flujo estudiados por la termodinámica debieran merecer mayor atención. En efecto, mientras la cuasiparanoica visión del origen de la vida a partir de un programa informático podría aceptarse como divertimento entre las páginas de una novela de ciencia ficción, el origen de la vida a partir de estructuras termodinámicas fluidas está virtualmente asegurado. Cierta número de observaciones y experimentos apoya la idea de que los flujos de energía pueden, como veremos, organizar estructuras más complejas que el medio circundante. Por ejemplo, cuando se calienta por debajo un plato con agua o aceite de silicona aparecen de manera espontánea formas fluidas hexagonales mantenidas por corrientes de convección, denominadas células de Bénard. **[LÁMINA 3]** Dichas formas emergen por sí solas de entre el desorden circundante, se autoorganizan. Esta belleza pauta es lo último que esperaríamos que surgiese de un cúmulo de colisiones aleatorias entre átomos. La mera existencia de redes de carácter autopoyético que conservan su identidad a pesar de (o, más bien, por causa de) la energía que fluye a través de ellas y alimenta su complejidad, merece la mayor atención de los científicos. Las estructuras termodinámicas, sistemas tridimensionales que hacen circular sustancias químicas y energía a través de ellos para perpetuar su complejidad, no se restringen a la vida. La vida no es más que un ejemplo de una clase más amplia de estructuras fluidas energético-materiales que generan una ciclicidad compleja. Pero para nosotros, seres vivos, la vida es el ejemplo más interesante de estas estructuras de complejidad creciente que se auto-organizan debido, en parte, a la energía que fluye a través de ellas.



LÁMINA 3

Células convectivas de Bénard surgidas espontáneamente por influjo de energía calorífica.

[Scott Camazine/Photo Researchers]

FLUJOS SENSUALES | El conocimiento científico de las permutaciones de la energía (descontando unas pocas generalizaciones atinadas, como el «todo fluye» del filósofo griego Heráclito) comenzó en rigor con el desarrollo de la termodinámica en el siglo XIX. Son de notar algunas líneas de pensamiento históricas que condujeron al estudio moderno del flujo calorífico. En el siglo XVI, Galileo inventó el primer termómetro conocido, y en el siguiente el químico inglés Robert Boyle (1627-1691) fue el primero en aislar gases y experimentar con ellos. Boyle demostró que el aire era compresible, lo que de hecho indicaba que estaba compuesto de partículas con espacio entre ellas. En su libro *The Skeptical Chemist* (1661), que representa el tránsito de la alquimia a la química, demostró que el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión y la temperatura (ley de Boyle). Boyle sabía que las partículas de gas no pueden ser estudiadas de forma individual. Sin embargo, su comportamiento puede predecirse aplicando métodos de muestreo estadístico. La consideración de los gases como agregados de partículas más que como partículas individuales supuso una ruptura conceptual con el estricto determinismo de la dinámica newtoniana.

El físico francés Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832), buscando la forma de mejorar el rendimiento de la máquina de vapor, encontró que la máxima eficiencia dependía de la diferencia de temperatura dentro del mecanismo. Fue el primero en cuantificar la relación entre calor y trabajo, por lo cual se le considera el fundador de la termodinámica moderna. Sus descubrimientos de que la energía se conserva pero, por otra parte, es imposible convertir todo el calor en trabajo, siguen estando entre los enunciados más claros de lo que ahora conocemos como las leyes Primera y Segunda de la Termodinámica.

La Primera Ley tiene que ver con la cantidad: en un sistema cerrado, la

cantidad total de energía, con independencia de sus transformaciones, permanecerá inmutable. La Segunda Ley, en cambio, concierne a la calidad: en un sistema cerrado es inevitable que se pierda energía de alta calidad en forma de calor de fricción. La constatación por Carnot de la erosión irremisible de la calidad de la energía hizo ver por vez primera a la humanidad, desde dentro de la ciencia, que el universo no es simétrico en lo que al tiempo se refiere. Los procesos complejos, incluidos los de la vida, tienen tendencias y direcciones. Como veremos, tras la tendencia evolutiva hacia la complejidad, incluyendo el amor sexual humano con sus millones de años de historia, subyace probablemente la asimetría temporal de base termodinámica.

Aunque hoy sabemos que estaba equivocado, Carnot creía que el calor era un fluido invisible, cuyo movimiento «cuesta abajo» de lo caliente a lo frío —como un salto de agua que hace girar una noria— era la fuente de energía. Como muchos químicos de la época, Carnot tomó prestada esta idea del químico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), quien demostró que el aire estaba compuesto en su mayor parte por dos gases distintos, oxígeno combustible y nitrógeno no combustible. Las mediciones precisas de estos dos gases marcaron el nacimiento de la química moderna. También el científico escocés James Black trató el calor como un fluido invisible, el «calórico». Su término «caloría», la cantidad necesaria para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua, está todavía en uso, aunque su concepción del calor ha sido reemplazada por la tesis moderna que lo explica como resultado del movimiento de los átomos.

Un famoso experimento mental representa el paso de la antigua concepción determinista del calor como sustancia fluyente a la concepción moderna del calor como resultado de interacciones atómicas probabilísticas —lo que se conoce como mecánica estadística—. En 1871, el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) sugirió que un diminuto demonio que montara guardia en una puerta entre dos compartimientos a la misma temperatura podría elevar la temperatura de un lado dejando pasar sólo las partículas más rápidas del otro lado. Así pues, no era verdad que el calor era una sustancia que sólo podía fluir de un cuerpo caliente a uno frío. En determinadas circunstancias sería

teóricamente posible —aunque altamente improbable— que un cuerpo frío adosado a otro caliente se enfriase aún más. Incluso antes de la mecánica cuántica, la termodinámica echaba por tierra el edificio del determinismo newtoniano, sustituyendo inevitabilidad por probabilidad.

En el mismo siglo, Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) demostró que la presión de un gas aumenta (o disminuye) a razón de $1/273$ de su valor inicial por cada grado centígrado de más (o de menos). La teoría predice, pues, que a -273°C (esto es, en el «cero absoluto») toda acción molecular debe cesar mientras el gas se comprime hasta un volumen cero. De todas formas, esta extrapolación —recogida después en la Tercera Ley de la Termodinámica— nunca ha sido verificada experimentalmente, debido a las dificultades técnicas que plantea la consecución de una temperatura tan baja.

La termodinámica clásica o del equilibrio (desde las primeras observaciones del flujo calorífico a la mecánica estadística de los átomos, de carácter probabilístico) estudiaba sistemas cerrados al flujo de energía. El físico alemán Rudolf Clausius (1822-1888) introdujo el término «entropía» como una medida de la conversión unidireccional de energía en calor y fricción dentro de un sistema cerrado. Más tarde, el físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), inspirándose parcialmente en la mecánica estadística de Maxwell, explicó la naturaleza unidireccional de esta conversión al demostrar que en la distribución de las partículas de un gas repartido entre dos cámaras había muchos más estados desordenados (esto es, una mezcla de partículas en diversos estados) que ordenados (es decir, una mezcla de partículas en un número limitado de estados). En otras palabras, había muchas más maneras de repartir equitativamente las partículas que de manera desigual. La probabilidad estaba del lado del desorden, la mezcla y la disipación. La famosa Segunda Ley de la Termodinámica, la Parca de la naturaleza, establece que el desorden (la entropía) de cualquier sistema cerrado debe aumentar. El estado probable de las partículas es uno en el que su energía, difuminada, tiene pocos usos. El calor, por ejemplo, es inservible en relación a la energía solar que lo genera.

Incluso esta visión termodinámica clásica tiene sus críticos. Huw Price, un filósofo australiano versado en física, argumenta que la concepción

asimétrica del tiempo, inherente a la termodinámica, es inconsistente con la mecánica clásica newtoniana y habría que abandonarla. Price señala que la probabilidad de estados futuros de desorden está —desde la perspectiva de la simetría temporal de la física clásica— igualada por la probabilidad de desorden en el pasado. Según una versión popular de la cosmología moderna (el modelo del universo «inflacionario»), la distribución de la materia poco después del Big Bang era extremadamente uniforme (ordenada). Pero, de acuerdo con las teorías sobre la forma en que la fuerza de gravedad actúa sobre la materia (como, por ejemplo, en los colapsos estelares conocidos como agujeros negros), el estado más probable para el universo primordial habría sido mucho más «aglomerado» (desordenado). Si la distribución de la materia en el universo primordial era uniforme, como sugiere el fondo de microondas, ¿qué le permitió exhibir tan gran improbabilidad? Si Price está en lo cierto y las leyes de la física son simétricas con respecto al tiempo, el cosmos debería hacerse más probable y desordenado con independencia de en qué sentido nos movamos.

No obstante, nacemos, nos reproducimos sexualmente y morimos, y no al revés. Es difícil, si no imposible, concebir la evolución, por no hablar de la vida diaria, sin una dirección temporal. El debate es muy antiguo, como lo atestigua la diferencia entre las visiones de dos filósofos presocráticos, Heráclito (hacia 540-475 a. C.), quien sostenía que todo cambia, y Parménides (hacia 515-450 a. C.), quien pensaba que el ser y la razón eran reales, mientras que el acto de la transformación, percibido por nuestros sentidos, era una ilusión. Zenón, cuyas paradojas demostraban lógicamente que el movimiento no existe, fue discípulo de Parménides. También Platón, que dedicó uno de sus diálogos a Parménides, sostuvo que la realidad última es eterna, mientras que el cambio, tal como lo percibimos aquí en la Tierra, es una sombra imperfecta del reino intemporal de las ideas. Pero estas críticas de la asimetría temporal no parecen aplicarse al mundo real de la vida, donde la termodinámica del no equilibrio nos ofrece un telón de fondo teórico más extenso.

Entre la termodinámica clásica y la termodinámica del no equilibrio hay dos grandes diferencias. La primera es que la termodinámica clásica estudia estructuras de complejidad decreciente (máquinas que pierden la

capacidad de realizar trabajo), mientras que la termodinámica del no equilibrio estudia entidades —seres vivos incluidos— que incrementan su complejidad y ganan capacidad de trabajo. La segunda diferencia, relacionada de manera fundamental con la primera, es que la termodinámica clásica trata de sistemas cerrados y aislados, mientras que la termodinámica del no equilibrio se centra en los sistemas abiertos. Los sistemas cerrados no admiten la entrada de materia. Los sistemas abiertos, por el contrario, son atravesados por un flujo material. Un cuerpo vivo, por tomar un ejemplo básico, incorpora materia en forma de alimento, líquido y aire, y, tras las transformaciones pertinentes, excreta residuos. Como ha dicho el ecólogo Eugene Odum, de la Universidad de Georgia, en los sistemas abiertos (él se refería a la vida) «la materia circula, la energía se disipa^[6]».

Con excepción de los meteoritos que nos llegan, el sistema complejo de la vida terrestre —la biosfera— es un sistema cerrado: en él entra la radiación solar y los rayos cósmicos, pero en general no entra materia. Los organismos individuales, en cambio, están abiertos tanto a la energía como a la materia. Las funciones vitales más básicas —la alimentación, la respiración, la excreción, el sexo— son la expresión de nuestra condición de sistemas termodinámicos abiertos. Probablemente no es casual que los placeres más naturales (como penetrar, tener un orgasmo, estornudar, beber, comer, defecar, orinar, tomar el sol, sudar, y hasta placeres estéticos como la música, asociada a la entrada de sonido por el oído, o la visión, resultado de la danza de ondas luminosas a través de los agujeros negros de nuestras pupilas para crear impresiones visuales en nuestras retinas) tiendan a implicar orificios y flujos. El individuo lo es en razón de su clausura informacional (nos vemos y nos referimos a nosotros mismos como entidades discretas). Nos ponemos un nombre y luego lo decoramos con números de identificación y títulos (doctor, ministro, abogado, catedrático, etc.) para expresar nuestra relativa independencia y separación de los demás. El carácter individualista norteamericano tiende a exacerbar esta clausura, pero al hacerlo así obstaculiza nuestra percepción de la realidad biológica básica de que somos sistemas abiertos cuya existencia misma depende del flujo de energía y materia a través nuestro. Es más, en cuanto a nuestra actividad sexual, no sólo somos sistemas abiertos desde el

punto de vista termodinámico, también lo somos en lo que respecta a la información: nuestra existencia depende de la combinación de ADN de un progenitor-fuente con ADN de otro progenitor-fuente (aunque esto no sea algo extensible a todos los organismos). Así pues, no sólo somos sistemas energéticos y materialmente abiertos, también lo somos desde el punto de vista informacional. Para asegurar nuestra continuidad evolutiva damos entrada a genes frescos.

Además de los sistemas abiertos y cerrados, la termodinámica considera también sistemas aislados. Un sistema aislado es un sistema cerrado tanto al flujo material como energético. Sin una fuente de energía con la que trabajar, estos sistemas llamados adiabáticos, en los que se basa buena parte de la termodinámica clásica, tienden a un estado de reposo final. La extrapolación de la tendencia de los sistemas aislados a «apagarse» condujo a la noción de la muerte térmica del universo: la idea de que en un futuro lejano todas las estrellas se habrán consumido y el universo entero se habrá convertido en una extensión muerta y aburrida con una temperatura uniforme. Pero, como ha señalado el astrofísico Freeman Dyson, esta conclusión es cosmológicamente prematura. Las estrellas mismas están lejos del equilibrio termodinámico, a pesar de 15 000 millones de años de evolución cósmica. Lo que llamamos universo quizá forme parte a su vez de un sistema abierto más amplio. La evidencia necesaria para extrapolar nuestro destino cósmico sigue siendo incompleta.

La termodinámica del no equilibrio fue la primera ciencia de la complejidad. Una figura clave en el desarrollo de esta disciplina es el químico rusobelga Ilya Prigogine, quien recibió el Premio Nobel por su descripción matemática del comportamiento de las células de convección térmica, los relojes químicos y otros sistemas no vivos que de forma natural generan complejidad, y que él reunió bajo la denominación de «estructuras disipativas». Como ha señalado Prigogine, estos sistemas exhiben una suerte de memoria. La forma definitiva que adoptan depende fuertemente de las condiciones iniciales. En esto se parecen a los sistemas disipativos de la vida. Pero la «longevidad» de las estructuras disipativas de Prigogine, medida en horas, es un relámpago fugaz en comparación con la de las células bacterianas, los protoctistas sexuales y los cuerpos animales, todos ellos integrantes de un sistema disipativo único cuyos

ciclos han persistido de manera ininterrumpida durante más de 3500 millones de años: la biosfera.

La entropía de los sistemas abiertos como los que constituyen la vida es notoriamente difícil de medir. Se sabe, sin embargo, que tras las estructuras disipativas de Prigogine subyace la tendencia del tiempo a exhibir una dirección. Puede que el destino del universo sea languidecer hasta la estasis (la asimetría temporal formalizada en la Segunda Ley), pero, paradójicamente, en el proceso es capaz de producir estructuras de complejidad creciente y no decreciente. En efecto, allí donde fluye la energía acaban emergiendo espontáneamente estructuras con un sorprendente grado de orden. En última instancia, sin embargo, estas estructuras funcionan produciendo desorden y por lo tanto acatan la Segunda Ley. La manifiesta facilidad con que podemos quemar un libro, embarullar una habitación o desordenar un rompecabezas en contraste con las tareas de escribir, construir o componer nos recuerda que incluso la creación de orden genera desorden. Esto resulta obvio cuando se considera la cantidad de basura y contaminación, de desperdicios y excrementos, que deja el animal medio —por no decir la civilización industrial— tras su estela. El orden local, como subraya Prigogine, produce necesariamente un desorden exterior adicional. Ningún proceso, ni siquiera la vida, está eximido de la Segunda Ley.

Harold Morowitz, director del nuevo programa de Historia de la Conciencia en la Universidad George Mason, explica así la Segunda Ley:

La tendencia de la energía a distribuirse aleatoriamente entre las moléculas de manera cinética es la base de la famosa Segunda Ley de la Termodinámica. Hay casi tantos enunciados de esta ley como especialistas en el tema, pero todos transmiten la idea de que en un sistema aislado la entropía aumentará. Así, el calor fluye de los cuerpos más calientes a los más fríos, y las moléculas se difunden de las concentraciones mayores a las menores. Un sistema que evoluciona hacia el equilibrio adopta el estado molecular más desordenado consistente con las condiciones a las que está sometido. En el equilibrio todo es completamente homogéneo y nada interesante puede suceder^[7].

Con su énfasis en el incremento del desorden, la Segunda Ley^[8] parece contradecir la evolución de la complejidad en la materia viva, pero de hecho proporciona una explicación más profunda del comportamiento de

la vida. La complejidad de la vida está compensada por una tendencia igual, si no mayor, a producir desorden —calor y entropía— en torno a ella. El sexo, una parte cada vez más íntima de los procesos en virtud de los cuales la materia viva se perpetúa a sí misma, tiene una relación dual con el incremento del desorden impuesto por la Segunda Ley. Por un lado, para muchos organismos, incluyendo nuestra especie y otras especies animales familiares, el sexo se ha convertido en una faceta obligada de la reproducción. Al producir el orden de las copias vivas, creando materia viva autosimilar, la reproducción sexual acelera la producción de desorden, porque la compleja organización de un ser vivo se paga, inevitablemente, exportando más desorden. Por otro lado, la producción de materia viva autosimilar en un universo abocado al desorden nunca será perfecta. El sexo, implantado en la reproducción animal, ejemplifica la tendencia natural de todos los procesos de copia a ser imperfectos. El sexo, por lo tanto, perturba tanto como protege la integridad de la materia viva, y hace ambas cosas de acuerdo con la Segunda Ley de la termodinámica, un principio que no sólo gobierna la materia, viva y no viva, sino que nos ayuda a explicar por qué existe la materia viva y por qué se comporta como lo hace.

LA PARADOJA DE SCHRÖDINGER | Si la Segunda Ley de la Termodinámica nos dice que existe un incremento universal del desorden, ¿por qué la evolución de la vida —con su igualmente impresionante incremento general del orden— parece violar este principio? Esta paradoja, planteada en 1943 por el científico austríaco Erwin Schrödinger en sus conferencias del Trinity College de Dublín, atrajo la atención hacia la biología como problema físico. Mucho se ha hecho a partir de su inferencia de que alguna molécula informacional debía ser responsable de la herencia. Schrödinger dedujo que la vida actuaba como un cristal aperiódico^[9]. Sus escritos inspiraron la búsqueda de la base material de la herencia. Diez años después de la publicación del libro de Schrödinger, James D. Watson y Francis Crick anunciaron su descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN. La identificación de la molécula capaz de autorreplicarse permitió a otros demostrar cómo el ADN, en

combinación con ARN y proteínas, dirigía el mantenimiento, el crecimiento y la reproducción celulares. Pero un problema igualmente serio, el de la potencial aproximación entre la biología y la física, permaneció sin resolver: ¿cómo se las arreglan los organismos para resistir la degradación termodinámica? Schrödinger conjeturó que, de algún modo, los seres vivos deben concentrar un flujo de orden sobre sí mismos, para el cual propuso el estrafalario término «neguentropía».

En la mecánica clásica newtoniana el tiempo no tiene dirección. Las ecuaciones que describen los movimientos de unas bolas de billar que rebotan son igualmente aptas para describir el movimiento inverso de las bolas tal como se vería en una película proyectada marcha atrás^[10]. Sin embargo, en nuestra experiencia de la vida real el tiempo transcurre en un solo sentido, del pasado al futuro. Los coches se deprecian, la gente envejece y las flores brotan y se secan cada primavera: en el mundo real el tiempo tiene dirección. La leche que echamos en el café forma nubes que se difunden dando una mezcla color beige. El café se enfría, nunca se calienta por sí solo; tampoco los componentes mezclados, café negro y leche blanca, se segregan espontáneamente. Una cerilla se enciende y un humo sulfúreo se disipa ondeante por la habitación. Sólo en una película proyectada marcha atrás veríamos humo convergiendo misteriosamente sobre una cabeza de cerilla, leche derramada volviendo a la jarra, o una botella de champán rota recomponiéndose perfectamente en el aire mientras viaja en contra de la gravedad hacia la mano extendida de la camarera. Estas improbabilidades milagrosas ponen de manifiesto precisamente el flujo de orden que Schrödinger percibió en la vida operando hacia delante en el tiempo, y sobre el que reclamó la atención de sus colegas científicos.

El propio Schrödinger sugirió una primera respuesta, que venía dada por la forma en que planteó la cuestión. La vida construye sus células, cuerpos y cerebros empleando el ADN como plano o plantilla para ensamblar la materia celular rica en carbono, hidrógeno, fósforo y azufre. La materia acuosa del entorno menos ordenado penetra en el dominio, regido por el ADN, de su altamente ordenada identidad. Ahora bien, puesto que, como subrayó Schrödinger, la vida no puede dejar de estar sujeta a las leyes de la física y la química, este orden debe tener un precio.

La vida no puede violar la Segunda Ley. El orden que exhibe procede del Sol.

Imaginemos que nuestro filodendro favorito desaparece en un haz de luz que apunta hacia el Sol. Esta imagen (nuestra planta doméstica percibida en la dirección opuesta del tiempo) pone de manifiesto que los organismos no están aislados, sino que son sistemas abiertos inmersos en un medio ambiente. Aunque hoy apenas incorpora materia del espacio exterior, la suma total de la vida está abierta de manera innegociable a un flujo continuo de energía procedente del Sol. El proceso básico de la vida consiste en tomar fotones de baja entropía en la banda de la luz visible y ultravioleta, con longitudes de onda cortas, y emitirlos después en forma de radiación infrarroja de longitud de onda larga. En otras palabras, la vida convierte luz en materia viva y calor. A base de atrapar, explotar y, hasta cierto punto, reciclar la energía de alta calidad de los fotones emitidos por el Sol, la vida se mantiene y crece, produciendo entropía y calor como residuos cósmicos. La vida se apropia de estos fotones y los pone fuera de circulación por un tiempo, pero luego los devuelve al espacio exterior en forma de calor. Si la vida fuera un sistema aislado, sería algo milagroso. Pero no lo es, porque se trata de un sistema abierto. La complejidad creciente de la evolución se funda en la radiación solar de baja entropía. Incluso el sueño de un tigre que duerme mientras digiere una gacela, cuyo propio cuerpo procede del pasto, deriva de la energía altamente ordenada del Sol. Lejos de ser una suerte de móvil perpetuo independiente que desafía las leyes de la física, el orden de la vida es un préstamo del Sol.

En el esquema cósmico de las cosas, el incremento de la complejidad de la vida en la Tierra a lo largo del tiempo evolutivo es perfectamente natural. La vida no es algo único, sólo es el ejemplo más impresionante de una clase más amplia de estructuras productoras de entropía. Estas estructuras disipativas incrementan su orden local a base de disipar la energía que fluye a través de ellas, y que se suma a un incremento general del desorden. Como un dinero prestado que debe devolverse con intereses, el orden vital, como el de todo sistema disipativo, no se obtiene gratuitamente, sino al precio de un mayor desorden.

Si retrocedemos un paso y contemplamos la vida con una perspectiva más amplia que incluya también el entorno de los organismos, vemos que

éstos crean desorden de múltiples maneras. Orina, heces, sudor, contaminación, desperdicios y exhalaciones de dióxido de carbono son todos ejemplos de los inevitables residuos producidos por la vida humana. Como sistemas abiertos que somos, debemos deshacernos de nuestros desechos materiales y energéticos. A escala organísmica, lo hacemos exhalando y excretando gases, fluidos y heces pobres en energía. A escala ecosistémica, excretamos vertiendo aguas residuales y creando vertederos en torno a nuestras ciudades. A escala biosférica, contaminamos inevitablemente el área comunal global de los océanos del mundo y acumulamos chatarra espacial en la órbita de la Tierra. Al quemar combustibles fósiles, por ejemplo, los seres humanos contaminamos la atmósfera terrestre con dióxido de carbono, un producto de desecho más probable desde el punto de vista termodinámico. Aunque la vida es un sistema adaptable y evolutivo por naturaleza, tan sutil y capaz que ha encontrado maneras de reciclar desechos y reconvertirlos en materia viva, no puede escapar al mandato termodinámico de que el orden local debe generar desechos a escala global. Los árboles, por ejemplo, pueden reciclar cantidades limitadas de dióxido de carbono. Pero el exceso de este gas (el más abundante con mucho en las atmósferas de nuestros estériles vecinos planetarios Marte y Venus) generado por la civilización industrial es un testimonio aleccionador de los dictados de la Segunda Ley.

Un conocimiento parcial puede resultar peligroso. En los años sesenta y setenta algunos escritores apocalípticos predijeron un inevitable declive de la civilización sobre la base de una interpretación superficial de la tendencia hacia el desorden implícita en la Segunda Ley. Ahora bien, lo único que dice la Segunda Ley es que la entropía de un sistema aislado aumentará, y la Tierra no es un sistema aislado. La vida debe abrirse al Sol y a los ciclos astronómicos de su entorno, como saben los amantes de la playa y los afectos de astenia primaveral o fiebre del heno. La complejidad de la materia viva —incluida la dependiente de la sexualidad— puede aumentar siempre y cuando el Sol esté ahí para alimentarla.

La evidencia científica más clara de que la vida obedece la Segunda Ley quizá sea la concerniente a la temperatura. Las observaciones desde satélite muestran que los hábitats de la superficie terrestre más ricos en vida son también los mejor refrigerados (y en consecuencia los que más

entropía producen en forma de calor disipado, en consonancia con la Segunda Ley). Los ecosistemas maduros y de alta diversidad como la selva amazónica, con sus millones de especies sexuales altamente integradas, son los mejor refrigerados de todos. Las selvas ecuatoriales, con su bombeo de agua a través de las raíces de los árboles para su evaporación posterior en la superficie foliar (un proceso conocido como evapotranspiración), son sistemas de aire acondicionado naturales cuya complejidad local es compensada con creces por el calor que generan. Un hecho interesante es que la liberación a través de los poros de las hojas — los estomas— de ciertos compuestos volátiles denominados isoprenoides estimula las precipitaciones. [LÁMINA 4] Los isoprenoides sirven de núcleos de condensación de gotas de lluvia. Así, las selvas ecuatoriales y la lluvia constituyen un sistema único de producción global de entropía refrigerado localmente, un sistema que abarca también la meteorología «inanimada» por encima de la cubierta vegetal. Desde el punto de vista físico, pues, la materia viva es parte de un sistema termodinámico abierto cuyos efectos no pueden comprenderse sin mirar más allá de la clausura quirúrgica de pieles, cortezas o conchas. La vida y el sexo sólo adquieren sentido en el contexto de un universo energético.

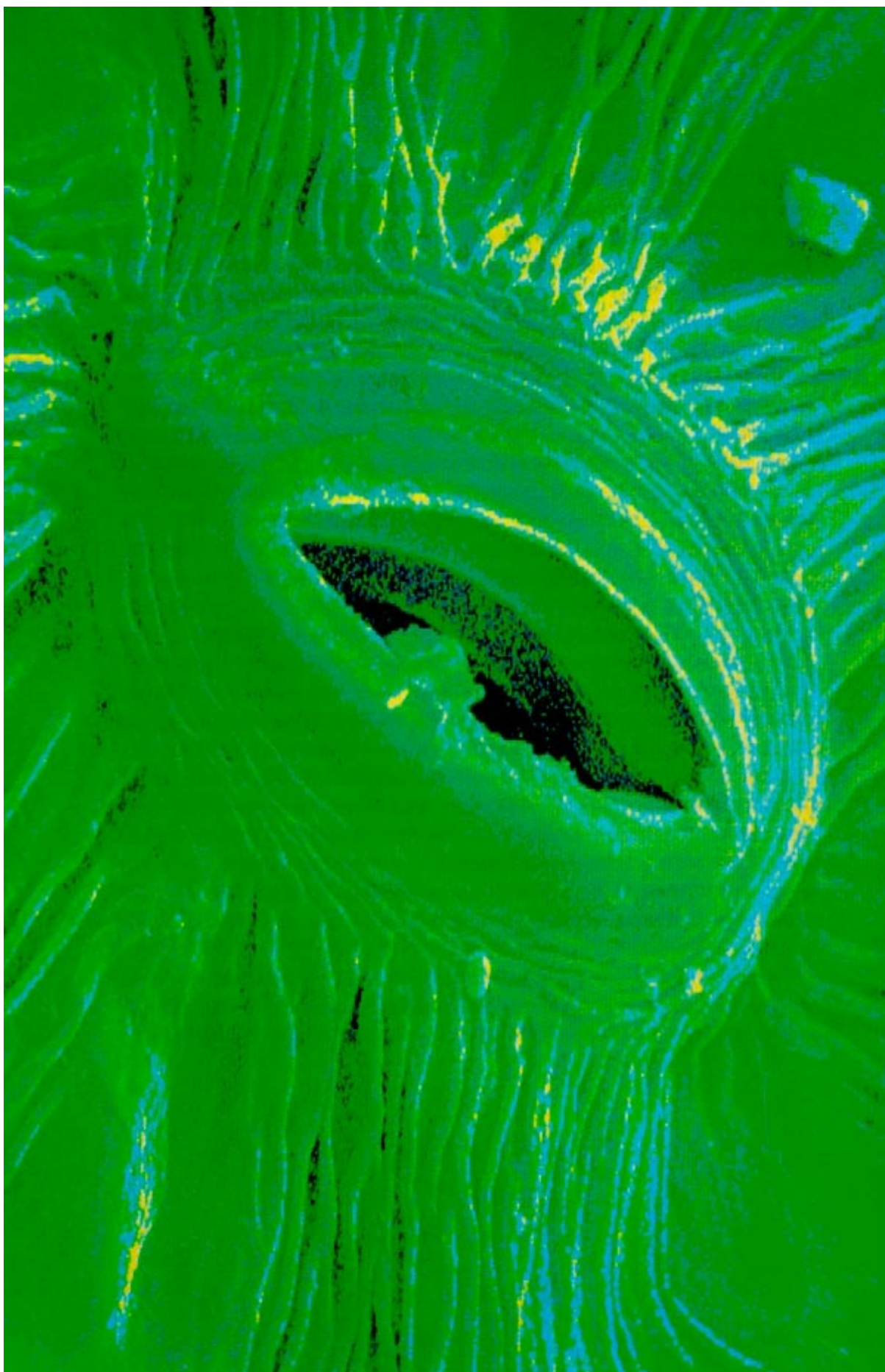


LÁMINA 4

Estoma (poro respiratorio) del envés de una hoja de saúco (*Sambucus nigra*). Los estomas son órganos para el intercambio de gases entre el interior de la hoja y la atmósfera. Estos poros suelen estar abiertos (como en la foto) durante el día y cerrados por la noche.

[Andrew Syred/Science Photo Library]

Por otra parte, la evidencia fósil sugiere que la superficie planetaria ha estado más refrigerada de lo que lo habría estado de no haber evolucionado la vida. Siempre dentro del intervalo de temperaturas delimitado por los puntos de congelación y ebullición del agua, la vida tiene un récord de más de 3000 millones de años de presencia continuada sobre este planeta, lo que indica temperaturas relativamente moderadas durante todo ese tiempo. Sin embargo, y de acuerdo con los modelos de evolución estelar, la temperatura del Sol ha ido aumentando a lo largo de su existencia. Todo indica que la Tierra, junto con la vida, se ha autorrefrigerado, mientras que si nuestro planeta hubiese estado desprovisto de vida habría tenido una temperatura superficial más alta, pero poca capacidad para producir calor y entropía a escala global. Igual que un frigorífico, que aporta calor a la cocina a pesar de su frío interior, la vida, a pesar de su capacidad refrigeradora —o a causa de ella— aporta calor a sus alrededores. La Tierra se autorrefrigera en virtud de diversos mecanismos que están siendo activamente investigados por la comunidad científica. La duración de la refrigeración planetaria a través de la evapotranspiración forestal y el enterramiento de «gases invernadero» que retienen el calor quizá tenga un límite natural. La vida acabará perdiendo su desesperada carrera contra la luminosidad creciente del Sol, a medida que la predicha expansión última de éste en una gigante roja convierta en vapor el agua de los océanos. Pero para cuando el Sol se haya ido, dentro de unos 5000 millones de años, ¿quién sabe si la vida no habrá colonizado planetas de otras estrellas para continuar creciendo y reproduciéndose alrededor de nuevos soles?

Como dijo Morowitz, hay casi tantos enunciados de la Segunda Ley como especialistas en termodinámica. La más útil en relación a los sistemas abiertos quizá sea la versión acuñada por Eric D. Schneider, un termodinámico del Instituto Hawkwood en Livingston, Montana. La

afirmación de Schneider de que la naturaleza tiende a reducir gradientes (diferencias de toda clase, no sólo de temperatura, sino de presión, concentración química, etc.) es una elegante extensión de la Segunda Ley. La naturaleza aborrece la baja presión del interior de un frasco en el que se ha hecho el vacío o el frío del hielo en un día caluroso, y de forma espontánea nivela estas diferencias.

Las células de convección mostradas en la [LÁMINA 3] son el resultado de la reducción del gradiente entre el fondo caliente del recipiente y el aire frío sobre el líquido. Un tornado, que es un sistema atmosférico altamente complejo, tiene una forma característica que nunca podría predecirse sobre la base de la termodinámica del equilibrio o el cálculo de probabilidades, [LÁMINA 5] Los márgenes de un tornado o remolino son casi verticales. Es obvio que el sistema está lejos del estado de reposo correspondiente al equilibrio gravitatorio. Sin embargo, los tornados aparecen de manera predecible allí donde se registran grandes diferencias de presión atmosférica (barométrica). De hecho, los tornados deben su propia existencia a los gradientes de presión atmosférica que ellos mismos destruyen violentamente. Para cuando una tormenta toca a su fin, se ha llevado consigo las diferencias de presión que hicieron posible su formación.



LÁMINA 5

Tornado (13 de mayo de 1980).

[Howard Bluestein/Photo Researchers]

La naturaleza misma, sin ayuda de arquitecto creativo alguno, da forma a sistemas complejos para eliminar gradientes de presión y temperatura. La complejidad tridimensional real no es una obra de ingeniería, una derivación de algoritmos ideados por ingeniosos programadores. La complejidad tridimensional real aparece espontáneamente, y es el resultado natural del hallazgo de atajos por parte de la energía siempre fluyente para reducir gradientes en la naturaleza.

Por eso existe la vida. Por encima y más allá de los detalles de su genética o de su fascinante historia, la vida es un medio termodinámico para degradar el gradiente solar. Sin embargo, a diferencia de una tormenta, que reduce las diferencias de presión atmosférica en cuestión de horas, la materia viva ha estado reduciendo el gradiente solar durante cerca de 4000 millones de años. Naturalmente, el gradiente que la materia viva se encarga de deshacer es de una magnitud mucho mayor que el responsable de una tormenta de verano. Pero, así como un huracán existe para reducir un gradiente de presión, o el remolino de agua en el desagüe de nuestra bañera existe para reducir un gradiente gravitatorio, la química del carbono reciclante de la vida existe para reducir un gradiente solar. El gradiente en cuestión es la diferencia entre el caliente horno nuclear del Sol y el frío espacio exterior.

La vida se alimenta de esta diferencia, que se da de forma natural, y acelera su desaparición. De hecho, se ha especulado incluso con la idea de que la asimetría temporal (el contraste entre el futuro aparentemente abierto y el pasado aparentemente cerrado) es en sí misma un artefacto fruto de nuestra dependencia, como formas vivas que somos, de un gradiente termodinámico. La forma exacta en que se produce esta ilusión puede que esté más allá de nosotros. Pero la teoría de la relatividad de Einstein nos dice que la verdadera naturaleza del espaciotiempo es tetradimensional, simétrica, sin una dirección temporal privilegiada. De algún modo, nuestra situación termodinámica restringida (viviendo en el filo de un gradiente, como parte de esta biosfera que recicla materia, esta

tormenta de acción lenta, almacenadora de luz solar) puede que sea responsable del mayor error de percepción de la vida: la asimetría del tiempo.

Al mismo tiempo, nuestra evolución sexual sólo adquiere coherencia cuando se la considera históricamente, una historia que comienza mucho antes de que aparecieran los mamíferos olisqueadores de genitales, incluso antes de que aparecieran los animales. Ésta es la historia que aquí contamos, comenzando con el Big Bang y terminando con las pequeñas explosiones de nuestros descendientes sexuales. Aunque pueda haber fluctuaciones locales, las células, los organismos y la biosfera como un todo tienden a deshacer el gradiente solar. Éste, se nos revela, es el propósito de la vida, del mismo modo que el propósito de un tornado es reducir un gradiente de presión.

La larga historia del pensamiento religioso occidental ha conducido a una reacción contra el pensamiento finalista (teleológico) en la ciencia. En otro tiempo se consideraba que los organismos eran como eran porque Dios los había hecho así con un propósito divino. Sin embargo, el triunfo de la biología evolutiva moderna, con su énfasis en los accidentes, la contingencia y la adaptación, ha hecho que cualquier alusión a un propósito sea altamente sospechosa de atavismo religioso. Ahora bien, en el sentido más básico, físico, los organismos sí exhiben un propósito. No se trata de un propósito divino, por supuesto, ni tiene conexión alguna con el dios judeocristiano. Los organismos hacen gala de una direccionalidad temporal, una teleología, que es intrínseca a su automantenimiento.

El «propósito» de la autopoyesis, el automantenimiento que reconocemos en las formas de vida celulares más simples, es incorporar alimento empleando la energía disponible. Según se piensa, las primeras formas de vida que evolucionaron habrían sido bacterias fermentadoras que metabolizaban azúcares y otros compuestos creados de forma natural por los rayos del Sol. La evolución de las bacterias fotosintéticas, capaces de explotar directamente el gradiente solar en sus actividades recicladoras de materia, amplió grandemente el potencial de la vida para descomponer y transformar la energía estelar. En la actualidad, todo el crecimiento y la reproducción sobre la superficie de este planeta —esa fantástica pauta que llamamos vida— se fundamenta en la Segunda Ley y su tendencia a

reducir las diferencias físicas por cualquier medio posible. Así como las diferencias de presión no siempre producen tornados, las diferencias de temperatura no siempre originan vida. Pero el propósito de ambos fenómenos, en el sentido más básico y natural, es reducir diferencias.

LA NATURALEZA DEL DESEO | Esta discusión nos lleva a especular sobre el lugar del sexo en este universo físico. Cerraremos este capítulo abriendo nuestro libro a la idea de que la naturaleza tiene y ha tenido un propósito. Aun antes de la evolución de las primeras formas de vida, hace cerca de 4000 millones de años, la naturaleza tenía una suerte de anhelo o deseo. De manera con toda probabilidad inconsciente, la naturaleza, como lo atestiguan todas las manifestaciones de la Segunda Ley, quiere lograr sus fines. Como hemos visto, la reproducción de la vida, al producir orden, crea desorden en forma de calor y entropía local. En lo que respecta a nuestra reproducción, durante cientos de millones de años ésta sólo ha sido posible a través de una forma de apareamiento basado en dos géneros, en la que un espermatozoide voluntarioso fecunda un óvulo expectante y el huevo fecundado se desarrolla luego mediante división celular en el animal adulto. La materia viva es un tipo especial de destructor de gradientes, capaz de persistir indefinidamente gracias a la información contenida en la química repetitiva del ADN celular.

De la misma forma que somos materia que contempla su propia evolución, quizá representemos, como seres sexuales, un cosmos que adquiere conciencia de su propia tendencia a crear y destruir. El sexo es el principio y el fin de ese metaciclo de la química del carbono que reconocemos como un «yo»: nuestra propia identidad individual a pesar de la repetición imperfecta de nuestra forma en el espejo generacional de nuestra similar-pero-no-idéntica descendencia. Al experimentar la tentación o el placer sexual, estamos efectuando una degradación cósmica más primordial que la vida misma, inscrita en el significado mismo de la Segunda Ley de la Termodinámica. Ayudamos al Sol a agotarse a sí mismo, intensificando la degradación de su energía en forma de calor (no ya sudando en nuestra habitación, sino dando al universo una oportunidad óptima de repetir nuestra forma). En razón de su antigua ligadura a la

reproducción, nuestros actos eróticos, de forma consciente o inconsciente, responden a los fines de la naturaleza. Porque la «meta» inconsciente de la naturaleza es llegar al estado de equilibrio, el estado de máximo desorden, caracterizado por la ausencia de gradientes. Es más, como atestigua su construcción de tornados, células de Bénard y materia viva, la naturaleza es capaz de crear espontáneamente estructuras altamente improbables, bellamente diseñadas, que reciclan materia y danzan rítmicamente, con el fin de alcanzar el estado final más probable y desordenado. En otras palabras, todos nuestros propósitos y anhelos humanos, desde el deseo pasajero de algo dulce hasta la pasión ardiente por el gran amor de nuestra vida, reflejan tendencias del mundo inanimado ya implícitas antes de la vida en la Segunda Ley. Los reproductores sexuales, en su calidad de seres vivos que producen más de sí mismos, responden no sólo a fines biológicos, sino también físicos.

Se podría decir que el universo está «en celo». El cosmos, fuera de equilibrio al menos desde el Big Bang, permanecerá así a menos que sea realmente un sistema aislado como los considerados por la termodinámica clásica, en cuyo caso se aproximará inevitablemente —aunque nunca lo alcanzará plenamente— a un estado de estasis. En el placer sexual adquirimos conciencia de nuestra un tanto peculiar y contradictoria predilección por llegar y a la vez no llegar a un fin, por deshacer un gradiente y a la vez preservarlo para mayor delectación. El deseo tanto de abandonarse como de resistir, tanto de reservarse como de vaciarse, refleja el dilema de la materia viva que se alimenta de una fuente de energía, pero que desaparecerá si la agota completamente.

Lejos del equilibrio, los sistemas vivos no son independientes, sino que existen sólo en la vecindad de fuentes necesariamente menguantes de energía de alta calidad. Cuando se las enfría hasta cerca del cero absoluto, las formas vivas, si es que sobreviven, están «como muertas». Démosles alimento y energía, sin embargo, y revivirán. Bacterias, esporas, quistes y otras formas de vida latente congeladas y desecadas reanudan su metabolismo una vez descongeladas e hidratadas. Tales experimentos criogénicos sugieren que el grado de vigor está correlacionado con el flujo de energía y materia en combinación con la capacidad de controlar dicho flujo. Quizá podamos vislumbrar aquí, en la situación cósmica de la vida

como deshacedora de gradientes, la base material para la estructura psicológica del deseo y la tensión entre gratificación instantánea y reticencia prudente. La paradoja de la vida, incluida la sexual, es que la frustración misma del deseo de llegar a un final contribuye a prolongarla.



CALDEADOS
Y HOSTIGADOS:
COMIENZOS SEXUALES

Desde que Eva decidiera lanzar sus chispas infernales,

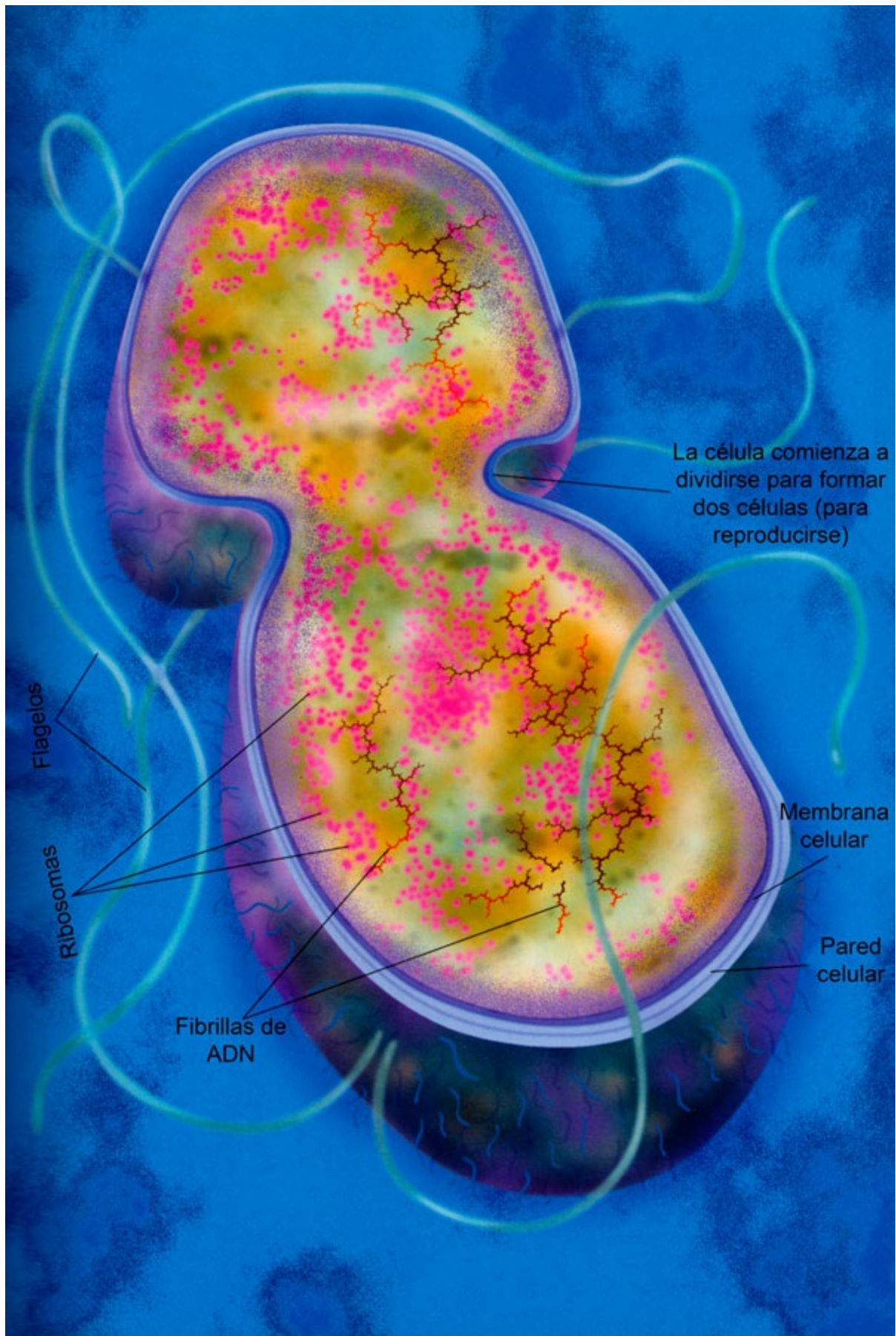
Desde que se usara ir por ahí desnudos

Desde que la vieja Nosecuántos fuera creada...

William Blake^[11]

SERES TRANSGÉNICOS: EL PRIMER SEXO DEL MUNDO | El sexo es muy antiguo. Aunque no lo necesitan para reproducirse, las bacterias, las primeras formas de vida sobre el planeta, se entregan a él. La revolución biotecnológica no hace más que explotar la tendencia de las bacterias a donar genes propios y recibir genes ajenos: la ingeniería genética se basa en las antiguas propensiones sexuales de las bacterias. Al carecer de un núcleo delimitado por una membrana, las células bacterianas se clasifican como procariotas. **[LÁMINA 6]** Los fósiles más antiguos y sus trazas químicas aparecen en la roca formada casi inmediatamente después de que la Tierra adquiriese una corteza sólida, hace alrededor de 3850 millones de años. Estos vestigios de la vida más antigua son fósiles de procariotas. El sexo procariótico difiere de manera fundamental del sexo reproductivo de animales y plantas. Auténticamente transgénico, el sexo procariótico implica siempre la transferencia de genes de una fuente donante (bacteria, virus, solución química u otra) a una bacteria receptora viva. Este movimiento genético, presente en los albores de la vida, proporcionó un importante medio de supervivencia a toda la vida subsiguiente.

El sexo procariótico se originó durante un periodo geológico de violencia formativa y radiación solar intensa, **[LÁMINA 7]** Durante los primeros días del planeta, la vida tuvo que pasar numerosas pruebas. Las bacterias no sólo fueron sometidas a una intensa radiación ultravioleta, también sufrieron un continuo bombardeo de rayos cósmicos, partículas y meteoritos procedentes del espacio. En vista de este cuadro infernal, los geólogos se refieren a la tumultuosa primera época de la Tierra como eón Hadeense. En el eón subsiguiente, la vida bacteriana primitiva se diseminó por el terreno lleno de cráteres, las aguas fangosas y las gorgoteantes fuentes termales. Esta época, en la que los procariotas se diversificaron, se conoce como eón Arcaico.



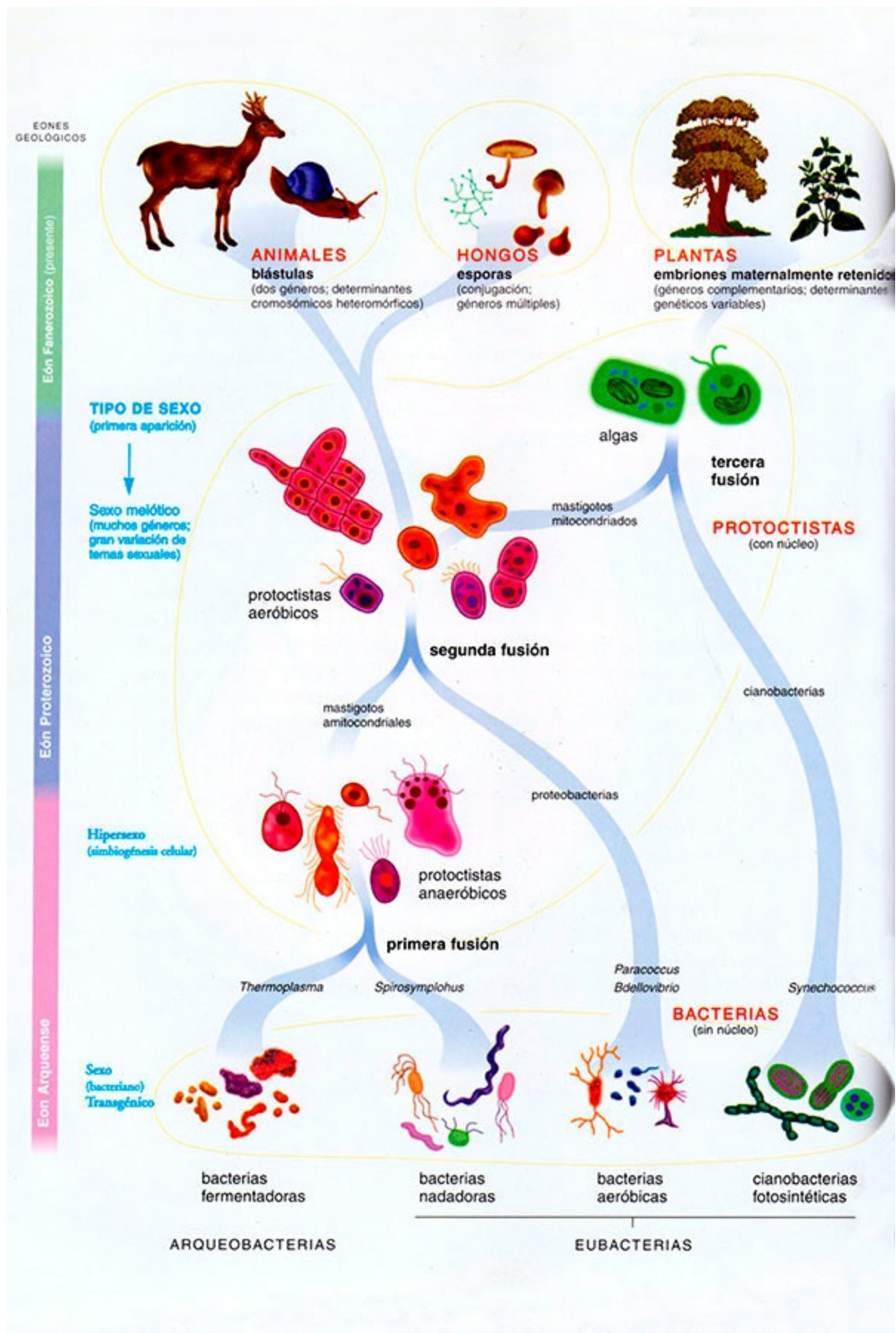


LÁMINA 6

Célula bacteriana (procariota) justo antes de dividirse. El proceso reproductivo en su totalidad se muestra en la lámina 12.

[Kathryn Delisle/José Conde]

LÁMINA 7

Escala temporal de la evolución del sexo. Las fusiones simbióticas (hipersexuales) condujeron a las células nucleadas a partir de los procariotas (primera fusión); la respiración aeróbica se derivó de la segunda fusión hipersexual, y las algas fotosintéticas fueron el resultado de la tercera fusión. El sexo de fusión (meiótico) ancestral condujo a los animales, los hongos y las plantas.

[Kathryn Delisle/José Conde]

La vida bacteriana, obligada a ocupar multitud de hábitats diferentes, inventó todas las variantes del metabolismo celular, de las cuales plantas y animales utilizan sólo una pequeña proporción. Algunas bacterias, por ejemplo, son incluso capaces de extraer energía de metales como el hierro y el manganeso. Las bacterias desarrollaron estas facultades, al menos en parte, por donación genética, la primera forma de sexo del mundo y, todavía hoy, la más importante para la ecología global. En la transferencia de genes bacteriana, una bacteria donante traspasa uno, varios o virtualmente todos sus genes a su par, sin que ello implique la producción de descendientes. En comparación con los animales y plantas que se reproducen sexualmente, los procariotas intercambian genes de manera fluida. Los animales y plantas, en cambio, reciben la mayoría de sus genes nuevos al comienzo de su ciclo vital, en el acto de fecundación mediante el cual los generan sus progenitores.

De hecho, y puesto que los genes donados por una bacteria pueden ser recibidos por otra muy diferente (lo que quiere decir que los genes bacterianos cruzan las barreras entre «especies»), los bacteriólogos Sorin Sonea y Maurice Panisset, de la Universidad de Montreal, argumentan que las bacterias no deberían clasificarse como especies separadas^[12]. Si se define la especie en la forma tradicional, como una población de organismos que se entrecruzan para generar descendencia viable, entonces las bacterias no encajan. No necesitan aparearse para reproducirse, y cuando practican el sexo no se limitan a intercambiar genes con organismos de su propia especie. Las cepas de *Bacillus anthracis*, *Bacillus*

cereus, *Bacillus megaterium* y *Bacillus subtilis* pueden ser muy similares. Los organismos se entrecruzan, las poblaciones se entrecruzan, pero sólo cuando dos tipos de bacilo comparten más de un 85% de sus rasgos los bacteriólogos los tratan como formas de la misma especie. Si la semejanza es del 84%, los bacteriólogos los considerarán especies distintas. Asignar especies a base de contar rasgos es algo bastante arbitrario cuando dos cepas bacterias tienen entre un 80 y un 98 por ciento de rasgos comunes. Incluso hay casos como el de *Streptomyces griseus*, una bacteria pluricelular que produce el antibiótico estreptomicina, que puede recibir genes de (aparearse con) *Escherichia coli*, una bacteria unicelular muy diferente que ni de lejos comparte con ella el 85% de sus rasgos. [LÁMINA 8]

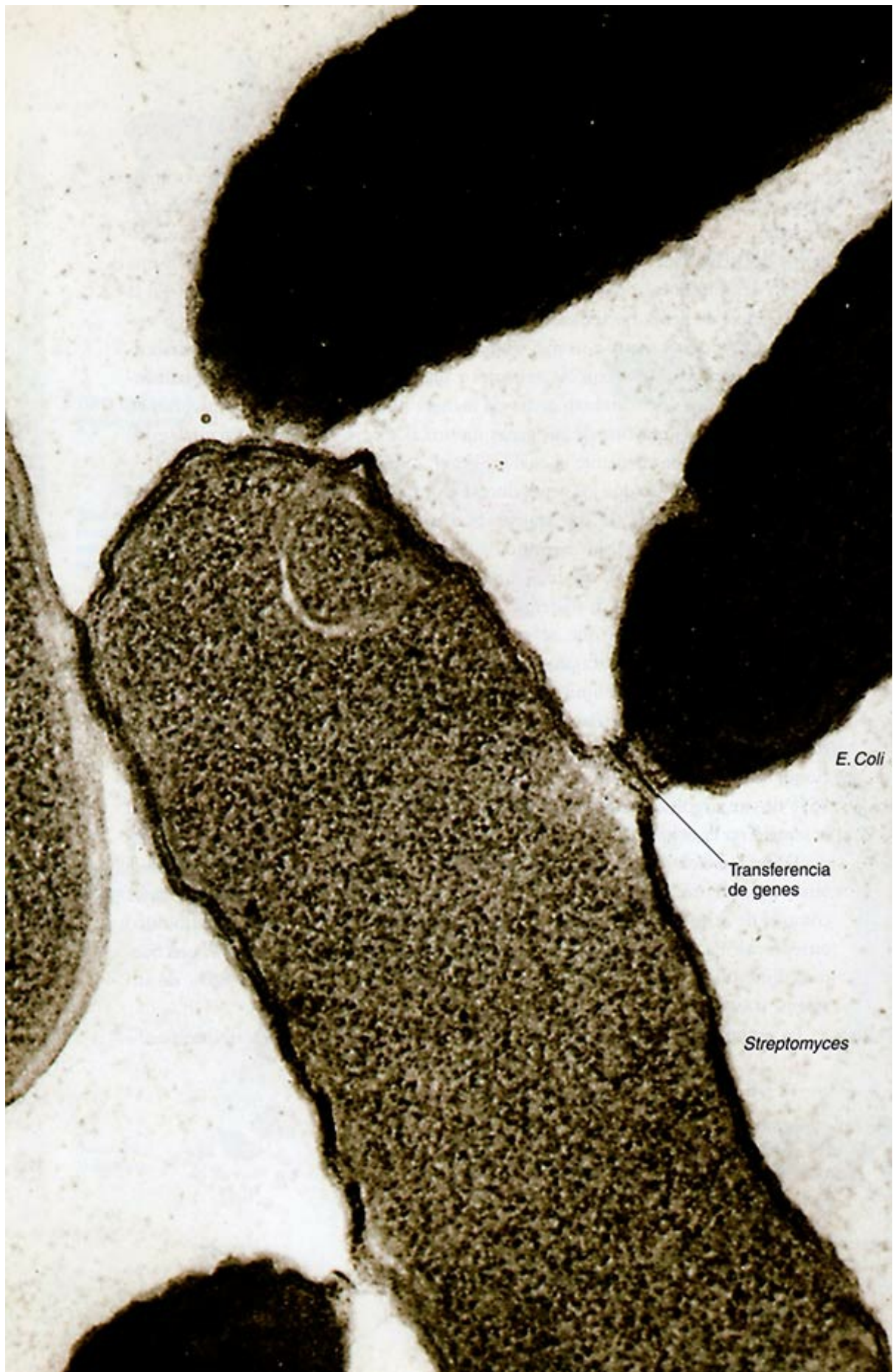


LÁMINA 8

Promiscuidad bacteriana I: *E. coli* transfiere genes (flecha) a *Streptomyces*, una bacteria filamentosa bien distinta. Micrografía electrónica de una sección fina de las células. (Véase lámina 11.)

[Kathryn Delisle/José Conde]

La extraña sexualidad bacteriana, con sus donaciones genéticas «transespecíficas», puede ilustrarse fácilmente imaginando lo que pasaría si existiese en los mamíferos. Si tuviéramos la capacidad de intercambiar genes, un hombre pelirrojo y con pecas podría, después de nadar junto a una morena y su perro, despertarse con el pelo castaño y las orejas caídas. A menudo la verdad científica es, como mínimo, tan extraña como la ciencia ficción. Monstruos como los niños perro descritos por H.G. Wells en *La isla del doctor Moreau* palidecen ante los híbridos naturales creados por el desenfrenado intercambio de genes bacterianos en el micromundo real. Pese a las advertencias fáusticas, la «diabólica» biotecnología de la mezcla de genes «interespecífica» es más vieja que las propias especies.

Los ingenieros genéticos no han inventado la mezcla de genes, la han tomado prestada. La capacidad de una especie bacteriana de sintetizar las proteínas de otra especie nos permite usarla para producir insulina humana, hemoglobina de cerdo y otras sustancias que en la naturaleza sólo son producidas por mamíferos. Genes que codifican proteínas humanas específicas se combinan con genes extraídos de bacterias y se reintroducen en células bacterianas para su expresión. Esto significa que el gen híbrido dirige la síntesis de proteínas híbridas. La porción correspondiente a la proteína humana puede cortarse mediante enzimas específicos. De esta forma se puede hacer que bacterias de crecimiento rápido produzcan grandes cantidades de insulina o hemoglobina humanas junto con sus propias proteínas. Podemos asustarnos al mirarnos en el espejo de la biología, pero no deberíamos confundir la imagen que ofrece con una maestría humana sin igual. Los organismos transgénicos son mucho más viejos y mucho más que un fenómeno meramente humano.

Algunos tipos de bacterias son relativamente estables, mientras que otros son verdaderos altruistas genéticos, donando ADN aunque eso signifique su propia muerte. Cuando Richard Dawkins, zoólogo de la

Universidad de Oxford y popularizador de la idea del «gen egoísta», fue informado de la tendencia de ciertas bacterias a ceder tantos genes que acaban muriendo, se quedó perplejo. Pero, como argumentan Sonea y Panisset, de hecho las bacterias no son tanto individuos como partes de un único superorganismo global, que responde a los cambios en las condiciones ambientales no mediante la especiación, sino excretando e incorporando genes útiles de sus vecinos mejor dotados y multiplicándose luego desenfrenadamente.

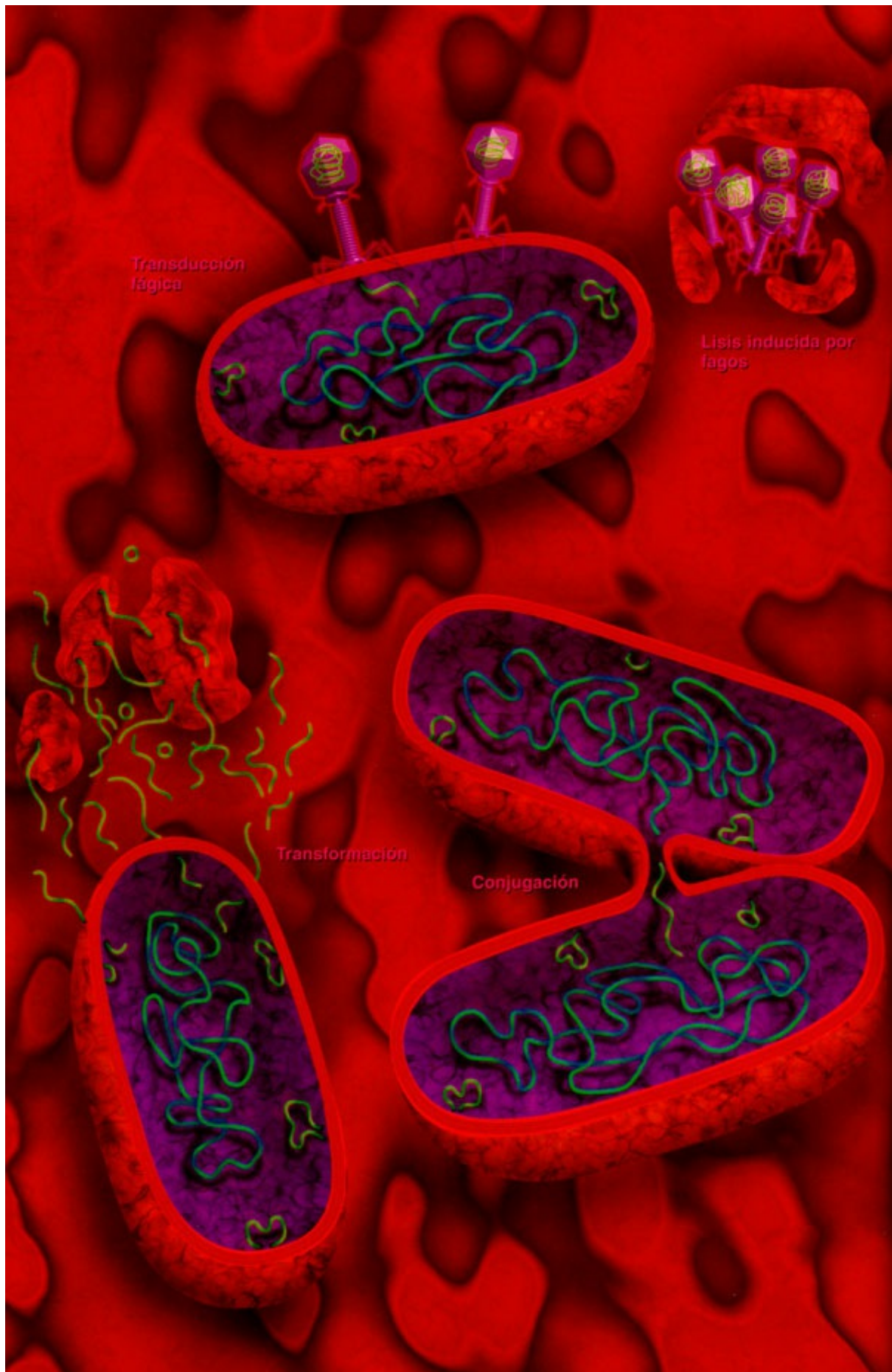


LÁMINA 9

Sexo bacteriano. Desde arriba, en el sentido de las agujas del reloj: transducción fágica; lisis inducida por fagos; conjugación; transformación.

[Kathryn Delisle/José Conde]

Bajo las amenazas de muerte del calor abrasador, la congelación, la falta de ciertos nutrientes, la desecación, etc., los procariotas primitivos habrían encontrado a menudo la salvación en la posibilidad de acceder a un acervo genético común. El sexo bacteriano habría constituido un atajo hacia la supervivencia. En evolución, la adquisición de un complejo genético preadaptado —lo que los evolucionistas llaman un «seme»— puede obviar la necesidad de aguardar a que se produzcan mutaciones fortuitas. Cuando Darwin propuso su teoría de la evolución por selección natural, no conocía la fuente de variación. Hoy sabemos que la secuencia de las bases químicas que componen el ADN cambia o muta espontáneamente. Estos cambios acostumbran a ser deletéreos (como las erratas de imprenta en un libro). En un organismo pueden ser dañinos, incluso fatales. Ocasionalmente, sin embargo, se producirá un accidente afortunado, un cambio que incrementará las posibilidades de supervivencia del organismo.

Los cambios y duplicaciones de la secuencia de bases y las adiciones de ADN extra siempre han sido una fuente de variación genética. Pero hay otras, y el sexo es una de ellas. En los animales y plantas con reproducción sexual, sin embargo, los genes nuevos adquiridos por vía sexual se diluyen cuando los miembros de la especie se aparean con los del sexo opuesto, lo que conlleva la mezcla de genes en la descendencia. Las bacterias, sin embargo, se reproducen «de verdad». En otras palabras, al reproducirse sin sexo, los genes nuevos adquiridos sexualmente (al modo procariota) son transferidos a una descendencia sin mezcla, idéntica a la célula progenitora.

Una bacteria se reproduce autoclonándose. Tras una fase de crecimiento, copia sus genes y el resto de las partes de su diminuto cuerpo y luego se divide por la mitad (en un proceso que los biólogos denominan fisión binaria o bipartición) produciendo dos células genéticamente idénticas. [LÁMINAS 6 y 12] Como una oveja clonada, cada nueva bacteria

tiene un único progenitor. Cada bacteria hija es como una fotocopia tridimensional de la célula madre. Así, si una bacteria tiene la suerte de adquirir un buen lote de genes nuevos, podrá legarlo a sus hijas sin alteración alguna. Siempre que el entorno lo permita, una bacteria clonará de manera célibe cualquier ADN nuevo que haya recibido y, a diferencia de las mutaciones aleatorias usualmente inútiles, los lotes de genes tomados de otro organismo son de una eficacia probada. La diferencia es similar a la que hay entre un errata, que casi siempre empeora el texto, y una cita apropiada, que obedece a un propósito. Los genes que contenían información para la metabolización de desechos o toxinas potencialmente dañinos o para alejarse nadando de la proximidad de compuestos peligrosos eran genes salvavidas. Como una cita de Shakespeare en un texto actual o un apunte de música clásica en una canción de rock, estos complejos genéticos contrastados —seme— proliferaron en un nuevo contexto, permitiendo a las bacterias que los poseían medrar en hábitats de otro modo inhabitables.

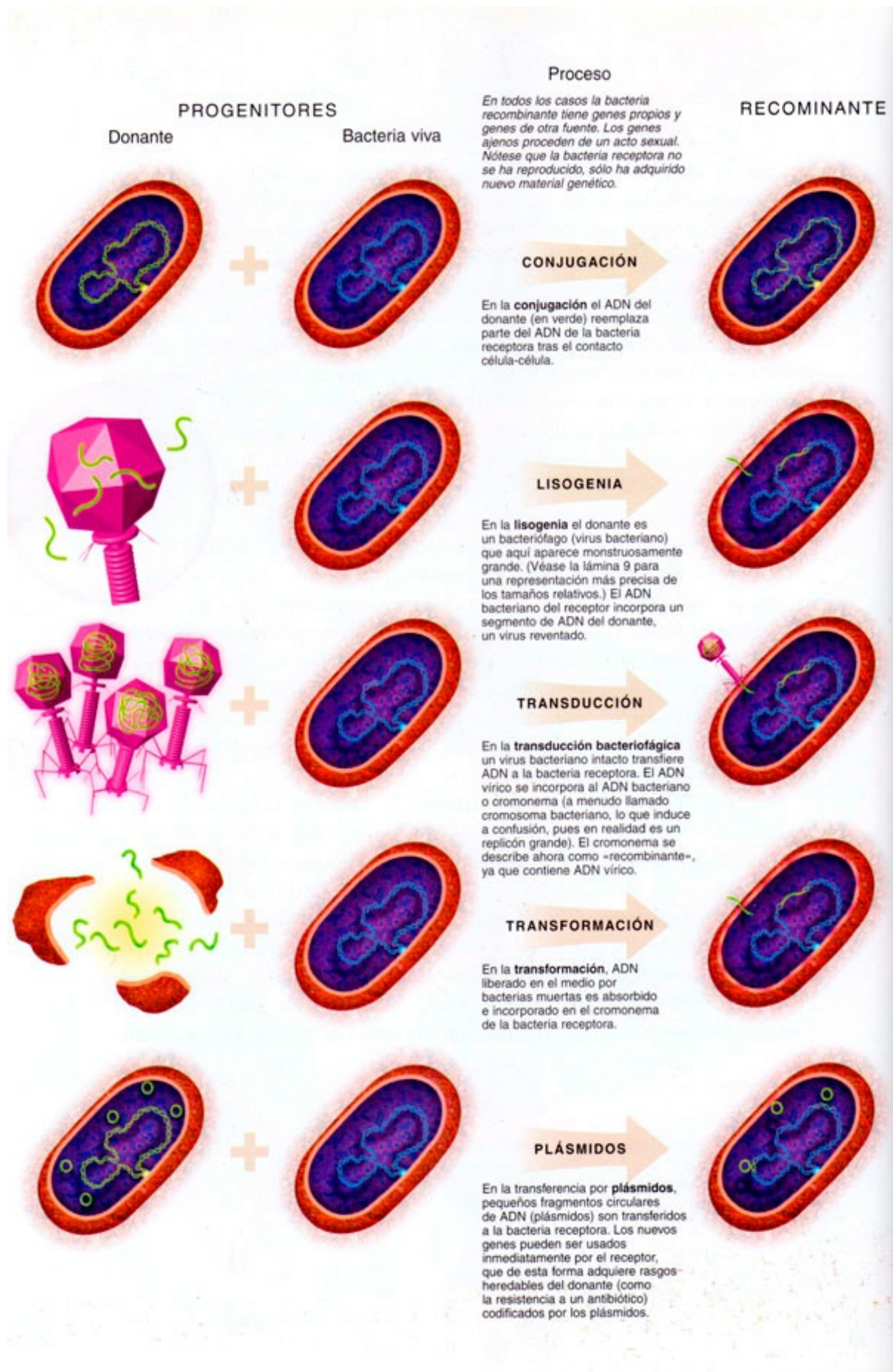


LÁMINA 10

El sexo bacteriano en síntesis. El sexo requiere dos partes, los progenitores de las columnas izquierda y central. A la derecha se muestran los resultados de las diversas modalidades de sexo bacteriano en bacterias afines. Estos diagramas representan actos sexuales bacterianos vistos en sección.

[Kathryn Delisle/José Conde]

El sexo fue un salvavidas. Aunque resistentes y de crecimiento rápido, los procariotas carecían con frecuencia de los recursos necesarios para sobrevivir. Por si las condiciones cósmicas en las que evolucionó la vida primitiva no fueran ya de por sí bastante estresantes, ella misma solía crearse problemas adicionales allí donde proliferaba. Los desechos o subproductos tóxicos del metabolismo son una fatalidad termodinámica. Una proliferación rápida, signo de destrucción efectiva de gradientes, produce necesariamente nuevos compuestos químicos que se convertirán en una tentación para aquellos organismos que sean capaces de aprovecharlos. Con los procariotas aparecieron soluciones frescas a los problemas medioambientales recurrentes creados por la proliferación de nuevas mutaciones. El sexo bacteriano les permitió evolucionar no sólo a través de la acumulación de mutaciones, sino a través de la cesión de genes por parte de vecinos transgénicos evolucionados por separado.

TRANSFORMISMO SEXUAL | Las bacterias se entregan a diversos tipos de transferencia genética (es decir, sexo): transducción, conjugación y transfección. [LÁMINAS 9 y 10] Cuando las bacterias se lisan (es decir, revientan), sus paredes y membranas celulares se rompen y sus genes se liberan. El ADN desnudo, bastante robusto, puede sobrevivir en suspensión acuosa al calentamiento, el enfriamiento, incluso la congelación y otros maltratos medioambientales. Cosa prodigiosa, el ADN desnudo liberado por bacterias amenazadas puede flotar en solución hasta alcanzar células vivas sanas y salvas. Dicha transducción implica el traslado de genes bacterianos, a menudo anulares, del medio circundante a una bacteria receptiva. La conjugación bacteriana, en cambio, implica contacto celular. Entre célula y célula se forma un puente o tubo a través

del cual pasa un número variable de genes de una bacteria (donante) a otra (receptora). **[LÁMINAS 8 - 11]**

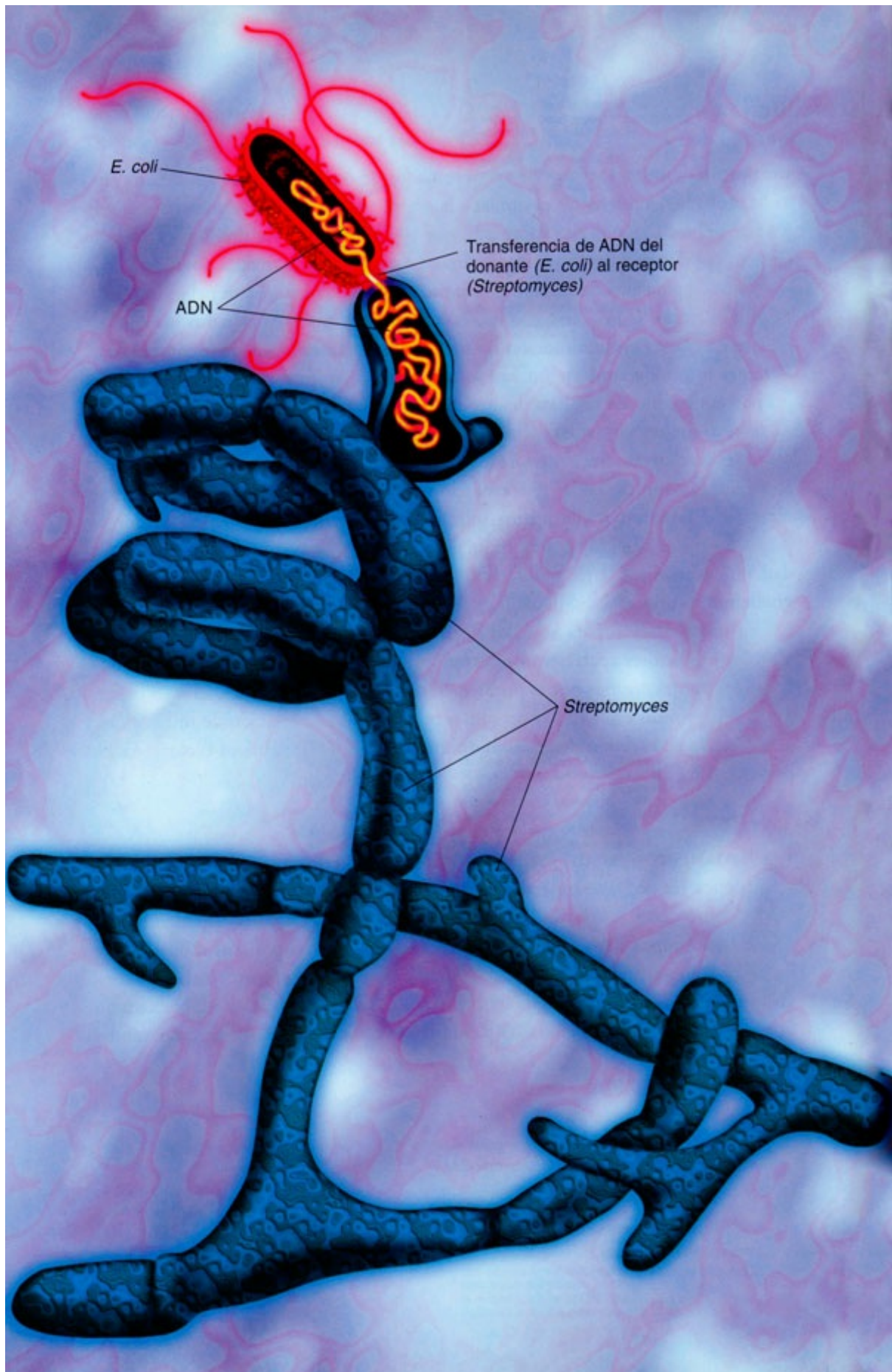


LÁMINA 11

Promiscuidad bacteriana II: *E. coli* transfiere genes a *Streptomyces*, una bacteria filamentosa bien distinta. Dibujo inspirado en micrografías como la de la lámina 8.

[Kathryn Delisle/José Conde]

También los virus pueden actuar de mediadores en la transferencia de genes entre bacterias. Este proceso se denomina transfección. Hay virus bacterianos específicos que se fijan al exterior de la célula y le inyectan su material genético para, sabotando la maquinaria genética bacteriana, producir más virus. Al final la célula infectada revienta liberando nuevos virus que portan combinaciones de genes virales y bacterianos, prestos a inyectar su material genético en otras bacterias. Por muy violentamente patológico y predador que parezca —y lo es—, esto es sexo. El sexo requiere la generación de un nuevo organismo con genes procedentes de más de una fuente (en este caso de la bacteria receptora original y del virus). El sexo, al implicar la adquisición de ADN nuevo, está claramente relacionado con la enfermedad. Muy frecuentemente, enfermedad significa adquisición de ADN de algún otro organismo. El resultado de esta adquisición es variable. Si el nuevo ADN nos perjudica lo llamamos enfermedad. Pero a veces el nuevo ADN contribuye a que la bacteria receptora viva mejor en un lugar o tiempo determinados.

La dispersión sexual de los genes bacterianos fue crucial para la transformación del planeta de un yermo hostil y estéril en un lugar pleno de vida abundante y variada. La proliferación y evolución de los diferentes tipos de bacterias, con su gran virtuosismo metabólico, propició una rápida transformación ecológica. La metaespecie bacteriana única a escala planetaria reciclaba compuestos químicos en multitud de ambientes, incluyendo los creados por ella misma. Las bacterias aprendieron a utilizar el agua y la luz solar en la fotosíntesis y el amoníaco en el metabolismo del nitrógeno, además de incontables recursos o subproductos disponibles como fuentes de energía para el crecimiento y la reproducción, incluyendo gases ricos en energía (hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y metano). Las bacterias depositarías de los genes para el uso de todas estas fuentes de energía y alimento podían cederlos para su uso eventual por otras bacterias. El sexo bacteriano promovió el acceso global a los genes que

conferían una capacidad metabólica dada, permitiendo que los virtuosismos se difundieran por todo el planeta.

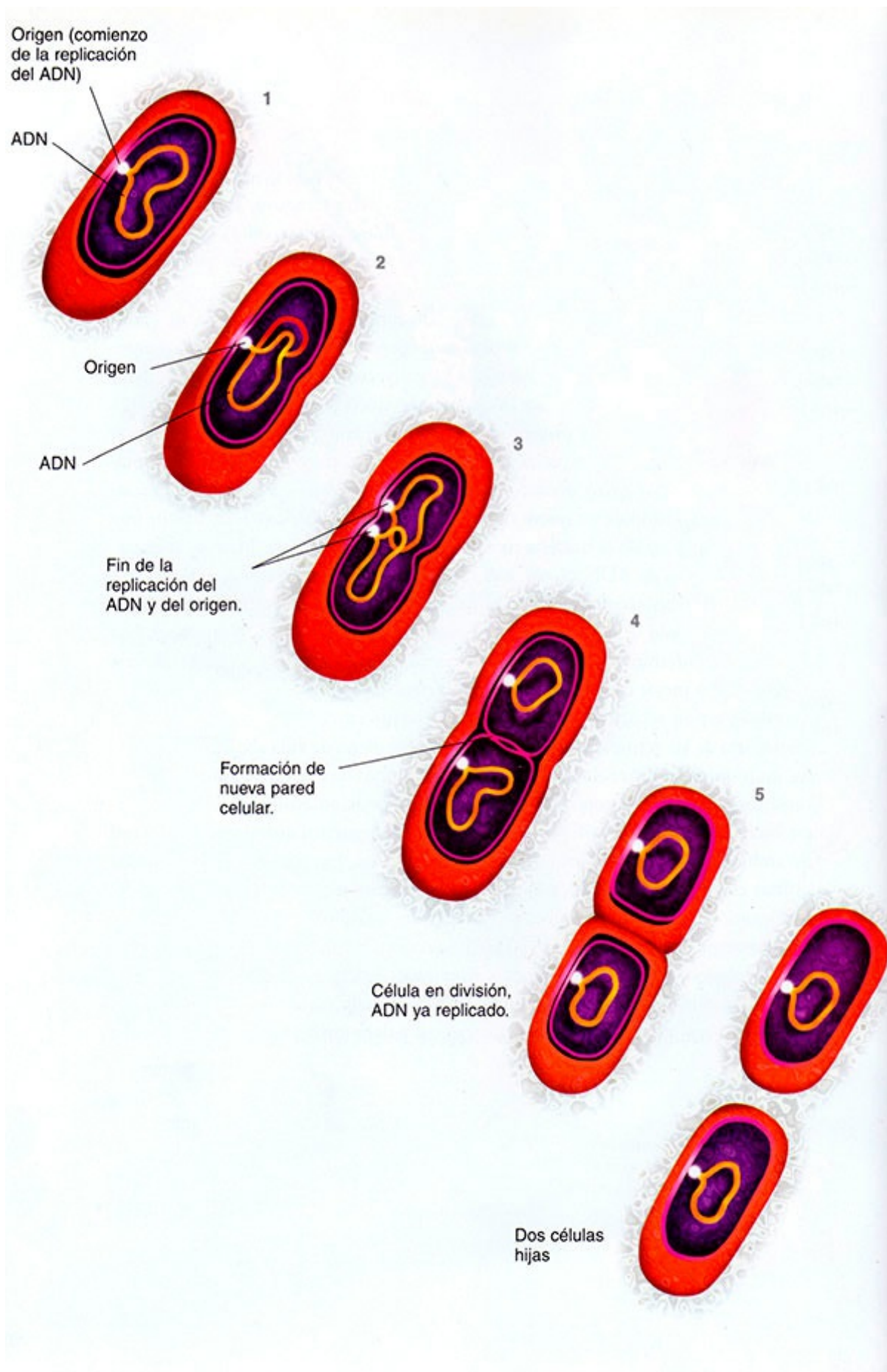


LÁMINA 12

Una célula se convierte en dos: diagrama de la reproducción bacteriana. (1-3) Replicación del ADN (cromonema). (4-6) La fisión binaria produce dos células hijas.

[Kathryn Delisle/José Conde]

Aunque plantas, animales y hongos acaparan nuestro interés simplemente porque podemos verlos, esta vida de mayor tamaño es metabólicamente aburrida en comparación con la extraordinaria variedad de ardidés metabólicos de las bacterias. Plantas, animales y hongos heredaron sus aptitudes metabólicas (fermentación, fotosíntesis productora de oxígeno y respiración basada en el oxígeno) de las bacterias. Pero las bacterias conservan un repertorio metabólico mucho mayor que las otras formas de vida. Su capacidad para crecer sobre azufre elemental o limaduras de hierro pone de manifiesto la estrechez de nuestro metabolismo. Sólo cuando ampliamos la noción de metabolismo humano e incluimos en él la industria y la tecnología podemos siquiera comenzar a evaluar las dotes bacterianas para la transformación medioambiental. Aun así, nuestra tan cacareada biotecnología apenas pasa de ser un acto de ratería, la simple modificación para aplicaciones concretas de una sexualidad que hemos tomado prestada de las bacterias y que se ha dado de forma natural durante miles de millones de años.

El sexo bacteriano difiere también del nuestro en lo que al tiempo se refiere. En esta modalidad de sexo, la más arcaica, los genes transferidos se expresan en la bacteria receptora misma, confiriéndole nuevos rasgos de forma inmediata, sin esperar a la generación siguiente para manifestarse. El neodarwinismo ha insistido en la importancia de las mutaciones, los cambios aleatorios en el ADN. Ocasionalmente, una mutación permitía a las bacterias acceder a alguna nueva fuente de alimento o sobrevivir a temperaturas más altas. Pero sólo el sexo hacía posible que una bacteria individual tuviese acceso a los recursos genéticos del planeta entero. A base de intercambiar genes, con algo de colaboración por parte de sus compañeras, una bacteria podía estar en condiciones de responder a nuevas contingencias. El sexo ofreció a las bacterias una nueva renta vital. La transferencia sexual de genes significaba que ninguna bacteria era ya una

isla sino, más bien, una célula semiindependiente en el seno del equivalente biológico de una democracia, un cerebro o un supercomputador global. Este antiguo sistema creador de ambientes y basado en el sexo bacteriano a escala global continúa sosteniendo nuestro ecosistema planetario.

Los genes mutantes raros que posibilitan vías metabólicas nuevas e importantes no siguen siendo raros por mucho tiempo, porque son rápidamente copiados y compartidos. Con su activa multiplicación y su desenfrenado intercambio genético, las bacterias conferían nuevas capacidades tanto a su descendencia como a sus vecinos (una especie de transmisión cultural genética). Mucho antes de «las autopistas de la información», de las telecomunicaciones o las redes de ordenadores, las bacterias formaban un nexo planetario de información bioquímica, innovador y expansivo, y su sexualidad no reproductiva difundía genes útiles por todo el planeta.

SEXO Y RADIACIÓN SOLAR | ¿Cómo evolucionó el sexo bacteriano? La respuesta, reconstruida o inferida a partir de observaciones de laboratorio, parece clara. La evolución del sexo tiene que ver con la reparación del ADN. En una Tierra arcaica sin capa de ozono, era inevitable que el ADN fuese dañado por la radiación solar. Caldeados y hostigados por el Sol, cuyo gradiente reducían, los procariotas fotosintéticos y otras formas de vida arcaicas sufrían continuas convulsiones en los centros de control moleculares que son los genes. La radiación de alta energía los desgarraba y abría, provocando mutaciones deletéreas. Las bacterias tuvieron que desarrollar mecanismos para reparar los incesantes daños en el ADN. **[LÁMINA 13]** En situaciones desesperadas la recomposición del ADN propio sólo podía conseguirse integrando ADN ajeno, y así evolucionó el sexo.

La crisis es, según parece, un denominador común en el origen del sexo, tanto en las bacterias como en las formas de vida con cromosomas nucleares^[13]. La vida, que es un proceso energético, depende como mínimo de un conjunto común de materiales esenciales —agua, carbono, nitrógeno, azufre y fósforo— y de un flujo incesante de energía. Pero la

vida, cuyo hogar primigenio es el agua, corre siempre el peligro de deshidratarse cuando se traslada al medio terrestre y aéreo. La necesidad de luz solar, al menos para la inmensa mayoría de la vida instalada en la superficie terrestre, ha sido siempre un juego prometeico lastrado por las amenazas de la desecación, el exceso de radiación y hasta la combustión espontánea. Ya sea transducción, transfección o conjugación, los procesos del sexo bacteriano son casi idénticos a los procesos de reparación genética en bacterias bombardeadas con radiación ultravioleta. Los enzimas empleados para remendar el ADN deteriorado por la luz fueron cruciales para la evolución del sexo bacteriano. Estos antiguos sistemas de reparación del ADN, de los cuales parece haberse derivado el sexo bacteriano, siguen estando presentes en todos los organismos^[14].

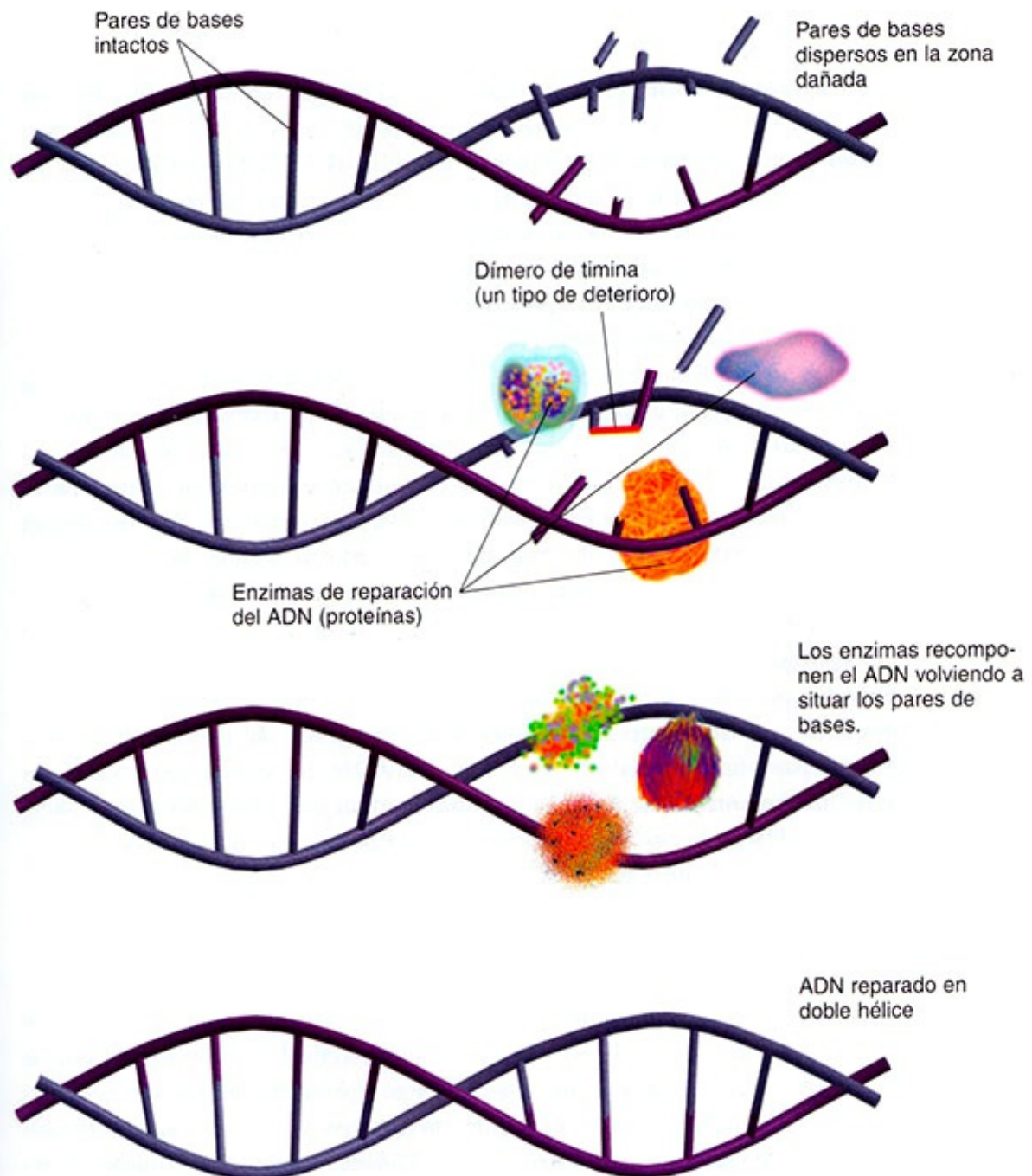


LÁMINA 13

Reparación del ADN. Una doble hélice dañada (arriba) es intervenida por dos tipos de proteínas (enzimas: centro). El resultado es ADN reparado (abajo). Ésta es una ampliación de un segmento del ADN representado como hebras retorcidas en las láminas 6, 9, 10, 11 y 12.

[Kathryn Delisle/José Conde]

Hay pocas dudas de que el sexo bacteriano apareció hace más de tres mil millones de años, cuando aún no había oxígeno libre en nuestra atmósfera. Al no haber oxígeno tampoco había capa de ozono estratosférica que protegiese el material genético de la radiación ultravioleta. A juzgar por los datos recogidos por el satélite *Explorer 10* de la NASA sobre estrellas como nuestro Sol, la emisión de energía lumínica durante la evolución temprana de la vida tuvo que ser tan intensa que el mero hecho de que sobreviviese alguna bacteria es algo portentoso. Pero lo cierto es que la vida se originó —o al menos persistió— bajo la presión de un mortífero bombardeo de rayos ultravioleta. Cualquier bacteria que no fuese capaz de reparar su ADN dañado estaba condenada a perecer.

La evolución del sexo a partir de los sistemas de reparación del ADN fue probablemente un hecho afortunado. Los enzimas como la ligasa, que suelda segmentos de ADN, son vitales para la microcirugía de emergencia del material genético y, dado su papel fundamental en la replicación del ADN, es seguro que evolucionaron antes que los sistemas de reparación propiamente dichos. Obviamente, la replicación del ADN, necesaria para la división celular bacteriana, tuvo que estar ya presente en las formas de vida más arcaicas.

El ADN es la molécula bicatenaria de los genes, esa molécula genial que se replica a sí misma (con la ayuda de numerosos enzimas proteínicos). Para producir más de sí mismo, el ADN «progenitor» se desenrolla y, una vez separadas, las cadenas viejas sirven de plantilla para la formación, catalizada por enzimas (ADN-polimerasas), de cadenas «hijas» complementarias. Al final del proceso cada una de las cadenas «progenitoras» tiene una cadena complementaria. Así, si una de las cadenas resulta dañada, la información presente en la cadena complementaria intacta puede usarse para reconstruir la parte dañada. Se

puede decir que las moléculas de ADN llevan consigo «copias de seguridad» de sí mismas intrínsecas a su estructura.

El proceso de reparación del ADN comienza por lo general con la intervención de una nucleasa que extirpa la porción dañada; después el hueco se rellena con nucleótidos, los elementos de construcción del ADN. La cadena intacta sirve de plantilla para la regeneración de una nueva doble hélice. Este proceso de empalme y copiado a partir de la cadena «de seguridad» requiere multitud de enzimas reparadores, una buena sincronización y nucleótidos disponibles. Una vez refinado, el antiguo mecanismo de reparación del ADN se convirtió en moneda corriente dentro del supersistema genético bacteriano, y se propagó por todo el globo. Los sistemas de reparación del ADN universales abrieron las puertas al sexo. En el proceso de reparación más simple, el gen o genes que sirven de plantilla proceden del ADN propio. El sexo se da cuando un ADN externo o extraño se integra en el ADN dañado del receptor. Quizá la integración de ADN ajeno en las estirpes de bacterias fuese más la norma que la excepción. Los remiendos de genes debieron ser frecuentes en una Tierra arcaica desprotegida.

Cuando ambas cadenas de la molécula de ADN sufrían daños en algún punto (en otras palabras, cuando no había copia de seguridad a la que recurrir para recuperar la información de la secuencia de nucleótidos) las células morían. Es seguro que muchas células, si no la mayoría, murieron. Pero en algún momento temprano de la historia de la vida una bacteria usó sus enzimas de reparación para integrar ADN ajeno de una compañera o del agua circundante: había nacido el sexo (entendido como recombinación). Como las buenas noticias, los genes para estos enzimas de reparación se propagaron rápidamente. La primera integración de ADN ajeno en el ADN propio fue el primer acto sexual. Después el sexo, como una infusión genética, permitió la supervivencia en un mundo irradiado y químicamente caótico. La transferencia exitosa de ADN bacteriano salvó a los procariotas, preparándolos para repetir y refinar sus saludables actos sexuales.

Todavía hoy, la luz ultravioleta representa un verdadero drama para las bacterias. Algunas eluden el castigo protegiéndose con el equivalente bacteriano de «sombreros» o «gafas de sol». [LÁMINAS 14 y 15] Otras

responden a las radiaciones interrumpiendo su crecimiento y liberando una serie de enzimas y retazos de ADN desnudo en el medio acuoso circundante, a la vez que se apresuran a producir copias corregidas de sus moléculas de ADN dañadas. Esta pronta reacción biológica a las agresiones del entorno, que también es inducida por la presencia de toxinas, se conoce como «respuesta SOS», y es una antigua manera de asegurar la supervivencia de al menos unas pocas bacterias descendientes ante la perspectiva de una crisis medioambiental. Cosa significativa, cuando las bacterias pierden la facultad de reparar el ADN deteriorado desaparece también invariablemente toda actividad sexual.

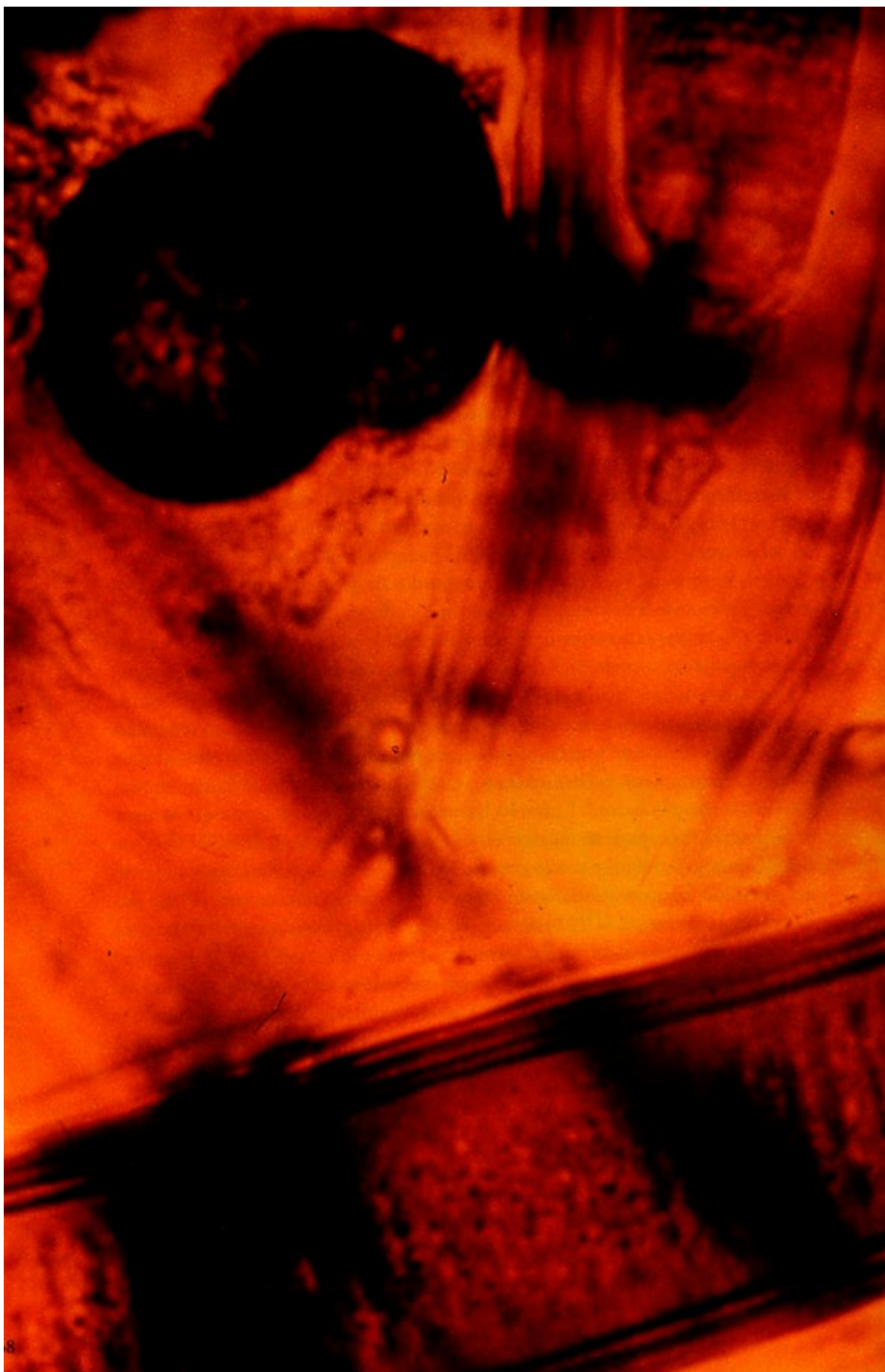




LÁMINA 14

Los «sombreros» de las cianobacterias las protegen de la luz solar directa. Tanto *Lyngbya aestuari* (el filamento inferior) como la cianobacteria cocoide de arriba están rodeados por tales vainas protectoras.

[Stjepko Golubic]

LÁMINA 15

Como las gafas de sol, las vainas de las cianobacterias absorben el exceso de radiación solar. Arriba: *Lyngbya*; abajo a la derecha: *Schizothrix splendida* con su gruesa vaina.

[Stjepko Golubic]

Escherichia coli, la bacteria intestinal humana, es extremadamente eficiente en la reparación del ADN dañado por la radiación ultravioleta; pero una cepa de *E. coli*, la denominada *rec minus*, es incapaz. Esta mutante asexual es también cientos de veces más sensible a la radiación ultravioleta que sus parientes sexualmente activos. En el sexo bacteriano el ADN es transferido en un sentido, de un donante a un receptor. La bacteria receptora integra los genes del donante en un orden lineal propio. La

formación de ADN recombinante requiere al menos una bacteria viva y otra fuente —viva o muerta— de ADN. Para que la bacteria resultante de este acto sexual sobreviva debe poseer un juego completo de genes (una copia de cada gen esencial). La recombinación genética que hoy enriquece a los empresarios de la biotecnología comenzó siendo una técnica de supervivencia: primero como reparación del ADN y luego como sexo bacteriano, transgénico por naturaleza.

¿SEXO ANTES DE LA VIDA? | ¿Cuán antiguo es el sexo? Hay evidencias de que las bacterias surgieron no mucho después de que la corteza terrestre se solidificara. Pero las bacterias no evolucionaron de la nada. Compuestos de carbono complejos, forjados por el Sol y otras fuentes de energía, crecieron dentro de estructuras termodinámicas disipativas^[15]. Antes de la vida propiamente dicha hubo sistemas complejos organizados. Algunos científicos han sugerido que en este dominio prebiótico podría haber existido el equivalente molecular del sexo: entre las protocélulas habría habido un intercambio fluido de fragmentos de ADN, en cuyo caso nada impide pensar que el sexo, definido como recombinación genética, pudiera haber existido antes incluso que la vida misma.

El sexo es recombinación genética, la formación de un nuevo ser recombinando genes de al menos dos fuentes «progenitoras» como pueden ser una bacteria donante y otra receptora. Las proteínas que componen todos los cuerpos vivos no se forman directamente a partir del ADN, sino a través del ARN, la molécula «mensajera» y «traductora» que usa la información del ADN para ensamblar aminoácidos en proteínas. El ARN es una molécula «sexy», en el sentido de que puede reordenarse a sí misma. A diferencia del ADN, el ARN se replica y además dirige la síntesis de proteínas. La actividad del ARN como enzima que se corta y reorganiza a sí mismo es de suyo un extraño tipo de recombinación genética. Algunos ven en esto sexo al nivel molecular. El ADN, por el contrario, debe generar ARN como intermediario para el ensamblado de las proteínas. Cuando las cadenas helicoidales del ADN se abren, una porción de una de las cadenas es «copiada» en forma de ARN mensajero. Luego las moléculas de ARN de transferencia usan el ARN mensajero

como plantilla para ensamblar el aminoácido correspondiente dictado por el código hasta completar una proteína. Mientras el ADN depende del ARN y diversos enzimas para replicarse, el ARN puede, en principio, producir proteínas por sí solo.

Algunos científicos postulan que antes de la evolución de la vida la Tierra era un «mundo de ARN», en el que de manera anárquica fragmentos genéticos se recombinaban y producían proteínas que al final desembocaron en la vida. Si es así, el ARN habría sido el precursor de la vida, un sistema de información genética camino de convertirse en materia viviente.

Es posible que la Tierra arcaica fuese un escenario de genes desnudos en desenfadada confusión, pero a nosotros nos parece más probable que las evoluciones del ARN ancestral tuviesen lugar dentro de protocélulas limitadas por una membrana. En cualquier caso, el sexo ancestral de ARN —en la forma de recombinación— probablemente precedió a las células con ADN y condujo a las primeras formas bacterianas. El sexo (o al menos sus precursores necrofílicos basados en el ARN) podría haber entrado en escena antes que la vida misma.

AMISTADES PELIGROSAS: HIPERSEXO | Todas las formas de vida familiares (organismos visibles a simple vista como las plantas, los animales, los hongos y los líquenes) proceden del «hipersexo». Todos sabemos que, en las especies sexuales, dos individuos se unen temporalmente para producir nuevos individuos con genes de cada progenitor. Mucho menos conocido es el hecho de que, en el pasado, individuos muy diferentes se han unido permanentemente para producir nuevos «descendientes» con genes de cada especie. En vez de producir un nuevo miembro de una especie preexistente, como en el sexo animal y vegetal ordinario, las amistades peligrosas interespecíficas pueden producir especies enteramente nuevas. La simbiosis, muy extendida en la naturaleza, se da cuando dos o más individuos de especies distintas viven juntos durante la mayor parte de sus vidas. Como en el sexo, la simbiosis implica una unión estrecha entre los individuos. Pero aquí existe un elemento de bestialismo, porque no se respeta la barrera entre especies. En

analogía con el sexo bacteriano, donde, por ejemplo, una bacteria del género *Streptomyces* puede tener un encuentro sexual con otra bacteria muy diferente, lo que llamamos hipersexo —por definición— se da entre representantes de formas de vida distintas. El concepto de hipersexo, definido aquí como una asociación simbiótica permanente que genera organismos con genes de distinta procedencia, todavía no ha sido plenamente reconocido por el neodarwinismo ortodoxo^[16]. Pero no por eso deja de ser una fuente de innovación evolutiva de la mayor importancia.

Los ejemplos más llamativos de hipersexo se dan en las bacterias. Una bacteria penetra en el cuerpo de otra y comienza a crecer y reproducirse dentro de ella. Las uniones permanentes entre bacterias en principio separadas condujeron a nuevas formas de vida, incluyendo, tras cientos de miles de años de evolución, los seres humanos. Los consorcios bacterianos son el fundamento de cada una de las células animales que componen nuestro cuerpo, y también de las células vegetales. En otras palabras, las células que nos constituyen son híbridos hipersexuales. Con la excepción de unos pocos seres minúsculos que habitan en aguas carentes de oxígeno (como *Trichonympha*, [LÁMINA 16]), casi todos los organismos compuestos de células con núcleo —protoctistas (como los ciliados y las algas pardas), hongos (como las levaduras y las setas), plantas (como los helechos y el trigo) y animales (como las almejas y los humanos)— poseen orgánulos para la respiración aeróbica. Dichas células contienen diminutos orgánulos —las mitocondrias— que producen energía para el organismo mediante el metabolismo del oxígeno. Estas mitocondrias microscópicas (las pequeñas barras oscuras que se observan en la [LÁMINA 17]) fueron en otro tiempo bacterias libres que respiraban oxígeno. Antes de que evolucionaran los animales, las plantas o los hongos, es probable que pequeñas bacterias predadoras capaces de respirar oxígeno invadieran células fermentadoras de mayor tamaño (protoctistas) sin dicha capacidad. Con el tiempo las bacterias invasoras se convirtieron en las mitocondrias, formando una «unión sexual» permanente.



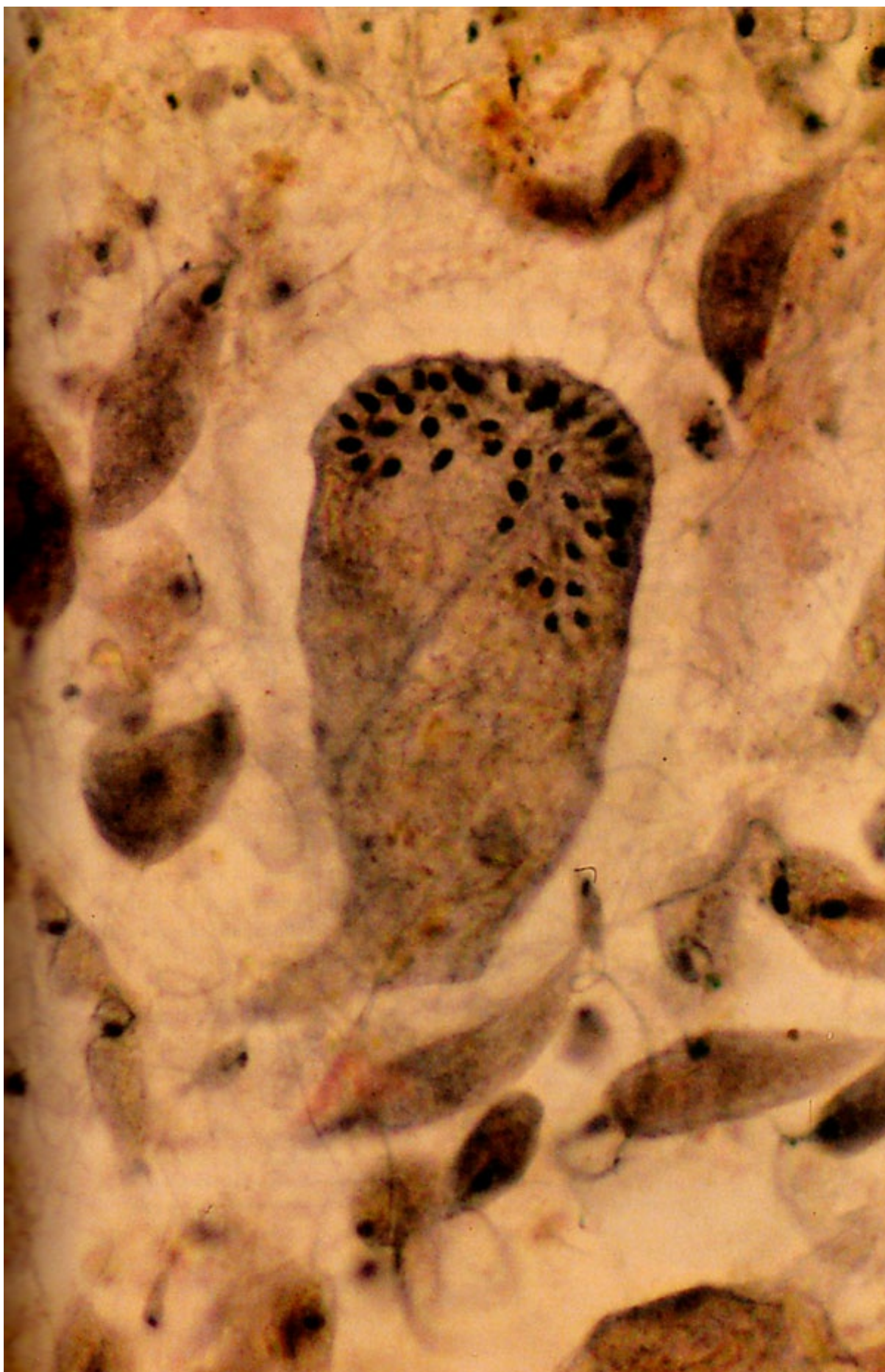


LÁMINA 16

***Trichonympha*, un hipermastigoto. En este ejemplo de sexo protocista, una célula se diferencia en hembra desarrollando un anillo de gránulos en la parte posterior. El macho atraído penetra en ella por detrás; sus undulipodios y demás orgánulos se desintegran, dejando sólo el núcleo, que se aparea con el núcleo femenino tal como se muestra en la lámina 21.**

LÁMINA 17

Protoctistas procedentes del intestino de una termita. Estos insectos digieren la madera. Los puntos negros son los núcleos. En *Calonympha* puede haber más de uno por célula.

[David Phillips/Photo Researchers]

El hipersexo puede partir de una infección. En el caso de las mitocondrias, por ejemplo, los agentes infecciosos fueron bacterias aeróbicas invasoras que, en vez de destruir completamente a sus «huéspedes» fermentadores, se multiplicaron dentro de ellos manteniéndolos con vida. Paradójicamente, los mejores agentes infecciosos no fueron los más letales. El patógeno «perfecto» acaba con todo y luego muere él mismo por falta de recursos. Lo más probable es que los antecesores de las mitocondrias matasen a casi todas las células que infectaban, pero la imperfección fue esencial para que, con el tiempo, la enfermedad se convirtiese en un estado de infección crónica benigna. Todas nuestras células están marcadas por un antiguo yugo microbiano, la subordinación de agentes en otro tiempo infecciosos ahora confinados en nuestras células y trabajando para ellas. Las plantas también contienen bacterias en asociación permanente, los orgánulos verdes conocidos como cloroplastos. Los cloroplastos comenzaron siendo bacterias de vida libre del grupo de las cianobacterias (la tercera fusión de la [LÁMINA 7]). Hasta la planta o el animal más virginales albergan un pasado promiscuo, una larga memoria de hipersexo —apareamientos bacterianos permanentes— en lo más hondo de sus células.

Algunas asociaciones hipersexuales nacieron de manera relativamente pacífica: un organismo producía un producto de desecho, como oxígeno o acetato, que otro organismo podía respirar o asimilar (y así eliminar del medio). Con la unión de ambos se establecía un consorcio aeróbico y

asimilador de acetato. A través del hipersexo, las comunidades bacterianas se convirtieron en nuevas individualidades compuestas. Otras asociaciones microbianas, sin embargo, tuvieron un comienzo más violento. Bacterias agresivas y a menudo letales como *Bdellovibrio*, *Daptobacter* y *Vamprococcus* siguen invadiendo e incluso matando a sus víctimas en su incesante búsqueda de alimento y energía. A menudo fue un impulso depredador lo que atrajo unas bacterias hacia otras en primera instancia. Pero en un planeta atestado la hostilidad no siempre es la mejor política. Los organismos antagonistas llegaron a convenios metabólicos que en ocasiones se convirtieron en pactos genéticos. «Si no puedes vencerles, únete a ellos», reza el viejo dicho. Algunas bacterias, obedeciendo esta máxima, renunciaron a su autonomía y se integraron en unidades mayores. El resultado fue la emergencia de formas de vida más complejas. La [LÁMINA 18] ilustra de manera cómica el tránsito hipersexual de la hostilidad predatoria a la interdependencia inseparable.

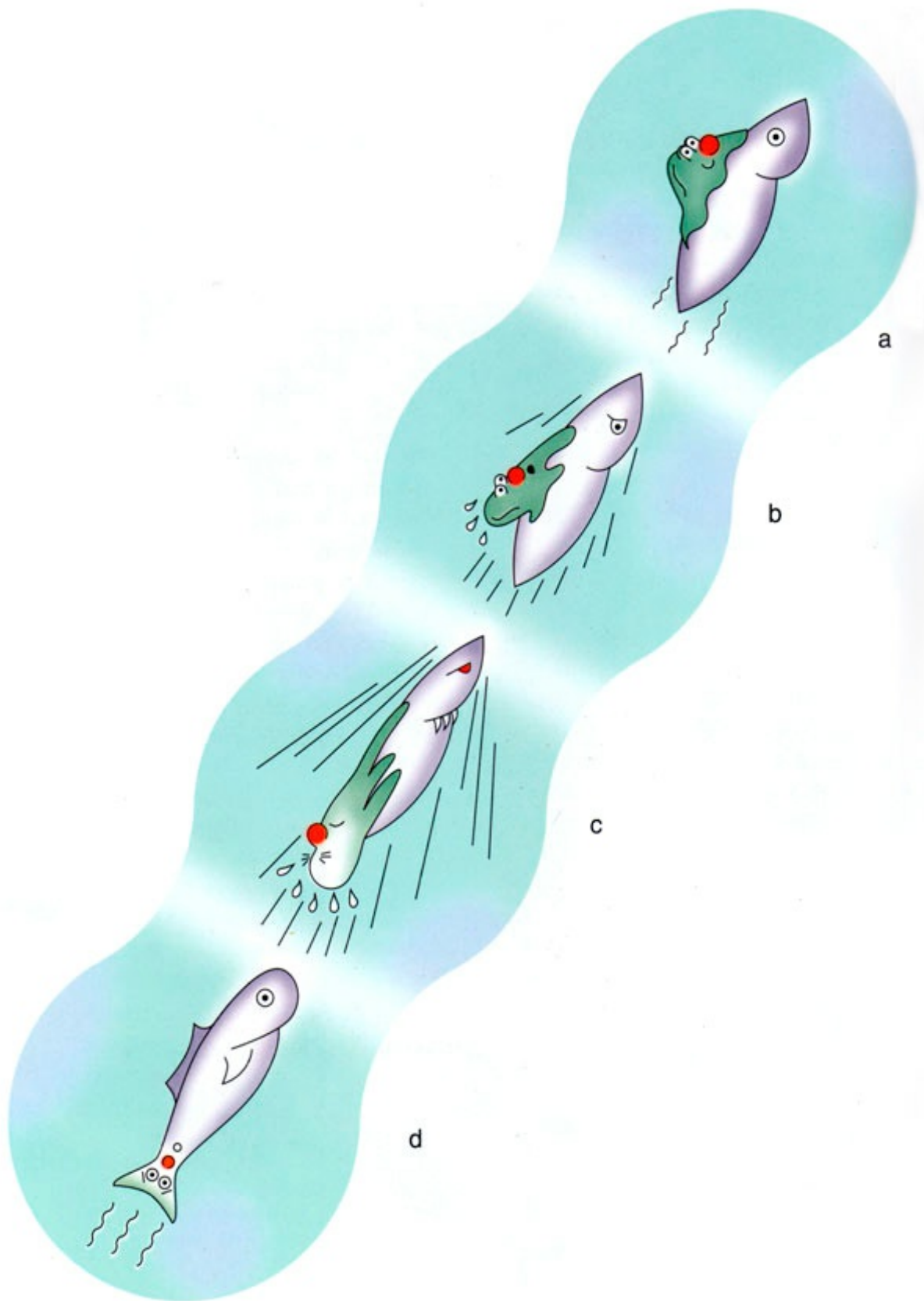


LÁMINA 18

Simbiogénesis: dos tipos distintos de seres amenazados se funden para convertirse en un pez feliz y contento en cuatro pasos (a, b, c y d).

[J. Steve Alexander]

El hipersexo verdadero, un abrazo evolutivo permanente, casi siempre implica la participación de una bacteria. El anatomista norteamericano Ivan Emmanuel Wallin (1883-1969) fue un experimentador pionero en este terreno. Wallin fue un precursor. Fue él quien hipotetizó que nuestras mitocondrias procedían de bacterias aeróbicas ancestrales de vida libre. Pero se equivocó al pensar (incorrectamente, como luego se demostraría) que había conseguido aislar mitocondrias de células animales y criarlas por separado. Las mitocondrias aisladas no sobreviven más allá de unas horas. Nadie ha conseguido cultivarlas en laboratorio, es decir, inducir las a reproducirse cuando se les suministra alimento. Su atadura, y su disciplina, es completa. Obliterada su individualidad, no pueden vivir fuera del citoplasma de nuestras células.

En todas las células de nuestro cuerpo persisten vestigios de la unión permanente bacteriana que llamamos «hipersexo». El mestizaje hipersexual parece estar en el origen de todos los organismos grandes que nos resultan familiares. Cada una de nuestras células es resultado de una increíble hibridación, más disparatada y variada que cualquiera de las que puedan encontrarse en un bestiario medieval.

HIPERSEXO Y EL ORIGEN DE LAS ESPECIES | Tras el sexo bacteriano vino el hipersexo, es decir, una asociación simbiótica permanente para formar un nuevo tipo de célula (la nucleada). En el hipersexo una bacteria entera penetra en el cuerpo de otra y las células de ambos tipos viven juntas para siempre. La reproducción de los socios hipersexuales condujo a nuevas unidades evolutivas: las células con núcleo comunes a todas las formas de vida no bacterianas (de las amebas unicelulares a los animales y plantas con miles de millones de células por individuo). Alguien podría protestar arguyendo que la endosimbiosis no es sexo. Desde el punto de vista evolutivo, sin embargo, fue incluso mejor que el sexo: las fusiones

bacterianas dieron lugar no sólo a amebas, plasmodios y paramecios, sino (tras la evolución del sexo meiótico y sus géneros) a todos los organismos superiores, incluidos nosotros. Los animales que se aparean y las orquídeas polinizadas por insectos son los beneficiarios de esta ascendencia hipersexual. En efecto, animales, plantas, hongos y protoctistas tienen la hipersexualidad embutida en su historia evolutiva celular.

Nada puede ser más íntimo que compartir el espacio encerrado por la membrana celular de otro organismo. Esto es lo que se ha visto que hacen algunas bacterias (similares en sus estilos de vida a nuestros ancestros celulares). **[LÁMINA 19]** A lo largo del tiempo evolutivo, dos o más bacterias comparten el mismo espacio vital, el mismo citoplasma, hasta hacerse inseparables. Mientras aprovechan y reciclan los desechos de cada cual, se entregan al sexo transgénico. Bacterias antes independientes se fusionan total y permanentemente para convertirse en organismos nuevos, mucho más complejos. La «individualidad» de los organismos grandes es siempre intrínsecamente compleja, el resultado de la integración y pérdida de autonomía de unos ancestros sólo remotamente relacionados.

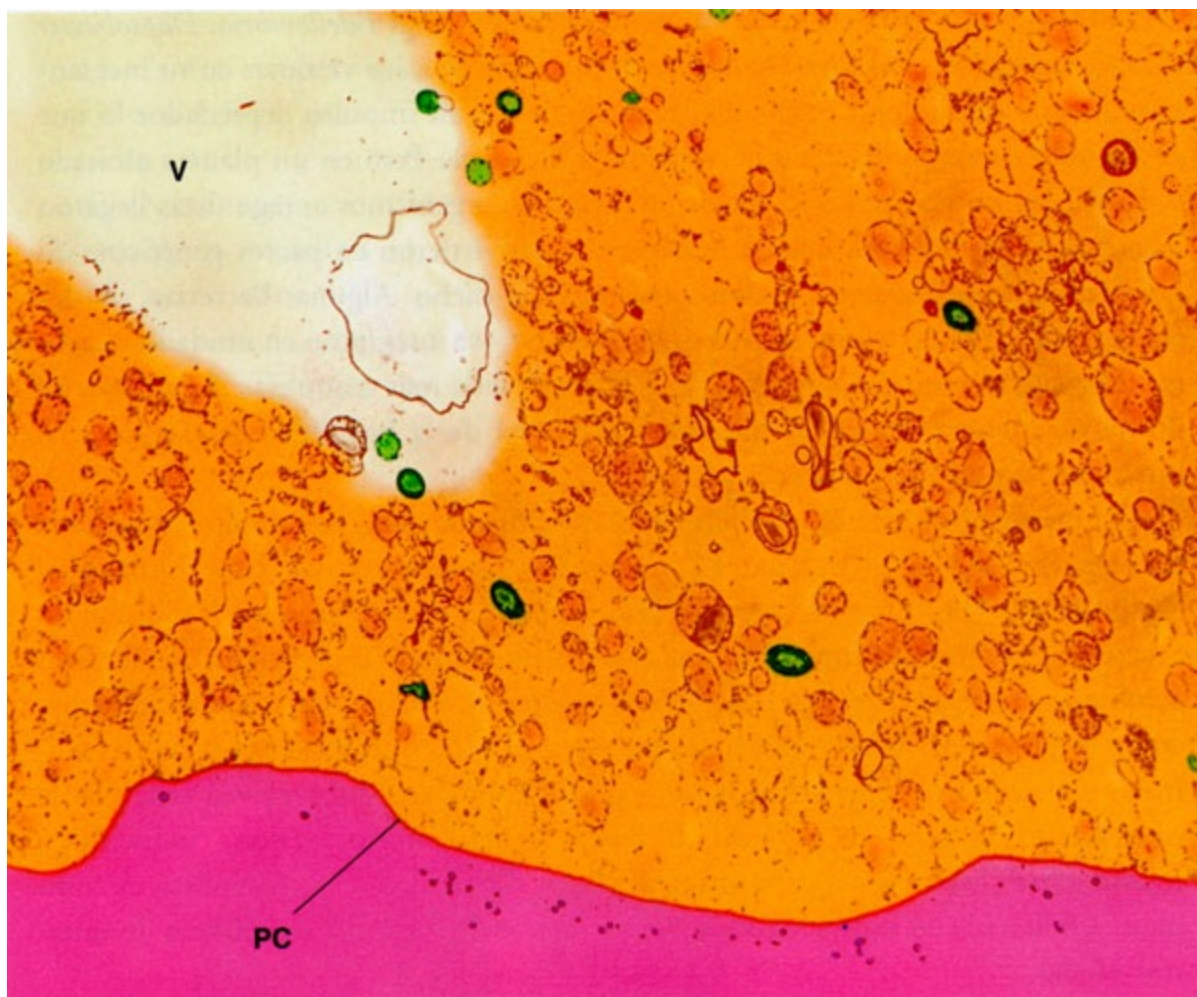


LÁMINA 19

***Beggiatoa*, una bacteria gigante anaranjada del golfo de México. Esta micrografía electrónica de transmisión de pocos aumentos muestra el citoplasma periférico con algunos endosimbiontes visibles hacia el espacio vacuolar (V). Por fuera de la pared celular (PC) hay algunas bacterias de vida libre.**

Las profundidades del compromiso hipersexual reflejan la historia natural de las bacterias. Normalmente las bacterias nunca se funden, sino que entablan un breve contacto para enviar genes de una célula a otra. En el hipersexo, sin embargo, se funden para siempre. Nosotros los animales evolucionamos a partir de los protoctistas, que a su vez son la descendencia hipersexual (saltándonos quizá mil millones de generaciones) de la descendencia hipersexual de bacterias permanentemente unidas. La primera fusión hipersexual bacteriana (entre un oscuro microbio del grupo de las arqueobacterias y un nadador con

pared celular) condujo a la primera célula nucleada (la primera fusión de la [LÁMINA 7]).

La descendencia eucariótica del hipersexo bacteriano, al proceder de la fusión de más de un tipo celular, era estructuralmente más complicada que sus ancestros bacterianos. Mil millones de años de evolución en el seno de las comunidades microbianas condujeron a las fantásticas y caprichosas fusiones hipersexuales. Los protoctistas como *Staurojoenina*, mostrado en la [LÁMINA 20], fueron en otro tiempo los dominadores del mundo.

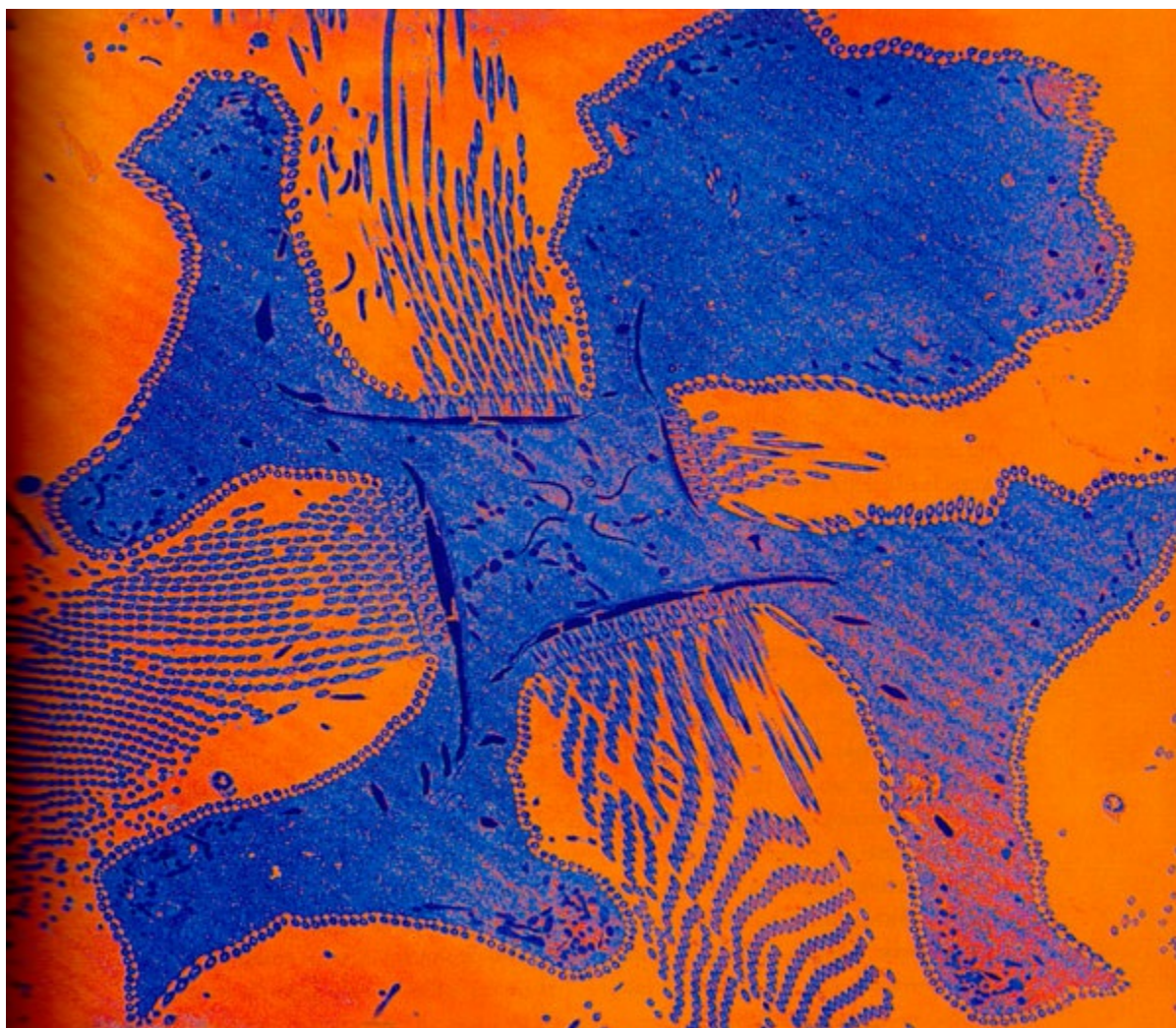


LÁMINA 20

Staurojoenina, protista tetralobulado simbiote de *Incisitrmmes minor* (Newbury Park, California). Sección ultrafina de la parte frontal de la célula. Cada lóbulo está cubierto de bacterias superficiales alineadas, y entre los lóbulos hay haces de undulipodios de estructura similar a los de los espermatozoides masculinos y los

cilios de los oviductos femeninos humanos.

[Micrografía electrónica de transmisión por David Chase.]

Una vez algunos protostistas comenzaron a fundirse y crecer, ocasionalmente retornaban a su estado unicelular original. Para persistir, tenían que actuar así en cada generación. El camino para la evolución de especies con reproducción sexual estaba abierto. Los géneros fijos y las especies sexualmente establecidas no comenzaron a evolucionar hasta hace unos mil millones de años. Las especies como los perros y los gatos son en última instancia el resultado de la invención protostista del sexo meiótico. Con el sexo reproductivo (ciclos de duplicación y singularización en protostistas que se fusionaban estacionalmente) vinieron las especies sexuales. En el próximo capítulo exploraremos la evolución de estos ciclos generadores de cuerpos y engendradores de muerte.

EL CAMINO HACIA LA MEIOSIS | En el lenguaje corriente entendemos por sexo la «fricción genital» de los mamíferos. Quizás a causa de esta concepción tan restringida, el sexo tiende a considerarse un proceso único. Nada está más lejos de la verdad. El sexo es múltiple, complicado y confuso, y tiene una inmensa y profunda historia. Pueden distinguirse al menos tres modalidades de sexo, todas ellas evolucionadas en diferentes organismos y en diferentes tiempos y lugares. El primero en evolucionar fue el sexo bacteriano unidireccional que condujo a la supervivencia de una red ecológica global finamente sintonizada. Más tarde, una forma específica de hipersexo simbiótico contribuyó a la aparición de nuestros ancestros nucleados, los protostistas. Por último, en los ancestros de hongos, plantas y animales evolucionó la forma más familiar de sexo: el sexo meiótico fecundante que implica fusión celular. Todo esto fue un preludio necesario para el desarrollo de cuerpos masculinos y femeninos como los nuestros. Nuestras propias urgencias, necesidades e inclinaciones sexuales seguirán en la oscuridad mientras no se revelen los detalles íntimos de nuestros ancestros sexuales. Se sabe mucho sobre nuestro pasado sexual, pero cualquier especialista en el tema no puede relatar más que una mínima parte de la historia. Estamos intentando componer la historia completa a partir de las claves que nos ofrecen los diversos

especialistas. Nuestra historia sexual —en sentido amplio— es bastante estrambótica.

Primero fue el sexo bacteriano transgénico, y tras él vino el hipersexo, las comunidades de bacterias fusionadas que condujeron a la nueva individualidad de la célula nucleada. Este nuevo nivel de sexualidad coexistió con el anterior y se construyó sobre él. La vida nunca olvida su ascendencia. El sexo bacteriano transgénico, la modalidad que enriquece a las empresas de biotecnología, probablemente evolucionó como una respuesta natural a los peligrosos niveles de compuestos químicos mutágenos y radiaciones ultravioleta en la caliente y desprotegida Tierra primitiva. Las fusiones bacterianas, la simbiogénesis específica que hemos denominado hipersexo, combinaron distintos seres (fermentadores, nadadores, aeróbicos y fotosintéticos) en uniones permanentes.

El tercer tipo de proceso sexual, el sexo meiótico, evolucionó en los protoctistas, producto a su vez del hipersexo bacteriano. El sexo meiótico producía propágulos (los espermatozoides y óvulos animales o las esporas vegetales y fúngicas) por meiosis, el proceso de reducción del número de cromosomas. La meiosis es un tipo de división celular que reduce a la mitad el número de cromosomas celulares. La sexualidad meiótica (división celular por meiosis para reducir a la mitad el número de cromosomas, seguida de fecundación para doblarlo de nuevo) aparece como un acto de restauración compensatoria. A las ventajas de un estilo de vida solitario cuando la vida era fácil se contraponía la necesidad de una reserva de recursos cuando venían tiempos duros. Esta dicotomía (el ciclo duplicación-singularización de los cromosomas celulares) evolucionó en el mundo microbiano de los protoctistas. Como veremos, el comportamiento de los protoctistas actuales revela su historia sexual. «No se puede vivir con ellas, y tampoco sin ellas», se queja el amante despechado. La tensión evidenciada por esta frase quizá tenga sus raíces, como explicaremos, en el compromiso un tanto esquizofrénico del ciclo vital de los animales. Como animales que somos, estamos abocados a un acto de compensación imperativo entre nuestra existencia como cuerpos con dos juegos de cromosomas, que inevitablemente morirán, y las células sexuales con un juego de cromosomas, producidas por esos mismos cuerpos, que disfrutaban de la posibilidad de una vida continuada a lo largo de las generaciones.

The background of the page is a solid orange color with a pattern of white, wavy, concentric lines that resemble ripples or topographical contours. These lines are irregular and flow across the entire page, creating a textured, organic feel.

tres

CANÍBALES

Y OTRAS VÍRGENES:

SEXO DE FUSIÓN

Como nadie ha encontrado realmente la totalidad perfecta en otro ser humano, con independencia de su sexo, el gemelo es lo más cerca que uno puede acercarse a la totalidad humana con otro; y —¿quién osa invocar la biología y el origen de nuestra especie?— detrás de nosotros, mamíferos predestinados a morir una vez hayamos procreado, está siempre nuestro ancestro asexual la ameba, que nunca muere y no se reproduce sexualmente, sino que simplemente —¿serenamente?— se parte en dos produciendo réplicas idénticas.

Gore Vidal^[17]

FUNDIRSE PARA SOBREVIVIR | Dispensados por adelantado por cualquier consecuencia indecorosa de nuestra aventura no lineal, nos embutimos en un «traje de tiempo», seleccionamos la época y somos transportados a la Tierra tal como era hace 2000 millones de años. En nuestro monitor vemos aumentados, además de la bota izquierda de nuestro traje protector, algunos de nuestros ancestros sexuales más remotos: dos microbios nadadores ameboides fusionándose para sobrevivir. Eludiéndose y englobándose mutuamente por turnos, forcejean en el equivalente microbiano de un combate de lucha libre. **[LÁMINA 21]** Es difícil decir si están peleando o comiendo mientras cada uno intenta engullir al otro. Sus retorcimientos parecen tan placenteros como insatisfactorios. Hemos sido afortunados al aterrizar en este tiempo y lugar, porque seremos testigos de las maquinaciones que prefiguraron la fecundación, el proceso por el que un huevo y un espermatozoide se unen para dar un huevo fecundado que se desarrolla hasta convertirse en el cuerpo de un animal.



LÁMINA 21

Sexo protoctista arcaico. El diagrama representa dos triconínfidos. Los géneros se han diferenciado, y el macho penetra en la hembra por detrás. (Véase lámina 16.)

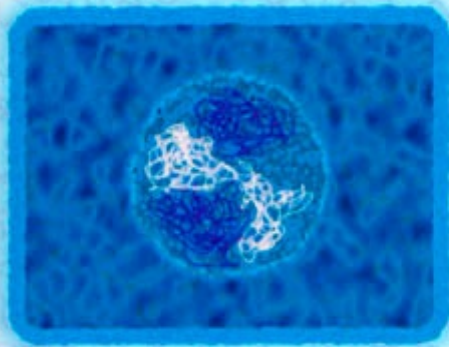
[Kathryn Delisle/José Conde]

Ajustamos el enfoque de nuestro microscopio portátil para ver más de cerca. Al principio pensamos que uno de los nadadores ha escapado al desesperado abrazo del otro, pero enseguida nos damos cuenta de que ambos siguen ahí. Se han fusionado. O quizá no. Observamos que los dos se han convertido en uno, pero no del todo. Sus membranas se han fundido, pero no sus núcleos. Juntos forman un cuerpo con dos núcleos, y por lo tanto con el doble de cromosomas —y de genes— que tenía cada uno por separado. Individualidades antes separadas, ahora en duplicidad, se confunden en una precaria singularidad, un ser cuasiunificado. Ahora los núcleos comienzan a acercarse el uno al otro, como movidos por una atracción mutua. Al final acaban fundiéndose. Dos organismos se han convertido en uno; sus dos núcleos se han convertido en un núcleo doble engrosado.

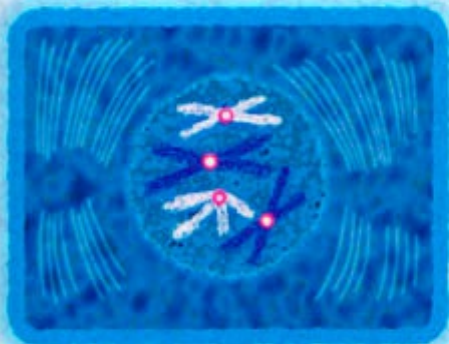
Miramos al cielo. El espectrómetro de gases incorporado en una manga de nuestro traje indica que la atmósfera, repleta de hidrógeno, metano y sulfuro, carece de oxígeno. Sin nuestra máscara protectora, la nube de gas venenoso que se cierne sobre el fangoso escenario nos mataría. El Sol en el horizonte parece pequeño, y el planeta extrañamente tropical, habitado sólo por un verdín voluptuoso. Ninguna planta o animal, ni siquiera un hongo, podría sobrevivir a esta asfixiante falta de oxígeno en la atmósfera. Pero aquí medran los protoctistas nadadores. Azuzados por el hambre, se funden en un abrazo caníbal. Vemos que algunos aún palpitan dentro de las membranas de su par. Es una lucha a muerte. Sin embargo, algunos emparejamientos, y hasta algún que otro trío, han tenido suerte. Fusionadas indefinidamente, las entidades dobles (o triples) formadas siguen nadando. Los emparejamientos más afortunados han mitigado su duplicidad convirtiéndose en células rollizas con un único núcleo, si bien con el doble de cromosomas. Siendo irreverentes, podríamos llamar a una mitad Adán y a la otra Eva. O, citando a Bette Davis: «Con dormitorios y baños separados, les doy la oportunidad de batirse [risas]». En el curso de

la ética teorización sobre la naturaleza del amor en el *Banquete* de Platón, Aristófanes nos habla de un tiempo primordial en el que hombres y mujeres —y hombres y hombres, y mujeres y mujeres— eran entidades únicas. Nuestras duplicidades ancestrales, dice, tenían forma de esfera con cuatro brazos y cuatro piernas, que podían retraer para rodar más rápido que cualquier corredor humano. Estos ancestros eran los andróginos, de quienes los hombres y las mujeres modernos son meras fracciones. Eran tan poderosos que Zeus, el rey de los dioses, les castigó por su arrogancia. Los dividió en dos, y luego ató los ombligos salientes de cada medio ancestro. Desde ese día, vagan por la Tierra en busca de su identidad perdida.

DUPLICIDAD | Si sustituimos los protoctistas primitivos por un rodador de ocho miembros, este relato inverosímil resulta ser no sólo provocativo, sino en gran parte cierto. Ocasionalmente, el hambre o la sed de nuestros minúsculos ancestros les condujo (en tiempo evolutivo y no mítico) a emparejarse y fundir sus membranas. Aunque la pasión sexual no surja de la inacabable búsqueda de nuestras mitades primordiales amputadas, como insinuó Platón, sí se debe a una duplicidad primordial. Todas nuestras células corporales son diploides, lo que quiere decir que poseen dos juegos de cromosomas reunidos en un solo núcleo. Nosotros tenemos 46 cromosomas, o 23 pares. La única excepción son los óvulos y espermatozoides, que son haploides, lo cual quiere decir que poseen un solo juego de cromosomas (23 en nuestra especie). En los animales, las plantas, los hongos y muchos protoctistas la haploidía y la diploidía se alternan. Periódicamente, óvulos y espermatozoides se unen a sus contrapartidas y restablecen la duplicidad cromosómica. En plantas y animales el núcleo diploide resultante, con sus dos juegos de cromosomas, se divide repetidamente para formar el embrión. El restablecimiento de la diploidía recibe un nombre familiar: fecundación. El término para la reversión periódica al estado haploide es más técnico: meiosis. [LÁMINA 22]

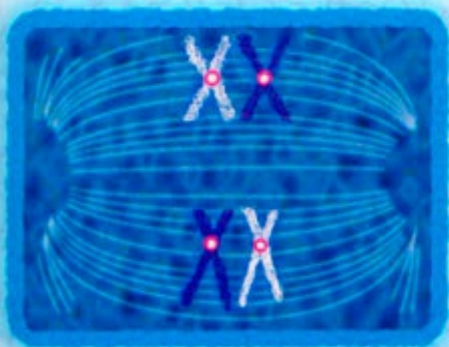


A

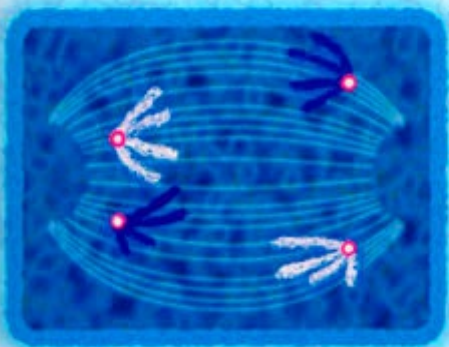


B

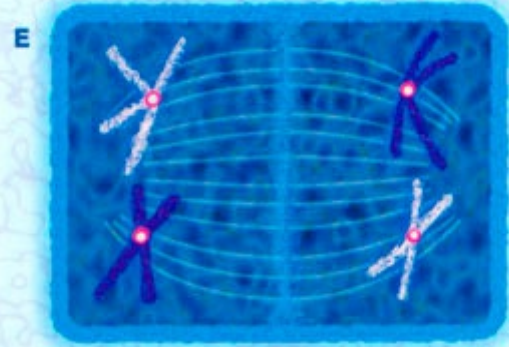
Cuatro cromosomas por célula



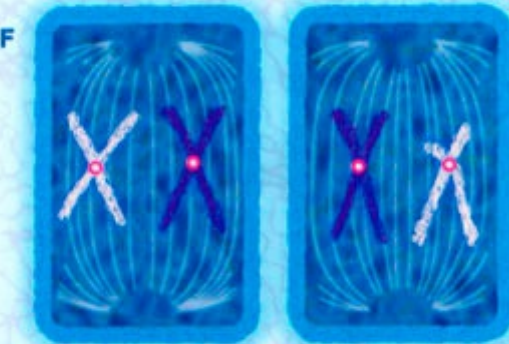
C



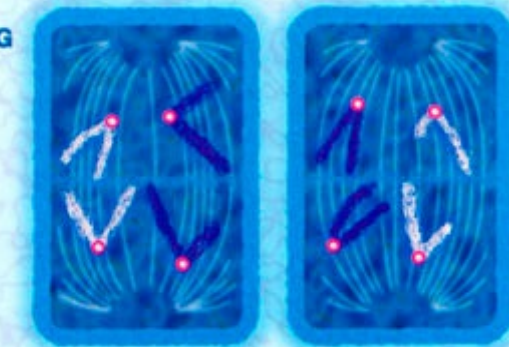
D



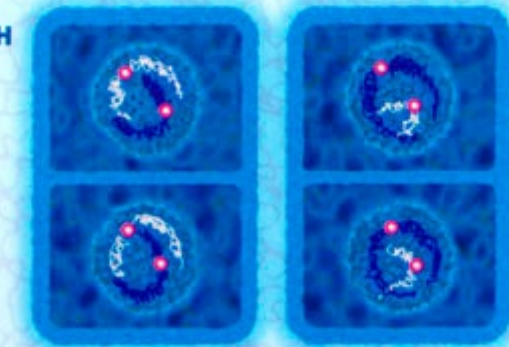
E



F



G



H

Dos cromosomas por célula

LÁMINA 22

Meiosis: el tipo de división celular en el que las células hijas tienen la mitad de cromosomas que la progenitora.

[Kathryn Delisle/José Conde]

La *meiosis* es un tipo de división celular que, a partir de células con dos juegos de cromosomas (diploides), produce células con un solo juego de cromosomas (haploides). Por esto mismo se la conoce también como «división reduccional». En los varones la meiosis produce espermatozoides haploides a partir de células diploides llamadas espermatocitos. En las mujeres, la meiosis produce óvulos haploides a partir de células diploides llamadas oocitos. No hay que confundir la meiosis con la *mitosis*, que es la división celular normal. Una célula haploide con 23 cromosomas antes de la mitosis dará dos células con 23 cromosomas cada una después de la mitosis, y una célula diploide con 46 cromosomas dará dos células con 46 cromosomas cada una. [LÁMINA 23] En la mitosis la célula se clona a sí misma. En la división meiótica reduccional, en cambio, una célula de 46 cromosomas forma al menos dos células con 23 cromosomas cada una.

Las distintas fases de la meiosis se muestran en la [LÁMINA 22] La reproducción animal requiere una fecundación que produzca la fusión espermatozoide-huevo que se desarrolla en la blástula, el primer estadio embrionario de los animales. En éstos la meiosis produce siempre espermatozoides y huevos destinados a encontrarse, fundirse y formar huevos fecundados que se convertirán en embriones. La haploidía, que acaba en fecundación, y la diploidía, que acaba en meiosis, constituyen el ciclo central de la historia biológica de los animales. Aunque los detalles difieren, la meiosis y consiguiente fecundación se da también en las plantas, la mayoría de hongos y muchos protoctistas. En todas estas formas de vida se requiere un apareamiento en algún momento de la vida de los individuos para restaurar la diploidía destruida por la meiosis. De ahí la denominación «sexo meiótico».

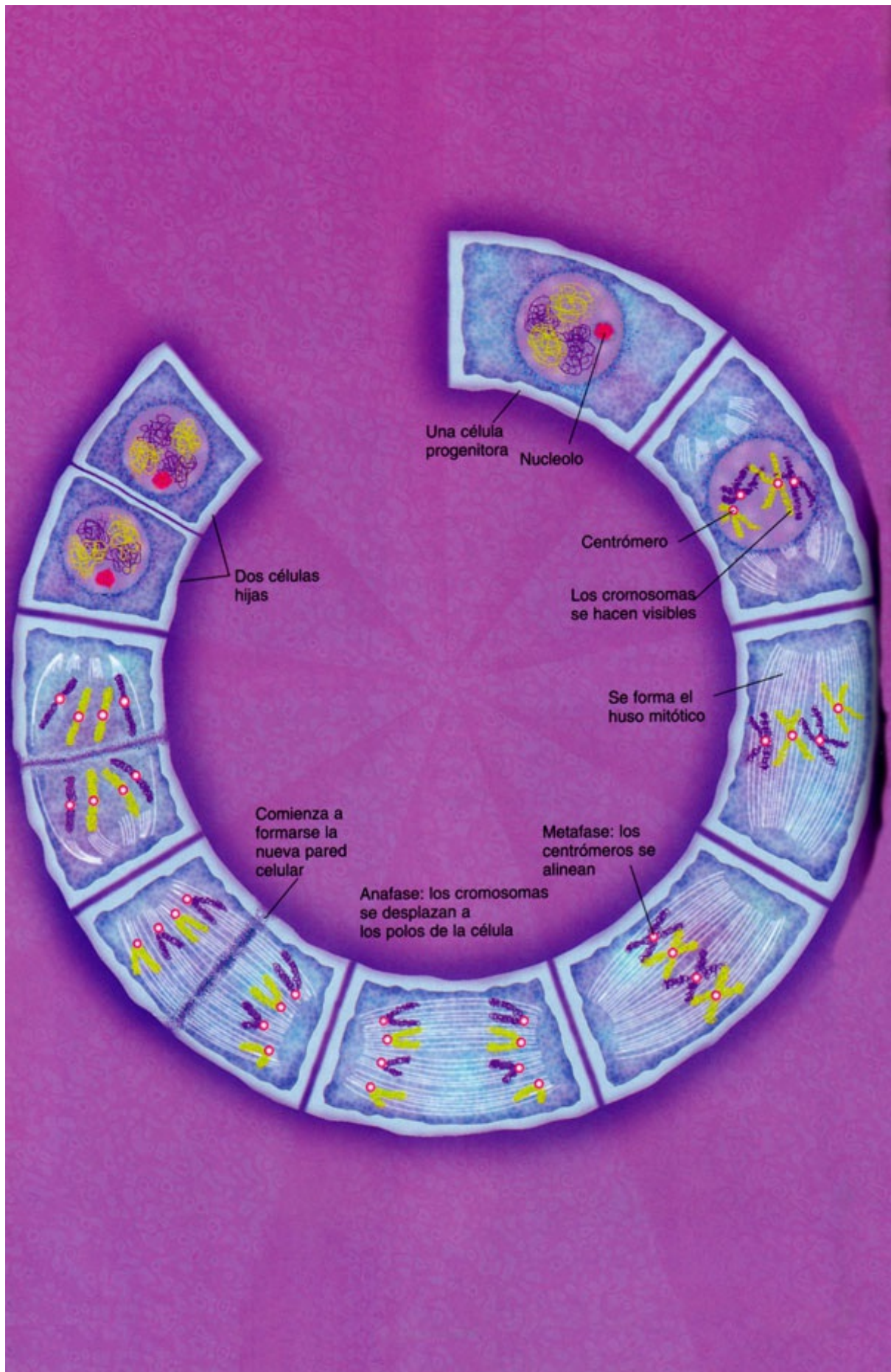


LÁMINA 23

Mitosis: el tipo de división celular en el que las células hijas tienen el mismo número de cromosomas que la progenitora, mostrada aquí en una célula vegetal.

[Kathryn Delisle/José Conde]

La blástula resultante de la unión sexual de espermatozoide y huevo crece a medida que las células diploides que la componen se dividen por mitosis. Los núcleos se multiplican. Las células se alargan, se engrosan o experimentan otras modificaciones. El embrión pluricelular desarrolla una boca, un ano, tejido muscular y nervioso, y se convierte en un miembro de una de las más de diez millones de especies animales reconocibles.

A partir de la alternancia protocista entre singularidad y duplicidad, de las fusiones celulares y posterior meiosis, evolucionaron los cuerpos de los animales. Las plantas también se desarrollan a partir de embriones, cuerpos pluricelulares que viven dentro de sus madres. Estos embriones no blastulares pasan también por una serie de estadios de desarrollo. Los cuerpos de animales y plantas están siempre compuestos por multitud de células. Para persistir, las células de estos cuerpos alternan entre la condición desapareada (haploide) y la apareada (diploide). En aquellos fangos fétidos, resguardados del para ellos tóxico oxígeno, los ancestros diploides de animales y plantas habrían sido capaces de tolerar la escasez de agua y alimento mejor que sus parientes desapareados. Pero, más pronto o más tarde, los monstruos dobles habrían tenido que recuperar su forma óptima: seres únicos, lozanos y eficientes, con un solo juego de cromosomas.

De hecho, en muchos protocistas actuales el sexo meiótico falta por completo. Estos seres se reproducen directamente a partir de una sola célula mediante alguna variante de la mitosis. Saludables y ligeros, se desenvuelven perfectamente con su único juego de cromosomas. Estos protocistas haploides mitóticos no pierden tiempo en producir un segundo e innecesario juego de cromosomas. No hay géneros ni apareamientos ni fusiones sexuales. Incluso muchas algas, plasmodios y hongos que pueden reproducirse sexualmente se desenvuelven y crecen perfectamente bien como haploides. Tan pronto como se aparean para sobrevivir a un periodo de cambio estacional o de escasez, el producto de la fusión se transforma

en una estructura resistente, un propágulo. Luego, tan pronto como las condiciones lo permiten, revierten al estado haploide experimentando una meiosis y librándose así de sus cromosomas «extra»^[18].

A diferencia de la meiosis, que reduce a la mitad el número de cromosomas, la mitosis es el tipo de división celular que mantiene el *statu quo*. Las divisiones mitóticas, mucho más frecuentes, son responsables del crecimiento de un organismo cuando las células descendientes permanecen unidas. La mitosis conduce a la reproducción —una célula forma dos o más células— cuando las células descendientes siguen caminos separados. Cada cromosoma se replica a medida que su cantidad de ADN y proteína (los componentes de los cromosomas) se dobla. Una vez duplicados, los cromosomas migran hasta situarse en el ecuador de la célula. Después, cada medio cromosoma (cromátida) se desplaza a un extremo de la célula (polo). Completado el proceso, la célula madre comienza a dividirse en dos. El resultado de la mitosis son dos células descendientes, cada una con el mismo número de cromosomas que la célula progenitora^[19]. Esta mitosis asexual, esta reproducción de células que constituyen organismos en sí mismas, es llevada a cabo por los protoctistas. Las células animales, vegetales y fúngicas también se reproducen por mitosis durante el crecimiento del organismo. Obviamente, ni la mitosis ni la meiosis están presentes en las bacterias, en las que faltan los cromosomas. (Véase nota 13, capítulo 2.)

Los animales, las plantas y los hongos, intrínsecamente pluricelulares, crecen a través de la reproducción mitótica de sus células constituyentes. Estos organismos grandes evolucionaron a partir de ancestros sexuales que alternaban la fecundación con la meiosis. Pero con toda probabilidad no descienden todos de un único ancestro. La evidencia preponderante (en especial la variación del tema meiótico entre los diversos protoctistas) sugiere que la sexualidad meiótica evolucionó más de una vez, incluso entre los distintos ancestros de plantas, animales y hongos^[20]. Ciliados, diatomeas, algas verdes, foraminíferos, plasmodios acuáticos y dinomastigotos presumiblemente han desarrollado variantes meióticas propias. Dado que todos estos protoctistas crecen y se reproducen por mitosis, parece obvio que ésta evolucionó antes que el sexo meiótico.

La división celular mitótica fue, y sigue siendo, el modo eucariota de

producir más células eucariotas. En los protoctistas la meiosis tiende a ser estacional, una modalidad especial de división celular que siempre debe ser compensada luego por algún tipo de fusión fecundante. Nuestros ancestros fueron protoctistas sexuales que, en condiciones de estrés, se fundían formando entidades dobles. Cuando las condiciones cambiaban revertían a su estado simple anterior. Los protoctistas unicelulares, o protistas, incluyen seres como las amebas, las euglenas y los paramecios. En los dos primeros grupos la meiosis falta por completo, mientras que los paramecios exhiben una meiosis atípica. Estos protoctistas vivos nos dan una idea de la clase de organismos en los que aparecieron los ciclos sexuales meiótico-reproductivos. [LÁMINA 24]

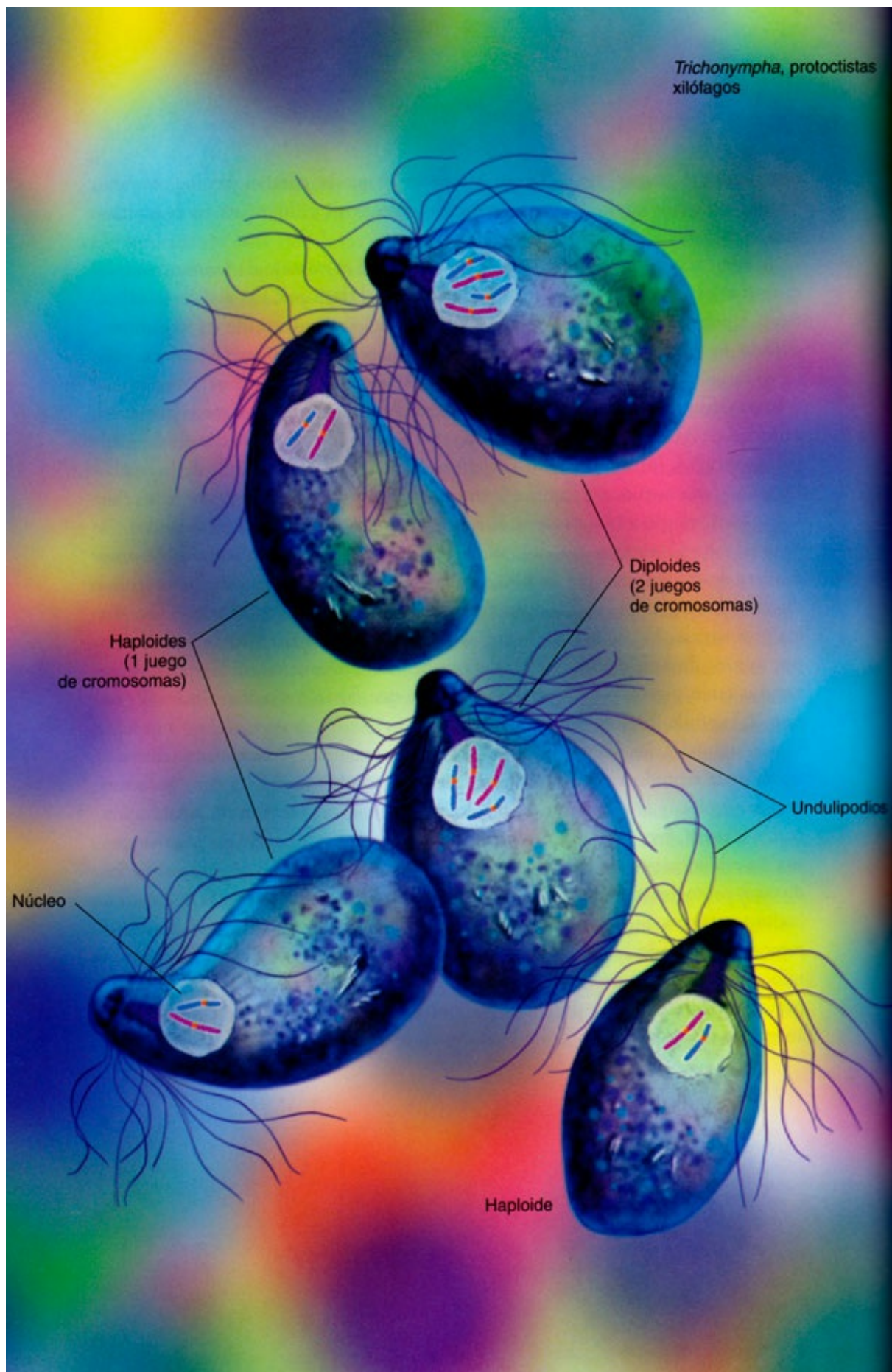


LÁMINA 24

Protoctistas, unos haploides (un juego de cromosomas) y otros diploides (monstruos dobles con dos juegos de cromosomas).

[Kathryn Delisle/José Conde]

La experimentación sexual protoctista condujo a los apareamientos fértiles entre individuos compatibles de la misma especie. Las especies, entendidas como poblaciones de tipos consistentes de organismos distinguibles, habrían evolucionado hacia la época en que el hipersexo bacteriano produjo los primeros protoctistas, hace alrededor de 2000 millones de años. Los primeros protoctistas eran asexuales y se reproducían por división directa, esto es, por mitosis. Algunos de sus descendientes fueron organismos sexualmente activos capaces de aparearse para producir células dobles, con reversión subsiguiente al estado simple. Hace alrededor de mil millones de años, algunas especies de protoctistas que practicaban el sexo estacional adoptaron un nuevo aspecto, estabilizándose mediante fusión sexual regular. Habían evolucionado las primeras especies sexuales. Eran protoctistas que de manera estacional se consagraban a la separación meiótica (retorno a la unicidad) y fusión mediante fecundación (restablecimiento de la duplicidad). Estos organismos tenían (y tienen) que resolver un problema: el de distinguir los géneros. Los pares complementarios tenían que encontrarse y reconocerse para evitar el maligno canibalismo que había pesado sobre sus ancestros. Los pares se fusionaban en cada generación para recrear la única forma de su organización viva que podía sobrevivir a la sequía, el invierno, la desecación o cualquier otra calamidad cíclica que había llevado a los protoctistas a fundirse en primera instancia.

Al principio, las células sexuales que se fundían eran los cuerpos de los propios organismos unicelulares. Aún hoy, en muchos protoctistas las células sexuales de géneros complementarios son indistinguibles. En las especies en que las células masculinas (o lo que sean) son indistinguibles de las femeninas (o lo que sean), los géneros se reconocen mutuamente mediante claves muy sutiles. Aquellos primeros protoctistas unicelulares no tenían órganos genitales ni propágulos nadadores especializados. Con el tiempo, y en muchos linajes por separado, las células sexuales inicialmente

iguales se fueron diferenciando en tamaño y forma, hasta culminar en la anisogamia, la diferenciación entre espermatozoides pequeños y huevos grandes.

La evolución de los primeros ciclos sexuales meióticos tuvo lugar en varios pasos. El primero fue, probablemente, el canibalismo. Aun hoy, en situaciones límite, los protoctistas unicelulares engullen cualquier cosa que se ponga a su alcance antes de sucumbir. En condiciones de hacinamiento, su frenético afán de supervivencia lleva a muchos protoctistas a engullirse unos a otros. A veces, sin embargo, tales fusiones —el devorado englobado por el devorador— pueden revertir, especialmente cuando las dos células fundidas son muy semejantes. La duplicación del número de cromosomas por fusión sexual requiere una explicación evolutiva. El canibalismo, un fenómeno frecuente en el mundo protoctista, proporciona una: la fagocitosis (un estrambótico nombre para el acto celular de engullir). La fagocitosis de células simples por sus vecinas en tiempos difíciles produjo una asociación miserable. Cuando ambos «socios» sobrevivían el resultado era un paso evolutivo intermedio entre el acto de comer y la fecundación duplicatoria del sexo meiótico.

Lemuel Roscoe Cleveland, biólogo de Harvard, dedicó la mayor parte de su carrera, desde 1934 hasta su muerte en 1969, al estudio de los hipermastigotos, un grupo de protoctistas nadadores que digieren la madera. En los años sesenta, examinando el comportamiento de organismos como *Trichonympha* y *Barbulonympha* (a los que se refería como sus «peludos») descubrió un tipo de canibalismo que podría ser muy similar al que pudo haber dado origen a la fecundación en nuestros ancestros microbianos. Cleveland observó que la falta de alimento les llevaba a comerse a sus congéneres. Este impulso no tenía nada de sexual, ya que estos hipermastigotos se reproducen rutinariamente por mitosis. Era algo más próximo al impulso caníbal del Hannibal Lecter de *El silencio de los corderos*. En su desesperación, las células se buscaban unas a otras agitando sus numerosos apéndices nadadores (undulipodios) con intención de devorarse. A veces se adherían, momento en que una de ellas abría su membrana y englobaba a la otra, como hacían para ingerir fragmentos de madera. Obviamente, estos seres no estaban actuando como psicópatas criminales. A diferencia del depravado Hannibal Lecter, no buscaban

matarse unos a otros por deporte. Agotadas sus fuentes de alimento o energía, los hipermastigotos estaban destinados a morir de inanición. Para algunos el canibalismo suponía la salvación, un desesperado último bocado para salir del paso hasta que las condiciones mejoraran. Siempre que la desecación o el frío hacían acto de presencia, se incrementaba la viabilidad del canibalismo como estrategia de supervivencia.

El hecho significativo para la historia del sexo (no tanto canibalístico como, en cierto sentido, vampírico) tiene que ver con las secuelas de la acción desesperada de los hipermastigotos moribundos. Cleveland observó que, en algunos casos, el individuo englobado no era completamente absorbido por el otro, sino que, en vez de eso, continuaba metabolizando en un esfuerzo por sobrevivir dentro del cuerpo de su raptor. La víctima se debilitaba pero no moría. Al carecer de sistema inmunitario, los microbios se fusionan con facilidad. En algunos casos, Cleveland observó la fusión de las membranas celular y nuclear, de manera que, donde antes había dos células separadas, ahora había una sola célula con dos juegos de cromosomas.

Advirtiendo la similitud fundamental entre estas fusiones celulares y el apareamiento (que también implica atracción celular, fusión de membranas celulares y fusión de membranas nucleares para formar núcleos diploides), Cleveland especuló que sus «peludos» de laboratorio habían experimentado la clase de proceso que estuvo en el origen del sexo meiótico. Al engullirse unos a otros, los mastigotos fusionaban sus membranas celulares y nucleares. Pretendían comer, pero en vez de eso se fundían. Así, teorizó Cleveland, fue como comenzó el sexo de fusión, el ciclo meiosis-fecundación.

Pero aún faltan algunas piezas del rompecabezas. El acto de canibalismo abortado que acaba en fusión puede doblar el número de cromosomas y crear un monstruo diploide, pero ¿cómo se recupera luego la forma haploide original? Un canibalismo continuado de este estilo (estimulado por las calamidades de la sed, el frío o el hambre) incrementaría aún más el número de cromosomas y la dilatación del ya dilatado cuerpo del hipermastigoto. Se hace necesaria una vuelta al número de cromosomas inicial. Para convertirse en nuestros ancestros sexuales, los monstruos en miniatura tenían que librarse de la pesada carga

de la diploidía.

Cleveland reconoció que, si bien la sed, el hambre, el calor, el frío, la salinidad excesiva u otros azotes del medio ambiente podían haber provocado la fusión por canibalismo parcial, se necesitaba una reversión del estado diploide vampírico cuando volvían los buenos tiempos. Al final, esta reversión sólo podía hacerse efectiva a través de la meiosis. Ahora bien, ¿cómo evolucionó la división celular meiótica? Cleveland trazó un esquema hipotético simple para la evolución de la meiosis a partir de la mitosis. El mecanismo fundamental de esta evolución habría sido una demora de la replicación cromosómica.

Los monstruos dobles no podían persistir indefinidamente. Durante la replicación de los cromosomas son habituales las desincronizaciones. Cualquier demora que condujera a una reducción del número de cromosomas habría sido favorecida por la selección natural. Así, tras un tiempo de hambruna y canibalismo, con el retorno de la abundancia, el estado ancestral haploide (con un solo juego de cromosomas) sería de nuevo el óptimo. Los protoctistas han prosperado durante millones de años en forma de nadadores solitarios, algas pluricelulares y plasmodios acuáticos filamentosos, y siguen haciéndolo. La vida protoctista se fraguó en el estado haploide simple. La diploidía, aunque salvara vidas en los tiempos difíciles, era un impedimento en los tiempos de suministro asegurado. Hoy la mayoría de protoctistas que se aparean producen algún tipo de estructura durable, un propágulo resistente. [LÁMINA 25] En los protoctistas, el apareamiento celular para producir una duplicidad no inicia el desarrollo de un embrión como en los animales, sino que, en vez de eso, acostumbra a dar una estructura diploide protegida, apta para superar periodos de crisis medioambiental. Fisiológicamente, estos propágulos parecen representar una evocación de tiempos más difíciles.

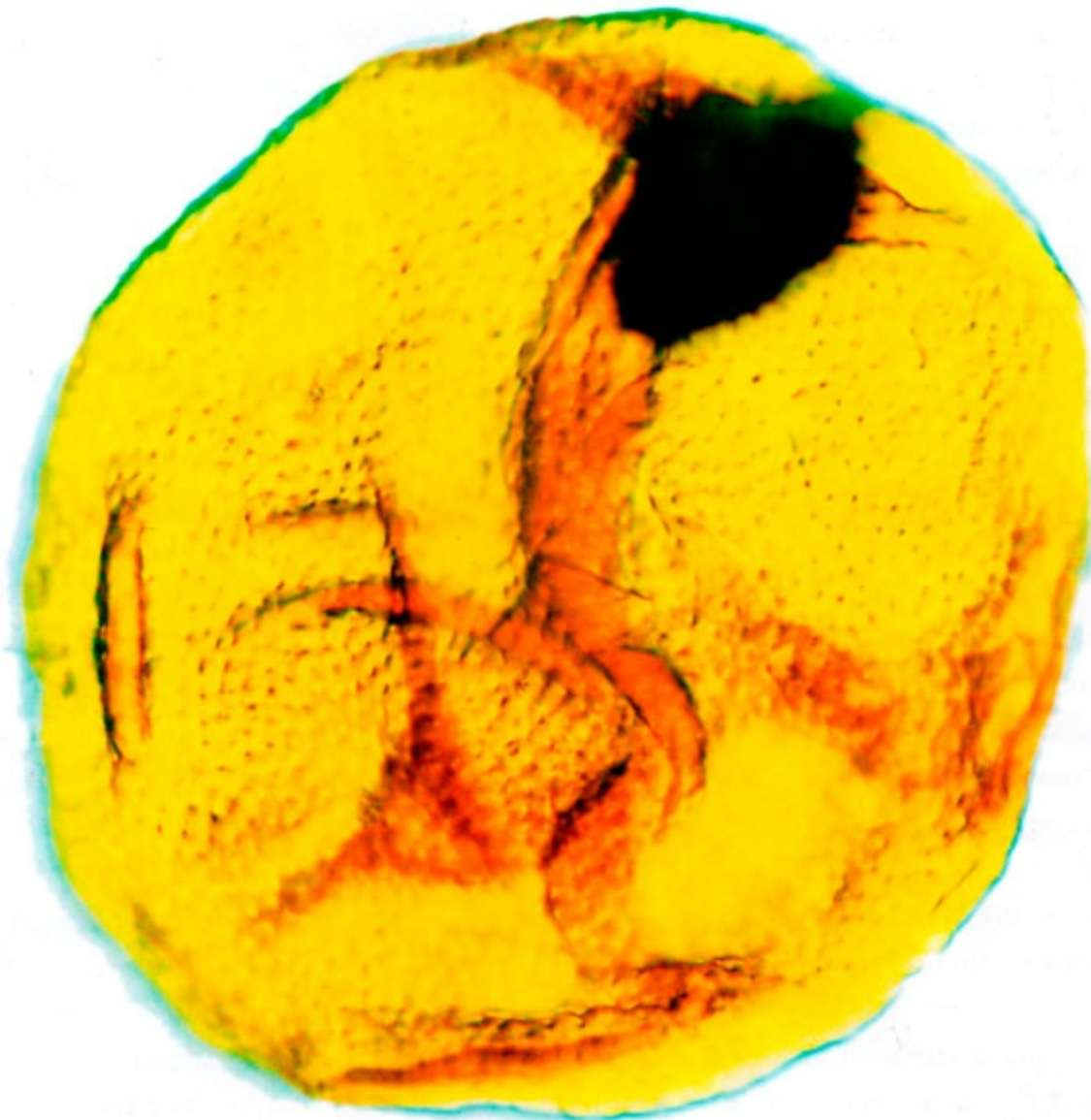


LÁMINA 25

Un acritarco fósil visto al microscopio. El término «acritarco» significa que nadie está seguro de lo que eran. Lo más probable es que fueran propágulos de protocistas primitivos.

Así pues, el apareamiento llevaba a la fusión celular, que a su vez hacía posible la supervivencia latente. Pero cuando volvían los buenos tiempos, los protocistas originales con un solo juego de cromosomas (los haploides) eran más aptos, pues se reproducían rápidamente. Cuando llegaba el verano, era muy ventajoso ser haploide. Los protocistas modernos ofrecen indicios sobre las circunstancias de la fusión celular

primordial. Las fusiones celulares producen quistes, zigósporas, histicosferas, oocistos u otros propágulos, según la especie. Estas estructuras resistentes deben su durabilidad, en parte, a una drástica disminución de sus flujos de energía y materia. En otras palabras, el sexo microbiano conduce al equivalente microbiano de la hibernación: ante la desaparición estacional de los gradientes necesarios para la vida, la formación de propágulos sexuales tiende a salvar vidas.

Los animales, que en esencia son colonias de células que se reproducen por mitosis, evolucionaron a partir de protoctistas primitivos que en un principio se reproducían asexualmente. Pero el sexo de fusión primordial, compensado en cada estación por la meiosis, condujo a una estrategia de supervivencia que se demostró efectiva y, en consecuencia, fue empleada una y otra vez. A esto siguió otra innovación. En vez de formar quistes latentes por fusión sexual, nuestros ancestros se dedicaron a crecer en el estado diploide, formando cuerpos que ya no eran monstruosos, y que tenían la capacidad de evitar las condiciones que llevaron a la fusión de células moribundas en primera instancia.

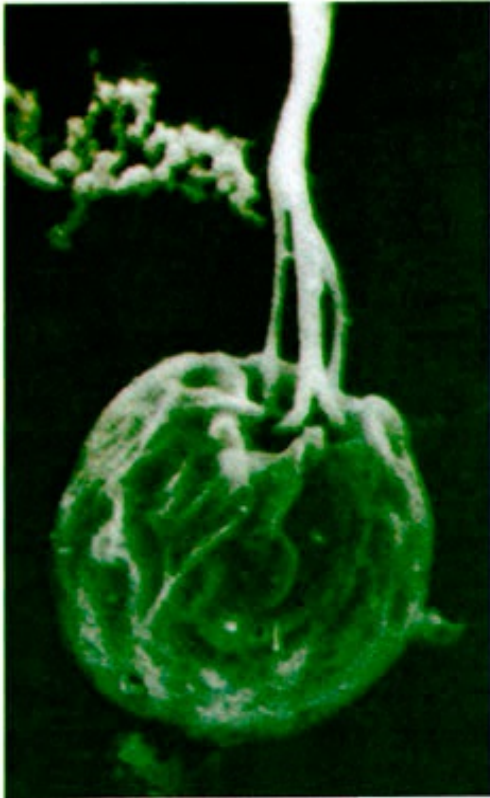
SUPERVIVIENTES NATOS | Que los protoctistas se entreguen al sexo para resistir tiempos difíciles tiene pleno sentido. Aquellos que, en medio de una crisis, se fundían (mientras sus vecinos no fusionados, menos resistentes, morían) sobrevivieron y fueron desarrollando los recios propágulos, resistentes a la desecación y al frío, mostrados en la [LÁMINA 26] Esta fusión de emergencia fue la precursora de la fusión sexual. Aún hoy, estos quistes no se reactivan hasta que vuelve a haber alimento y agua o las condiciones mejoran. En los protoctistas la fusión sexual no es una forma de reproducción. En muchas algas verdes y dinomastigotos, por ejemplo, el sexo tiene como resultado las típicas estructuras de paredes gruesas y metabolismo reducido. La fusión produce los quistes invernales que permanecen en estado latente hasta la primavera.

La evidencia más fascinante del origen múltiple del sexo meiótico reproductivo surge del hecho de que tantas especies de protoctistas respondan al estrés medioambiental realizando actos sexuales. Un ejemplo es *Chlamydomonas*, un alga verde unicelular propia de los estanques (cuyo

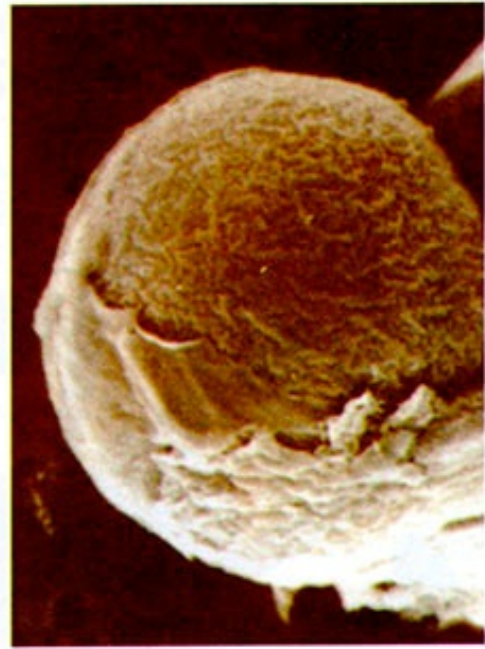
género incluye formas rojas habitantes de la nieve) que se reproduce rápidamente por división mitótica. En condiciones normales no tiene ninguna necesidad de sexo. Privémosla de nitrógeno, sin embargo, y cada célula individual comenzará a nadar en busca de otra célula de su misma especie, en apariencia idéntica, para aparearse con ella. El resultado de esta fusión es un «monstruo» con cuatro undulipodios (el doble de lo normal). La privación de nitrógeno induce el sexo, y el sexo crea un ogro que, al cabo de cinco días, se convierte en el cigoto de paredes gruesas que se muestra en la [LÁMINA 27]. Sólo la meiosis puede despertar a estos cigotos de su hechizo. Una vez sumergidos en agua que contenga sales de nitrógeno, nuevas células haploides nadadoras de origen meiótico emergen agitando frenéticamente sus dos undulipodios.



«Decoraciones» superficiales, quizá para facilitar la flotación (nadie sabe qué función tenían).



A



B



C

LÁMINA 26

Histricosfera. Este fósil es un tipo de acritarco, pero las aberturas superficiales permiten identificarlo como un quiste producido sexualmente por dinomastigotos primitivos. Los dinomastigotos marinos (o dinoflagelados) son un grupo de protoctistas que ha dejado cientos de formas fósiles y muchos descendientes vivos.

[Kathryn Delisle/José Conde]

LÁMINA 27

Zigósporas de *Chlamydomonas*. A.Tras el apareamiento y fusión los monstruos dobles nadan desmañadamente con sus cuatro undulipodios. B.La célula producto de la fusión, ahora diploide, deja de nadar y desarrolla una pared gruesa endurecida, como se ve en esta micrografía electrónica de barrido de una zigóspora. C.Las tres zigósporas diploides agrupadas de la foto son resultado del apareamiento de seis células. Las células de partida se fusionaron dos a dos formando células nadadoras cuadriundulipodiadas (como en A) que luego se transformaron en estas zigósporas de pared gruesa. Las zigósporas son estables y capaces de resistir durante muchos meses, incluso años, condiciones ambientales adversas. En forma de zigósporas, *Chlamydomonas* sobrevive a los inviernos fríos, la salinización del agua, los veranos secos y tórridos y otras inclemencias medioambientales que matarían a las células nadadoras desapareadas.

[Charlene Forest]

Aun en el laboratorio tiene que pasar al menos una semana antes de que algún estímulo pueda inducir la reanudación del crecimiento en los cigotos de *Chlamydomonas*. El quiste, con su cubierta dura, resiste las privaciones igual que un oso o murciélago en hibernación, o como una nuez, un tonel de tardígrado o una espora de hongo. Es una forma de ganar tiempo. En este estado de animación suspendida su metabolismo desciende para ajustarse a las escasas reservas disponibles: el sexo es económico. La formación de quistes es una estrategia astuta, si bien un tanto desesperada. Los microbios forman un quiste vía apareamiento y luego corrigen la duplicidad interna del mismo vía meiosis. *Chlamydomonas*, igual que muchos otros microbios, sacrifica rutinariamente sus expectativas inmediatas de crecimiento por la promesa de un crecimiento futuro. La anticipación de apuros medioambientales venideros evolucionó en los protoctistas mucho antes que los animales, o la conciencia tal como la conocemos, aparecieran en la escena evolutiva. En efecto, la planificación, esa característica pretendidamente consciente y específica del ser humano,

está implícita en la formación de quistes microbianos. Se trata de una respuesta fisiológica que evolucionó para anticipar las fluctuaciones estacionales en las reservas de alimento y energía.

Todos los protoctistas se reproducen por mitosis, y se multiplican perfectamente bien sin sexo. Cuando se anuncian tiempos difíciles, otros rápidamente se aparean y forman propágulos latentes con perspectivas de futuro. Al nivel eucariota básico de la célula protoctista simple, las fusiones sexuales son un último recurso, una medida de emergencia que incrementa sobremanera las posibilidades de supervivencia «individual». Las comillas se justifican porque tal enquistamiento, y meiosis subsiguiente, muestra la extraña interdependencia entre los individuos. En la prehistoria del sexo, sólo aquéllos que se acoplaron siguieron evolucionando.

LA CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO | La ciclicidad es un ingrediente crucial en la historia del origen del sexo reproductivo. Los animales, plantas y hongos (y todos los protoctistas sexuales) de hoy no somos ni simples ni dobles en términos absolutos. En realidad somos ambas cosas. Como animales, alternamos entre el estado doble de las células corporales y el estado simple de las células sexuales. En los hongos son las células corporales las que están en el estado haploide simple. Cíclicamente, las células de los hongos de la región septentrional fría de Estados Unidos forman el estado doble a finales de agosto o en septiembre. La meiosis deshace inmediatamente esta duplicidad generando esporas haploides que son dispersadas por el viento ya avanzado el otoño. Esta alternancia entre unicidad y duplicidad (haploidía y diploidía) comenzó con el establecimiento del sexo meiótico. En todas las especies obligadamente sexuales, es necesario que las células sean unas veces haploides y otras diploides. Las presiones selectivas sobre cada uno de estos estados pueden haberse sucedido según una pauta regular. El frío estacional, las sequías predecibles y otros fenómenos cíclicos aportaban y suprimían de manera alternativa un gradiente del que dependía el crecimiento de los microbios. Muchos linajes de protoctistas descubrieron el sexo y lo encontraron beneficioso. Estos protoctistas alternan un estado haploide de

multiplicación rápida con un estado diploide resistente, basculando entre proliferación y supervivencia.

Los primeros reproductores sexuales probablemente alternaban entre una estación dura (invernal o seca), en la que se fusionaban, y una estación veraniega, que pasaban en forma de células separadas. Los embriones en desarrollo de plantas y animales tienen una mayor complejidad intrínseca: comienzan allí donde acaban los protoctistas fusionados. La brillante estrategia de los animales y vegetales primitivos fue crecer en el estado fusionado provisional. El desarrollo de embriones pluricelulares diploides abrió todo un abanico de posibilidades ecológicas nuevas antes del necesario retorno a la espora o célula haploide ancestral^[21]. Lo que hoy contemplamos como el cuerpo de una planta o un animal es siempre una masa de células que se reproducen mitóticamente.

Un ejemplo, extraño pero ilustrativo, de ciclo protoctista con formación de cuerpos pluricelulares es el de los llamados plasmodios. Estas masas mucoides reptantes exhiben una fusión estacional alternada con una marcada individualidad. Su modo de vida arroja luz sobre los «eslabones perdidos» entre las células individuales hambrientas y las grandes masas celulares teóricamente similares a las antiguas colonias que se convirtieron en los primeros cuerpos.

Incluidos hasta hace poco entre los vegetales o los hongos, en la actualidad los plasmodios, tanto los acelulares (mixomicetes) como los celulares (géneros *Dictyostellium*, *Acrasia* y otros), se consideran protoctistas únicos^[22]. No son filamentosos como los hongos ni tienen las paredes celulares quitinosas características de aquéllos. A diferencia de plantas y animales, no forman embriones de ninguna clase. Los plasmodios son una muestra soberbia de por qué los protoctistas merecen ser reconocidos como un grupo con entidad propia. Por su parte, los mixomicetes como *Echinostelium*, *Fuligo*, *Lycogala* y *Stemonitis* son ahora clasificados por la mayoría de taxónomos como un tipo aparte dentro del reino protoctista. [LÁMINA 28] Las discusiones sobre si estos heterótrofos móviles son animales o plantas se han resuelto admitiendo que no son ni una cosa ni otra. Sus peculiares fusiones sexuales y su alternancia entre cuerpos pluricelulares y unicelulares ilustran la existencia de curiosas ramas laterales en el árbol evolutivo del sexo.



LÁMINA 28

En muchos protocistas el sexo da lugar a esferas pedunculadas que contienen propágulos. Las de la foto han sido producidas por mixomicetes, protistas reptantes que se agregan para formar cuerpos pluricelulares.

Los mixomicetes forman colonias celulares móviles que pueden encontrarse sobre la madera podrida en el suelo del bosque, la madera astillada al borde de los senderos de los parques o los montones de abono compuesto. En su fase unicelular son microscópicos. En cambio son fácilmente detectables sus delicados esporóforos, oscuros y pedunculados. Estos esporóforos pueden llegar a medir más de 1 cm de altura y persisten

al menos unos cuantos días.

Los mixomicetes alternan entre una fase activa, en la cual la división nuclear se adelanta a la división celular para dar una criatura ameboide multinucleada (el plasmodio propiamente dicho), y una fase latente. El plasmodio se expande y contrae, reptando lentamente en busca de víctimas. Las bacterias y pequeños protoctistas atrapados por el plasmodio palpitante son comidos vivos, [LÁMINA 29] Una vez repleto y satisfecho, el plasmodio se instala y comienza una fase reproductiva de esporóforos sedentarios. Los núcleos se dividen para formar esporas de paredes gruesas. Esta alternancia entre una fase plasmodial, consistente en masas citoplasmáticas plurinucleares fluyentes, y una fase sedentaria esporífera, consistente en células uninucleadas, es típica de estos coloreados y viscosos organismos. [LÁMINA 30]

Llamamos «metamorfosis» a la transformación de una oruga en mariposa; en cambio, llamamos muerte a la transformación que tiene lugar cuando dos mariposas adultas perecen después de aparearse. Ahora bien, desde una perspectiva más profunda, nada ha muerto. La «muerte» de la mariposa es una fase natural, el siguiente estadio de desarrollo en una forma cíclica, mediada sexualmente, de organización celular. En los mixomicetes, cuyos cuerpos están menos definidos que los de los insectos, esta persistencia a través del cambio es clara. El ciclo sexual de estos plasmodios «comienza» cuando se abre la negra pared celular de la espora, liberando un amebomastigoto de vida libre. Los núcleos de esta célula se dividen una y otra vez para formar un protoplasma limitado por una membrana, y el ciclo vital continúa. Por lo general, de cada espora surge una célula ameboide simple. Pero, cuando hay agua encharcada, las amebas emergentes, conocidas como mixamebas, simplemente desarrollan un par de undulipodios y se alejan nadando. Presumiblemente, esta fase de mastigoto nadador se remonta a los ancestros undulipodiados de estos organismos. Dos células nadadoras, dos amebas o una ameba y una célula nadadora se aparean. La célula fusionada resultante de este apareamiento sin restricciones se desarrolla en un plasmodio.



LÁMINA 29

Los esporóforos amarillos de mixomicetes como *Fuligo septica* o *Dictydium cancellatum* evidencian que ha habido fusiones sexuales en el suelo.



***Physarum* (amarillo), un mixomicete plasmodial que se alimenta de setas.**

Los plasmodios producidos sexualmente forman tres tipos principales de esporóforos, según la especie. Unas veces se desarrolla una amplia base en contacto con la madera o el suelo del bosque y, a medida que crece el pedúnculo, las palpitantes «venas plasmodiales» se acortan y coagulan, cesando el movimiento interno característico de la masa protoplasmática. El cuerpo se seca, con lo cual libera esporas que germinan en amebas que luego se multiplican asexualmente por mitosis. Se podría decir que el plasmodio «muere». Pero lo que hace en realidad es alternar entre células individuales asexuales y un cuerpo plurinuclear producido sexualmente (parece ocioso afirmar explícitamente algo tan manifiesto). Interrumpiendo y a la vez continuando la identidad, el sexo meiótico nos lleva más allá de nosotros mismos, haciéndonos más —y menos— de lo que somos. Una vez maduras las esporas y dispersadas por el viento, el mixomicete sólo retorna al estado plasmodial cuando las células sexuales desarrollan undulipodios y se juntan por pares o tríos (y, a veces, hasta por docenas) para fundirse de nuevo. El apareamiento es orgiástico.

Durante la evolución de los ancestros protoctistas de animales, plantas y hongos, su reproducción, su misma existencia, se hizo cada vez más dependiente de actos repetidos de fusión. En origen, estos actos de fusión fueron probablemente la secuela de un canibalismo inducido por la desecación y la falta de alimento. Los periodos de escasez estacionales propiciaron las fusiones cíclicas. Sin embargo, cuando las lluvias de primavera y los calores veraniegos reanudaban el suministro de nutrientes, los propágulos o las masas de células fusionadas crecían y se propagaban frenéticamente. Estas propagaciones, moldeadas por la selección natural, se convirtieron en las formas de aparición cíclica que hoy conocemos como cuerpos. Los plasmodios son testimonio de la delirante experimentación sexual de los cuerpos protoctistas en evolución, cuyos descendientes más familiares son las plantas, los animales y los hongos.

GENES DESINTERESADOS | Desde Darwin, la evolución ha sido descrita como una competencia entre individuos. La selección natural elimina a los débiles y hace que sólo sobrevivan los fuertes. Desafortunadamente, el neodarwinismo académico se ha basado en una idea demasiado restringida del individuo. En el caso del plasmodio, ¿cuál de sus estados es el individuo? ¿La masa palpitante? ¿Las amebas sexuales que rutinariamente sacrifican su individualidad al fundirse de manera frenética para formar un todo viscoso? Las células que se unen para formar una totalidad pueden estar emparentadas genéticamente, como ocurre con las amebas sexuales del plasmodio. Pero con frecuencia el «individuo» está formado por la fusión de componentes genéticamente diferenciados.

La termita del desierto de Sonora alberga en su dilatado intestino grandes poblaciones de *Arthromitus chaseii*, una bacteria filamentosa esporógena. De hecho, cada individuo hospeda una comunidad entera de microbios que digieren la madera. Los corales del Caribe se afanan en ingerir y retener dinomastigotos amarillos de la especie *Symbiodinium microadriaticum*. La existencia misma de los arrecifes depende de estos simbioses fotosintéticos. Ni el débil dinomastigoto ni el fuerte coral sobreviven por sí solos como individuos.

Los organismos como éstos incrementan sus posibilidades de supervivencia estableciendo alianzas. Incluso los animales individuales se unen de manera cuasisexual para producir nuevas clases de «individuos». Las hormigas legionarias (*Eciton burchelli*), por ejemplo, marchan por los bosques de América Central y del Sur devorando hojas en colonias que pueden sumar más de 200 000 individuos. Componen sus nidos con los cuerpos entrelazados de los propios miembros de la colonia^[23]. La agregación (de gametos y cuerpos) conduce a entidades organizadas mayores. La agregación en grupos que incluyen tanto parientes como extraños ofrece nuevas y poderosas ventajas evolutivas. Evolucionando en el tiempo a través de interacciones sociales e interespecíficas, los «individuos» aparecen en niveles de complejidad y organización cada vez más inclusivos.

En el capítulo segundo vimos que el hipersexo bacteriano condujo a

los primeros protoctistas. La idea de que los protoctistas evolucionaron a partir de fusiones permanentes de bacterias está respaldada por una abundante investigación que incluye la microscopía electrónica y la biología molecular. La sexualidad requiere fusión. ¿Es un huevo un individuo? ¿Puede reproducirse una persona sola? El principio de que «la evolución sólo trabaja al nivel del individuo» debe ser revisado. Este principio del individuo como «unidad de selección» tendría sentido si en la escena evolutiva sólo hubiesen aparecido criaturas de reproducción asexual. Pero todos los organismos grandes son entes compuestos. El que los seres visibles evolucionaran a través de la fusión y multiplicación de cuerpos microbianos refuta la abstracción de la selección individual, por muy conveniente que pueda haber sido o siga siendo en casos limitados.

Es más, como repetidamente han resaltado investigaciones recientes, los animales viajan a menudo en grupos para reducir el riesgo de morir antes de tener opción de reproducirse. Incrementan sus posibilidades de supervivencia agrupándose en bandas para cazar, buscar comida o proteger a sus hijos. El egoísmo no depende sólo del parentesco genético, aunque la supersimplificación sociobiológica pueda llevar a creerlo así. Hasta el protoctista «individual» más simple evolucionó por vía hipersexual a partir de una simbiosis permanente entre bacterias bien distintas. La agrupación, el poder del número, ha sido crucial en al menos dos grandes transiciones evolutivas: el hipersexo que llevó de las bacterias a las células nucleadas, y el sexo de fusión que llevó a los cuerpos macroscópicos como los de plasmodios, sargazos y, más tarde, plantas y animales.

El concepto de que los organismos se trascienden a sí mismos al vivir juntos (sea con congéneres o con extraños no emparentados genéticamente) ha sido desdeñado durante décadas por la corriente principal de la zoología. Pretendiendo ser científicos, los biólogos de poblaciones y en especial los zoólogos han tratado a los organismos como si fueran partículas físicamente aisladas. En las formulaciones neodarwinistas, los organismos, reducidos a sus genes, son unidades indivisibles, independientes e interesadas. Pero esta idea de los genes y los animales como átomos individuales es destructiva. Los organismos son sistemas abiertos y en desarrollo, con multitud de oportunidades para vincularse de forma temporal o permanente a sistemas de la misma clase.

¿POR QUÉ EXISTE EL SEXO? | Los organismos vivos individuales no son átomos (ni partículas de ninguna clase). Ni siquiera son cosas. Los seres vivos son procesos delimitados, termodinámica e informacionalmente abiertos. Sus límites están siempre cambiando. A través de sus membranas, pieles y orificios entran en contacto con su entorno y entre sí. Transformando energía y produciendo entropía, cada organismo individual se mantiene y, si es sexual en algún sentido, se combina. Ya sea a través del sexo transgénico bacteriano, el hipersexo protoctista o el sexo de fusión de animales, plantas y hongos, todos los seres sexuales se mantienen y se combinan a la vez. Los organismos individuales son mucho menos independientes de lo que asume la moderna biología neodarwinista. La conjunción, primero al nivel bacteriano y después al nivel del sexo eucariótico, ha sido responsable directa de las principales transiciones evolutivas. Unos protoctistas moribundos se salvaron gracias a la fusión sexual; después, al evolucionar para ajustarse a unas condiciones ambientales de escasez y abundancia cíclicas, se desarrollaron en su estado fusionado para formar los primeros cuerpos. La fusión sexual, imperativa en los animales, nos transporta fuera de nosotros mismos y propicia nuevas formas de organización social.

Una vez establecidos, los ciclos de fecundación precedida de meiosis florecieron. ¿Por qué? Los detalles de la retención del sexo dependen en cada caso de los detalles de los linajes de organismos en los que apareció la sexualidad en primera instancia. Aunque la mayor diversidad sexual se da entre las formas de vida no animales, en los estudios sobre el tema la mayoría de ejemplos se extrae del reino animal, lo cual tiende a crear confusión. La historia, significado y nivel de complejidad del sexo difieren hasta tal punto de un grupo a otro de organismos que cualquier teoría general de la sexualidad está condenada al fracaso.

Una explicación especialmente recurrente, aunque dudosa, para la retención de la fusión sexual por los organismos aduce que el sexo es una suerte de mecanismo de rejuvenecimiento genético. Esta afirmación se basa en observaciones hechas sobre el ciliado *Paramecium aurelia*. Estos paramecios se multiplican por división mitótica directa, sin contacto sexual alguno. Sus poblaciones se extinguen al cabo de unos meses, mientras que

sus parientes sexuales sobreviven indefinidamente. ¿Significa esto que el sexo tiene un efecto rejuvenecedor? No necesariamente. Cuando un paramecio está preparado para la conjugación sexual y no encuentra pareja, experimenta un proceso de «autoapareamiento» denominado autogamia. El núcleo diploide de esta célula única se divide por meiosis para producir cuatro núcleos hijos haploides. Estos núcleos se fusionan luego dentro de la misma célula. Después de esto la célula se divide mitóticamente. El linaje enteramente endogámico que se deriva de este proceso sobrevive tanto como sus parientes conjugantes que practican el sexo biparental. Por otra parte, dicha autofecundación genera ciliados enteramente homocigóticos: la variedad genética (un producto del sexo que ha sido citado a menudo como la razón por la cual los organismos retienen el sexo cuando podrían reproducirse más rápido sin él) se ha reducido en vez de aumentar. Aun así, el paramecio se revitaliza y rejuvenece, siendo capaz de reproducirse asexualmente durante muchas generaciones.

Está claro que, al menos en lo que respecta al rejuvenecimiento del paramecio, hay algo más importante que el apareamiento o la recepción de genes a través del sexo. No son los genes nuevos lo que salva a los linajes celulares de la extinción, sino la meiosis, el complejo proceso de reducción del número de cromosomas por núcleo. Sospechamos, pues, que es la meiosis (junto con la fusión subsiguiente, aun dentro de un único progenitor) el verdadero imperativo. La meiosis y la fusión al nivel celular, y no necesariamente el sexo biparental, es la clave del rejuvenecimiento.

La meiosis, seguida de la fusión de núcleos procedentes de uno o dos progenitores, precede siempre el desarrollo de un nuevo cuerpo animal o vegetal. Los organismos sexuales requieren la meiosis y la fecundación para su existencia, mantenimiento y desarrollo. Los protoctistas, animales y plantas sexuales son cuerpos complejos con un metabolismo incesante, en cuya historia sexual están profundamente enraizadas la fusión celular y la enmienda meiótica de la diploidía. La meiosis restablece las condiciones iniciales, termodinámicas y genéticas, del desarrollo de esas intrincadas estructuras disipativas que son los cuerpos. Los organismos con sexo meiótico (los protoctistas sexuales, la mayoría de hongos y todas las plantas y animales) deben «volver al tablero de dibujo». La fusión nuclear

inicia el proceso del desarrollo, y la meiosis la compensa para que pueda repetirse en la siguiente generación. Cuanto más complejo es el cuerpo, cuanto mayor el número y diversidad de sus partes integradas, más riguroso parece ser el requerimiento de «comenzar desde el principio» a través de la fusión y posterior compensación mediante meiosis reductora.

Las capacidades de autorreparación y regeneración disminuyen a medida que los cuerpos se hacen más diferenciados y complejos. Los mixomicetes soportan la eliminación de grandes secciones de sus plasmodios sin inmutarse. Aumentan de tamaño por el extraño expediente de fusionarse con células simples o incluso un plasmodio entero. Pólipos, estrellas de mar, planarias y otros animales acuáticos sencillos pueden regenerar un cuerpo entero a partir de un trozo. Cangrejos, langostas y muchos insectos regeneran los miembros perdidos. Incluso algunos de los llamados «animales superiores»^[24], como las lagartijas y salamandras, pueden regenerar patas perdidas. Sin embargo, los primates como nosotros, o los carnívoros como nuestros perros y gatos, renuevan sólo determinados tejidos y curan de heridas de alcance limitado. Nuestro pelo vuelve a crecer después de cortado, pero no así nuestras cabezas. El punto crucial de nuestra crisis existencial es que, para regenerarnos totalmente, debemos copular y morir como individuos conscientes.

La necesidad que tienen las algas pardas, muchos plasmodios acuáticos y diatomeas, y la mayoría de hongos, plantas y animales de repetir sus fusiones ancestrales en cada generación recuerda la necesidad de un niño de comenzar por la «A» para recitar el alfabeto. La naturaleza cíclica de la fusión creadora de duplicidad y la meiosis enmendadora de este estado puede contemplarse como una especie de condensación espaciotemporal que se despliega en el desarrollo de los cuerpos. Los sistemas históricos lejos del equilibrio difieren de los cercanos al equilibrio en que no tienden inevitablemente a la disolución, sino que mantienen sus «identidades» mediante series cíclicas de acciones que derivan de historias discretas. Las vías que se establecieron en el pasado y se incorporaron en el ser vivo en cuestión pueden ser revisitadas. Tanto la fisiología como la memoria retienen en la materia viva los detalles peculiares de una trayectoria histórica dada. La historia de los sistemas vivos reaparece de manera inconsciente. La materia viva puede archivarla y quizás olvidarla, pero

nunca desaparece del todo. La fusión sexual ritualizada seguida de meiosis evolucionó en un principio porque protegía a nuestros ancestros de una muerte prematura. Hoy las vías dependientes de la historia deben ser recorridas de nuevo.

Comparados con los sistemas no vivos, la extrema ornamentación de los organismos se debe a la incorporación de historias excéntricas que abarcan miles de millones de años.

En el sexo meiótico la recuperación de las condiciones iniciales que lleva al desarrollo de cuerpos complejos requiere siempre una fecundación cuya esencia es la fusión nuclear. La realización de dicha fecundación en algún momento del ciclo vital queda asegurada por sensaciones mediadas químicamente en seres de género complementario. La meiosis y la fusión celular cíclica se hicieron condición *sine qua non* para la supervivencia. La meiosis se da incluso entre los numerosos protoctistas, plantas y animales que prescinden del sexo biparental. Algunos linajes que practican el sexo multigenérico o biparental incluyen variedades o especies no sexuales, pero la meiosis y la fusión nuclear persisten en el progenitor único. De esta observación se desprende que la meiosis y la fecundación siguen siendo tan importantes para el desarrollo de individualidades como lo fueron para el origen de estas individualidades en el pasado. Dentro de los márgenes de variación naturales, la repetición del ciclo sexual propio garantiza a cada especie la perpetuación de su organización material específica, dirigida genéticamente. El sexo «recluye» la forma precisa de un cuerpo, la organización viva que reconocemos como una especie dada de protoctista, hongo, planta o animal. Nuestro sexo «vertical» de origen protoctista, en el que los núcleos fusionados se dividen y pasan a la siguiente generación (en oposición a la transferencia «horizontal» de genes bacterianos que vimos en el capítulo 2) es esencial para la individualidad. El principio del orden cíclico preservado por la meiosis es el apareamiento y la fusión celular. El final de este orden cíclico es el envejecimiento y la muerte.

El sexo meiótico y la diferenciación tisular, que son el sello de los dos grandes grupos formadores de embriones (plantas y animales), evolucionaron en los protoctistas. Ciertos plasmodios acuáticos, los llamados quitridios, se desarrollan tras la fusión de dos células

undulipodiadas. Los probables ancestros de los hongos, que no tienen fase nadadora, fueron organismos de esta clase. Las algas verdes pluricelulares (clorófitos) con reproducción sexual fueron los probables ancestros de las plantas terrestres. Los zoomastigotos, pequeños protoctistas sexuales, fueron los probables ancestros del placozoo *Trichoplax*, las esponjas y otros animales acuáticos blastulares. Los animales aparecieron a finales del eón Proterozoico, hace más de 540 millones de años. La evolución de la meiosis (que en animales, plantas y hongos se correlaciona con la diferenciación celular y tisular) tuvo que ser anterior. Animales, plantas y hongos retornan cada generación a un núcleo diploide fértil, en nuestro caso el del óvulo fecundado. La meiosis, en particular el alineamiento cromosómico durante la etapa denominada profase I, quizá sea una suerte de «pasar lista» para asegurar que las dotaciones de genes, incluidos los de mitocondrias y cloroplastos, estén en orden antes de que sobrevenga el desarrollo del embrión vegetal o animal. Hemos visto que la meiosis uniparental era suficiente para el rejuvenecimiento de los paramecios. La meiosis se mantiene en todos los organismos con sexo de fusión porque, probablemente, el proceso en sí es esencial para la fisiología del desarrollo y la supervivencia. Cuando los organismos complejos se reproducen, tienen que pasar de nuevo por la meiosis, el requisito previo de la fecundación.

Las ideas sobre los orígenes sexuales presentadas en este libro difieren de los supuestos comúnmente divulgados acerca del papel del sexo en la evolución. El sexo bacteriano tiende a ignorarse. En cambio, el sexo biparental se considera un avance evolutivo crucial. Las evidencias, sin embargo, sugieren que el sexo bacteriano es fundamental, mientras que el sexo biparental nunca es objeto de selección directa. El sexo bacteriano, un mecanismo de reparación del ADN modificado, permite a los organismos adquirir nuevos genes con la misma facilidad con que nosotros pillamos un resfriado. El legado bacteriano de la reparación enzimática del ADN reaparece en la profase I de la meiosis de animales y plantas. Sin la sexualidad bacteriana, el sexo meiótico de animales y plantas nunca habría evolucionado. Así, aunque entendemos que los procesos de reparación del ADN asociados a la meiosis son cruciales, el sexo biparental con dos géneros es secundario. En los animales no es más que un legado evolutivo.

Taxones enteros (como los rotíferos, con centenares de especies de aguas salobres, marinas y dulces) prescinden de la biparentalidad, sin menoscabo de su variación o su éxito evolutivo. Lo que se seleccionó de estos animales no fue su sexualidad, sino sus tejidos y órganos complejos. Los rotíferos y tantos otros animales que omiten el sexo biparental no han abandonado la meiosis. No podrían hacerlo aunque quisieran.

¿Podrían los machos humanos, como los de los rotíferos, convertirse en entes evolutivamente superfluos? Es verdad que la clonación femenina podría, en principio, soslayar nuestro ciclo sexual biparental. Pero es dudoso que la meiosis y la fecundación puedan abandonarse del todo. Es más probable que estas abnegadas madres deban ser autofecundadas. Sus óvulos haploides seguramente requerirán una inyección de fertilidad en forma de autofusión: la fecundación de los núcleos ovulares por otro núcleo haploide procedente del propio cuerpo. Esto es lo que ocurre, de hecho, en los rotíferos.

AL CADALSO CON LA REINA ROJA | Los evolucionistas que plantean la cuestión del porqué de la existencia de tantos organismos sexuales gustan de citar las raras especies (en realidad sólo poblaciones) de lagartijas cola de látigo que se ahorran el fastidioso trámite de la reproducción sexual prevaleciente en la especie «normal» heterosexual^[25]. ¿Por qué, se preguntan, las «especies» sin machos no han desplazado a sus vecinos de ambos sexos? Si se sustituyen los machos (que, en principio, no pueden reproducirse por sí solos) por hembras capaces de reproducirse por su cuenta se consigue, en teoría, multiplicar por dos la tasa reproductora de la especie. La respuesta de los libros de texto es que los organismos sexuales, intrínsecamente cambiantes, se adaptan mejor a los ambientes fluctuantes. Sin embargo, tanto la pregunta como su inmediata respuesta son engañosas.

A pesar de su aparente «pérdida del sexo», la ausencia de machos con los que fornicar y sus «pseudocópulas» hembra con hembra, las poblaciones exclusivamente femeninas de lagartijas cola de látigo del sudoeste de Estados Unidos retienen una sexualidad subyacente. Sus células experimentan meiosis, fecundación y otros procesos propios del

sexo biparental. El sexo no ha desaparecido por completo ni mucho menos. Estas lagartijas no son asexuales, son unigenéricas y uniparentales. Aquí se ponen de manifiesto los inconvenientes de considerar el sexo como un proceso único: la pérdida de un género, el masculino, es algo absolutamente distinto de la pérdida de los ciclos sexuales de meiosis y fecundación. Dentro de los ovarios de estas lagartijas tiene lugar una fusión de células haploides para formar células femeninas diploides capaces de desarrollarse en embriones de lagartija.

Examinemos más de cerca el argumento estándar. Dado que la búsqueda de pareja requiere tiempo y energía, los biólogos asumen que la selección natural debería favorecer a los organismos que se reproducen sin necesidad de sexo porque esto representaría un ahorro de tiempo y energía. Según esta lógica, la selección natural debería conducir a seres que se reproduzcan simplemente por mitosis: divisiones celulares en ausencia de sexo que deriven en una gemación o bipartición para formar nuevos cuerpos. En el lenguaje económico que los zoólogos usan (o del que, desde nuestro punto de vista, abusan) para describir la evolución, el «coste» del sexo (búsqueda de pareja, producción de células sexuales con la mitad de cromosomas, tiempo y energía invertidos en estas actividades) parece desproporcionado en relación al beneficio que pueda reportar. Para resolver este dilema aparente determinados biólogos razonan que el sexo mismo debe conferir alguna ventaja. Una sugerencia predilecta es la de que el sexo se mantiene porque incrementa la variación de la descendencia. Esta variación, se afirma, permite que los organismos sexuales se adapten más rápidamente a los entornos cambiantes que sus contrapartidas asexuales. Dado que los propios organismos (parásitos, depredadores y competidores) son parte fundamental del entorno, se razonó posteriormente que la diversidad sexual debería engendrar más diversidad sexual. Este razonamiento ha inspirado multitud de libros y artículos divulgativos, e incluso ha recibido un nombre pegadizo: la hipótesis de la Reina Roja, en alusión al personaje de Lewis Carroll,

... la Reina seguía gritando «¡Más rápido! ¡Más rápido!», pero Alicia sentía que *no podía* ir más rápido, aunque no le quedaba aliento para decirlo. Lo más curioso era que los árboles y las otras cosas que había en derredor nunca cambiaban de sitio: por muy rápido que corrieran, nunca parecían dejar nada atrás... «En nuestro país», dijo Alicia,

todavía jadeante, «si se corre muy deprisa durante mucho tiempo como hemos hecho nosotras, se llegaría a alguna otra parte».

«¡Vaya un país más lento!», dijo la Reina. «Aquí, como puedes ver, tienes que correr todo lo que puedas para mantenerte en el mismo sitio. Si quieres llegar a alguna otra parte debes correr al menos ¡el doble de rápido!»^[26]

La hipótesis de la Reina Roja, de la sexualidad como fuente de biodiversidad, probablemente ni siquiera es una hipótesis, pues se basa en la idea de que la sexualidad es un proceso único. La insistencia en la importancia del sexo como generador de variedad para mantenerse en un entorno rápidamente cambiante está en proporción inversa a lo que indican los datos. Los rotíferos sexuales no son más variados y adaptables que los uniparentales. Las observaciones contradicen la idea de que la diversidad fomentada por el sexo es un requerimiento para la supervivencia y evolución en entornos cambiantes. Cuando Matthew Meselson, biólogo de Harvard, se valió de la biología molecular para comparar especies emparentadas de rotíferos uniparentales (asexuales) y biparentales (bisexuales), halló que el número de variantes alélicas en los rotíferos asexuales era ¡300 veces mayor^[27]! Se han descrito cientos de especies de rotíferos bdeloideos en las que nadie ha observado nunca una célula espermática, un macho o un acto de fecundación. La misma abundancia de poblaciones de rotíferos exclusivamente femeninas es testimonio de la enorme variación heredable existente. Los organismos uniparentales parecen ser capaces de generar una abundante variación mensurable por la selección natural. Es más, en las membranas de *Borrelia* (una espiroqueta presente en las garrapatas que causa la enfermedad de Lyme) y *Trypanosoma* (un protoctista tropical responsable de la enfermedad del sueño) se ha observado la generación espontánea de antígenos de superficie de variación rápida. Esta generación acelerada de variedades resistentes a los fármacos demuestra que, aun sin sexo de ninguna clase, la reproducción, lejos de asegurar siempre la identidad, puede generar variación heredable de sobra. No hace falta sexo (en forma de recombinación genética transgénica, fusión sexual o meiosis) para que la variación abunde. La hipótesis de la Reina Roja es simplemente un nombre bonito para un mito zoológico.

De hecho, muchos procesos, como la mutación, la simbiogénesis y

hasta el estrés fisiológico, pueden generar diferencias mensurables entre los organismos. La reproducción sexual es uno de estos generadores de variación. Pero el experimento crucial, que sería la comparación cuantitativa entre poblaciones de organismos de la misma clase multiplicándose con y sin sexo biparental en las mismas condiciones ambientales, no se ha hecho. En realidad *no puede* hacerse, porque la inmensa mayoría de especies sexuales no puede perder su sexualidad y seguir existiendo. La afirmación de que el sexo incrementa la variación en relación a la ausencia de sexo es, pues, infundada. Cuando, como en protoctistas y rotíferos, sí es posible suprimir experimentalmente la sexualidad biparental, para hacerlo hay que alterar las condiciones ambientales. La conclusión es que la producción sexual de variación no es directamente comparable a la variación generada por otras vías. El imperativo sexual fecundación-meiosis sigue siendo una parte ineludible de la vida de los organismos grandes. La destrucción cíclica de gradientes quedó irremediabilmente ligada a la sexualidad de los protoctistas que se iban a convertir en los primeros animales y plantas.

EL IMPERATIVO MEIÓTICO | Nuestra explicación de por qué los individuos sexuales se molestan en buscar parejas de género complementario sólo para diluir sus genes es simple. No tienen elección. Para sobrevivir al frío invernal o a la sequía estival deben recurrir al sexo. Si aspiran a participar en el proceso de destrucción del gradiente solar, deben entregarse a la fusión sexual.

Las maneras en que el sexo se imbrica en la existencia de los animales no se conocen en su totalidad. El sexo no es, como demasiados biólogos asumen, objeto de selección directa. Es parte del camino por el que nosotros, eucariotas complejos, nos convertimos en lo que somos. El apareamiento, la meiosis y la fecundación están profundamente enraizados, y se remontan a un tiempo en que el doblamiento (fecundación) y fragmentación (división) estacional de las células condujo a ciclos de desarrollo pluricelular y reproducción. Indispensable para formar el nuevo huevo fecundado fértil que se convierte en la blástula, la sexualidad animal nunca se pierde por completo. La actividad sexual

biparental está tan ligada a los procesos meióticos que los animales, en especial los mamíferos, no pueden descartarla fácilmente. En plantas, hongos y protoctistas los géneros son mucho más lábiles, y en ellos han sobrevivido diversas variaciones profundas del sexo de fusión. La razón fundamental de estas diferencias es que plantas, hongos y protoctistas tienen abiertas otras vías de reproducción (ejemplos de esto son las lentejas de agua, que se multiplican por mitosis sin florecimiento sexual, el moho *Penicillium*, que se dispersa por esporas mitóticas, y muchos otros).

Aunque pluricelulares y sexuales, los cordados primigenios (los ancestros del tipo animal al que pertenecemos) aún no habían desarrollado estructuras de soporte esqueléticas a partir de depósitos de fosfato cálcico dentro de sus cuerpos; pero ya tenían una notocorda, el soporte dorsal cartilaginoso que se extiende de la cabeza a la cola, y que luego sería sustituido por la espina dorsal, con sus fibras nerviosas que conectan los genitales al cerebro. Los cordados primigenios sin duda eyaculaban espermatozoides y producían huevos sedentarios con vitelo.

Atraídos por señales químicas específicas, el macho de cualquier especie dada percibe como «sexy» a algunas hembras de su propia especie (y no otra). Con frecuencia bombardeados hasta la saciedad con espermatozoides de múltiples machos, la mayoría de huevos sólo permite la entrada de un espermatozoide para fusionarse con su núcleo. Un animal con tejidos diferenciados está obligado a ejercer esta discriminación sexual generacional. La pluricelularidad animal se asienta sobre el sexo biparental. En nuestra ontogenia (nuestro desarrollo desde el cigoto —el huevo fecundado— hasta el individuo adulto) todos nosotros recorreremos el camino ancestral y nos detenemos en el albergue ancestral del sexo, porque ahí tuvieron que descansar todos nuestros ancestros para poder sobrevivir. Sin albergue en el camino, no es posible completar la peligrosa singladura.

En otras palabras, la animalidad es dependiente de la historia: los animales dependen de la repetición de eventos particulares en la historia de sus ancestros. Hoy ningún armadillo, geco o niño nacerá o sobrevivirá sin pasar por los procesos de la meiosis, la diferenciación de género y la fecundación. El camino cíclico que conduce a un ser humano moderno requiere rizar el rizo del sexo antes de volver al «punto de partida» de la

fusión de espermatozoide y óvulo. Con excepción de nuestros glóbulos rojos, que carecen de núcleo y por lo tanto no tienen cromosomas, y nuestros espermatozoides y óvulos, que tienen sólo un juego, todas las células de nuestro cuerpo tienen al menos dos juegos de cromosomas. Cada una de nuestras células combina la herencia nuclear de nuestra madre y nuestro padre. Somos meióticos y sexuales hasta lo más hondo de nuestro ser.

The background of the page is a complex, abstract pattern of green and white. It consists of numerous concentric, irregular rings and wavy lines that flow across the entire surface, creating a sense of movement and depth. The colors range from a deep forest green to a bright, almost white light green.

cuatro

EL BESO DE LA MUERTE:

SEXUALIDAD Y MORTALIDAD

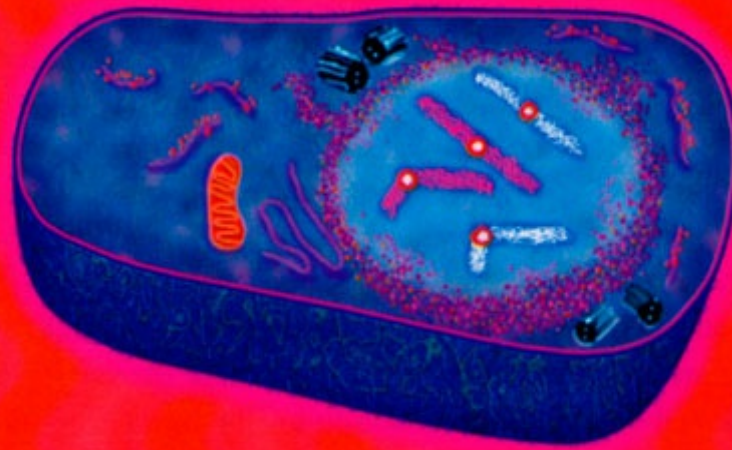
¡Se vende anarquía para las masas;
satisfacción irrefrenable para raros entendidos;
muerte agonizante para los fieles y los amantes!

Rimbaud^[28]

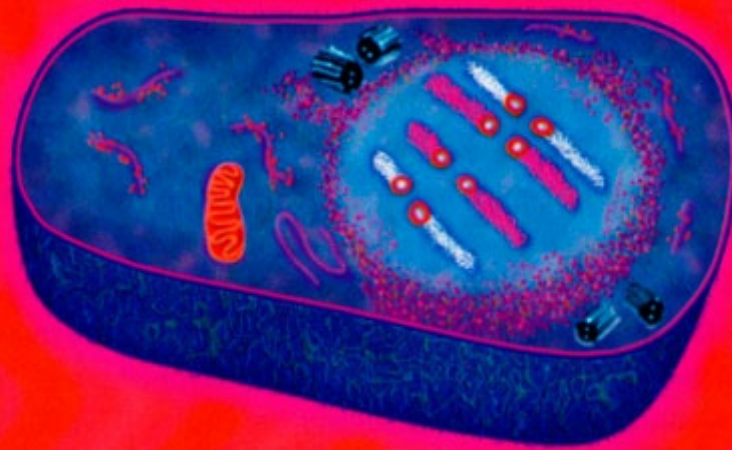
LA CONEXIÓN SEXO/MUERTE | La evolución del sexo fue como un pacto con el diablo. El sexo de fusión, fecundación más meiosis, permitió a ciertos seres sobrevivir a los ciclos de las estaciones. El sexo permitió que los animales desarrollaran cuerpos pluricelulares elaboradamente complejos a partir de huevos fértiles. Pero el precio de este éxtasis más allá de la identidad (la sexualidad que nos impele a unirnos con otro y crear un nuevo ser más allá de nosotros) fue alto. El sexo, al nivel celular, ha estado conectado con la muerte desde hace quizá setecientos millones de años. Los cuerpos de los progenitores tenían que morir. La evolución del sexo en los animales vino acompañada del envejecimiento y muerte de sus cuerpos. La perspectiva de la muerte a una hora prevista, la llamada muerte programada, fue arte y parte del sexo de fusión desde sus inicios unicelulares. La conexión romántica entre el sexo y la muerte en el arte refleja una historia evolutiva real.

Por extraño que parezca, el envejecimiento y la muerte que encontramos tan normales (y que tanto nos angustian cuando consideramos nuestro destino último) eran desconocidos en los albores de la vida y continuaron siéndolo durante millones de años. La vejez y la muerte natural, tal como las conocemos en los mamíferos, evolucionaron en protoctistas arcaicos como los ancestros de los ciliados (microbios unicelulares sexuales). Las diminutas células individuales, o al menos sus núcleos, tenían que fundirse sexualmente para sobrevivir. La fusión sexual reiniciaba el reloj de la vida y soslayaba el envejecimiento. Los descendientes de estos microbios desarrollaron cuerpos animales susceptibles de especiación. **[LÁMINA 31]** Nuestra vida consciente entera, de la niñez en adelante (incluida la conciencia, asentada en el cerebro, de la inminencia de nuestra propia muerte), es un resultado tardío de las propiedades de la multiplicación de ciertos protoctistas que se fundieron en un abrazo sexual. La multiplicación clonal de células nucleadas fusionadas, que servía para crear quistes y otros propágulos resistentes, ofreció nuevas oportunidades a la vida. Todos los animales, así como la mayoría de plantas y hongos, representan patrones de desarrollo establecidos por protoctistas que crecen, aunque sea brevemente, en un

estado fusionado (diploide) antes de retornar a su estado no fusionado (haploide) ancestral. Todas las plantas desarrollan cuerpos (llamados gametófitos) en el estado no fusionado, más evidentes en los musgos y helechos, que en las fases haploide y diploide son plantas separadas. Es como si nuestros espermatozoides y óvulos se desarrollaran por separado dando pigmeos haploides que comieran y excretaran. En los organismos sexuales el desarrollo en el estado no fusionado siempre se alterna con el estado fusionado. El retorno innegociable a la condición ancestral implica que el estado fusionado sólo puede ser transitorio. En el caso humano, lo que se desarrolla en el estado fusionado es nada menos que nuestro cuerpo, con su cerebro capaz de anticipar su propia muerte y de retornos a buscar el sentido de nuestras vidas.



progenitor no
fisionado



descendiente
fisionado



híbrido

LÁMINA 31

Fisión cariotípica: una vía para la evolución de nuevas especies de mamíferos. El legado protocista de la replicación centromérica prematura condujo a la especiación de ungulados, lémures y otros mamíferos. (Véase la nota 6 del capítulo 4.)

[Kathryn Delisle/José Conde]

Una larga tradición cultural asocia el sexo con la muerte. Influido por las ideas hindúes sobre la naturaleza fundamentalmente engañosa de la realidad, incluida la realidad biológica, el filósofo alemán Arthur Schopenhauer (1788-1860) sostuvo que el atractivo del género opuesto era una ilusión fundamental cuyo objeto era perpetuar lo que él llamó «el genio de la especie». Como tal, todo chismorreo sobre quién pretendía o debería o podría emparejarse con quién era de hecho una meditación sobre la composición genética de la siguiente generación. Seguramente prestamos tanta o más atención al sexo, los amoríos y nuestros hijos que a nosotros mismos porque nuestros cuerpos de gran cerebro están destinados a morir, mientras que nuestros genes, contenidos en espermatozoides y óvulos protocistoides poseen la inmortalidad. John Dobson, físico nacido en China y estudiante de los Upanishads (los pasajes filosóficos de los Vedas, las antiguas escrituras sánscritas), lo expresa así:

Las directrices fundamentales del programa genético sirven para dirigir una corriente de entropía negativa sobre nosotros mismos y transmitir la línea genética. Por esto nos sentimos los agentes de la acción y los paladeadores de sus frutos. Esto no es más que un espejismo genético. Los genes nos han persuadido de que siguiendo sus dictados alcanzaremos la paz de lo inmutable, la libertad de lo infinito y la bienaventuranza de lo indiviso. Pero, en vez de eso, lo que tenemos al final es una familia. El lector ya debe haberlo comprobado^[29].

Las desventuras del joven Werther, un relato del poeta y científico alemán Johann Wolfgang Goethe (1749-1832) sobre un hombre que se suicida por culpa de su desesperanzado amor por una mujer que no puede poseer, contribuyó a la eclosión del movimiento romántico y animó a los jóvenes alemanes a matarse en emulación de su héroe romántico. Sigmund Freud (1856-1939), el médico austríaco fundador del psicoanálisis,

subrayó la importancia inconsciente de las fantasías sexuales en la primera infancia. Freud atribuyó toda actividad psicológica a dos grandes impulsos: eros, el impulso sexual, y tánatos, el impulso de la muerte. La conexión sexo/muerte aparece también en el relato bíblico de Eva, que cede a la tentación del diablo en forma de serpiente, lo que provoca la expulsión de la primera pareja del Jardín del Edén y la caída de la humanidad, a través del pecado original, del estado de gracia inmortal a la lujuria terrenal. Desde el antiguo relato del Génesis a la mujer fatal de la última película de espías, sexo y muerte están íntimamente conectados.

No es casual. La asociación del sexo con la muerte en la imaginación popular es un reflejo de la vida misma. Sexo y muerte están fuertemente entrelazados, un legado evolutivo de la antigua estrategia microbiana de fundirse para sobrevivir. La naturaleza conservadora de la evolución ligó el sexo con la muerte en los descendientes de aquellos microbios haploides primordiales (antes de que dieran origen a plantas, hongos y animales). Los organismos que se reproducen sexualmente existen como individuos discretos sólo durante un tiempo limitado. La conexión sexo-muerte no existe en las bacterias, y tampoco en las amebas, euglenas y demás protoctistas no sexuales. Al reproducirse por fragmentación tales protoctistas son, en principio, inmortales. Ninguna de las 250 000 especies estimadas de protoctistas existentes requiere la fusión sexual para reproducirse. Muchos, como las algas pardas y rojas, recurren al sexo para invocar desarrollos que permiten tolerar extremos estacionales. La mayoría de protoctistas ejerce el sexo sólo para sobrevivir. Cuando el entorno (a través de alteraciones naturales estacionales de sol y sombra, calor y frío, humedad y sequedad) amenaza, los protoctistas responden diferenciándose en géneros complementarios (a veces no dos, sino decenas de ellos) que se atraen mutuamente.

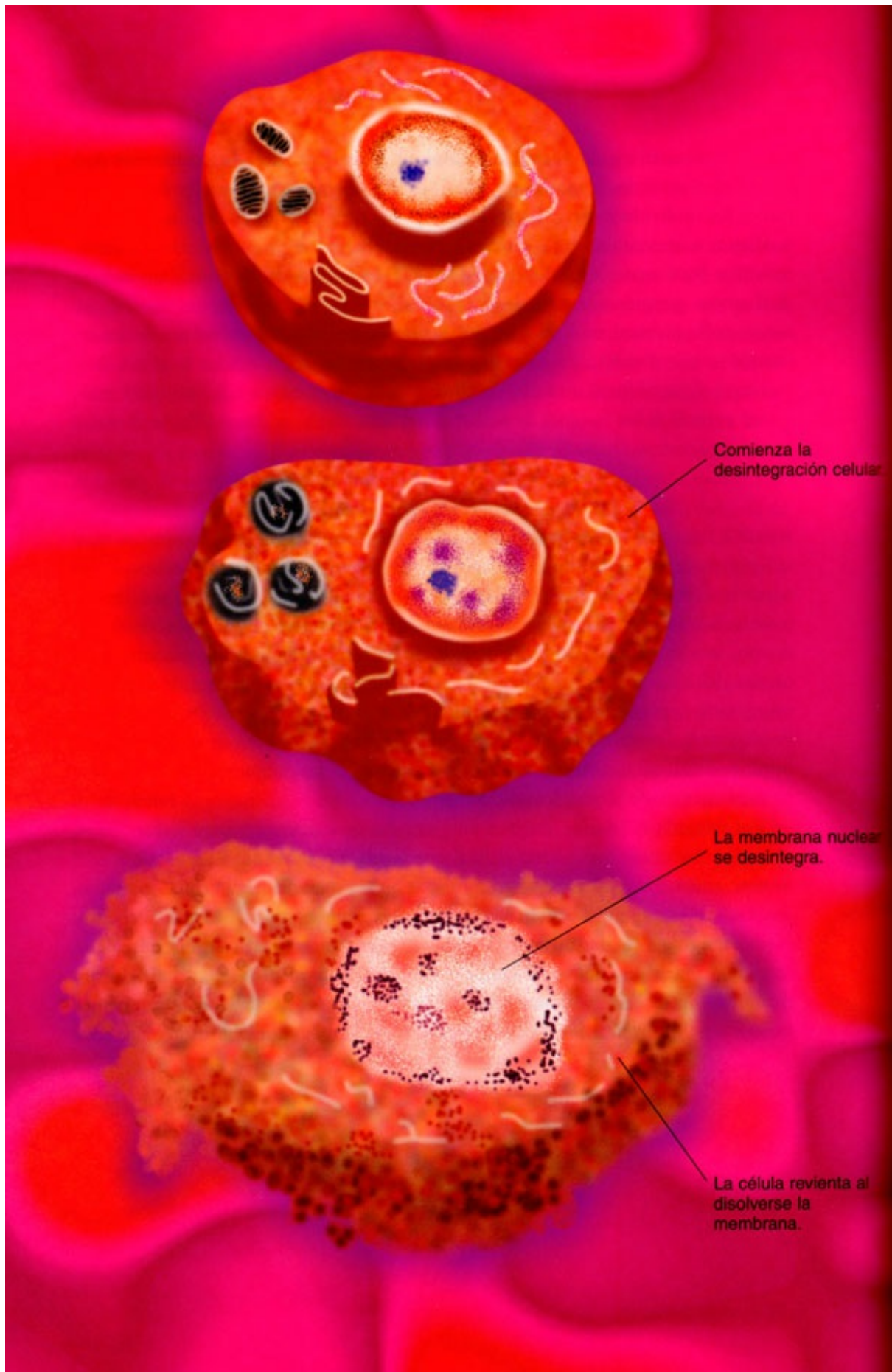
La reproducción uniparental sin sexo (tanto la fisión bacteriana como, posteriormente, la mitosis protoctista) fue la norma durante los primeros 2000 millones de años de la vida en la Tierra. La proliferación que tan monstruosa nos parece cuando toma la forma de tumor canceroso, llaga purulenta o infección bacteriana es de hecho el *modus operandi* asexual de la vida primigenia. Esta incesante multiplicación por división celular se refrenó y perfeccionó con la innovación de la sexualidad. Partes de las

células, duplicadas por la fusión, se hicieron redundantes e innecesarias. La muerte se hizo estacionalmente inevitable. Evolucionaron trayectorias definidas de autodestrucción o crecimiento preferente que regulaban el número de cromosomas, cloroplastos y mitocondrias por célula, asegurando la supervivencia de los monstruos dobles. La división celular bacteriana y mitótica —el estado no fusionado— fueron y son el elemento principal del desarrollo y la reproducción. La infrecuente fusión cíclica que comenzó de manera fortuita tenía que ser controlada a causa de sus potencialmente monstruosas consecuencias. A la larga esto derivó en los hechos angustiosos del envejecimiento y la muerte programada.

Si se les suministra energía, alimento, agua y espacio suficientes, todas las bacterias y muchos protoctistas son de hecho inmortales. Crecen y se multiplican sin límite, duplicando su ADN y otros componentes celulares y dividiéndose en dos células descendientes. En su simplicidad termodinámica esencial, la vida se expande en virtud de una división celular sin trabas. No hay cadáver ni mortalidad intrínsecos, no hay un necesario «ser para la muerte», como lo expresó el filósofo alemán Martin Heidegger (1889-1977). Dos seres celulares se originan de uno. Si las células descendientes permanecen juntas, pueden constituir el inicio de un cuerpo o tumor. Si, tras la división, se va cada una por su lado, lo llamamos reproducción celular. Una vez más, no se ve muerte por ningún lado, no hay cadáveres. En un proceso sin solución de continuidad, se forman dos nuevos seres donde antes sólo había uno. La fisión binaria bacteriana o la mitosis protoctista ininterrumpida es el hecho fundamental de la ciencia evolutiva: el impulso irresistible de crecer y reproducirse es nuestro legado microbiano absoluto. Cuando una célula ha generado dos células descendientes, la célula progenitora no ha muerto, se ha dividido. Por el contrario, los «individuos» sexuales (el legado protoctista de unos cuerpos que crecen, maduran e inevitablemente mueren) evolucionaron en tiempos relativamente recientes, hace menos de mil millones de años. La muerte de un organismo individual entero, programada y predecible, evolucionó no en las bacterias, sino en sus sucesores los protoctistas. Todos los protoctistas se reproducen —al menos de vez en cuando— por división directa uniparental: la reproducción celular mitótica. Sin embargo, algunos (pero no todos ni mucho menos) sobreviven a la hostilidad

estacional a través de las fusiones fecundantes del sexo meiótico. Entre ellos se cuentan nuestros ancestros.

MUERTE CELULAR PRIMIGENIA | Hay dos clases de muerte celular. La primera, más antigua desde el punto de vista evolutivo, es lo que se conoce como citocidio o necrosis. Ésta es una muerte evitable. La causa del citocidio es externa, accidental. [LÁMINA 32] La segunda, que recibe el nombre de apoptosis, es una muerte desde dentro, una muerte en el plazo señalado, inevitable. La apoptosis, el equivalente celular del suicidio, probablemente prosperó debido a las presiones de selección sobre cuerpos pluricelulares conformados por el desarrollo y la muerte. El desarrollo de partes distintivas en un embrión no está regido sólo por la multiplicación mitótica de sus células, sino también por la muerte celular programada. La parca tiene también su lado alegre. [LÁMINA 33]



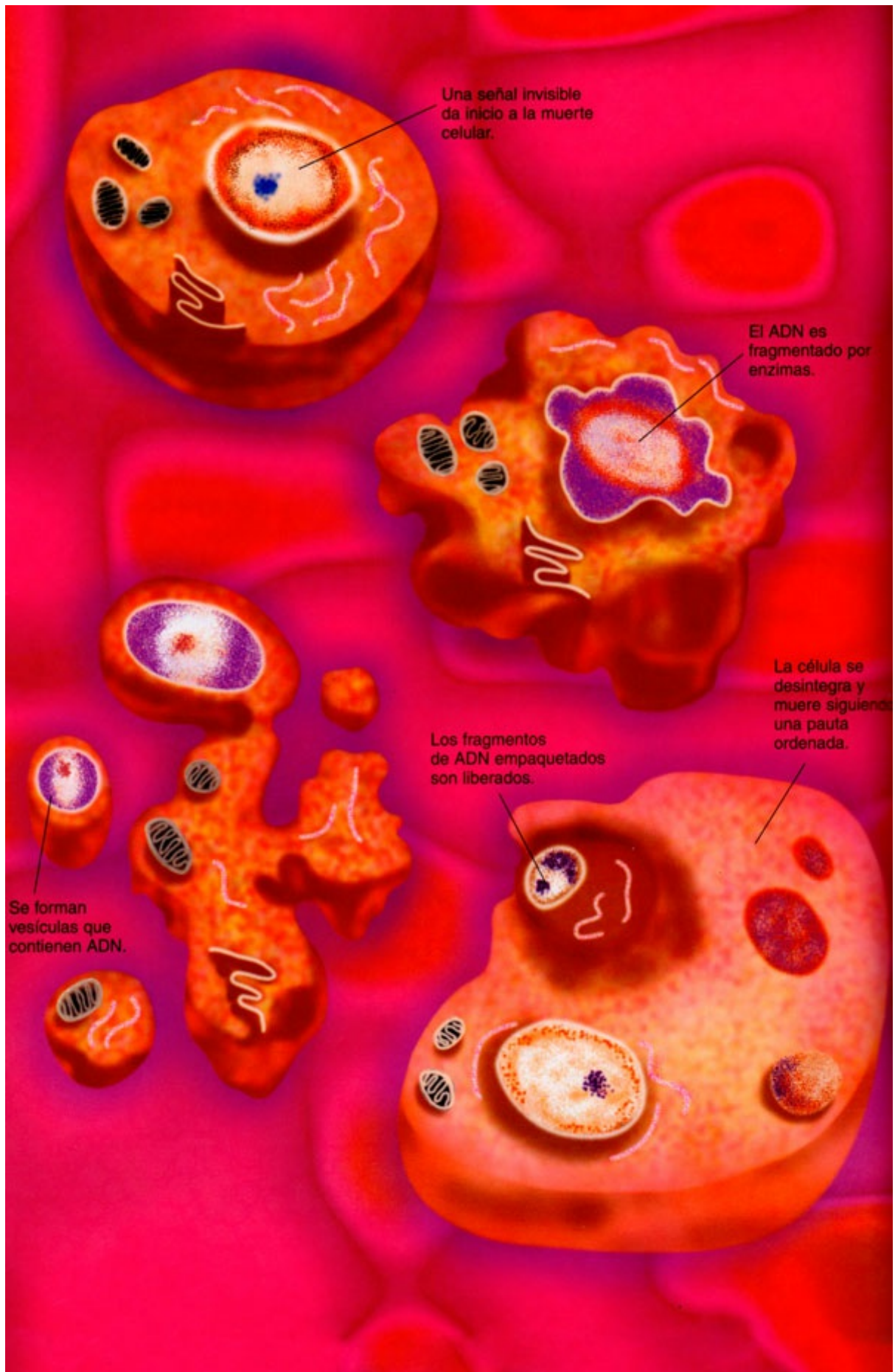


LÁMINA 32

Citocidio: muerte violenta en células tisulares de mamífero.

[Kathryn Delisle/José Conde]

LÁMINA 33

Apoptosis: muerte celular programada. La célula en proceso de muerte (arriba a la izquierda) desmenuza sosegadamente su ADN, el cual se distribuye en vesículas cerradas (abajo a la izquierda) que se dispersan para ser engullidas por otras células (abajo a la derecha).

[Kathryn Delisle/José Conde]

Las primeras células no estaban programadas genéticamente para morir. En el citocidio una célula lucha hasta el final por seguir funcionando. Resistiéndose a la muerte, intenta reaccionar contra las fuerzas que la matarían. Las células humanas amenazadas por agresiones externas se resisten violentamente a la tragedia del citocidio. Una célula humana irreparablemente dañada por toxinas o insuficientemente alimentada por la linfa o la sangre circundante morirá pronto. La falta de alimento, la desecación y otras carencias pueden privar a las células de la energía necesaria para bombear iones de potasio hacia dentro y de sodio y calcio hacia fuera, lo que hace que la célula se hinche y acabe reventando. Una muerte así es innecesaria. Si en el momento y lugar correctos se le hubiese suministrado suficiente alimento o energía en forma de ATP, la célula habría sobrevivido. El mantenimiento de la integridad de la membrana celular requiere una vigilancia incesante de su estado de conservación y del bombeo de iones. Las víctimas de citocidio atraen a los macrófagos del sistema inmunitario, células «policía» que patrullan engullendo y poniendo fuera de circulación los restos celulares. Los macrófagos activan otras células, los fibroblastos, encargadas de sellar lesiones (a veces visibles en forma de tejido cicatrizado). El citocidio es una emergencia celular imprevisible que induce respuestas de las células vecinas supervivientes.

La apoptosis es otra cosa. Se trata de una muerte celular programada. A diferencia del citocidio, la apoptosis es una extraña forma de suicidio, un suicidio ineludible, natural y necesario del cual depende el desarrollo normal de los cuerpos sexuales. La multiplicación de las células

integrantes de todos los organismos sexuales está sujeta a límites naturales. La mayoría deja de dividirse tras un número discreto de generaciones. Estas células que se autodestruyen activamente siguiendo una pauta predecible a lo largo de una vida se denominan apoptóticas. Al igual que el «espacio negativo» (el área vacía alrededor de un modelo sobre la cual el profesor de arte fija la atención de sus estudiantes) las células que desaparecen por apoptosis conforman el organismo remanente. En el embrión humano, por ejemplo, los millones de células que forman las membranas interdigitales del feto en desarrollo experimentan una muerte programada.

MUERTE CELULAR PROGRAMADA | En la apoptosis, las células nunca mueren por obra de alguna fuerza exterior. El núcleo se degrada y el ADN que contiene se deshace delicadamente, como pétalos cayendo de una flor. Las preparaciones microscópicas de células apoptóticas revelan que la muerte tiene lugar con majestuosa precisión. La apoptosis es una muerte serena. Las instrucciones para la misma son enviadas por el ADN al citoplasma a través de un ARN mensajero que se traduce en enzimas proteínicos, los cuales, a su vez, comienzan a cortar el ADN en pequeños fragmentos. Una vez comenzada la fragmentación de las largas hebras de ADN ya no hay vuelta atrás: la célula acabará muriendo. Como un paciente en coma sin actividad eléctrica cerebral, la célula puede mantenerse con vida algún tiempo, pero las esperanzas de recuperación son nulas.

La apoptosis evolucionó en los mismos organismos que inventaron el sexo meiótico: los protoctistas. Hoy vemos cómo el macronúcleo viejo del paramecio muere amablemente durante la autogamia y la conjugación sexual, dejando sitio para el desarrollo de uno nuevo. Los tripanosomas (pequeños protoctistas que obtienen alimento y energía de la sangre y otros tejidos de los animales grandes que los alojan) exhiben una apoptosis completa. Uno de los primeros signos de muerte programada inminente en estos minúsculos nadadores es un redondeamiento. En la célula se forman agujeros. Dentro del núcleo del tripanosoma, la cromatina —el material cromosómico— comienza a aglomerarse. Pedazos de ADN cromosómico

metódicamente cortados por enzimas específicos son liberados en el fluido circundante. Para sobrevivir, los tripanosomas, a menudo transportados por insectos, deben penetrar en los tejidos de los animales que infectan. Las células inyectadas por la picadura del insecto proceden a multiplicarse por división dentro de la víctima. Muchos tripanosomas, sin embargo, no consiguen contactar con un huésped, y entonces se suicidan por apoptosis. El hecho de que estos protoctistas, además de exhibir una apoptosis completa, tengan ciclos vitales complejos con etapas diferenciadas en insectos y mamíferos, pero no presenten sexo de fusión ni meiosis de ningún tipo, nos sugiere que la apoptosis evolucionó antes que el sexo meiótico. Sospechamos que la apoptosis evolucionó en protoctistas arcaicos que respondían a cambios medioambientales cíclicos aun antes de que se establecieran los ciclos de fecundación-meiosis.

Aunque presente en otras especies, el proceso de apoptosis se ha estudiado principalmente en mamíferos, incluso en algunos tejidos humanos. La célula apoptótica comienza por despegarse de las células vecinas. La temblorosa membrana ondula y luego se deshace en fragmentos. Estos fragmentos celulares, llamados cuerpos apoptóticos, contienen ribosomas, mitocondrias y otros orgánulos. La apoptosis local no suscita en las células circundantes que patrullan por los tejidos la misma situación de emergencia que el citocidio. No se dispara ninguna alarma. Los espacios tisulares no se agrandan para abarcar la célula apoptótica como ocurre con la célula afectada de citocidio. Los tejidos no se llenan de glóbulos blancos que liberan mensajeros químicos para el sistema inmunitario. El tejido en el que las células experimentan muerte programada permanece en calma. No se produce inflamación. Los cuerpos celulares apoptóticos son reciclados paulatinamente en materia viva; el ADN y las proteínas descompuestos son usados para la resíntesis. Las células vecinas, incluyendo los macrófagos residentes, engullen y digieren los restos nutritivos. Los tejidos en los que mueren calladamente células apoptóticas permanecen sanos. La muerte programada, como la caída del cabello o el menstruio, es algo natural. Los cuerpos (animales o vegetales) requieren la muerte programada para vivir.

AUTODESTRUCCIÓN | Los nemátodos de la especie *Caenorhabditis elegans* son gusanos pequeños, retorcidos y translúcidos corrientes en los jardines. Por suerte para los científicos, su delgada cutícula permite observar al microscopio la actividad de las células musculares y nerviosas en vivo, por lo que no resulta sorprendente que se encuentren entre los animales mejor estudiados de la Tierra. El animal adulto, de un milímetro de largo, está compuesto exactamente por 959 células, y se desarrolla en tres días a partir de un huevo fecundado. En el proceso aparecen 131 células adicionales, sólo para morir durante la transición al estado adulto. Se trata de una muerte celular programada.

A pesar del imperativo evolutivo de la supervivencia, en condiciones de hacinamiento muchos animales merman de forma natural sus propias poblaciones. Esta autodestrucción individual parece incrementar la supervivencia a escala social. En los mamíferos se han descrito comportamientos dependientes de la densidad de población. Los roedores hacinados, por ejemplo, muestran con mucha frecuencia conductas violentas, homosexualidad y automutilación. La implantación de los óvulos fecundados en la pared del útero de la hembra del ratón (*Mus musculus*) fracasa si se la expone al olor de un macho extraño (una indicación de superpoblación).

Los topillos abortan espontáneamente en condiciones similares. La resistencia al crecimiento ha demostrado ser una forma excelente de asegurar el crecimiento potencial futuro. La apoptosis celular y los comportamientos animales que reducen la población o impiden la concepción son ejemplos de una estrategia evolutiva ampliamente extendida de moderación, de posponer la gratificación inmediata en favor de las perspectivas futuras.

Como las empresas que hacen «regulación de plantilla», los cuerpos «despiden» a sus propias células u orgánulos por apoptosis. Un suicidio celular paulatino y predecible sigue a un episodio de rápido crecimiento celular. Los órganos van surgiendo a medida que las células supernumerarias son eliminadas de manera ordenada. Las muertes pasadas informan la organización presente. Como dice el físico austríaco Erich

Jantsch en su libro *The Self-Organizing Universe*: «[Un] importante resultado de la evolución puede contemplarse en la creciente intensificación de... la vida presente mediante la inclusión de la experiencia del pasado junto con anticipaciones del futuro. La evolución biológica configura la experiencia de un filum entero que, partiendo de las primeras biomoléculas, se hace efectiva en el presente»^[30]. La muerte de grupos de células es un requerimiento absoluto para la maduración de un cuerpo a partir de un embrión.

EL ÚTERO ETERNO DE HENRIETTA LACKS | Los animales evolucionaron a partir de protoctistas inmortales que inventaron la mortalidad y se asentaron. Todavía se desarrollan a partir de células huevo inmortales. Normalmente reprimidas, las células corporales sometidas a estrés revierten a veces a su modo de reproducción ancestral volviéndose cancerosas. Las células cancerosas son reversiones al estilo de vida previo de mitosis no restringida. La comunidad minuciosamente diferenciada que es el cuerpo animal tiende a desintegrarse. La individualidad se mantiene sólo en virtud de una reiteración y un refuerzo incesantes, como la mayoría de nosotros intuye. Los animales ejercemos un sutil control inconsciente sobre nuestros tejidos y órganos, protegiéndolos mediante un sistema inmunitario instintivamente cooperativo. El sistema inmunitario de los vertebrados evolucionó en tiempos relativamente recientes. Los embriones se desarrollan mediante división celular mitótica, combinada con movimientos internos y migraciones celulares. El desarrollo embrionario siempre va acompañado de actividades celulares predecibles: metabolismo, crecimiento, división, locomoción, fusión y apoptosis. La división celular se retarda y cesa en ciertas localizaciones; las muertes celulares se suceden; el embrión se desarrolla.

Las etapas de rápida proliferación celular durante el desarrollo corporal temprano recuerdan la colonización por especies pioneras en la génesis de un ecosistema. Después los límites entran en juego. A medida que se frena el crecimiento del ecosistema, los pioneros de multiplicación rápida pronto comienzan a ser desplazados por una amplia gama de especies de diversa índole. La diversidad ecológica aparece una vez se frena la multiplicación

de las especies pioneras y el ecosistema madura. De forma similar, la frenética multiplicación celular en las primeras fases del desarrollo embrionario se va frenando. Los distintos tejidos y órganos aparecen al tiempo que, *in utero*, comienza a reconocerse la característica forma humana. [LÁMINA 34] En el desarrollo animal y en la sucesión ecológica reconocemos procesos subyacentes similares a escalas muy diferentes.

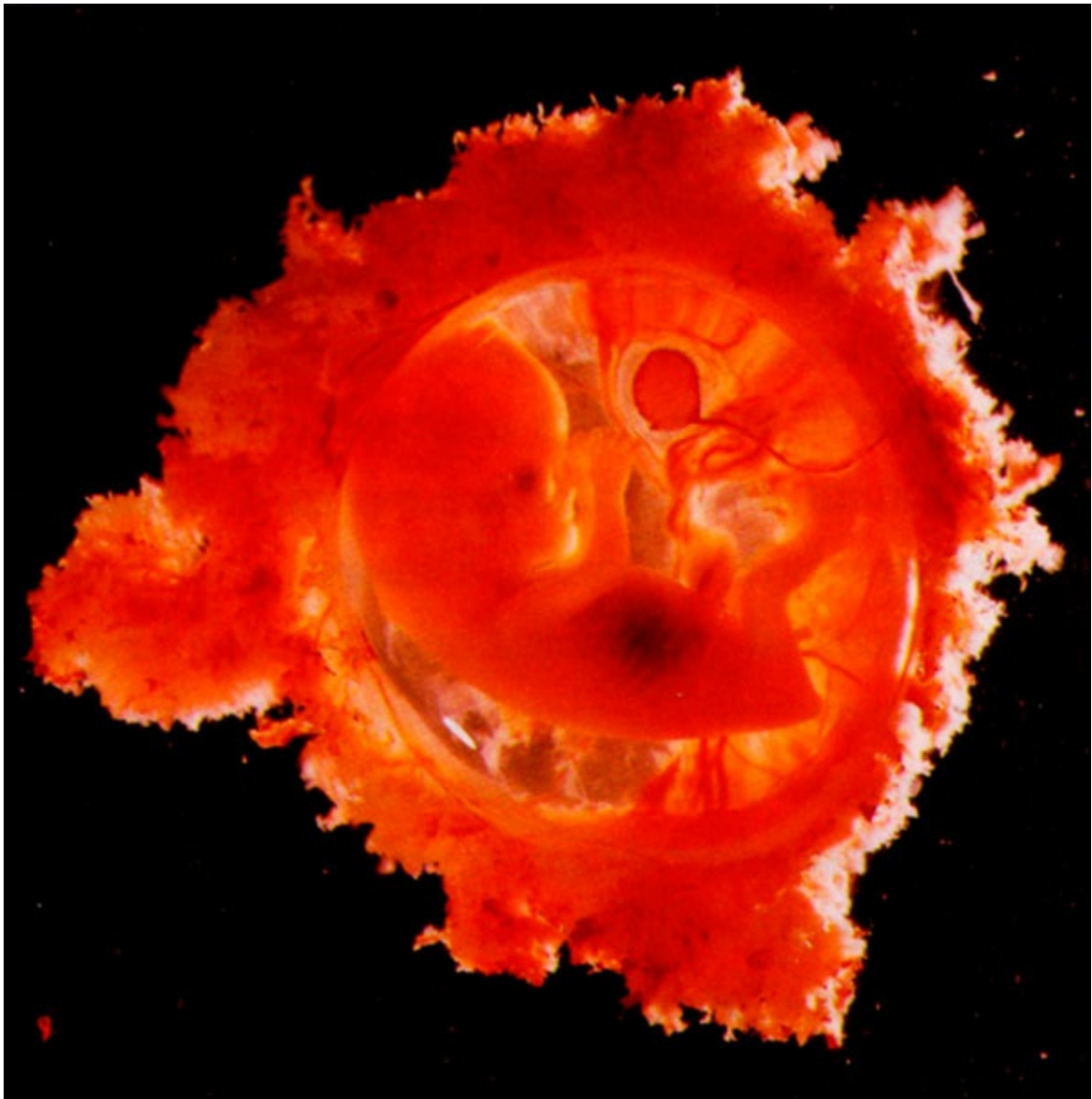


LÁMINA 34
Feto humano.
[Lennart Nilsson]

Las células HeLa nos proporcionan un ejemplo vivido de la tendencia latente de las células humanas a multiplicarse sin freno. Se llaman así en memoria de Henrietta Lacks, una madre de cuatro hijos que, en 1951, ingresó en el Hospital John Hopkins con un cáncer de cuello uterino. Tras un tratamiento con radiaciones inicialmente esperanzador, en el curso del cual se extrajo una muestra del tumor para su estudio, el cáncer agresivo de la paciente se propagó a los órganos vecinos. Henrietta Lacks murió en octubre de aquel mismo año. Desde su muerte, sin embargo, sus células cervicales, que continúan proliferando, han sido exportadas a laboratorios de todo el mundo. George Gey, investigador de la poliomelitis en la Escuela de Medicina John Hopkins, había vistos frustrados sus intentos de cultivar virus de la polio en laboratorio. Como todos los virus, el de la poliomelitis humana requiere células vivas para reproducirse. Gey se mostró sorprendido y esperanzado cuando observó la vigorosa multiplicación y, por ende, las posibilidades científicas de las células cervicales cancerosas procedentes de Henrietta Lacks. De hecho, las células HeLa son tan agresivas que se imponen a otros tejidos humanos en cultivo. En 1966, Stan Gartler, un genético de la Universidad de Washington, descubrió que células de tejido cardíaco, renal y hepático aisladas por separado habían sido contaminadas y desplazadas por células HeLa, de multiplicación más rápida, lo que provocó un escándalo científico. Médicamente, las células HeLa son importantes porque siguen proporcionando a los investigadores la oportunidad de estudiar virus humanos sin tener que recurrir a cuerpos humanos completos.

Antes de la difusión de las células HeLa no se había conseguido cultivar con éxito células humanas en el laboratorio. El principal obstáculo era el llamado número de Hayflick. Entre los años setenta y ochenta, el biólogo celular Leonard Hayflick observó que los fibroblastos, células obreras que intervienen en la cicatrización, se dividen sólo un número limitado de veces tras ser extraídas del cuerpo humano para su cultivo. Si se mantienen húmedas a la temperatura corporal en un medio nutritivo y se les suministra nitrógeno y dióxido de carbono, los fibroblastos pueden cultivarse en placas de Petri donde pueden continuar dividiéndose. Hayflick encontró que, mientras los fibroblastos procedentes de una persona de mediana edad se dividían entre 20 y 30 veces, los procedentes

de fetos se dividían alrededor de 50 veces antes de morir. Si, tras 20 divisiones, se guardaban los fibroblastos fetales en nitrógeno líquido, descongelados al cabo de más de una década aún eran capaces de dividirse otras 30 veces antes de degenerar y morir, lo que demostraba que las células fetales tenían un registro de su edad. Cada tipo de célula parece programado para un número específico de divisiones.

Los linajes de células embriónicas se obtienen a partir de ratones en un estadio muy temprano del desarrollo, antes de que el embrión, todavía en el oviducto, se implante en la pared del útero, momento en que consta de unas 100 células. Estas células embriónicas de ratón, manipuladas para evitar que se diferencien y dejen de dividirse, se multiplican indefinidamente en cultivo. Si se implantan en un segundo blastocisto, pasan a formar parte del embrión en ciernes, convirtiéndose en células cerebrales, epiteliales, etc., según la región del blastocisto en la que se inserten. Los biólogos denominan «totipotencia» a esta versatilidad de las células inmaduras. Las células totipotentes tienen un potencial reproductor enorme, pero este potencial se pierde una vez se especializan para convertirse en un tejido específico. Los linajes embriónicos son totipotentes. Al igual que las células HeLa, son inmortales (siempre y cuando no se les deje diferenciarse).

Las poblaciones sexuales de paramecios y otros ciliados no pueden sobrevivir indefinidamente sin pasar por el sexo meiótico. La pareja puede ser un individuo de género complementario o incluso un segundo núcleo haploide dentro de una misma célula. Lo relevante es el sexo en sí, no la unión de dos individuos. El objeto del sexo de los ciliados no es ni la reproducción ni la recombinación genética, sino poner a cero el reloj del proceso de envejecimiento. Un paramecio siempre experimenta una meiosis aunque no disponga de pareja para su ritual de intercambio de micronúcleos (de otro modo estaría condenado a envejecer y morir). Tras una división nuclear meiótica, dos micronúcleos idénticos proceden a aparearse y autofecundarse.

Este apareamiento consigo mismo se denomina autogamia. La autogamia se da cuando dos núcleos haploides idénticos se funden para formar un núcleo diploide. Ya hemos señalado que, lejos de incrementar la variación genética, la autogamia la reduce en gran medida. Una supuesta

ventaja del sexo es que la variación genética incrementada proporcionará genes que, en diploidía, pueden enmascarar mutaciones deletéreas. Pero la heterocigosis, la posesión de dos copias distintas del mismo gen, no puede derivarse de la autogamia. En el núcleo diploide resultante de la fusión nuclear autógena las dos copias de cada gen son necesariamente idénticas, porque proceden del mismo progenitor. La autogamia reduce a cero las oportunidades de enmascarar genes deletéreas. Así pues, la autogamia debería llevar al debilitamiento de las poblaciones de paramecios. Sin embargo, lo que hace es rejuvenecerlas. Una vez más, otro argumento estándar para la difusión de la sexualidad biparental (que se mantiene porque permite enmascarar genes deletéreas) es invalidado por el contraejemplo del paramecio.

La autogamia es tan efectiva para el rejuvenecimiento como la biparentalidad. Las células antes moribundas se ven igualmente rejuvenecidas por ambos procedimientos, recuperando su rápida tasa de multiplicación. Una vez más, la autogamia demuestra que la verdadera importancia del sexo no puede residir en la generación de variabilidad genética. La finalidad real del sexo meiótico es prevenir el envejecimiento, poner el reloj a cero, reparar el ADN y organizar genes y proteínas para la diferenciación celular y el desarrollo embrionario. Juntas, la meiosis y la fecundación devuelven a los seres nucleados a un «punto cero» desde el que pueden recomenzar su ciclo vital.

El vínculo entre los mundos microbiano y animal puede apreciarse en la provocativa similitud entre microbios con estados sexuales y asexuales y ciertos animales que alternan entre la reproducción sexual y la asexual. Estos animales participan de lo que los científicos denominan partenogénesis cíclica: un tira y afloja entre un modo de reproducción dependiente del sexo y otro independiente de él. Un ejemplo es el mosquito *Miastor metraloas*. Estos insectos pueden reproducirse en estado larvario sin el beneficio del sexo^[31]. En condiciones favorables prescinden de la fase adulta y la sexualidad «normal», pero cuando las cosas se ponen difíciles vuelven a ella. Igualmente, cuando ciertos áfidos notan los primeros fríos invernales, abandonan la reproducción asexual (uniparental) y vuelven a la sexual (biparental).

Los cientos de especies incluidas en el fílum rotíferos ejemplifican esta

tendencia de la sexualidad biparental a ceder el paso a la partenogénesis a gran escala. Los rotíferos marinos son un ejemplo para el movimiento de liberación femenina, porque no se ha detectado un solo macho en ninguna de las 350 especies descritas. Las hembras portan huevos y crías que son hembras vírgenes. Los taxones de agua dulce, sin embargo, son distintos. Ocasionalmente producen machos en respuesta a factores ambientales. Ante alguna fluctuación ambiental extrema, especialmente la amenaza del invierno, algunas poblaciones producen huevos de los que, al cabo de dos generaciones, surgen machos. El enfriamiento del agua induce en estas poblaciones exclusivamente femeninas la producción no de hijos, sino de hijas de cuyos huevos nacen nietos. En estos pequeños animales acuáticos el sexo de fusión ocasional acoplado con la ausencia generalizada de sexo biparental se correlaciona con la diferenciación corporal asociada a ciertos cambios medioambientales cíclicos. El sexo no se correlaciona directamente con la variación genética o la biodiversidad. Lo que ocurre es que los entornos inhóspitos activan la respuesta sexual al invocar el imperativo ancestral de supervivencia a través del sexo de fusión.

Los orígenes de la muerte y el sexo meiótico se remontan a los protoctistas arcaicos. Las células de *Tetrahymena* y *Paramecium* se libran de sus viejos macronúcleos después de aparearse, en un proceso que augura el declive de los cuerpos fértiles de animales, plantas (las flores, por ejemplo) y ciertos hongos (setas). En estos ciliados, la muerte apoptótica del macronúcleo usado sucede a la unión sexual y precede a la diferenciación de un macronúcleo renovado. Plantas, hongos y animales evolucionaron a partir de protoctistas sexuales de este estilo. La diabólica programación genética del envejecimiento y la muerte parece estar implementada en los organismos con sexualidad meiótica. Pero esta implementación, al menos la muerte celular programada en forma de apoptosis, se originó en protoctistas unicelulares similares a los ancestros de los actuales *Paramecium* y *Tetrahymena*. Más tarde el sexo al nivel celular, intercalado entre el desarrollo y la muerte, fue retenido por los protoctistas pluricelulares y sus descendientes.

Muchas especies de protoctistas que alternan entre multiplicación asexual y encuentros sexuales que reducen el número de individuos consisten en células densamente empaquetadas con una acentuada

«memoria» de su individualidad. Una vez las poblaciones, mediante la diversificación e integración de sus componentes, se convirtieron en una clase nueva de individuos, éstos, como es natural, se vieron sometidos a presiones selectivas de toda clase. Como siempre, las condiciones extremas estacionales trazaron su destino. Pero también surgieron nuevas presiones selectivas. Aquellos organismos sexuales pluricelulares, complejos y relativamente grandes, tenían que batallar ahora en un nuevo campo: el de sus propias poblaciones de seres envejecientes en crecimiento, maduración y diferenciación.

CONECTARSE O MORIR | Un buen día, una madre y sus dos hijos dieron un paseo hasta el lago local y, una vez allí, los tres se lanzaron al agua y se ahogaron. Se trataba de una familia desplazada que había perdido al padre en la reciente guerra de la antigua Yugoslavia. Un suicidio en grupo de este estilo puede parecer irrelevante en lo que respecta a la muerte programada de los macronúcleos del paramecio o al macrófago que induce a las células corporales dañadas por la radiación a destruir su propio ADN y morir. La gente tiene libre albedrío, dice la sabiduría convencional, mientras que las células son autómatas. Pero todo ser humano está formado por células y, sin embargo, el cuerpo es algo más que una máquina. El cuerpo humano, como el de todos los mamíferos, se describe mejor como una enorme comunidad integrada de células que actúan bajo ligaduras no sólo genéticas, sino termodinámicas y medioambientales. Las células de los sistemas nervioso e inmunitario mueren si no consiguen establecer conexiones.

De la misma forma, la gente sin «lazos» (sin afectos, sin familia, amistades o trabajo a los que «ligarse») es más propensa al suicidio, la depresión o la muerte por «causas naturales». Los hombres solteros tienden a morir antes que los casados; la gente que tiene mascotas a su cargo también vive más tiempo. Sospechamos que existe una conexión. Quizá todos los organismos, desde las poblaciones de protoctistas a los habitantes de la desgarrada Bosnia, tiendan a autodestruirse cuando se les priva durante demasiado tiempo de las interacciones con los miembros de su especie o de otras con las que están históricamente ligados. Los

llamados mecanismos de autodestrucción dependientes de la densidad aparecen en animales con exceso de población. Para nosotros, la muerte programada es una versión antigua, refinada y genéticamente fijada de una tendencia más general y difusa de los organismos sometidos a estrés ambiental a autodestruirse cuando ya no hay lugar o función para ellos en su entorno.

Tiene relevancia aquí una reseña de Craig Holdrege, un erudito biólogo y profesor de instituto en Vermont, en un importante nuevo libro sobre la manipulación genética de la vida^[32]. En los años cuarenta, Ken Spitz observó niños que habían sido internados en un orfanato estadounidense al nacer y que eran criados por niñeras en ausencia de sus madres. De acuerdo con Spitz, la alimentación, la higiene y el cuidado médico eran de los mejores que había visto. Sin embargo, como cada niñera tenía de ocho a doce niños a su cargo, apenas había contacto entre cada niño y su sobrecargada nodriza. Los niños pasaban mucho tiempo desatendidos. A su llegada al orfanato, Spitz observó que ningún niño tenía un juguete. Es más, para calmar a los niños, las fatigadas niñeras colgaban sábanas alrededor de las cunas que sólo dejaban ver el techo. Al cabo de tres meses de la ausencia de las madres, los niños comenzaron a mostrar signos de deterioro. Lloraban, chillaban, padecían insomnio y comenzaban a perder peso. Los mismos niños que antes habían sido difíciles de consolar ahora rechazaban el contacto físico cuando se les ofrecía. Se tendían boca abajo en la cuna y se movían menos. Se hicieron más susceptibles a las enfermedades infecciosas. Su expresión facial se tornó rígida y su llanto antes vigoroso se había reducido a un gimoteo. «Después de tres meses los niños se mostraban completamente pasivos. Ahora yacían sobre la espalda, incapaces de darse la vuelta. La mirada parecía vacía y la coordinación ocular deteriorada».

De los noventa y un niños observados por Spitz, al final del primer año habían muerto veintisiete^[33]. Está claro que estos bebés no «decidieron» suicidarse a la manera de una persona mayor. Su pérdida de interés en el asunto de vivir estuvo de algún modo provocada por la falta de un contexto humano adecuado. La muerte sobrevinía de manera autónoma. Podríamos decir incluso que las muertes estaban «programadas», si no fuera por la obvia inadecuación de esta palabra. La cuestión no era tanto lo

que se hacía como lo que no se hacía para conectar a los bebés con el resto de la vida humana.

Spitz pasó también por otro hogar para niños desplazados donde pudo observar los mismos síntomas, aunque en una forma más leve. La gran diferencia era que en este segundo orfanato las madres volvían regularmente para ocuparse de sus hijos. Cuando lo hacían los bebés se recuperaban con bastante rapidez. La trágica agonía de los niños del primer orfanato evoca la de las células desconectadas. Es como si, en nuestras vidas dependientes de la historia, necesitáramos reconocer puntos de referencia para llegar a alguna parte. Los genes tienen un papel crucial, pero no lo explican todo. La interacción cara a cara, las caricias, la instrucción, la imitación, la nutrición a su debido tiempo y un millar más de acciones cotidianas generan salud y desarrollo. El contacto entre madre e hijo parece incluso estimular la síntesis de compuestos «de ánimo» (cadenas cortas y específicas de aminoácidos llamadas polipéptidos). Aparte de genes, la puesta en circulación de estos compuestos bioquímicos, necesarios para un crecimiento saludable, requiere una atención maternal continuada. Para los primates como nosotros, la interacción temprana y consistente con la madre es una continuación de la pauta de proliferación celular, interacción y muerte programada que comienza dentro del útero y continúa fuera de él.

Los genes son componentes de las células, y las células son componentes de los organismos. Los organismos son componentes de poblaciones que siempre están organizadas en comunidades naturales que incluyen más de una especie. No actuamos de acuerdo con un plan fijado o «esquema» determinado genéticamente, sino en virtud de una historia de conectividad, implicación y participación.

Quizás el suicidio romántico, la muerte autoimpuesta del amante despedido o no correspondido, sea otro ejemplo de la propensión de las células y los organismos a destruirse cuando no tienen nada que hacer dentro de sus poblaciones. La víctima potencial del suicidio, en este caso, se ve despojada de su razón de vivir no por alguna carencia o necesidad presente sino, más bien, porque ha abandonado toda esperanza de que sus genes establezcan el contacto ansiado en la siguiente generación.

Suscribimos la afirmación de L.R. Cleveland de que la fusión propia

del sexo meiótico fue fruto de la desesperación de unos protoctistas capaces de englobarse unos a otros dentro de sus membranas fusionables. Al principio las parejas no eran otra cosa que alimento potencial. No había géneros, ni masculino ni femenino.

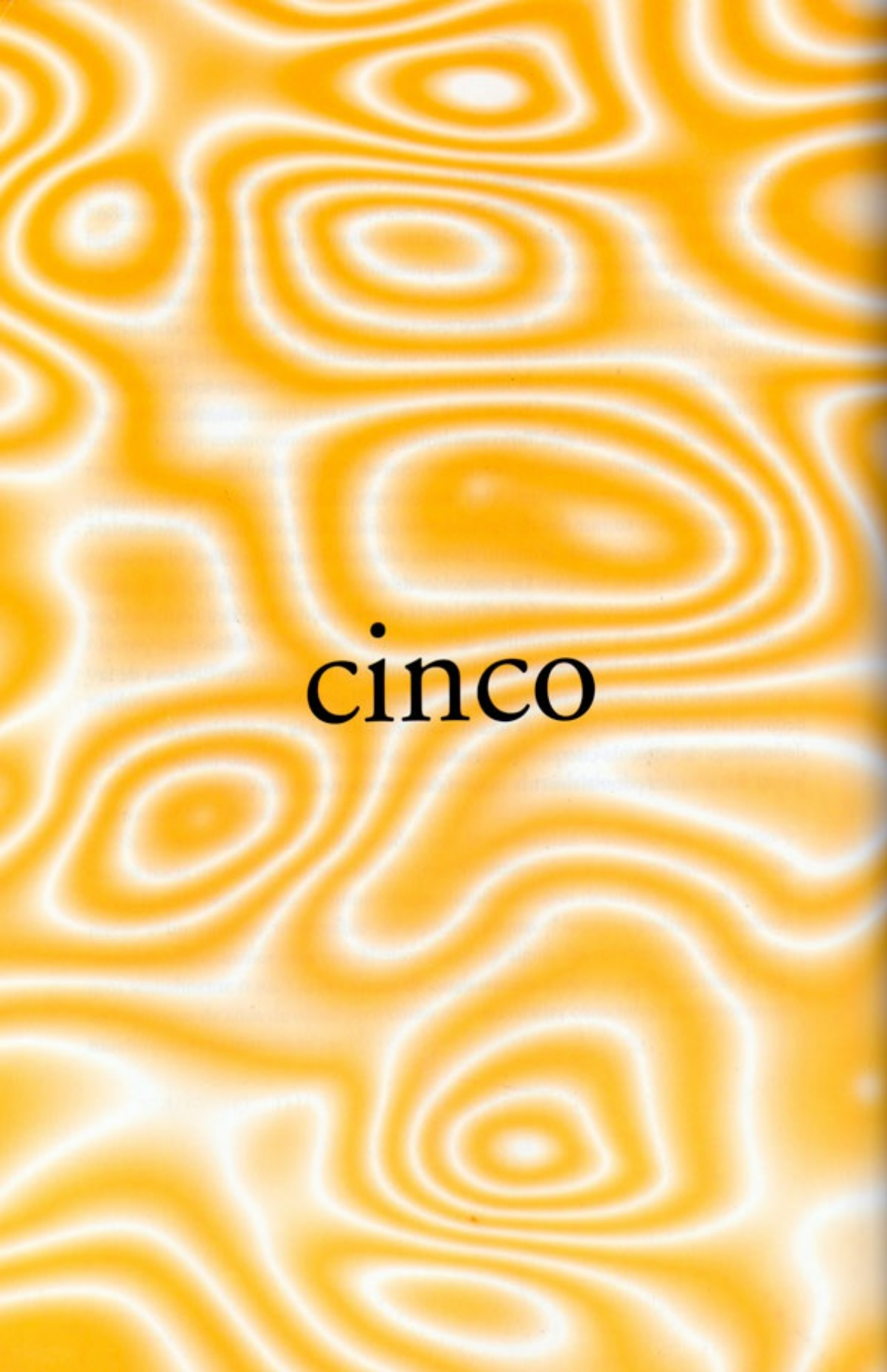
Cuando tenían hambre o sed las células se fundían. Era una eventualidad, no un hecho establecido. La fusión de células simples para producir monstruos dobles no fue fruto del deseo sexual, sino del estrés. Como hemos visto, es probable que ciertos protoctistas intentaran comerse a sus congéneres, englobándolos a través del proceso conocido como fagocitosis. Sin embargo, el comedor no siempre digería al comido. En algunos casos comedor y comido se fundían formando una única célula más grande. Los monstruos dobles se convirtieron en los primeros diploides, con su doble juego de cromosomas. Un ligero ajuste en la cronología de la reproducción celular (más concretamente, una demora en la reproducción del centrómero, el cuerpo cromosómico que se une al huso mitótico) habría hecho posible la reversión de la diploidía^[34]. Esta demora natural devolvía las células fusionadas a su estado singular inicial. Como hemos visto, bajo la presión de ciertas condiciones ambientales de carácter cíclico, la duplicidad monstruosa y el retorno posterior a la normalidad fueron favorecidas por la selección natural. Como la electricidad y los automóviles en la vida humana moderna, lo que en tiempos fue un lujo hoy es una necesidad. Con el tiempo, el delirio caníbal y las fusiones protoctistas se convirtieron en fecundación y reproducción. En un pasado lejano, los placeres de la gastronomía y el erotismo fueron uno solo, y el género no existía. Los caníbales con indigestión que sobrevivieron a la fusión se convirtieron en nuevos individuos, seres unificados resultado de una unión desesperada. La división celular reductora (meiosis) y el crecimiento (mitosis múltiple), completados con la muerte programada, vinieron después. Nuestros cuerpos sexuados son el resultado de esta singular concatenación de circunstancias.

Nuestras vidas están condicionadas por la sexualidad. Venimos de un vacío y vamos hacia un vacío. Entretanto vivimos. Nuestras vidas, y nuestras muertes, están mediatizadas por el sexo. Venimos a este mundo a través de un acto sexual que da inicio a un proceso irreversible de envejecimiento. Nuestros padres se unieron sexualmente al menos una vez.

Hemos nacido y algún día moriremos, nos acoplemos sexualmente o no. Como forma de organización material, tenemos más de tres mil millones de años de edad, pero como personalidades conscientes tenemos como mucho unas cuantas décadas.

El sexo produce cuerpos a partir de fusiones celulares y a través del desarrollo embrionario, la niñez y la adolescencia. Pero esta forma individual de organización material tiene límites. Inevitablemente, cada uno de nosotros envejece y muere. La única manera que tenemos de preservar el proceso disipativo de nuestro cuerpo es acudir al sexo fértil para reproducirnos; el sexo inaugura y sella a la vez nuestro destino como individuos. El precio fáustico que pagamos por el acto sexual que inicia la compleja diferenciación tisular de nuestro vástago, incluida la masa de tejido neuronal que llamamos cerebro, es la intromisión de la muerte. Nuestro imperativo es reproducir, dentro de nuestra vida fértil, un cuerpo con una forma concreta de organización material lejos del equilibrio termodinámico.

La tradición judeocristiana que asocia sexo con «la Caída» tiene resonancias científicas. Cuando evolucionaron los ciclos sexuales en nuestros ancestros protocistas, estos descendientes comunales de las bacterias inmortales perdieron su inocencia. Desde entonces, tanto desde el punto de vista religioso como científico, el sexo ha ido de la mano con la muerte. La evolución de los cuerpos iniciada por la fusión sexual en cada generación significó el fin de la degradación energética continuada, la imposición sobre la vida primitiva de la muerte recurrente mediatizada por el sexo. El resultado fue la discontinuidad de los cuerpos pluricelulares. El «beso de la muerte», con su conexión implícita entre la reproducción sexual y el inevitable declive de los cuerpos sexuales, es una metáfora apta para la evolución, hace miles de millones de años, de cuerpos descartables que sirven de vehículo temporal para las células sexuales potencialmente inmortales que contienen los genes.

The background of the page is a full-page abstract pattern. It consists of numerous concentric, irregular white rings and lines of varying thicknesses, set against a solid orange background. These lines flow and swirl across the entire surface, creating a dynamic, organic texture reminiscent of topographical contour lines or liquid ripples.

cinco

ATRACCIONES EXTRAÑAS:

SEXO Y PERCEPCIÓN

La causa final de esta rivalidad entre los machos parece ser que el animal más fuerte y activo se encargue de propagar la especie, que así se vería mejorada...

[Si] los vegetales se hubieran producido sólo mediante yemas y bulbos y no por generación sexual... en este momento no existiría ni la milésima parte del número de especies presentes.

Erasmus Darwin

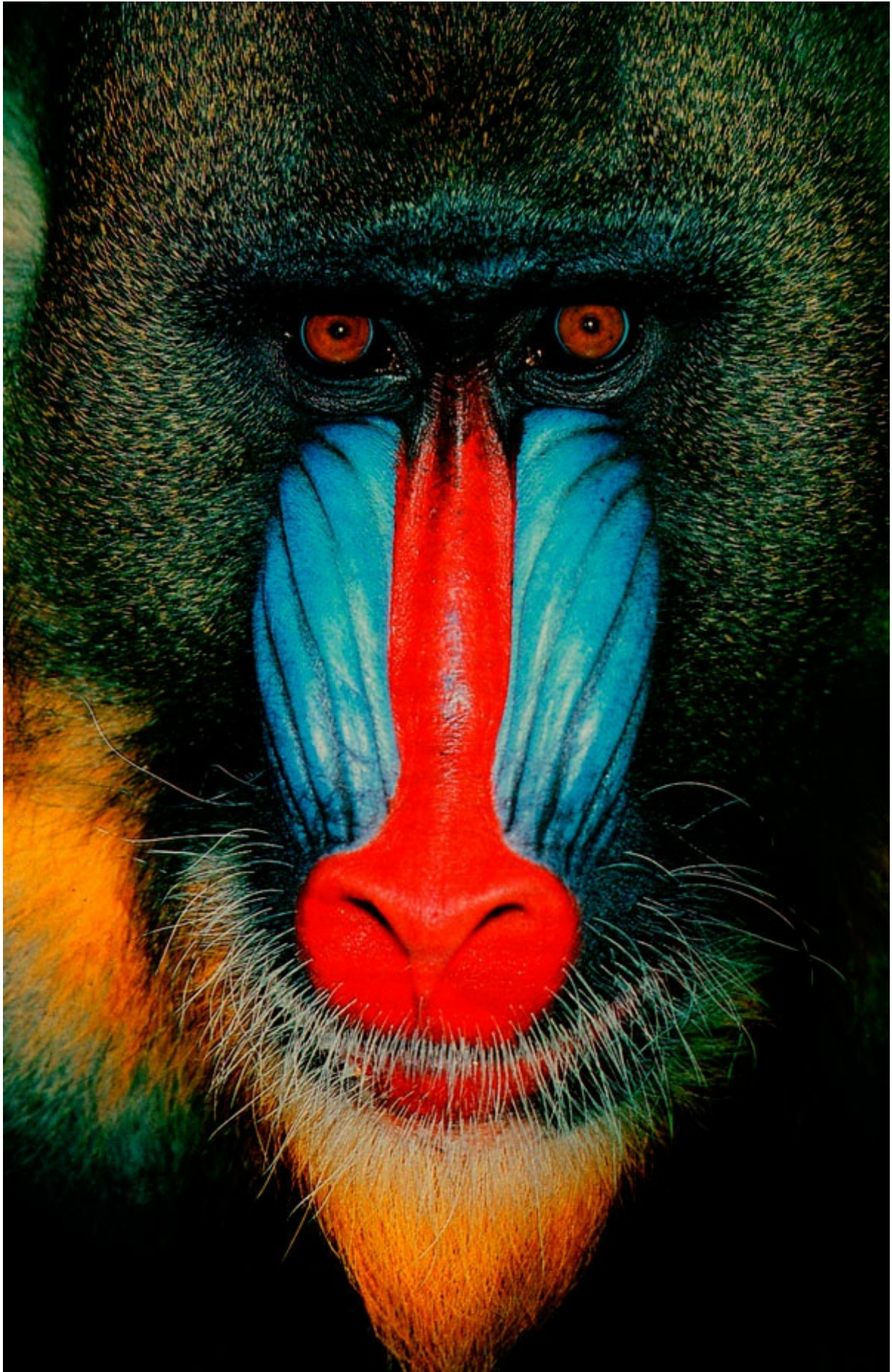
Cuando uno está enamorado comienza por engañarse a sí mismo.

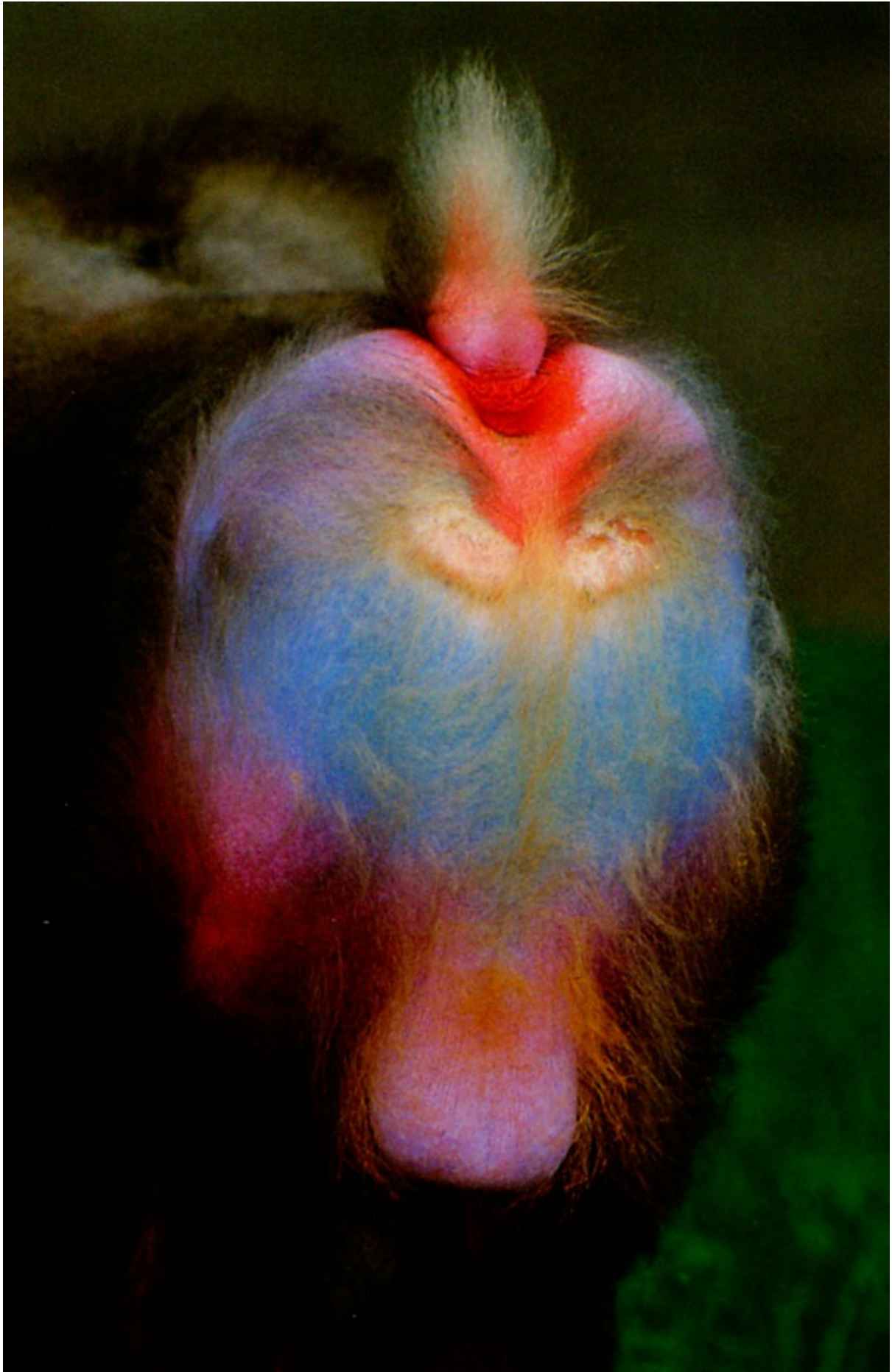
Y acaba engañando a los demás.

Esto es lo que el mundo llama un romance.

Oscar Wilde^[35]

TRAS LA ESTELA DEL SEXO Y LA MUERTE | Como hemos visto, el sexo fecundante evolucionó porque nuestros ancestros protoctistas sobrevivieron a las estaciones. El sexo mismo no fue objeto de selección en los animales. Se mantuvo porque era la única vía por la que los animales podían desarrollarse. Sin embargo, en la panorámica de la evolución planetaria, las especies sexuales, una vez evolucionadas, proliferaron de forma exuberante. Además, las poblaciones de animales y plantas sexuales se aplicaron a cumplir con el propósito termodinámico de la vida. Como veremos, su anulación del gradiente solar fue más rápida y extensiva que la de sus predecesores microbianos. A menor escala, cualquier animal sexuado es atraído por ciertos rasgos de la pareja potencial y se aparea sólo con los individuos que los poseen. Por esto mismo, los animales tienden a reproducir en su descendencia rasgos sexualmente seleccionados. Tales rasgos pueden ir desde los llamativos «ojos» de la cola del pavo real hasta las nalgas azules del mandril. **[LÁMINAS 35 y 36]** En este capítulo comenzaremos explorando el contexto del sexo meiótico, luego pasaremos a los rasgos que han surgido tras la estela de la reproducción sexual, sin olvidar los de nuestra propia especie.





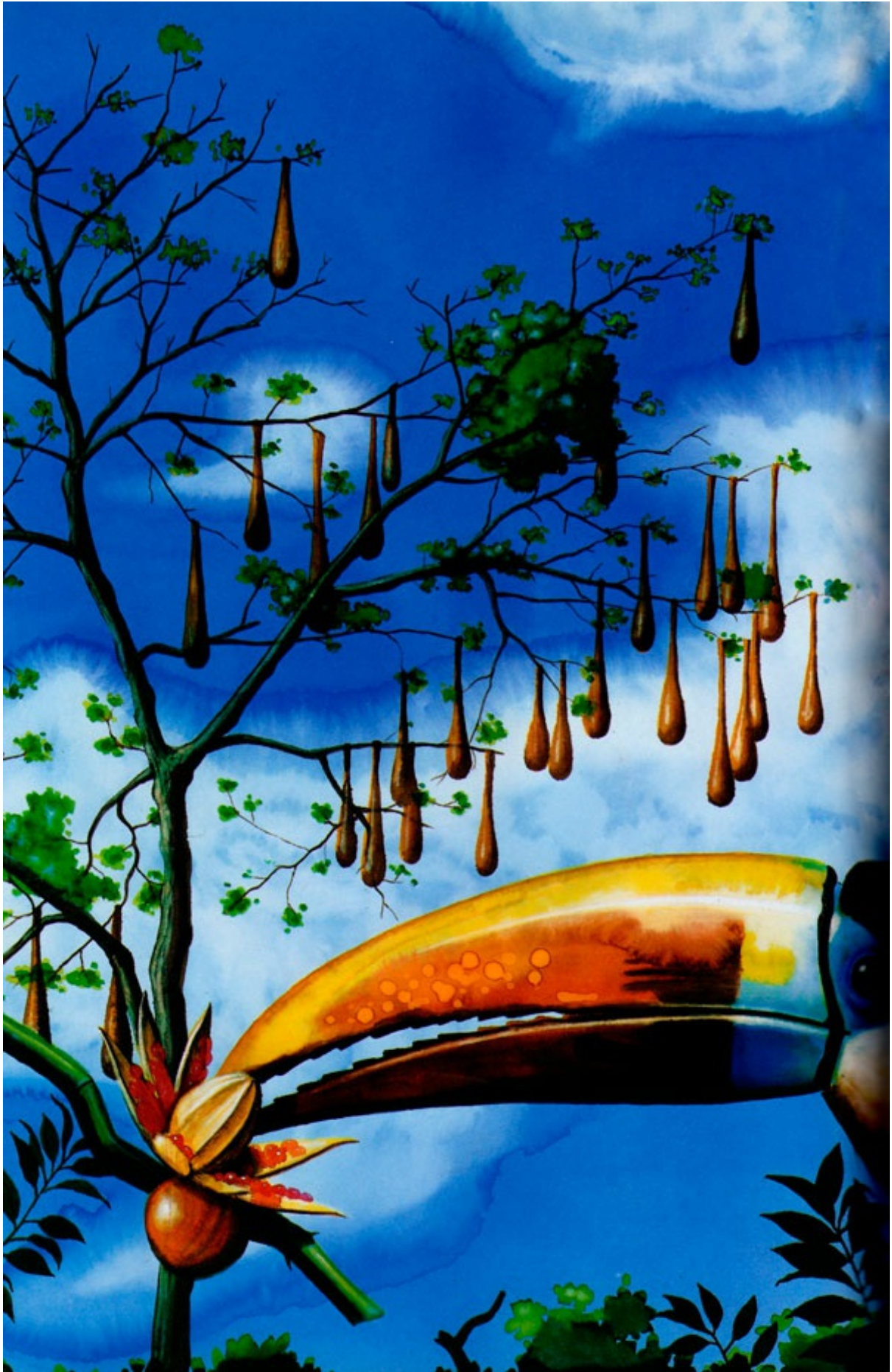
LÁMINAS 35 y 36

Cara y parte posterior de un mandril, con patrones de coloración similares. «(N)ada me interesó ni me sorprendió tanto como los brillantemente coloreados cuartos traseros de ciertos monos... Me parece... probable que los brillantes colores, tanto de la cara como de la parte posterior o, como en el mandril, de ambos, sirven como ornamento y atractivo sexual». —Charles Darwin.

[Tony Angermayer y Tim Davis/Photo Researchers]

La biparentalidad de los animales produce blástulas a partir de huevos fecundados. En todos los grupos principales (tipos) de animales, el sexo de fusión al nivel celular es una vía obligatoria que muy bien podría ser imposible de eliminar. (Véase Apéndice).

Las especies sexuales, animales y vegetales, que han dominado la vida durante los últimos 500 millones de años, parecen haber prosperado a escala global. No hay más que contemplar el vasto número de especies sorprendentes y brillantemente coloreadas que pueblan la selva ecuatorial [LÁMINA 37] para hacerse una idea de la gran diversidad de las especies sexuales. Las variaciones en genitales o flores, dos signos directos de sexualidad, son subproductos inevitables del imperativo sexual dependiente de la historia de cada especie. Sospechamos que la variedad sexual de plantas, animales y hongos, donde cada individuo pertenece a una población diferente de parejas potenciales, incrementa la tasa de degradación de energía y producción de entropía. Los ecosistemas ricos en especies sexuales, como el de la selva amazónica, reducen de manera más eficiente el gradiente solar que los ecosistemas bacterianos menos sexuales bajo los hielos antárticos. Observadas desde el espacio en la franja infrarroja del espectro electromagnético, las comunidades como las de la Amazonia disipan calor y producen entropía de forma más efectiva que las de sus primos menos diversos^[36]. Si bien el sexo no es objeto de selección directa ni en plantas ni en animales, las especies sexuales abundan porque se seleccionan plantas y animales específicos. Estas especies sexuales, los árboles en particular, son la clave de los ecosistemas más complejos y productores de entropía del planeta.



La vida es sensible. La vida afecta a su propia evolución. Incluso la decisión aparentemente simple de nadar hacia el alimento por parte de una bacteria lleva, con el tiempo, a nuevas vías evolutivas. Una bacteria que nade hacia un alimento que a su vez es un producto de desecho de un segundo tipo de bacteria, por ejemplo, probablemente establecerá una asociación. Cuando una clase de bacteria engulle el residuo de una segunda y se forma una asociación estable se produce una parcelación del hábitat. Los protoctistas nadadores que requieren el sexo de fusión para sobrevivir al invierno se asocian no sólo con su alimento, sino también con sus parejas potenciales. Con la evolución de la sexualidad cíclica obligatoria, los protoctistas y los primeros animales se involucraron activamente en su propia evolución. Charles Darwin, el nieto de Erasmus, describió dos procesos por los que el sexo acelera la evolución. Para diferenciarlos los agrupó bajo la denominación «selección sexual». Darwin observó que en ocasiones las hembras escaseaban en relación al número de machos dispuestos a aparearse con ellas. Esto conducía bien a la competencia masculina, con lo que se seleccionaban los machos más fuertes, bien a la elección femenina, con lo que se seleccionaban los machos más atractivos. Darwin hizo notar que los animales que ejercen una discriminación pueden influir en los caracteres de la siguiente generación.

Desde los días de Darwin, otra forma de selección sexual, la competencia espermática, ha sido sometida al escrutinio de los científicos. Los victoriosos en la competencia espermática no son los machos capaces de desplazar los cuerpos de sus competidores a base de lucha, sino los que desplazan los espermatozoides de los machos rivales por medios tales como eyacular tras ellos o producir un número mayor de espermatozoides propios. Una estrategia común que ha evolucionado independientemente en arañas, insectos y mamíferos es la producción de un esperma en extremo pegajoso que bloquea la entrada del esperma de ulteriores pretendientes. Algunos roedores incluso producen «tapones vaginales» que

depositan con sus penes. En los animales, y especialmente en los primates sociales como nosotros, la facultad de variar el comportamiento con intención de atraer, de percibir diferencias sutiles en la forma, tamaño y color de los cuerpos, y de engañarnos a nosotros mismos y a los otros, se ha incorporado al proceso evolutivo.

«¿No ves más allá de esta fachada, esta manera de ser afable y tolerante?», pregunta Walt Whitman en su famosa obra *Hojas de hierba*. Pero, como organismos, las «fachadas» acostumbran a ser las únicas indicaciones que tenemos. Ningún animal percibe directamente el genotipo, es decir, los genes presentes en los cromosomas de una posible pareja. Lo que se percibe es el fenotipo, la expresión de esos genes en el animal entero. De hecho, lo que percibe cualquier animal es el exterior del cuerpo del otro, desde cierto ángulo y con cierta iluminación. Los poetas hablan de la luz especial que baña al ser amado. Los novelistas escriben sobre el enamoramiento. Muchas novelas describen los peligros que arrostran los amantes en su afán por acoplarse sexualmente. Poderosos cambios bioquímicos (desde la producción de feniletilamina, una droga natural análoga a las anfetaminas, durante el «frenesí» inicial de la atracción física hasta la elevación de los niveles de oxitocina durante y después del orgasmo) se correlacionan con el deseo, el amor y el vínculo de pareja. Estas drogas inevitablemente producidas por el cuerpo y alteradoras de la mente, forman parte del arsenal bioquímico responsable de que nuestra naturaleza nos impulse a buscar parejas y tener descendencia. Como muchos otros animales, a veces arriesgamos nuestra propia supervivencia para tener alguna oportunidad de inyectar nuestros genes en la siguiente generación.

Ahora bien, dado que somos seres imperfectos y no dioses omnipotentes, nuestra percepción de las parejas deseables evolucionó a partir del mismo aparato empleado por nuestros ancestros asexuales para localizar el alimento. El resultado es que podemos enviar y responder a señales falsas. Somos fácilmente embaucados, encandilados, tentados y seducidos. En este capítulo se trata en detalle un aspecto importante de la evolución del sexo: la forma en que la percepción implicada en el acoplamiento y la producción de descendientes continúa conformando el cuerpo y la mente. Se exploran los precursores evolutivos del

reconocimiento mutuo, la fusión, el sexo y el amor propios del género humano. El deseo y el amor son mucho más cruciales para la continuidad evolutiva que para el bienestar del animal individual. Son impulsos que nos llevan a sacrificar nuestros cuerpos individuales (destinados, como hemos visto, a morir de todas maneras) en favor de seres futuros producidos sexualmente. Somos efímeros, pero el sexo permanece.

El engaño se basa en la percepción, y el engaño sexual se basa en la percepción y en el sexo. ¿Cómo evolucionó el sexo de los mamíferos? ¿Es obligatorio el apareamiento? ¿Cómo, entre una plétora de estímulos, localizamos una pareja adecuada? ¿Cómo se relaciona nuestra sexualidad con nuestra percepción de otras formas de vida? En un esfuerzo por comprender las fuentes de la conducta sexual humana, compararemos la percepción, el engaño y las estrategias de apareamiento en una amplia gama de especies.

Nuestra perspectiva es clara. La vida misma deriva del despliegue termodinámico del universo físico. El sexo meiótico (de fusión) es un fenómeno biológico que evolucionó en protoctistas estresados. Los animales ancestrales no podían desarrollar embriones o adultos sin la penetración previa de un espermatozoide en un huevo. En nosotros, el sexo es imprescindible; el desarrollo y la reproducción de todos los miembros de los 38 tipos animales requiere la meiosis y la fecundación. (Véase **Apéndice**). Creemos que nuestro análisis científico de estos procesos dependientes de la historia contribuirá a la comprensión de aspectos de la evolución de la sexualidad tan sutiles como el modo en que la percepción animal conforma los cuerpos animales a lo largo del tiempo evolutivo.

PERCEPCIÓN, ENGAÑO, ESTÉTICA | La percepción, el engaño y la sensibilidad estética han estado evolucionando en los animales desde su aparición en la Tierra hace más de 541 millones de años. No es de extrañar, pues, que la evolución animal haya perfeccionado estas capacidades y a la vez haya sido influenciada por ellas. A pesar de nuestra arrogancia y nuestro antropocentrismo, los resultados de multitud de experimentos y observaciones nos fuerzan a admitir que el pensamiento y el sentimiento no están limitados al género humano. La percepción y la

acción estimulada por ella son propiedades de la vida (incluso la bacteriana). De hecho, la totalidad de la naturaleza viva es un fenómeno de percepción interactiva^[37].

Unos cuantos tipos de bacterias nadadoras, que toleran el oxígeno pero no dependen de él, son magnetotácticas. Responden al campo magnético terrestre nadando hacia el polo norte en el hemisferio norte y hacia el polo sur en el hemisferio sur. Estas brújulas vivientes contienen minúsculos cristales de magnetita alineados dentro del cuerpo celular. La magnetita les permite orientarse siguiendo las líneas de fuerza magnéticas. Su destino no son los polos, sino los sedimentos ricos en nutrientes y pobres en oxígeno en los que proliferan. Pero hasta la bacteria más pequeña, magnética o no, percibe, y en vista de que muestran actividad locomotriz podemos decir que obran en consecuencia. Bacilos y bacterias filamentosas se alinean siguiendo un gradiente de concentración de azúcar alrededor de una fuente alimentaria. Sienten y actúan en función de sus sensaciones. Muchas bacterias, así como sus descendientes protoctistas, son atraídos o repelidos por la luz o el oxígeno. La facultad perceptiva de la vida está directamente relacionada con su actividad reductora de gradientes. Los seres vivos, en efecto, identifican gradientes —de nitrógeno, azúcares, ácidos, luz, calor y «soledad» (su separación de otras células u organismos)— y responden en consecuencia, convirtiendo sus percepciones en acciones encaminadas a reducirlos.

La «supervivencia a través del sexo» de los protoctistas se convirtió con el tiempo en reproducción sexual obligatoria. Los ancestros de los animales reconvirtieron muchas de las facultades perceptivas que habían evolucionado en los protoctistas para la detección y localización del alimento, los enemigos o el hábitat. Como los protoctistas, mucho antes de volverse sexuales, ya eran devoradores tanto de bacterias como de otros protoctistas (caníbales), sospechamos que el placer de comer evolucionó mucho antes que el sexual. Desde el principio, todas las formas de vida móviles tenían que procurarse alimento y cobijo. Los protoctistas sexuales y sus descendientes animales, además, necesitaban parejas. Durante cientos de millones de años, el imperativo reproductor forzó a los protoctistas sexuales y los primeros animales a distinguir las parejas potenciales entre un mundo de distracciones.

Los bellos, de acuerdo con la visión sesgada de los miembros de su misma especie, sobrevivieron. La belleza puede ser sólo superficial y la moda sinónimo de frivolidad, pero, a lo largo de los eones, la atracción sexual ha sido un asunto de vida, muerte y continuidad para aquellos obligados a reproducirse sexualmente. Falso o no, el atractivo es y ha sido una realidad biológica. Inferir la deseabilidad genética de una pareja potencial es algo de la mayor importancia para todos los seres con reproducción sexual. «Ojos brillantes y pelo denso» en los mamíferos son indicativos de fertilidad y capacidad progenitora. La textura de la piel, la finura o brillo del pelaje y el apogeo de la época del celo, por ejemplo, contribuyen a determinar la fertilidad de una pareja potencial.

SELECCIÓN SEXUAL Y SELECTIVIDAD FEMENINA | Charles Darwin, inspirándose en el pavo real, fue el primero en sugerir que la presencia en los animales de ciertos caracteres distintivos no se debe necesariamente a que tengan un valor de supervivencia, sino a que, cuando el otro género los encuentra atractivos, promueven apareamientos fértiles. [LÁMINA 38] El apareamiento discriminado se refiere a las uniones fértiles entre organismos de apariencia similar. Esta forma de apareamiento conduce a poblaciones con rasgos comunes distintivos. Las modas adolescentes pasajeras constituyen un ejemplo de la evolución de nuevas preferencias de apareamiento a través de la manipulación de la propia apariencia para atraer al otro género. Todos conocemos subgrupos humanos que repiten costumbres que conducen a comunidades provisionales de apareamiento discriminado. Los rasgos de las subpoblaciones endogámicas (los ejemplos humanos podrían incluir anillos nasales, extensores labiales, crestas y zancos) resultan peculiares o antiestéticos para otros miembros de la misma especie. Pero la pasión sexual es profunda. En efecto, las urgencias sexuales insatisfechas pueden ser tan fuertes que, ante la carencia de una pareja apropiada de la misma especie, los organismos llegan a veces a aparearse (infructuosamente desde el punto de vista evolutivo) con miembros de otras especies. [LÁMINA 39]

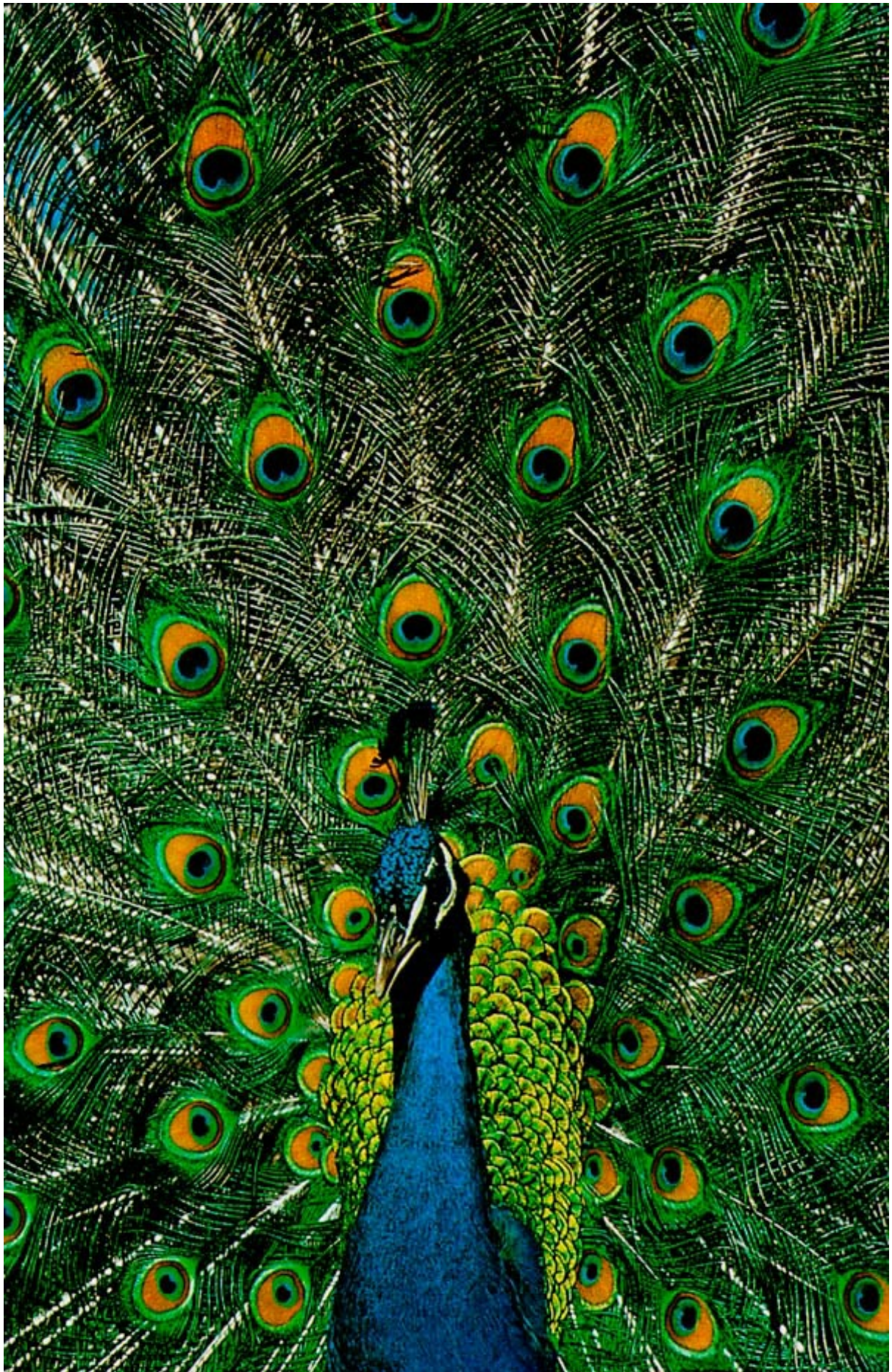




LÁMINA 38

El espléndido despliegue del pavo real.

[Frans Lanting/Minden Pictures]

LÁMINA 39

La fiebre de la jungla: una mantis religiosa montando a una ardilla listada.

[Alexis Rockman]

En *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, Darwin propuso que los rasgos como la cola del pavo real,

... sirven sólo para dar ventaja a unos machos sobre otros, porque los machos menos dotados, si se les dejara tiempo, tendrían el mismo éxito a la hora de aparearse con las hembras; y en los demás aspectos, a juzgar por la estructura de la hembra, estarían igualmente bien adaptados para sus hábitos de vida ordinarios... porque los machos han adquirido su presente estructura no por estar mejor adaptados para sobrevivir en la lucha por la existencia, sino porque les ha dado ventaja sobre otros machos, y han transmitido esta ventaja sólo a su descendencia masculina. Fue la importancia de esta distinción lo

que me llevó a designar esta forma de selección como selección sexual^[38].

La selección sexual hace que los organismos influyan sobre su propia evolución. Darwin insistió resueltamente en su convicción de que las hembras, incluso las de insectos presumiblemente guiados por instintos ciegos, pueden tener un impacto significativo sobre su propio futuro al aparearse exclusivamente con ciertos machos. Para Darwin, era un «hecho asombroso el que las hembras de muchas aves y algunos mamíferos... y... lo que aún es más asombroso... reptiles, peces e insectos» ejercieran una «selectividad femenina». Aunque en un principio fue denigrada incluso por los mismos evolucionistas que defendieron la selección natural, la selección sexual darwiniana se ha visto desde entonces rehabilitada.

En 1982, el zoólogo escandinavo Malte Andersson, un experto en selección sexual, publicó los resultados de un experimento consistente en cortar unas 15 pulgadas de la cola del macho de la viuda colilarga (*Euplectes progne*) y pegar el trozo cortado en la cola de otros machos^[39]. Los machos de cola alargada tuvieron un mayor éxito reproductor, medido por el número de nidos con huevos o polluelos dentro de su territorio. Las hembras del diamante moteado australiano (*Poephila guttata*) muestran predilección por los machos con patas anilladas en rojo y naranja o con bucles verdes. Los machos rechazan a las hembras con anillos negros, y prefieren inseminar a las anilladas en azul o naranja, aun cuando las hembras con anillos negros tienen la ventaja reproductiva de que producen polluelos más saludables. Nancy Burley, la bióloga de la Universidad de California que desveló esta sorprendente estética aviar, también descubrió que las hembras seleccionaban a los machos según el color de sus sombreretes.

PLUMAS DE COLA Y MÁS ALLÁ | La televisión y el cine refuerzan las normas del atractivo sexual a una escala cada vez más global. Consideremos la supermodelo delgada y bronceada. Los estándares de belleza femenina vigentes difieren grandemente del ideal renacentista de gordura saludable, tal como se expresa en los cuadros de Botticelli y Rubens. El ideal Victoriano de feminidad «tuberculosa», pálida y frágil,

nos resulta hoy chocante. La tendencia a la delgadez en la moda puede o no reflejar un valor de supervivencia. En tiempos de relativa escasez de recursos los cuerpos femeninos rollizos pueden indicar una mayor capacidad potencial para concebir y criar niños. Alternativamente, en las culturas urbanas modernas y populosas, la delgadez puede ser indicativa de mujeres más fáciles y menos caras de mantener. Aun en el limitado lapso temporal abarcado por la humanidad moderna occidental, la moda ha experimentado cambios drásticos con consecuencias evolutivas potenciales. Aunque diametralmente opuestas, tanto la espigada supermodelo como la robusta beldad renacentista son ejemplos de rasgos favorecidos por la selección sexual.

Algunos emplean el término «selección desbocada» para referirse a un tipo de selección natural que no se basa en ventajas obvias de cara a la supervivencia, aparte del atractivo peculiar, reforzado por la reproducción, de la posesión de un cierto rasgo por parte de miembros deseables del género opuesto. Los rasgos deseados pueden incluso ir en detrimento de sus poseedores. De acuerdo con el principio de la desventaja, propuesto por el zoólogo israelí Amotz Zahavi, el dibujo característico de las rayas de una cebra, los ocelos de la cola de un pavo real o el pigmento en la base de un largo cuello son ejemplos de una clase de mensajes que, además de ostentaciones específicas, representan una desventaja. Un animal de cuello largo puede hacer ostentación de su longitud mediante un desventajoso anillo basal. Los cuellos cortos parecerán aún más cortos: «Mi cuello es tan largo que me puedo permitir hacerlo parecer corto». Su teoría sugiere que el atractivo de algunos rasgos caprichosos (como, por ejemplo, los brillantes tonos rojos de los colibríes machos de la especie *Spathura underwoodi*, que también lucen largas plumas de cola ornamentales) puede deberse incluso al nulo valor de supervivencia de los rasgos en cuestión. El chico que da veinte brincos a toda velocidad sobre la acera para impresionar a la chica está derrochando energía. Ahora bien, aunque esto suponga una cierta desventaja para el ejecutante, también indica que se trata de un macho valioso que tiene energía a raudales.

Sin embargo, los ejemplos más espectaculares de atractivo supuestamente reforzado por la reproducción son estructurales y fisiológicos más que comportamentales. Los pelícanos (*Pelecanus*

onocrotalus) de sexo masculino desarrollan grandes salientes sobre el pico durante la época de cría. A pesar de que reducen la visión y dificultan la captura de peces, estas protuberancias parecen ejercer un gran atractivo sobre las hembras. Incluso la delgadez femenina comienza a tener sentido a la luz del modelo de Zahavi. Es como si las mujeres estuvieran diciendo: «Mi cuerpo es tan deseable como productor de hijos que me puedo permitir hacer que parezca que no podría criar un solo bebé».

El principio de la desventaja de Zahavi es un ejemplo de cómo se explican los caracteres por su valor de supervivencia. Aunque Darwin distinguió entre selección sexual y selección natural, la primera es reducible en última instancia a la segunda. Por muy vigoroso y saludable que sea un animal, si es estéril o nadie quiere aparearse con él sus genes no pasarán a la siguiente generación, lo que quiere decir que serán descartados por la selección natural.

La distinción darwiniana entre selección sexual y selección natural implicaba que una y otra eran procesos independientes. Su compatriota y codescubridor de la selección natural, Alfred Wallace, desdeñó la selección sexual como fuerza evolutiva. Wallace no creía que los brillantes colores de los machos fuesen seleccionados por las hembras. En vez de eso sugirió que las coloraciones abigarradas eran la condición aviar natural. En otras palabras, no es que los machos hubiesen adquirido plumas brillantemente coloreadas, sino que las hembras, a causa de la presión depredadora sobre los nidos, habían adquirido coloraciones crípticas a modo de camuflaje.

Incapaz de aceptar la idea de que los animales seleccionaran a sus parejas por sus colores, Wallace pensaba que la selección natural (que, como Darwin, consideraba distinta de la sexual) ensombrece «los llamativos azules y verdes metálicos..., los más espléndidos matices iridiscentes»^[40]. El rojo de la sangre y el blanco de los huesos son resultado de la presencia de hierro y de calcio en la composición de estas partes del cuerpo; no son adaptaciones ni producto de selección alguna. Wallace rechazaba la idea de que la elección de pareja tuviese algún papel significativo en la evolución de los colores de las aves.

Biólogos tan eminentes como Julian Huxley (1887-1975) se unieron a Wallace en su objeción a la teoría de que la elección de pareja influye en el

curso de la evolución. Ni Huxley ni Wallace fueron capaces de apreciar que la elección de pareja por parte de las hembras no humanas, ejercida durante largos periodos de tiempo, podía conducir a cambios corporales significativos. El plumaje exquisito de los machos de especies como el faisán argo, del que Darwin escribió que era «más propio de una obra de arte que de la naturaleza», no podía, en su opinión, ser resultado del capricho de los faisanes hembra. Wallace lo expresó así: «No veo en qué forma las variaciones mínimas y constantes, suficientes para que opere la selección natural, podrían seleccionarse sexualmente... ¿Cómo podemos imaginar que una diferencia de una pulgada en la cola del pavo real o 1/4 de pulgada en la del ave del paraíso sería advertida y preferida por la hembra?»^[41]. Los rasgos ostentosos serían una adaptación para el reconocimiento de la pareja, el resultado de una mayor tasa metabólica en el macho o una advertencia a los predadores de que los machos no tenían demasiado buen sabor. El que estos rasgos reflejaran preferencias femeninas por parte de animales «inferiores» parecía imposible.

Volvamos al experimento de Andersson relativo al alargamiento de las colas de los machos de la viuda colilarga. Wallace habría señalado la posibilidad de que la longitud de la cola sea un carácter sólo aparentemente superficial: podría estar correlacionado con, por ejemplo, el éxito de los machos a la hora de defenderse de los parásitos, presumiblemente más visibles sobre colas más largas. En los últimos años este argumento ha sido formulado de manera explícita. De acuerdo con la teoría de Hamilton/Zuk, la ornamentación conspicua atrae a las hembras porque indica una resistencia hereditaria a los parásitos. Igual que Wallace, los biólogos William Hamilton y Marlene Zuk rechazan la idea de que la elección femenina animal es frívola. Lo que parece una frívola exhibición de colores llamativos y largas colas puede que sean símbolos para juzgar la resistencia genética a los parásitos. En un estudio sobre 109 especies de aves canoras, Hamilton y Zuk encontraron que los pájaros con infecciones sanguíneas crónicas tendían a perder los llamativos colores y cantos complejos de sus congéneres sanos^[42].

PENES EFÍMEROS Y AMOR DE ORANGUTÁN | Los taxónomos clasifican

las especies de efémeras por sus extremadamente variados genitales masculinos. Estos genitales casi barrocos incluyen pestañas, barbas y espátulas que extraen el esperma depositado previamente por algún otro macho. [LÁMINA 40] Muchas hembras de insecto tienen abrazaderas que aferran los genitales masculinos. Algunas poseen incluso muescas complementarias que se ajustan perfectamente a los apéndices de los machos. Una teoría sobre la evolución de los elaborados genitales masculinos de las efémeras los atribuye a un «conflicto mecánico de intereses». Los machos han desarrollado aparatos de inseminación más efectivos para vencer la resistencia femenina. Pero, como ha señalado el entomólogo William G. Eberhard, una batalla encarnizada entre los sexos sugeriría «cambios concomitantes en los genitales femeninos y masculinos, y estructuras antiacople en las hembras»^[43].



LÁMINA 40

Genitales de las efímeras. Azul: abrazaderas; rosa: pene.

[Patricia Wynne]

Existen múltiples ejemplos de lo contrario, como el de las hembras de los cicindélidos, que tienen muescas en las que encajan los órganos de sujeción masculinos, y el de las libélulas macho de la especie *Epigomphus quadracies*, que poseen apéndices abdominales que se ajustan en los alvéolos de la cabeza de las hembras. Quizá pueda ser ventajoso para las hembras rechazar todo acercamiento masculino durante la época en que el cuidado de las crías es primordial, pero, por lo general, los intereses genéticos de la hembra estarán mejor servidos si rechaza sólo a los machos menos capacitados. Como metáfora, la «batalla de los sexos» es tan desmesurada como las de la «armonía de la naturaleza» o la «fragilidad del planeta». Como mucho, la pretendida batalla es sólo un aspecto de la cuestión.

La diversidad genital masculina se explica porque es establecida y mantenida por selección femenina (las hembras elegirían a los machos con un aparato inyector de esperma más eficiente). [LÁMINA 41] En la evolución del aparato copulador existe una complicación adicional, y es que los machos, además de ser seleccionados por las hembras, también compiten entre sí por inseminarlas. Un cuerpo más grande, unos espermatozoides más rápidos y un comportamiento sexual más agresivo pueden suponer un beneficio para los machos que posean tales rasgos. Los machos con genitales más efectivos a la hora de sujetar, penetrar o estimular los órganos reproductores femeninos tienen más descendencia, lo que les otorga una ventaja evolutiva persistente.

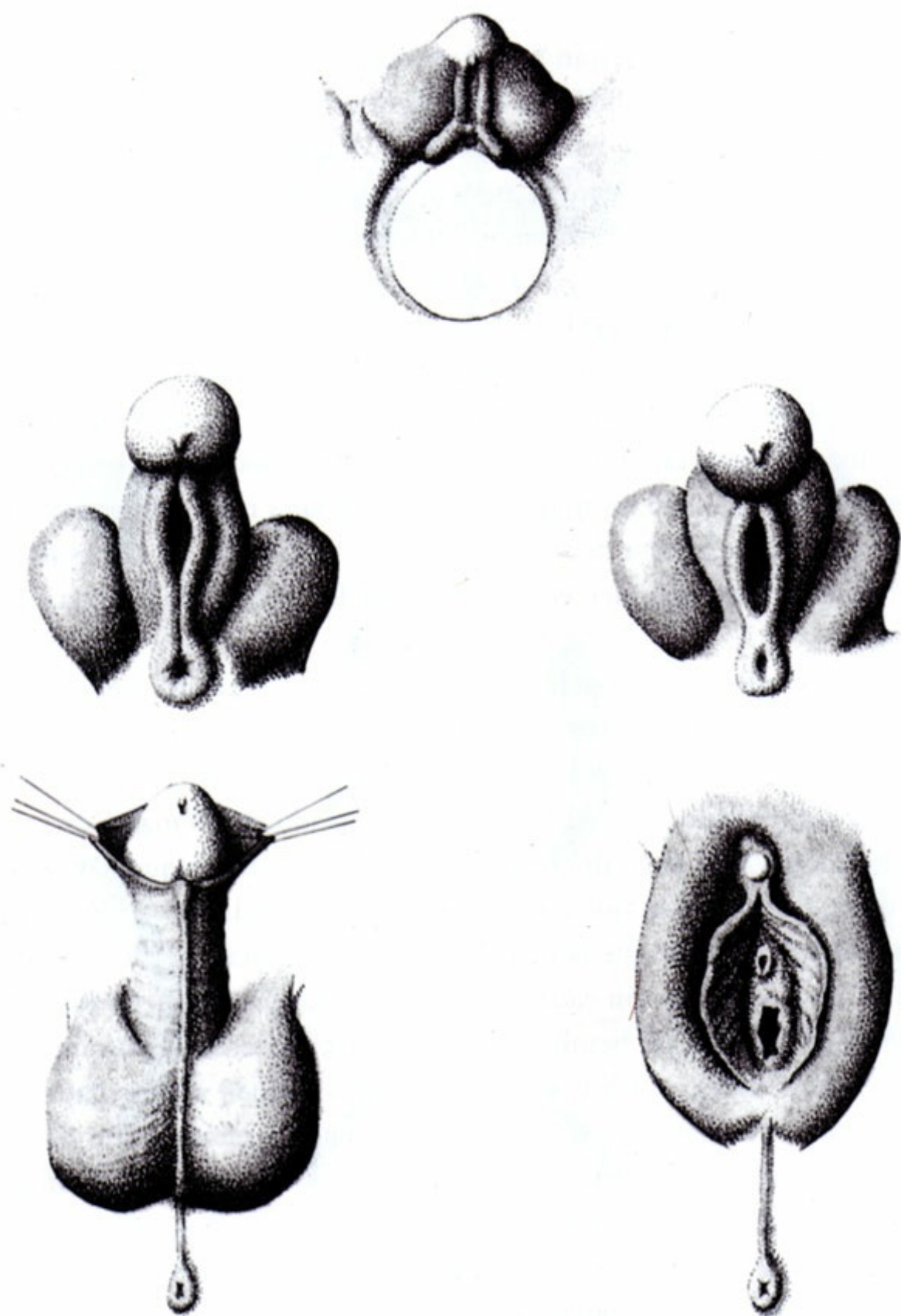


LÁMINA 41

Los varones son indistinguibles de las mujeres al principio del desarrollo: ambos presentan bultos de tejido donde luego aparecerán sus genitales (arriba). La punta se alarga y se convierte en el pene con su prepucio, mientras que los lados se funden a lo largo de la línea media y se ahuecan para convertirse en los testículos masculinos (izquierda), mientras que en la mujer la punta se diferencia para formar el clítoris y los lados se convierten en los labios vaginales (derecha).

[Christie Lyons]

Las hembras que eligen a los machos inseminantes propagan sus propios genes a través de sus hijos. La selección debe ser estricta, porque una mala elección puede repercutir negativamente a largo plazo en la perpetuación de los genes de la propia hembra. Como el espectador que «elige» una carta forzado por el mago, ésta es una elección de Hobson^[44]. A lo largo del tiempo evolutivo, y siempre que haya competencia masculina, los caracteres que conducen a una fecundidad masculina aumentada tienden a desplazar a los que la disminuyen. Las hembras, por lo tanto, desarrollan medios de discriminación cada vez más refinados para detectar los machos más fecundos. Los genes de las hembras capaces de reconocer el aparato inseminador más eficiente mediante indicios visuales o táctiles tienden a propagarse por la población. El incentivo para la evolución de un sentido estético que conectara la sexualidad con el resto del sistema nervioso vino dado por el placer neurológico que inducía a las hembras a aparearse con machos excitantes y fecundos. La capacidad orgásmica femenina refleja conexiones neurológicas inconscientes que permiten evaluar el aparato inseminador masculino.

La extrema diversidad de los penes de los efemerópteros procede de la especiación. Cualquier efémera individual que sea incapaz de identificar una pareja potencial de su propia especie no dejará descendencia. Los machos compiten por fecundar a las hembras, que a su vez compiten por reconocer y acoplarse con los machos más fecundos. Los genitales masculinos, como otros caracteres masculinos, son seleccionados, consciente o inconscientemente, por las hembras productoras de huevos. «Una hembra», escribe Eberhard, «podía seleccionar los genitales masculinos sobre la base de su ajuste mecánico interno o a través de otras sensaciones en su región genital. Una vez establecida dicha

discriminación, la selección favorecería a los machos que se ajustasen mejor a los criterios femeninos (un agarre más fuerte, un contacto sobre un área más amplia, un roce más frecuente, etc.) aunque sus genitales no fuesen mejores que los de otros a la hora de inyectar esperma. La capacidad de “convencer” a la hembra refuerza la adaptación masculina»^[45].

Parte de la confusión que rodea la selección sexual en la literatura evolutiva tiene que ver con la ausencia de una teoría filosófica coherente acerca de lo que constituye un signo. En un universo repleto de comunicación comportamental compleja, el lenguaje surge de forma natural. Parece improbable que pueda extraerse un propósito único o significado definido de entre la confusión de mensajes mezclados en un mundo lleno de señalizadores. Los sombreros, por ejemplo, son obviamente funcionales (protegen la cabeza del sol y la lluvia), pero también pueden tener un significado sexual. Aunque no evolucionamos con sombreros en nuestras cabezas, estas extensiones corporales, lo mismo que los picos con excrecencias de los pelícanos, afectan los pormenores de la atracción sexual y la elección de pareja.

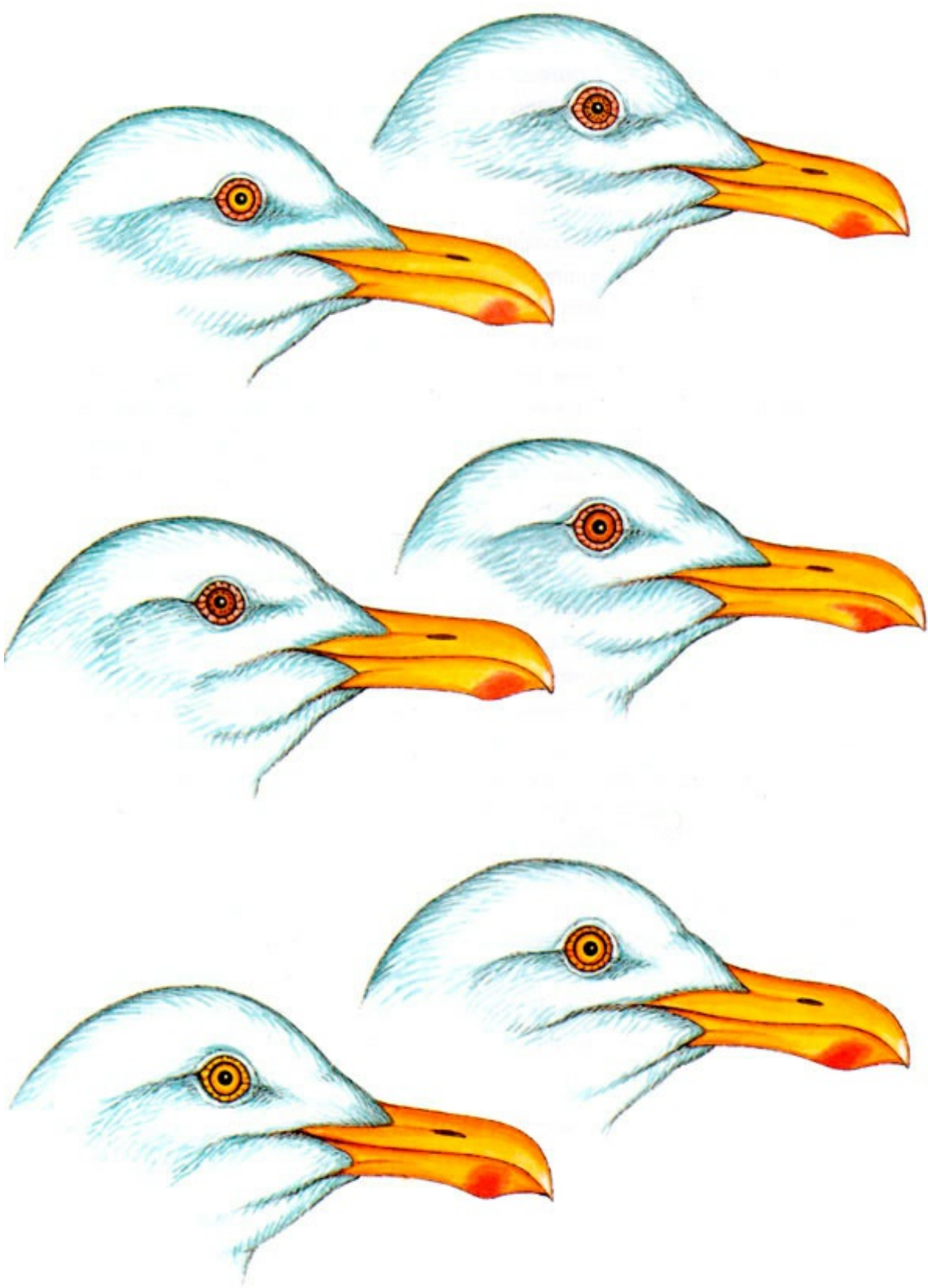
El novelista Milan Kundera dice que el sombrero es un objeto mágico: los sombreros, que constituyen una extensión de la cabeza y enmarcan la cara, crean un aura estética que no puede reducirse a mera funcionalidad. Algunas extensiones corporales tienen significado sexual porque resultan atractivas. La hembra del pelícano seguramente comparte esta opinión con respecto a sus parejas potenciales medio ciegas. Un extraterrestre «Wallaciano», contemplando los sombreros como extensiones tecnológicas del cuerpo humano, podría explicarlos como termorreguladores craneales, deseables porque incrementan la resistencia de sus portadores. Los sombreros, o al menos algunos de ellos, atraen a las parejas potenciales porque a sus ojos «lucen bien». Otros tocados pueden repeler al significar, por ejemplo, la aproximación de una tribu violenta enemiga. Los sombreros no tienen un significado absoluto, pero tienen significado. Las diferencias significativas en los cuerpos y las extensiones corporales surgen de historias de reproducción selectiva a lo largo de vastos periodos de tiempo, y conducen a poblaciones segregadas. Al final, los portadores de rasgos especializados, sexuales o no en su origen, dejan

de reproducirse con aquéllos que no los portan.

La tecnología, la cultura, la civilización y el arte, lejos de distanciarnos de nuestra condición de animales, acentúan y ensanchan nuestra naturaleza animal. Nuestros ancestros mamíferos eran vertebrados de cuatro patas cuyos principales medios de ataque y defensa eran sus mandíbulas. La belleza que encontramos en los pómulos altos quizá refleje una antigua veneración vertebrada del poder maxilar. Como mamíferos jerárquicos que somos, impresionables por las tallas grandes, la gente vitorea las voces reverberantes de líderes que hablan desde plataformas elevadas. Los adolescentes prefieren prendas pasadas de talla que les hagan parecer mayores o prendas ajustadas que resalten la figura del portador y lo muestren más anguloso y proporcionalmente mejor dotado. A pesar de nuestra pretendida superioridad sobre los ancestros animales «primitivos» de la humanidad, seguimos siendo primates sin cola, celosos y amantes de la exhibición sexual. Inevitablemente respondemos con súbito interés a la exposición del pubis, el pene, las nalgas o los pezones. Atendemos de manera predecible a una variedad cambiante de señales sexuales. Espinilleras, braguetas, minifaldas, gafas de sol de última moda, hombreras, pelucas, lápices de labios, collares y anillos exhiben distintos grados de funcionalidad, pero todos comunican sexualidad. La moda acentúa la antigua conexión entre variación fisiológica y éxito sexual. Nuestras reacciones ante las diferencias percibidas entre miembros de nuestra especie candidatos a pareja están lejos de ser arbitrarias: son respuestas profundas a millones de años de evolución.

INFERENCIA INCONSCIENTE Y CONFIANZA | Las tendencias conductuales heredadas predisponen a los animales al engaño. Consideremos las gaviotas, unas aves más bien simplonas; si vislumbran una especie distinta en un momento crucial de su desarrollo, más adelante se sentirán atraídas por los miembros de la especie «equivocada», y durante el resto de su vida intentarán aparearse infructuosamente con parejas inadecuadas. Para un observador humano, la gaviota argéntea, la esquimal y la de Bering (que anidan todas juntas en zonas de Canadá e Islandia) parecen idénticas. Sin embargo nunca se entrecruzan porque, de

polluelos, guardan en su memoria la impronta del color del iris y el anillo ocular de los miembros de su especie, cuyos «maquillajes» naturales van del amarillo pálido al naranja o violeta pálido. **[LÁMINA 42]** Cuando se pintan los ojos de las aves o se trasplantan polluelos anillados a nidos de otra especie con distinto color de ojos, se observa que, de adultos, estos individuos intentan aparearse con gaviotas que los rechazan a causa de su color de ojos «equivocado».^[46]



Iris y anillos oculares que dejan impronta en las gaviotas.

[Patricia Wynne]

Las gallinas domésticas atienden al piar constante de sus polluelos aunque se les impida el contacto físico con ellos. Estos mismos polluelos, cubiertos por una campana de vidrio insonorizante, son ignorados por su madre, lo que indica que ésta responde sólo al sonido y no a la visión de sus crías. Experimentos recientes con moscas del vinagre han permitido aislar los genes que controlan el cortejo al determinar el desarrollo de las áreas cerebrales responsables de las conductas de apareamiento. Los seres humanos no somos una excepción. Antes bien, nuestra percepción compleja, unida al requerimiento absoluto del apetito heterosexual como billete de entrada a la siguiente generación, nos permite engañar de forma exquisita tanto a los otros como a nosotros mismos.

Las imágenes y los sonidos que percibimos no representan la simple recepción pasiva de fenómenos externos a través de las ventanas transparentes de los sentidos, sino que son contruidos de manera activa, intuitiva y a menudo incorrecta. Aun así, no podemos hacernos una imagen del mundo sin que afluayan datos a nuestros sentidos. Los animales, como los microbios antes que ellos, han desarrollado dispositivos económicos para percibir el mundo circundante, en especial las parcelas relevantes para la perpetuación en el juego evolutivo de la vida. Un investigador pionero de la forma en que vemos el mundo, Hermann von Helmholtz (1821-1894), caracterizó la percepción humana como «inferencia inconsciente».

Limitados por nuestros cuerpos de gran cerebro, inmersos en un universo mayor, somos proclives a las conclusiones impulsivas antes de disponer de una evidencia completa. De hecho, puesto que posiblemente nunca podemos obtener toda la evidencia pertinente antes de tomar decisiones, nosotros, como las demás formas de vida, siempre actuamos sobre la base de una información limitada. A pesar de ello, en ciertas condiciones (aire libre, luz natural, capacidad de deambular y de manipular objetos para contemplarlos con dos ojos en tres dimensiones) nuestros modelos mentales del mundo parecen notablemente fiables. La percepción,

desde la sensación química de los microbios hasta el sonar de los delfines, es crucial para la supervivencia y la continuidad genética. Las imágenes internas que nosotros y nuestros colegas animales generamos deben tener alguna correspondencia con una realidad palpable si pretendemos dejar descendientes que sobrevivan. Sin embargo, ninguna reconstrucción interna de la realidad puede ser exacta^[47].

Las inferencias inconscientes pueden ser sutiles y persistentes. Pensemos en una naranja. Aunque más amarilla bajo la luz directa del mediodía, más azul bajo la luz indirecta de la tarde y tachonada de sombras mientras enrojece en el ocaso, continuamos percibiéndola con el mismo color anaranjado. Los conos que tapizan nuestras retinas, combinados con el procesamiento neuronal pertinente, compensan automáticamente los cambios de color. De esta forma construimos una misma visión consistente de una misma pieza de apetitosa fruta. Sin embargo, si la naranja se contempla bajo la luz de una lámpara de sodio o de otra clase, con una longitud de onda distinta de aquélla a la cual estamos evolutivamente habituados, la misma naranja puede parecer muy diferente, hasta repulsiva.

El psicólogo Roger Shephard, de la Universidad de Stanford, explica la inferencia inconsciente de la siguiente manera:

A través de los millones de generaciones de su evolución en el mundo tridimensional, el sistema visual se ha hecho altamente eficiente en proveernos de una representación interna precisa y fiable de lo que pasa en ese mundo. Lo que nuestra experiencia nos da es, en cierto sentido, la «ilusión» de un acceso directo, sin mediación, al mundo externo. Nuestra percepción de un entorno tridimensional estable, continuo y perdurable no retiene traza alguna de la maquinaria neuronal prodigiosamente compleja que tan prestamente construye esa experiencia. Ni tampoco somos conscientes de las pautas de excitación retiniana cambiantes, intermitentes, puntillistas, invertidas, curvadas y bidimensionales a partir de las cuales la maquinaria del cerebro construye nuestro mundo visual^[48].

Si hay aspectos del entorno que son invariables o cambian de manera predecible (como la relación entre los objetos y sus sombras) los animales buscan atajos perceptivos. Haciendo inferencias inconscientes, sobreviven, se aparean y dejan más descendientes.

LA CAJA PARADÓJICA | La forma exacta en que se lleva a cabo este proceso de inferencia inconsciente es tema de discusión, pero no cabe duda de que somos fácilmente engañables. Consideremos la antigua «ilusión lunar». Cerca del horizonte, especialmente en otoño, la Luna parece más grande y cercana que la misma Luna contemplada en lo alto unas horas más tarde. Se ha editado todo un libro de cientos y cientos de páginas para recoger las múltiples explicaciones de este fenómeno supuestamente simple. «Qué poco sabemos, qué poco sabemos», escribió el premio Nobel Max Delbruck^[49].

La Parabox es una ilusión óptica tridimensional ideada por Jerry Andrus, un habilidoso artista de Albany, Oregon. Puede construirse fotocopiando, recortando y pegando la plantilla de la [LÁMINA 43]. Dado que uno de nuestros «atajos» perceptivos es la construcción mental de volúmenes a partir de superficies, cuando se contempla la Parabox invertida con un solo ojo, a una distancia algo menor que la longitud de un brazo, parecerá proyectarse y cobrar volumen de manera inquietante. Inferimos una esfera a partir de un círculo, un cubo a partir de un cuadrado y paralelogramos. La mayoría de objetos, a diferencia de la Parabox, no aparecen «vuelto del revés». Percibimos objetos sólidos tridimensionales a partir de superficies planas bidimensionales.

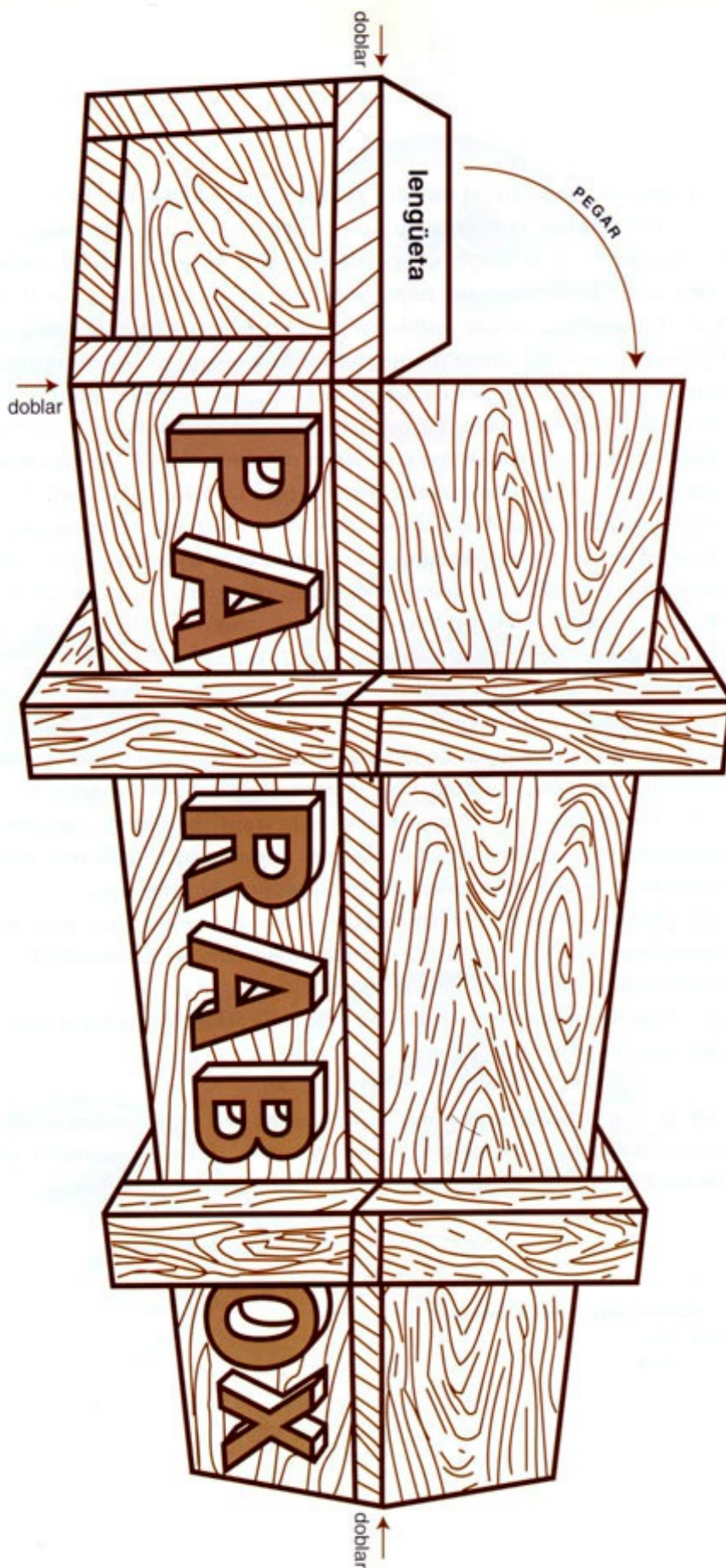


LÁMINA 43

Parabox: ilusión óptica tridimensional. Para crearla hay que fotocopiar esta imagen, recortarla y doblar y pegar por donde se indica.

[Jerry Andrus]

Los animales han aprendido a explotar esta tendencia a hacerse más imponentes presentando superficies persuasivas tales como velas triangulares, alas y abanicos guieres, como hacían muchos de los reptiles gigantes tan fabulosamente exitosos en el pasado. Como el encargado de los decorados de una película, que ahorra dinero construyendo fachadas en vez de edificios enteros, muchas especies animales han desarrollado superficies amplias desplegables. Los lagartos machos se exhiben de lado ante sus rivales para ofrecer una mayor superficie. Los cambios en el aspecto externo y el comportamiento siempre evolucionan más rápidamente que los cambios extensivos a todo el cuerpo. Si se abren ambos ojos se destruye la tridimensionalidad de la Parabox, pero para entonces ya hemos aprendido la lección de que la percepción no es percibida sino construida: lejos de ser pasiva, implica una actividad mental continuada. Construimos activamente nuestro mundo, en especial nuestras percepciones de los otros y de sus motivaciones, a partir de datos incompletos. Existe, por lo tanto, un vasto potencial para la malinterpretación, la manipulación y el engaño.

Cuando contemplamos la Parabox con ambos ojos la ilusión se desvanece, revelando el carácter sugestionador de nuestras construcciones mentales. La precisión matemática determinista, aunque satisfactoria desde el punto de vista teórico, nunca describe perfectamente la confusa realidad de la vida. La importancia creciente de la teoría de la probabilidad (en ciencias que van desde la biología de poblaciones a la termodinámica y la teoría cuántica) resalta la imprecisión, el riesgo y la verosimilitud. El cálculo de lo probable en relación a lo exacto nos obliga a reconocer a regañadientes que nuestra esperanza de una descripción final matemáticamente correcta del universo es vana. Ni nuestros sentidos ni nuestras matemáticas son perfectas, ni siquiera en principio.

LAS DROGAS DEL AMOR | La naturaleza nos apremia a reproducirnos sin poner demasiado cuidado en evitar que nos matemos durante el proceso, siempre y cuando produzcamos más efectivos de nuestra especie. Las drogas, compuestos químicos con efectos altamente específicos y predecibles, han influenciado profundamente la sexualidad desde los tiempos arcaicos en que las bacterias dominaban la Tierra. Por ejemplo, cuando se añade tetraciclina —un antibiótico— a un caldo de cultivo con bacterias, la actividad sexual bacteriana, medida por la transferencia de genes, se incrementa hasta mil veces. Diversos compuestos químicos simples inducen cambios psicológicos profundos, incluidos los de índole sexual. Las drogas de procedencia interna y externa que alteran el estado de ánimo abundan.

Algunas drogas naturales son tan poderosas que probablemente se prohibiría su venta con ánimo de lucro si no las hubiésemos heredado como parte de nuestra percepción natural y de la bioquímica que modula nuestras emociones. Una de estas drogas es la oxitocina, un compuesto que estimula la contracción de la musculatura lisa e induce la secreción de leche en las madres recientes. Si se administra un compuesto bloqueante de la oxitocina a ratas hembras posparturientas, éstas pierden todo interés en sus crías. Los niveles sanguíneos de oxitocina en los topillos de montaña, roedores excavadores que se caracterizan por abandonar a sus crías poco después de nacidas, son inferiores a los encontrados en los topillos de pradera, cuyas madres son más solícitas. La oxitocina en la sangre maternal aumenta tras el amamantamiento. En los hombres, los niveles de oxitocina en sangre se multiplican por cinco durante el orgasmo, y aún más en las mujeres. Durante el amamantamiento descienden los niveles de cortisol y la presión arterial, y los vasos sanguíneos del pecho se dilatan ofreciendo calor al bebé. Los niveles de glucosa en sangre de la madre lactante disminuyen^[50]. En los guerreros masculinos, en cambio, se elevan los niveles de cortisol y epinefrina (adrenalina), hormonas que incrementan la concentración de glucosa y la presión sanguíneas. En contraste con el guerrero amenazante henchido de testosterona (o su equivalente moderno, el atleta repleto de esteroides), la madre lactante

experimenta una sensación de calma, producto de un incremento de la síntesis de oxitocina por el hipotálamo.

Está claro que esta «droga afectiva» ha tenido un papel en la evolución sexual de los seres humanos. Puede que el ascenso de los niveles de oxitocina en nuestros ancestros masculinos y femeninos los hiciera más proclives a disfrutar de la compañía mutua tras una relación sexual. A medida que nuestros ancestros reforzaban su unidad familiar se fueron haciendo más inteligentes, amorosos y sociables. El trabajo en equipo mejoró la defensa frente a los predadores y la consecución de alimento. Una consecuencia añadida de esto es que ciertas tribus humanas primitivas, cohesionadas en parte por la oxitocina, habrían desplazado a otras menos estrechamente unidas.

Se puede contrastar la oxitocina con la feniletilamina, la pretendida «droga del enamoramiento»^[51]. Cuando se inyecta feniletilamina a ratones, macacos y otros mamíferos, se observa que gimen de placer, muestran conductas de cortejo y, de manera adictiva, presionan palancas para obtener más droga. Esta molécula análoga a las anfetaminas (un «acelerador» natural para amantes) se parece a los alucinógenos de origen vegetal. [LÁMINA 44] Cuando la pasión amorosa se apodera de nosotros los niveles de feniletilamina se elevan, lo que acelera el flujo de información entre las células nerviosas. Un déficit de esta especie de elevador natural del ánimo podría explicar el fenómeno de los «drogadictos de la atracción», en palabras de Michael Liebowitz y Donald Klein, del Instituto Psiquiátrico de Nueva York. Se trata de adultos promiscuos que buscan nuevas parejas sexuales sólo para experimentar el arrebató de pasión inicial antes de «el final de la luna de miel». La mayoría de parejas no rompe aunque la fogosidad de su relación decaiga tras la fase de idilio mediada por la feniletilamina. De hecho, el descenso de los niveles de feniletilamina en los adictos al enamoramiento parece ser causa de depresiones agudas. Liebowitz y Klein comprobaron que los sujetos tratados con antidepresivos respondían mucho más rápidamente a la terapia que los no medicados.

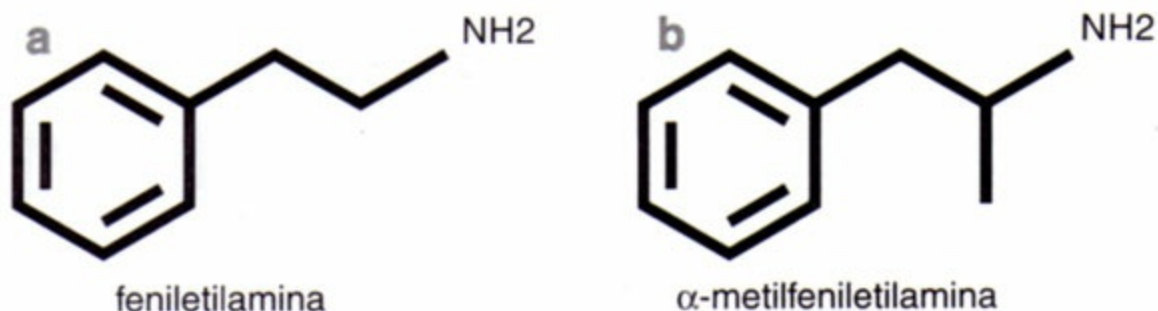


LÁMINA 44

Estructuras químicas similares de la feniletilamina (a), una «droga del amor» natural, y una anfetamina (b).

Por lo que sabemos, la feniletilamina no sólo mediatiza la pasión amorosa, sino también la sensación de peligro, porque sus niveles aumentan durante el suspense. Un desequilibrio o carencia de feniletilamina parece inducir en ciertas personas la búsqueda de situaciones peligrosas. La euforia del ganador de un juego de azar puede que también se deba a la feniletilamina. Los sentimientos de bienestar, placer y sensibilidad sensorial aumentada asociados al enamoramiento pueden intensificarse mediante la exposición a situaciones de riesgo y susto. La feniletilamina confiere una suerte de estado de alerta y confianza ante situaciones nuevas y peligrosas. Se ha podido comprobar, por ejemplo, que si un hombre conoce a una mujer sobre un precario puente colgante es más probable que le pida una cita que si el encuentro se hubiera producido en la relativa seguridad de un campus universitario o una oficina. El peligro, como la atracción sexual, inunda el cerebro de feniletilamina. Por último, la feniletilamina también aumenta tras la ingestión de chocolate (lo que podría explicar su reputación como presente romántico)^[52].

ROMANCE | En español, el término «romance» puede aplicarse a una relación amorosa pasajera o bien a algo que se dice sin fundamento. Para mantenerse y reproducirse, los seres vivos necesitan percibir; los animales

con reproducción sexual, además, necesitan percibir para interactuar mutuamente. Dada la universalidad de dicha percepción, no debería sorprendernos que la mentira y el amor a menudo se superpongan. Los organismos se necesitan mutuamente para perpetuar sus genes, y por eso mismo han evolucionado para hacer resonar los sistemas de reconocimiento sensorial de sus congéneres.

Los signos de fertilidad (piel juvenil, encanto, posición social) difunden la aptitud de una posible pareja para contribuir genéticamente a la próxima generación. Más que la sola fertilidad, estos signos comunican de manera inconsciente el potencial reproductivo, ajustándose, quizás, a un ideal de descendencia futura. En un famoso conjunto de experimentos, los sujetos juzgaban más atractivas las imágenes compuestas antes que las correspondientes a personas reales. Es como si, en una versión evolutiva de la noción platónica de un dominio ideal de formas perfectas, naciésemos con un ideal de belleza propio. Teniendo en cuenta esta dependencia de los signos externos, sorprende poco que hombres y mujeres, con intereses genéticos diferentes pero interdependientes, hayan desarrollado tácticas embaucadoras. Después de todo, está en juego no ya la vida presente, sino la de las generaciones futuras.

Lo que llamamos amor depende profundamente de la astucia natural de la bioquímica viva. Por ejemplo, los olores que encontramos sexualmente atractivos en el sexo opuesto se correlacionan con la salud potencial del sistema inmunitario en nuestra descendencia. Para discernir las relaciones entre atractivo sexual y feromonas se diseñó un experimento en el que un grupo de mujeres tenía que oler camisetas pertenecientes a hombres que las habían llevado puestas durante varios días. Lo que se encontró es que las mujeres preferían olores que se correlacionaban con antígenos de histocompatibilidad que ellas no tenían. En otras palabras, deseamos a aquéllos que tienen sistemas inmunitarios complementarios. Se ha especulado también que el hechizo romántico (la «luz» o «aura» especial del ser amado a ojos del amador) podría ser un fenómeno de impronta mediado por feromonas, algo corriente en los mamíferos. El olfato, conectado a la memoria y desligado de los centros cerebrales procesadores del lenguaje, habría sido el sentido más importante para nuestros ancestros prehumanos. La actividad sexual, que implica la proximidad de la pareja y

la exposición a sus olores individuales, despierta intensas y antiguas respuestas mamíferas. Desde principios del Cenozoico, cuando nuestros ancestros mamíferos eran nocturnos, las hembras han distinguido a los machos con los que se dignaban copular a base de apreciación nasal y memoria. Con independencia de cualquier otra consideración, el deseo y el amor son fenómenos biológicos mediados químicamente y muy antiguos.

Entre los organismos sexuales impera el fraude, pero incluso organismos de otras especies pueden valerse de la seducción erótica para dar gato por liebre. Las flores masculinas del género *Silene*, una planta que crece al borde de los caminos, son infectadas por *Ustilago*, un hongo relacionado con el tizón del maíz que «seduce» a las flores que infecta para que produzcan semillas. Estas «semillas», sin embargo, aunque similares en apariencia a las genuinas de la planta, en realidad contienen propágulos del hongo. También las orquídeas producen feromonas sexuales y adoptan formas florales que las miopes avispas macho, y hasta algún que otro botánico despistado, confunden con hembras de avispa. Un gran porcentaje de plantas con flores (angiospermas) llamativamente coloreadas se vale de los gustos sexuales de los animales para reproducirse. No se trata sólo de sensualidad entre reinos, sino de un atraco sexual: una especie descubre que vale la pena anunciarse y establece una trayectoria termodinámica nueva y más efectiva.

Como acabamos de ver, la seducción —el engaño sexual— atraviesa incluso la barrera de las especies. El fraude y su detección, la promiscuidad y la fidelidad, las diferencias de género y la androginia, evolucionarán y persistirán siempre y cuando perpetúen la vida. El biólogo Robert Trivers ha informado de las aptitudes matemáticas de algunas aves que por lo visto son capaces de contar (o al menos de detectar) la presencia de huevos supernumerarios en sus nidos, facultad que han desarrollado para proteger y criar a sus propios polluelos^[53]. La capacidad de engañar o de detectar el engaño, venga de donde venga, favorece la selección de la inteligencia, el discernimiento y el juicio crítico. Siempre que estas aptitudes se traduzcan en más descendientes fértiles, la percepción sexual y las capacidades asociadas a ella continuarán medrando. En evolución todo es lícito.

EL PLANETA DE LOS SIMIOS | Somos, de lejos, los primates más multitudinarios de la Tierra. Lo cual no quita que sigamos siendo primates, mamíferos, animales formadores de blástulas, sujetos a leyes físicas y condicionados por nuestra historia evolutiva. **[LÁMINA 45]** Todas nuestras aptitudes lingüísticas, culturales y tecnológicas se enraizan en el mundo animal; y los animales, como hemos visto, son seres intrínsecamente sexuales, los descendientes formadores de embriones, permutaciones meiótico-fecundantes, de supervivientes caníbales arcaicos. Es inútil pretender que estamos separados del resto de las formas de vida cuando el microscopio proclama nuestra semejanza incluso con seres acuáticos como las amebas (véase el capítulo 4). De hecho, nuestra marcada tendencia a distinguirnos del resto de organismos probablemente refleja el requerimiento de los animales con reproducción sexual de discriminar a sus congéneres entre otros organismos similares. Nosotros, igual que los bonobos (chimpancés pigmeos), debemos reconocer una pareja potencial entre formas vivas apenas diferentes. Como seres que se perpetúan sexualmente, los mamíferos deben reconocer y mostrarse a los otros miembros de su propia especie. Puesto que los seres humanos encuentran la autoconfianza sexualmente atractiva, y la autodistinción y la exhibición son requisitos para la perpetuación, el discernimiento necesario para reconocer la especie propia y el género opuesto probablemente contribuye a nuestra visión de nosotros mismos como pertenecientes a una estirpe única y superior.



LÁMINA 45

Callosidades isquiales (nalgas rojas) de una hembra joven de mandril sexualmente disponible.

[Bruce Coleman]

Los hábitos sociales y sexuales de los monos antropomorfos modernos ofrecen claves sobre nuestra herencia sexual. La sexualidad antropomorfa puede dividirse en dos grandes grupos, cada uno correspondiente a una «moralidad» prehumana dada o esfera de propiedad sociosexual basada en la especie: chimpancés y humanos por un lado, gorilas y orangutanes por otro. Estos dos campos difieren grandemente, lo que se refleja en el tamaño relativo de órganos genitales y cuerpos. Como ocurre en nuestra especie, los cuerpos de los chimpancés de ambos géneros son casi de la misma talla. Como los machos humanos, los chimpancés tienen unos genitales relativamente grandes. De hecho, sus testículos son mayores y producen más espermatozoides por eyaculación que los nuestros. Una interpretación del significado de los genitales masculinos grandes es que los seres humanos fueron más promiscuos en el pasado, de manera que nuestros ancestros se habrían beneficiado de un aparato de inyección de espermatozoides superior. En comparación con los estándares humanos actuales, sin embargo, los chimpancés son mucho más promiscuos. Las hembras que están en periodo ovulatorio, reconocibles por la piel hinchada y roja alrededor de la vagina, copulan abierta y frecuentemente con muchos miembros de su grupo. Todos los machos saben cuándo una hembra está receptiva en razón del cambio fisiológico conocido como estro: su trasero se hincha y enrojece.

Las hembras de gorilas y orangutanes, por el contrario, no son promiscuas. No se dedican a exponer su tracto reproductor a la atención de numerosos pretendientes durante la ovulación. En la competencia masculina entre los gorilas interviene la agresión física. El almacenamiento de espermatozoides en unos testículos colgantes y su inyección mediante una vigorosa eyaculación peniana, que son de importancia suprema para las personas y los chimpancés, no son tan significativos en las vidas de gorilas y orangutanes. El que hombres y chimpancés tengan penes más largos, testículos mayores y produzcan más espermatozoides que gorilas

y orangutanes probablemente se relaciona de forma directa con el hecho de que sus encuentros sexuales son más numerosos.

Los gorilas emplean la estrategia reproductiva del «harén». Un macho, por lo general de más edad y con algo de pelo gris —el «espalda plateada»—, domina a los otros machos. Este macho «alfa» tiene el monopolio de las hembras. Para reafirmar su dominancia sobre las hembras y los machos adolescentes exhibe su gran envergadura, y no duda en emplear la violencia para impedir que las hembras fértiles se apareen con otros. Su diminuto pene, cuya longitud en erección apenas sobrepasa los tres centímetros, emite relativamente poco esperma. Por el contrario, en los primates donde la diferencia de tamaño entre machos y hembras no es tan grande —lo que denota una menor agresión masculina y, por ende, menos posesividad sexual— es más fácil que la competencia se manifieste no en forma de cuerpos magullados, sino de genitales agrandados y espermatozoides de nado vigoroso. Dado que los chimpancés machos comparten las hembras en celo en vez de pelearse por ellas, aquéllos que liberen mayor cantidad de espermatozoides lo más cerca posible del óvulo se verán favorecidos. Los cuerpos grandes son una ventaja para los luchadores; los genitales grandes lo son para los amantes^[54].

Los antropomorfos, nosotros incluidos, establecen sociedades complejas de parejas y otras relaciones genéricas con una rica interacción mutua. Aunque la evolución del grupo a partir de un ancestro común contempló muchos cambios en la conducta sexual, nuestras similitudes con estos parientes próximos son mucho mayores de lo que estamos dispuestos a admitir.

En el laboratorio, los antropomorfos han demostrado ser capaces de aprender lenguajes de signos y de reconocer su imagen en un espejo, algo que no consiguen los otros monos. «Cuando estos antropoideos», y aquí el etólogo Frans B.M. de Waal se refiere concretamente al bonobo (*Pan paniscus*) o chimpancé pigmeo, más negro, de frente más alta, orejas más pequeñas y nariz más ancha que su primo más conocido, «se levantan o caminan erguidos, parece que hubieran salido de una impresión artística de los primeros homínidos»^[55]. [LÁMINA 46] Nos distinguimos por rasgos que incluyen nuestra postura erguida, una piel casi desnuda, un gran cerebro, una disponibilidad sexual persistente ligada a un estro continuado,

unos genitales masculinos relativamente grandes y un uso complejo de la laringe, el paladar, la garganta, los labios y la lengua en el habla. La comparación con nuestros parientes más cercanos nos permite hacernos una idea de nuestro pasado evolutivo.

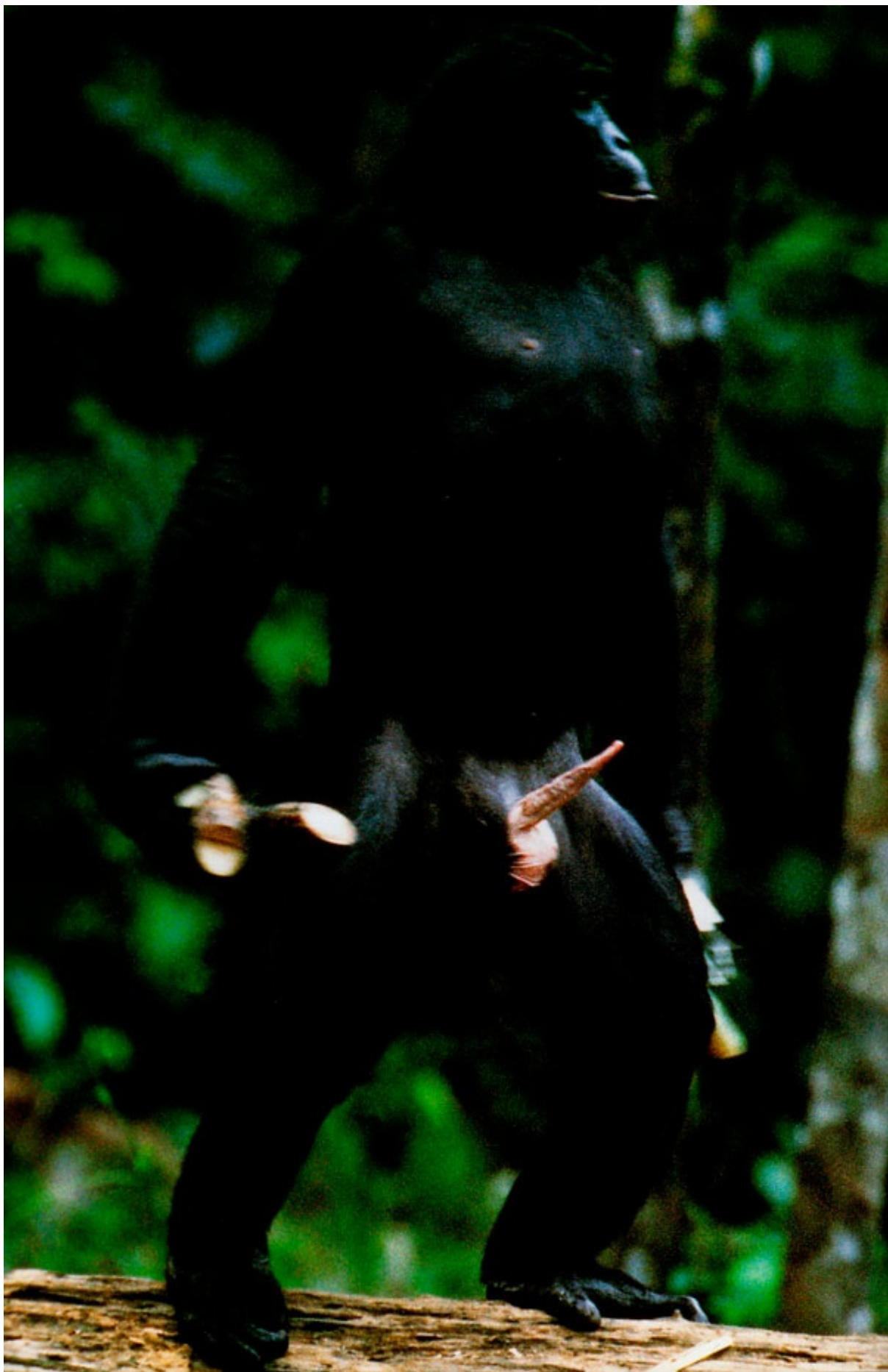


LÁMINA 46

Bonobo con el pene erecto (véase lámina 53).

[Frans Lanting/Minden Pictures]

Los orangutanes son habitantes solitarios de las selvas de Borneo. Desgraciadamente, hoy es más fácil encontrarlos en los zoológicos que en libertad. Estos antropomorfos de rostro expresivo tienen una talla de alrededor de dos tercios de la del gorila. El macho viene a ser el doble de grande que la hembra. Las parejas apenas entran en contacto si no es para aparearse. En cambio, el gorila (*Gorilla gorilla*), cuyo hábitat es el África ecuatorial, mucho mayor y de postura menos erguida, vive en pequeños grupos formados por un macho y varias hembras. Aunque los gorilas son más sociables que los orangutanes, las hembras sexualmente disponibles suelen ser acaparadas por un solo individuo: el enorme macho dominante, o macho alfa, de espalda plateada, pronto a castigar a los adolescentes intrusos o a cualquier hembra que se anime a copular con algún otro. Por último, los más sociables entre los grandes monos son los chimpancés. Estos antropomorfos (una de cuyas dos formas principales, el bonobo, exhibe la conducta sexual más franca de todas) son los más humanos en ciertos aspectos. Los bonobos practican el sexo a todas horas y en contextos que para otros monos serían poco estimulantes o socialmente inapropiados. Cosas tan aparentemente irrelevantes como la recepción de una naranja o la presencia de una intrigante caja de cartón grande pueden incitarlos a aparearse. Comparando la conducta sexual de los bonobos y los chimpancés «normales» (*Pan troglodytes*) con la de los seres humanos modernos (*Homo sapiens*) podemos deducir nuestra verosímil historia sexual.

DE LUCHADORES DOMINANTES A AMANTES ANIÑADOS | El dimorfismo sexual, es decir, la existencia de rasgos que marcan la diferencia entre machos y hembras, es corriente en plantas y animales. Incluso en los esquistosomas, gusanos trematodos parásitos del hígado que pasan la mayor parte de su vida en posición de cópula mientras liberan huevos fecundados en el cuerpo de sus víctimas (nosotros), el «macho funcional»

(el gusano grueso en la [LÁMINA 47]) difiere de la «hembra funcional» (el gusano delgado en la misma lámina). Este dimorfismo sexual «funcional» parece extraño porque ambos gusanos, tanto el grueso productor de esperma como el delgado productor de huevos, poseen ovarios y testículos. Aunque los dos son hermafroditas, cada miembro de la pareja usa sólo el tipo de órgano sexual complementario, comportándose como un macho funcional o una hembra funcional según el caso y adoptando en consecuencia un aspecto diferente.

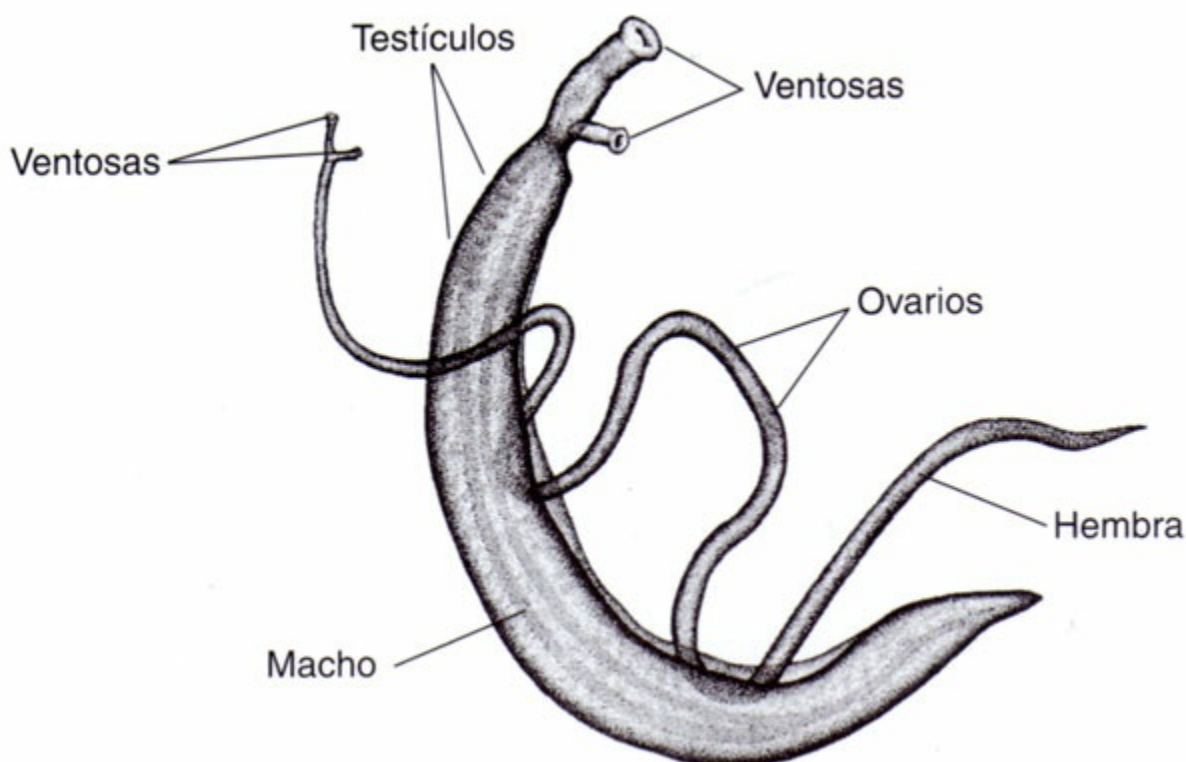


LÁMINA 47

Esquistosomas (tipo platelmintos). Estos trematodos hermafroditas, que hacen estragos entre los habitantes de las zonas tropicales, están permanentemente unidos en posición de cópula. Infestan el hígado y producen cientos de huevos que liberan en la sangre y otros tejidos de sus víctimas.

[Christie Lyons]

En nuestra especie, los rasgos sexualmente dimórficos incluyen diferencias de estatura, peso y distribución del vello. [LÁMINAS 48, 49, 50, 51 y 52] Entre nuestros ancestros hubo sin duda equivalentes humanos de

los gorilas machos dominantes de espalda plateada. Aún hoy, los varones adultos muestran rasgos dimórficos relacionables con la dominancia: mayor tamaño corporal que las mujeres, músculos más fuertes (útiles en las disputas por celos), calvicie, vello recio, piel y/o pelo oscuros, voz grave, ademanes bruscos, barba, bigote y vetas de pelo gris. Aunque nuestros genitales implican un pasado promiscuo al estilo chimpancé, homínidos prehumanos como *Australopithecus robustus* quizás hayan sido cazados hasta la extinción por seres humanos primitivos, menos dimórficos pero más agresivos y astutos, como los de la especie *Homo erectus*, que prosperó hace entre 1,3 y 0,5 millones de años.

Ahora bien, puesto que no somos mantenedores de harenes típicos, tales rasgos indicadores de dominancia, históricamente asociados con los homínidos física y socialmente más poderosos, nos remiten mensajes mixtos de atracción (poder) y repulsión (tiranía). La transición de monos a humanos está lejos de ser completa. Nuestra pilosidad, por ejemplo, retiene su antigua condición de jeroglífico simiesco. El pelo graso y recio, el color oscuro, el vello corporal, la estatura grande, el pelo gris y la calvicie masculina son todos indicadores simiescos de masculinidad, agresión y dominancia. Por el contrario, la piel suave y lisa y el pelo claro y sedoso son indicadores de juventud y feminidad: poco amenazadores y encantadores, los organismos que nos resultan «monos» tienden a suscitar la atracción y el mimo.





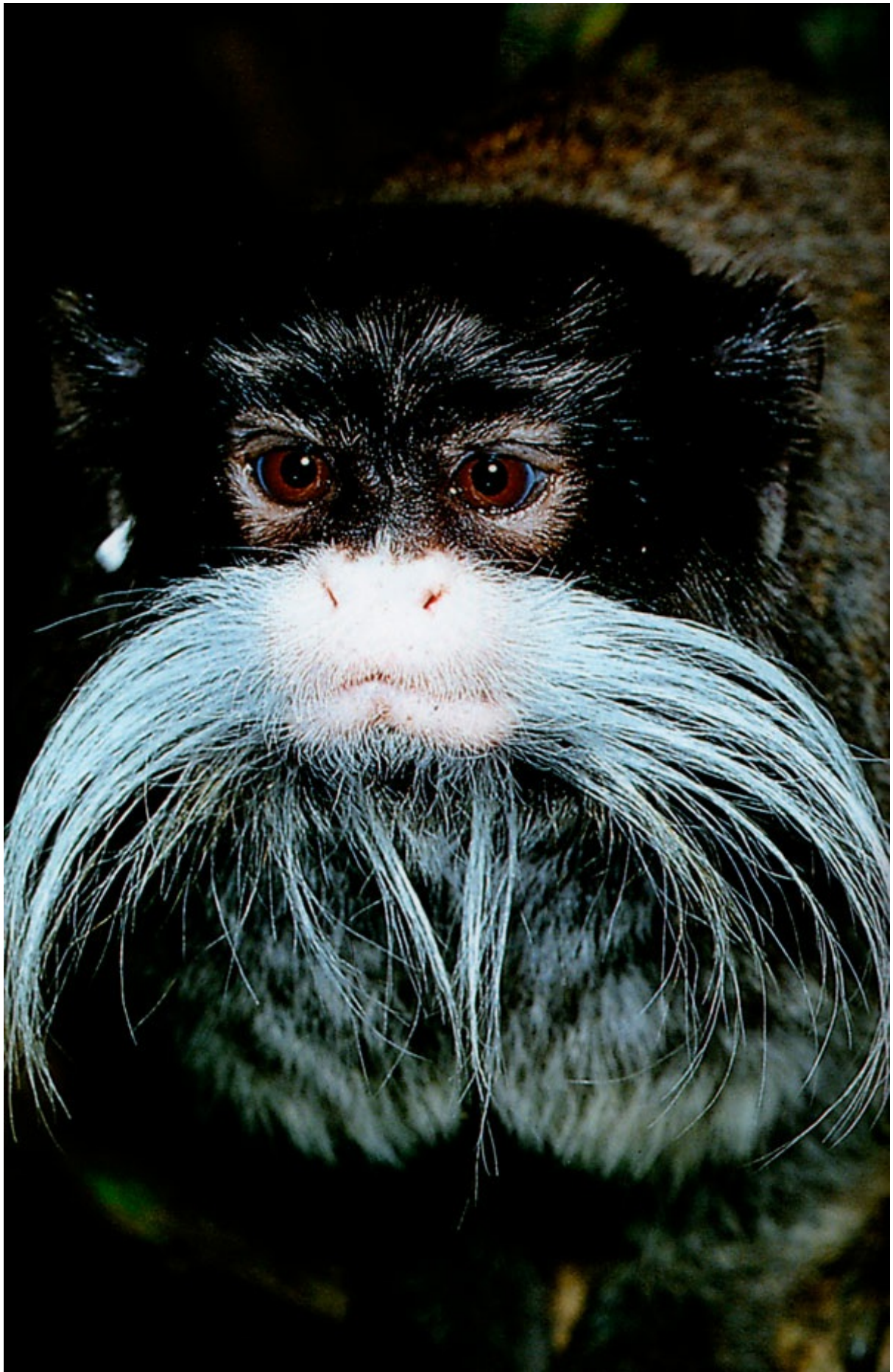






LÁMINA 48

Hombre furioso.

[International Stock Photos]

LÁMINA 49

Gorila furioso.

[Frans Lanting/Minden Pictures]

LÁMINA 50

Tití emperador (*Saguhius imperator subgriscens*).

[Tim Laman/Wildlife Collection]

LÁMINA 51

Soldado en uniforme de guardia y luciendo un bigote en manillar.

[Comstock]

LÁMINA 52

Dimorfismo sexual. Arañas saltadoras en pleno ritual de apareamiento.

[Mark Moffett/Minden Pictures]

Los seres humanos, como otros mamíferos, respondemos a rasgos juveniles como los ojos grandes, la cabeza proporcionalmente grande, la piel tersa y suave y los dientes pequeños. Estos rasgos son precisamente los de nuestra prole, incapaz de sobrevivir sin el cuidado parental. El encanto es especialmente importante. Los seres humanos retienen en su estado adulto rasgos que en nuestros ancestros primates no persistían más allá de la infancia. En otras palabras, nos parecemos más a monos inmaduros que a monos adultos. Parece ser que nuestros ancestros experimentaron un cambio en el ritmo del desarrollo embrionario, de manera que nacían en un estadio más inmaduro. Nuestros grandes cerebros continúan creciendo ya fuera del útero, después de que, históricamente, su gran tamaño haya constituido una fuente de padecimientos y problemas durante el parto. Una serie de caracteres ligados (cabezas y ojos grandes, caninos pequeños, curiosidad en todas las fases de la vida y carencia relativa de pelo) se explica elegantemente mediante la tesis de la neotenia, es decir, la tendencia a la infantilización. Los seres humanos adultos, más simiescos que los jóvenes en el sentido de que desarrollan más vello conforme maduran, son sin embargo mucho menos velludos que los

adultos ancestrales. Incluso los líderes modernos como Bill Clinton tienden a tener un rostro más aniñado y lampiño, maneras más amables y un pelo más sedoso que sus predecesores. Los rasgos de estos líderes neoténicos ilustran la tendencia hacia un aspecto menos amenazador y más «mono».

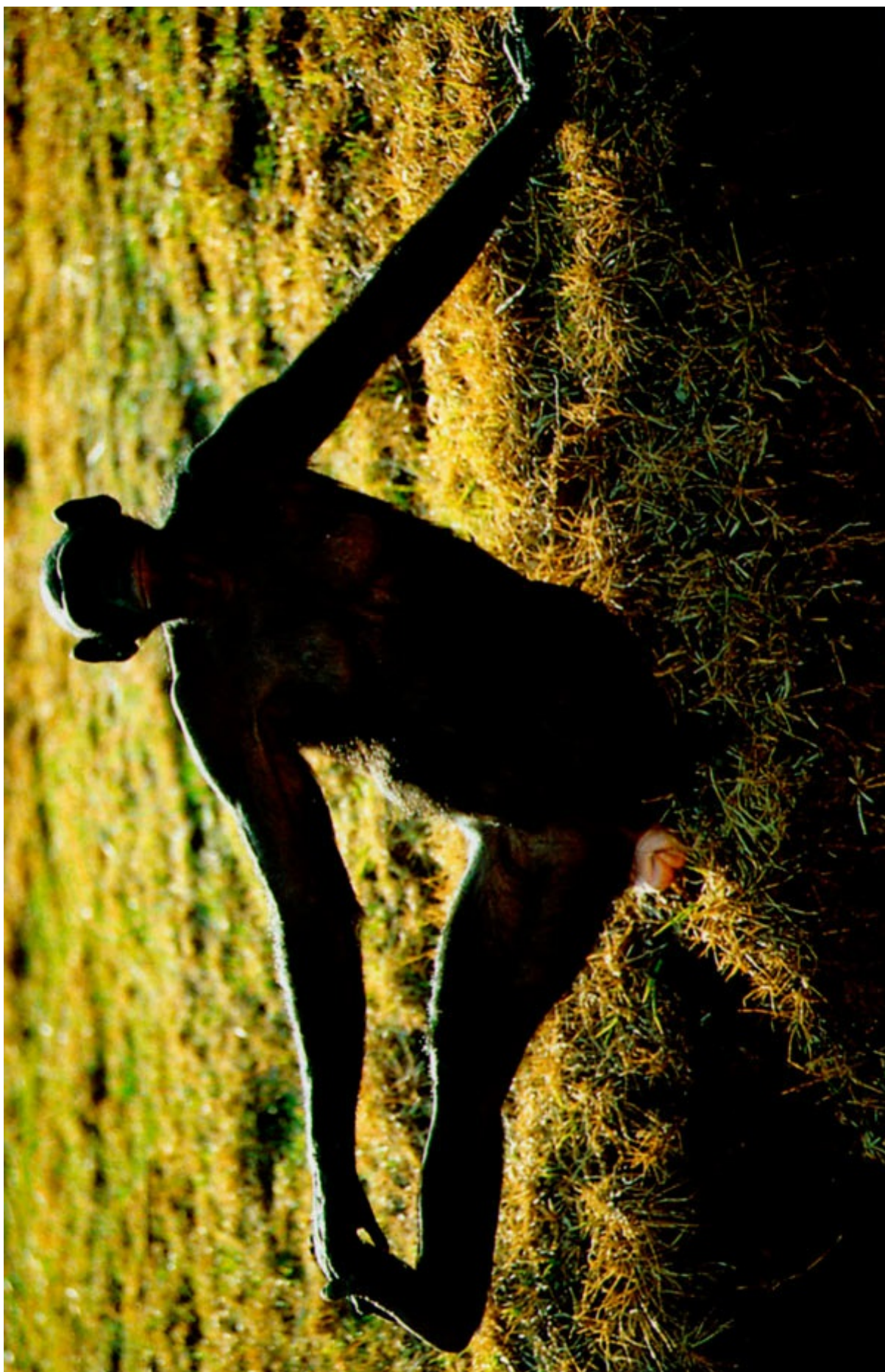
Las sociedades actúan como unidades. La política de poder caracterizada por unos machos adultos físicamente más fuertes que las hembras y los jóvenes evolucionó al incrementarse la población humana. Hoy los hombres con aspecto de homínidos dominantes del pasado (muy fornidos, de voz grave, pelo recio, calvos, barbudos y canosos) es probable que inspiren más miedo que respeto. A medida que nuestros ancestros homínidos fueron aumentando de número, el encuentro con extraños se hizo cada vez más frecuente. En las ciudades llenas de extranjeros, el aspecto ligado a la dominancia lo está también a la criminalidad potencial y la violencia. La disminución de las amenazas de peligro es una de las razones que llevaron a los hombres a afeitarse la cara, una costumbre iniciada por la milicia macedonia. El peinado y acicalado del pelo para hacerlo más sedoso, la ocultación de la calvicie, el oscurecimiento de las canas y los ademanes más amables y corteses contribuyen a mitigar la antigua dureza del macho dominante. Por otra parte, la costumbre de orinar en privado quizá sea una respuesta a la vida en comunidades populosas, como también lo es probablemente el enmascaramiento de los olores corporales. Las respuestas culturales contemporáneas han insistido en que los agresivos machos atemperen su comportamiento dominante, en marcado contraste con el patriarca dominante que en otros tiempos imponía respeto y merecía la atención sexual. El alejamiento del arquetipo del macho brutal en la especie humana obedeció, pues, a una doble motivación: por un lado a la importancia de moderar la agresividad en condiciones de densidad de población creciente y, por otro, a la neotenia.

PAPÁS DERRENGADOS | Aun en ausencia de cultura material, vestidos y lenguaje, las conductas masculina y femenina pueden ser notoriamente cambiantes. Ni en los reptiles ni en la mayoría de mamíferos existe un vínculo duradero entre padre e hijo. Los machos compiten por inseminar a

las hembras y dejan que sean ellas las que se hagan cargo de las crías. La hembra puede escoger machos que le aporten algo, pero las más de las veces la conexión del padre con su descendencia no existe o es sólo indirecta. Un lugar común es la provisión de alimento. Por ejemplo, los espermátóforos, paquetes de esperma comestibles, representan hasta el 40% del peso corporal de algunos insectos. Invitando a las hembras a comer la porción nutritiva y guardar los espermatozoides para uso posterior en un órgano especial (la espermateca), los machos ofrecen alimento a cambio de estar genéticamente representados en las generaciones futuras. En una pintoresca extensión del principio del sexo a cambio de comida, las hembras de la viuda negra y la mantis religiosa devoran no un espermátóforo, sino al macho mismo que acaba de inseminarlas. Incluso los murciélagos, mamíferos voladores mucho más cercanos a nosotros que las arañas o las mantis, producen espermátóforos.

Sin embargo, el hecho de que los machos retengan la capacidad física de fecundar a muchas hembras hace que surja una inevitable tensión que les impulsa a abandonar a las hembras estériles con crías por hembras fértiles fecundables. Dada la extrema vulnerabilidad de los infantes humanos, esta dramática tensión parece haber acompañado a la humanidad desde sus orígenes. De hecho, el potencial abandono paterno quizás haya condicionado la evolución del propio cuerpo femenino. En las mujeres faltan las marcas corporales vulvales y anogenitales típicas de las hembras primates en celo. El estro, la hinchazón y enrojecimiento de la vulva que acompaña a la ovulación, es un atractivo sexual para chimpancés y babuinos, entre otros primates. **[LÁMINA 53]** El estro significa que la hembra está en condiciones de ser fecundada. Estos signos externos de disponibilidad sexual ahorran energía a los miembros de aquellas especies en las que el apareamiento está cuidadosamente sincronizado. Pero para las hembras que requieren compromiso, el anuncio de la fecundidad mensual es una invitación a que los machos las abandonen. En las tribus cuyas mujeres habían perdido u ocultado las señales de fecundidad evidentes era menos probable que los padres fuesen distraídos por estímulos sexuales. La menstruación sincronizada, un fenómeno que suele darse en grupos de mujeres que viven en estrecha proximidad, como ocurre en los internados, también habría disuadido a los machos de

abandonar a una hembra para buscar otra más fértil: todas las hembras en una banda protohumana dada serían fértiles en los mismos días, haciendo efectivamente imposible para los machos el irse de jarana.



Estro. Hembra de bonobo estirándose y mostrando su vulva prominente.

[Frans Lanting/Minden Pictures]

Hoy las mujeres no muestran señales de ovulación evidentes; el estro es críptico. Es más, el agrandamiento mamario (en oposición a los demás primates, cuyas mamas sólo se hinchan durante la lactancia) probablemente sirvió para confundir a los hombres primitivos sobre las perspectivas de fecundidad. Los hombres tienden a mostrar menos interés erótico por las hembras que es improbable que conciban (las viejas, las poco saludables, y las preñadas o lactantes). Mucho peor es, desde el punto de vista humano, la conducta de leones, tigres y osos. Los agresivos machos de estas especies matan los cachorros lactantes para hacer que sus madres vuelvan a estar sexualmente disponibles y se dejen inseminar por el excitado asesino.

Las mamas prominentes y el estro oculto, que hacían más difícil para los hombres detectar la ovulación a partir de signos externos, probablemente les hicieron dedicarse (si bien a veces de manera posesiva y dominadora) a una sola mujer a un tiempo^[56]. En otras palabras, el estro críptico (una especie de victoria femenina en la «batalla de los sexos») contribuyó a que nuestros ancestros masculinos establecieran vínculos con sus hijos. La contribución paterna al cuidado de las crías se incrementó. Aunque los hombres no lleguen a criar a su prole ellos solos (como hacen, por ejemplo, los machos de la jacana o gallito de agua), puede verse fácilmente que los padres humanos ancestrales tuvieron un papel no desdeñable en la crianza de los hijos y que, lejos de ser un fenómeno reciente, los roles sexuales hace tiempo que empezaron a cambiar.

HIENAS RISUEÑAS | La contribución creciente a la crianza de los hijos por parte de los machos humanos es sólo uno de los miles de ejemplos del potencial evolutivo inherente en ambos géneros. En una reciente conferencia, la escritora feminista Susie Bright citó el caso de una amiga suya hacia la que se sentía atraída y que estaba en tratamiento hormonal como parte de un proceso de cambio de sexo. Su amiga le comentó que las

hormonas la estaban volviendo loca: «Estoy tan caliente que me siento como si estuviera violando a Bo Peep». Este comentario cómico nos alerta sobre el importante papel que ejercen las hormonas en nuestra identidad sexual, por encima de nuestra constitución genética masculina o femenina. La llamada guerra de los sexos es más bien una serie de escaramuzas dentro de una larga campaña donde los combatientes y los campos de batalla cambian rápidamente. Las diferencias físicas y psicológicas entre hombres y mujeres son principalmente el resultado de hormonas que influyen en el desarrollo de un embrión inicialmente unisexual. Los niveles hormonales, la historia pasada, el entorno social y muchos otros factores influyen sobre la masculinidad, la feminidad y las conductas sexuales asociadas.

Algunas especies de mamíferos muestran inversiones de género que van mucho más allá de nuestra experiencia humana. Bastará con un ejemplo: la «masculinización» de la hiena manchada. De las cuatro especies de hienas que existen en la actualidad, sólo la hiena manchada es apta para el estudio científico, ya que es la única que no está en la lista de especies amenazadas. La hiena manchada (*Crocuta crocuta*) es un mamífero agresivo cuyas hembras tienen un aspecto impresionantemente «masculino». [LÁMINA 54] Las manadas de estas criaturas de afilados dientes, compuestas exclusivamente por hembras, reducen una cebra a cuatro pezuñas en apenas veinte minutos. Son capaces de masticar y digerir el hueso, razón por la cual sus heces son blancas.



LÁMINA 54

Hiena hembra con su gran clítoris peniforme.

[Frans Lanting/Minden Pictures]

Hasta los años noventa nadie había conseguido determinar el género de estos animales porque todos ellos, tanto machos como hembras, ostentaban penes colgantes. Los científicos saben ahora que el «pene femenino» es de hecho un clítoris agrandado. Las hembras, que son fecundadas por machos menores que ellas y provistos de penes muy largos, carecen por completo de vagina. A diferencia del resto de mamíferos placentarios, las crías, por lo general mellizas, deben seguir una trayectoria en U a través del canal del parto para salir a través del clítoris. El doloroso parto tiene lugar a lo largo de la uretra, que discurre por el interior del clítoris gigante. El meato, la abertura de la uretra, se desgarrar para permitir el paso de la cría, de cerca de dos kilos. Muchas madres mueren durante el parto y muchas primeras crías nacen muertas. Pero la especie sobrevive. ¿Por qué? Aparentemente porque las manadas de agresivas hembras cazan con gran

eficiencia y se reproducen con éxito a pesar de su alta tasa de mortalidad. Las hienas, pues, no son antinaturales en absoluto.

La naturaleza tiende a la variedad en concordancia con la Segunda Ley; pero la vida, desde el momento en que puede mantener su forma reproduciéndose sexualmente o de cualquier otro modo, deshace gradientes, también en concordancia con la Segunda Ley. Los organismos que se reproducen sexualmente deben agruparse en sociedades, lo que de forma natural les lleva a desarrollar medios para reducir los gradientes grupales. Una madre hiena primeriza que muera de parto no perpetuará sus genes, pero sus hermanas, cazadoras despiadadas, serán en conjunto más competitivas que otros predadores menos agresivos. A pesar de su alta mortalidad, la estrategia de la hiena lleva y llevará a la generación eficiente de más hienas.

Un mínimo cambio químico puede tener poderosos efectos evolutivos. La placenta materna de estas hienas masculinizadas sintetiza testosterona *in utero*. Como los transexuales humanos, las hienas hembra carentes de vagina pueden parecer extrañas. Pero la vida muestra mucha más variedad en el dominio sexual, tanto intraespecífica como interespecífica, de lo que nuestra estrecha visión de la normalidad podría hacer pensar. En relación a su propia especie, las hienas son perfectamente normales^[57]. Así como las modas culturales cambian, de manera que ahora las mujeres llevan pantalones, y a veces hasta corbata, y hay hombres que llevan el pelo largo o se ponen pendientes, los géneros evolucionan y pueden incluso «invertirse» a lo largo del tiempo evolutivo.



seis

CONVERGENCIA:

EL FUTURO DEL SEXO

Sólo tenemos dos sexos; no podemos concebir un
tercero:
todo lo que podemos imaginar son combinaciones
interesantes de ambos.

Robert Garrels^[58]

SUPERORDENACIÓN Y LA METAMORFOSIS DE LAS MULTITUDES | Las multitudes son extrañas. Tanto en un concierto de rock como en un evento deportivo o en una batalla, las multitudes parecen tener una mente propia. Pero estas congregaciones humanas no son nada comparadas con el comportamiento de ciertas aglomeraciones a lo largo del tiempo evolutivo. A través de la evolución, organismos que en un principio se reproducían individualmente se han congregado en colectivos mayores más aptos para funcionar y reproducirse como tales. Con el tiempo, la multitud puede convertirse en unidad. La asociación conduce a la evolución de nuevas formas de vida. En algunos casos, los miembros del colectivo dejan de reproducirse individualmente o en pareja y pueden llegar a actuar como parte de un nuevo organismo de orden superior que, como tal, reduce gradientes de forma más efectiva que los miembros del colectivo por separado. En las colonias microbianas, los nidos de los insectos sociales, las madrigueras de las ratas topo y las ciudades humanas, la incesante necesidad de gratificación sexual es sacrificada e incluso eliminada en aras de la eficacia termodinámica del conjunto. El colectivo compite con otras entidades genéticas disipativas y deja más descendencia en los eternamente cambiantes paisajes evolutivos de la que dejarían los individuos por separado.

Las emociones son intrínsecamente sociales, pero también lo son los cuerpos animales. El contacto íntimo y regular con la madre, los hermanos, los miembros del grupo, las parejas y otros congéneres es esencial para la maduración y eventual reproducción, especialmente en los primates. El rubor, inducido por la conversión involuntaria en centro de atención, viene marcado por un enrojecimiento de la cara producto de un incremento del flujo sanguíneo hacia la cabeza y la consiguiente dilatación de los capilares. Provocado por el embarazo en situaciones sociales, el rubor es un llamativo ejemplo de la conexión íntima entre fisiología individual y fisiología grupal.

En el psicoanálisis, el deseo se refiere al esfuerzo por encontrar un objeto ausente (o por librarse de un objeto sobrante) que nos hará sentirnos completos. Ahora bien, dado que somos sistemas abiertos en un universo

disipativo y siempre cambiante cuya naturaleza está ligada a nuestra percepción de un sentido hacia delante del tiempo, ninguna posesión estática o eliminación de un objeto, sexual o de cualquier otra índole, nos completará verdaderamente. Es el movimiento hacia la consecución de nuestro deseo (algunos lo llaman lujuria), más que la llegada a algún destino o satisfacción final, lo que es congruente con la Segunda Ley de la Termodinámica.

La recombinación es un proceso fundamental de la vida. Las palabras se combinan y recombinan para crear lenguaje. Las imágenes se combinan para crear arte. Los genes de los organismos se combinan en ordenaciones siempre cambiantes para crear organismos únicos. [LÁMINA 55] En el sexo, la imitación es la forma más elevada de adulación, y el plagio es una forma de fidelidad. A través de la simbiosis y el sexo, los organismos se apropian de las aptitudes hereditarias de otros. Esta apropiación unas veces salva vidas y otras simplemente promueve rasgos caprichosos, pero, en virtud de la cualidad hereditaria, mnemónica, de la vida, los flamantes organismos recombinados, como todos los demás, copian su propia forma con grados diversos de éxito.

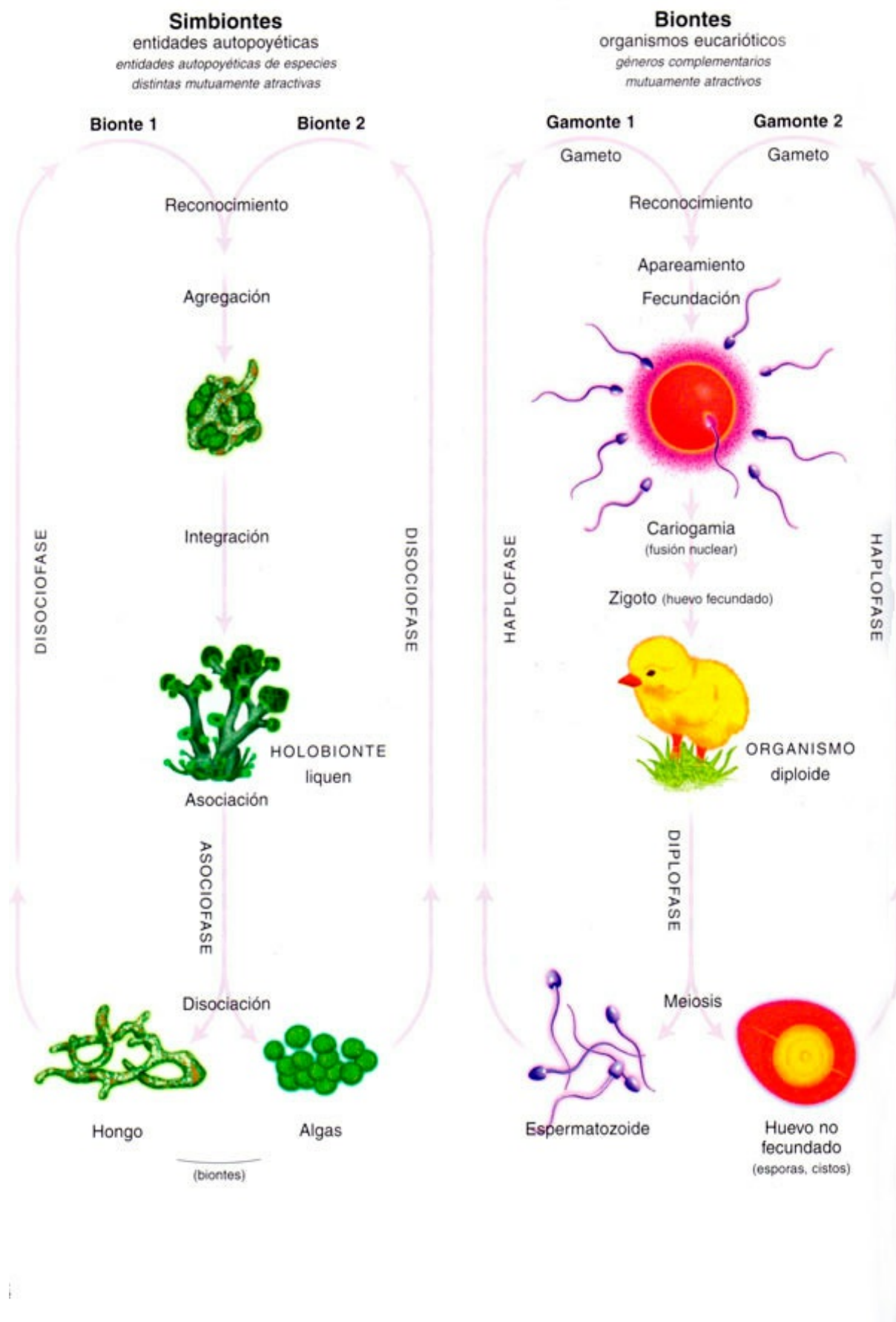


LÁMINA 55

Simbiosis cíclica (izquierda) comparada con la sexualidad (derecha). Ambas implican singularización (haplofase, disociofase), reconocimiento, fusión (fecundación, simbiogénesis), integración (asociofase) y disociación (meiosis).

[Kathryn Delisle/José Conde]

La dialéctica entre conformidad y novedad, entre orden repetitivo y promoción de la diversidad, está en el centro de la vida^[59]. Mientras la posición del misionero, como estándar sexual socialmente aceptado, está en el lado de la conformidad, la experimentación tecnológica mediante ingeniería genética está en el lado de la novedad. Vemos que la variedad y la mezcla son una tendencia básica del universo en concordancia con la Segunda Ley de la Termodinámica y la (aparente) unidireccionalidad del tiempo. La existencia de ovejas clónicas es un ejemplo de acrecentamiento del potencial confirmatorio de la vida a través de la novedad humana representada por una tecnología en constante evolución. Pero las sutilezas del entorno en el que los embriones crecen y se desarrollan fuera del útero materno son tales que ni siquiera la clonación «perfecta» puede asegurar la identidad. Como han señalado los filósofos, la única copia perfecta es el original. En la vida real, la tendencia a la variación descrita por la Segunda Ley es imposible de eliminar. Los gemelos idénticos criados juntos (lo más parecido a la copia perfecta de seres humanos) muestran grandes diferencias en su arquitectura neuronal debido a sus diferentes experiencias^[60]. Los procesos vitales de generación de variedad y fidelidad de copia, que en los animales están acoplados con el sexo y la reproducción, interactúan de múltiples maneras para producir la espléndida complejidad de la historia evolutiva. En el mundo de hoy esto abarca la incorporación de los ordenadores a nuestras vidas sexuales y sociales.

CONVERGENCIA | Hay un obstáculo persistente que se opone a una visión auténticamente evolutiva de nuestro universo y que, irónicamente, tiene él mismo una explicación evolutiva. Se trata de nuestra ampliamente extendida presunción cultural de que la vida humana es el propósito de la creación y de que el resto de organismos, como autómatas sin alma que

son, fue creado para nosotros. Esta visión automagnificadora es reforzada por la idea tradicional de que fuimos hechos a imagen y semejanza de Dios. No somos especiales. La Tierra no es el centro del Universo. La materia de nuestros cuerpos no es única. No estamos compuestos de polvo mágico. Los átomos que nos constituyen son indistinguibles de los átomos de hidrógeno, carbono, fósforo, oxígeno, etc., presentes en el espacio exterior y en las demás formas de vida. Nuestro papel dentro de los sistemas termodinámicos reductores de gradientes y recicladores de materia que constituyen la vida planetaria es menor que el que desempeñan los árboles. No somos ni «la forma de vida más elevada» ni «la especie elegida» para la cual fueron creadas las demás. Ni la evolución «ha llegado a su fin» de algún modo con nosotros.

De hecho, ahora más que nunca, las repercusiones evolutivas que han afectado a otras poblaciones de organismos multitudinarios en rápido crecimiento —y que han inducido su organización en «individuos»— parecen estar afectándonos también a nosotros. En biología, la evolución independiente de criaturas similares se denomina convergencia. La convergencia se da cuando linajes separados, bajo similares condiciones de estrés ambiental, desarrollan de forma independiente las mismas conductas o estructuras corporales. Aunque los cetáceos, los extintos ictiosaurios y los atunes, por ejemplo, tienen todas formas hidrodinámicas, capas de grasa subcutánea y pieles lisas, no tienen ancestros comunes inmediatos. Los ancestros de estos animales nadadores fueron, respectivamente, mamíferos de respiración aérea, reptiles terrestres y peces pelágicos. Las alas de insectos, murciélagos y aves evolucionaron no porque estos linajes tengan ancestros comunes inmediatos, sino porque todos se vieron forzados a volar para alimentarse y sobrevivir en medios aéreos relativamente despejados. Tanto las alas como las formas hidrodinámicas constituyen ejemplos de convergencia evolutiva^[61].

Al igual que ocurrió con otras formas de vida que nos precedieron, incluidos ciertos protoctistas, plasmodios, insectos (termitas, abejas, hormigas y avispas) y muchas otras, a medida que los grupos humanos incrementan su organización, el número de individuos reproductores mengua. Vaticinamos que la humanidad evolucionará hacia una especie compuesta por poblaciones en las que la mayoría de sus miembros no se

reproducirá.

Aunque más rara que la especiación estándar en especies divergentes, la superordenación (la agregación social para formar organismos nuevos y mayores) no es ni una monstruosidad ni una singularidad. Los precedentes abundan. Cuando los individuos agregados proceden de distintas especies, hablamos de hipersexo (como cuando ciertas bacterias de multiplicación rápida se coaligaron para convertirse en células nucleadas de reproducción más lenta). Cuando los individuos agregados pertenecen a la misma especie (como ocurre, por ejemplo, en los plasmodios del estilo de *Dictyostelium*), hablamos de superordenación. La superordenación en la fisiología grupal de lo que contemplamos como sociedades de individuos discretos puede resultar sorprendentemente compleja. Las sociedades de hormigas, abejas y termitas se han convertido en superorganismos que, en el interior de sus colmenas y montículos, mantienen una humedad superior al 90% y una temperatura ambiente de 18°C a 24°C. Otros enjambres exhiben comportamientos cooperativos únicos que superan las posibilidades de los individuos aislados. Las abejas japonesas detectan la feromona de los avispones que depredan sus nidos. Cuando un avispon se acerca a la entrada del nido, hasta quinientas abejas lo rodean cubriéndolo por completo. Las abejas toleran temperaturas de hasta 50°C. En vista de que el avispon emboscado perece cuando la temperatura supera los 45°C, las abejas, haciendo vibrar los músculos alares, elevan rápidamente la temperatura del agregado por encima de los 46°C, ¡lo suficiente para cocer al depredador!

El socorrido mito de que somos superiores al resto de formas de vida en razón de nuestra inteligencia y nuestra cultura, mientras que los demás organismos son autómatas ciegos cuyo comportamiento está completamente determinado por la genética, es fácilmente refutable. Las poblaciones se superordenan por convergencia. A medida que la población humana global crece, las tasas de natalidad disminuyen y nuestra interconexión tecnológica aumenta. Nuestra sociedad ha comenzado a desacoplar el sexo de la reproducción. Las restricciones religiosas, los anticonceptivos —desde los condones hasta los remedios naturales o la «pildora del día después»—, los abortos, la infertilidad creciente, los bancos de espermia y la clonación ya han dado un tijeretazo al cordón

biológico que liga el sexo con la reproducción. La masturbación inspirada por revistas y vídeos X o teléfonos eróticos genera un placer sexual virtualmente estéril, sin posibilidad de concepción. Aunque todavía limitado a un pequeño porcentaje de la población planetaria, el ciberespacio constituye una prolongación de esta tendencia evolutiva hacia el desacoplamiento del sexo y la reproducción, una tendencia que, sospechamos, continuará a medida que un número creciente de gente se disputa el espacio, el alimento y la energía.

Las células se agregaron en cuerpos. Los insectos se agregaron en unidades sociales como los enjambres y los termiteros. El «recableado» de la sexualidad se relaciona con la autorregulación de las poblaciones humanas. Los biólogos denominan «apomícticas» a las poblaciones de pasado sexual. Enamorándose de las máquinas, la gente quizá se esté encaminando hacia la apomixis. Así como la tendencia innata que tienen todas las células de nuestro cuerpo a multiplicarse queda sujeta a la disciplina necesaria para la formación de tejidos sanos no tumorosos, la tendencia innata de los seres humanos a reproducirse sexualmente está siendo mitigada. Nuestras poblaciones están evolucionando para comportarse cada vez menos como proliferaciones peligrosas y más como una especie de tejido neuronal de la biosfera. La atracción sexual que nos induce a buscar parejas en clubes, bailes o a través de los anuncios clasificados de la prensa o los contactos telefónicos fácilmente se modifica para convertirse en un lubricante estrictamente social con escasas consecuencias reproductivas.

Cada uno de nosotros no es necesariamente consciente de la función social que cumple nuestro impulso sexual al trabajar para incorporarnos al hipercerebro. Como escribió Samuel Butler acerca de las células corporales: «Se unen para formar nuestra individualidad propia, de la cual no es probable que tengan concepción alguna, y hacia la cual probablemente tienen la misma empatía parcial e imperfecta que nosotros, la colectividad, tenemos hacia ellas»^[62].

RATAS MONÁRQUICAS | En caso de que ocurra, no seremos la primera especie mamífera que haya prescindido de la reproducción sexual de la

mayor parte de su población adulta. Esta conducta grupal ha evolucionado en *Spalax*, género de roedores africanos excavadores conocidos como ratas topo desnudas. Estas «salchichas de dientes de sable» rosadas y arrugadas, sin duda uno de los organismos más feos de la Tierra, viven y duermen en colonias subterráneas cuyas entradas son vigiladas por centinelas. [LÁMINA 56] Sólo la gran reina y dos o tres sementales se reproducen. Los otros machos y hembras practican un «frotamiento anogenital» y hasta copulan de tarde en tarde, pero de cada siete machos cinco, si es que llegan a eyacular, producen sólo espermatozoides no viables^[63].



LÁMINA 56

Ratas topo desnudas (*Spalax*), mamíferos comunales comedores de raíces.

[Gregory G. Dimijian/Photo Researchers]

La esterilidad de la mayoría de ratas topo desnudas parece estar mediada hormonalmente. Son las reinas, y no sus consortes masculinos, los individuos que tienen los mayores niveles de testosterona en sangre. Como muchos otros mamíferos, incluidos nosotros, las ratas topo desnudas constituyen «jerarquías de dominancia». El desarrollo de estas jerarquías en las que los individuos asumen distintos roles recuerda de forma intrigante la diferenciación celular. Las poblaciones, sean de animales o de células, se especializan gradualmente para distintas funciones. Las poblaciones especializadas, como las células que se diferencian para formar los cuerpos animales, usan la energía de manera más eficiente, lo que las hace más eficaces que poblaciones menos organizadas operando sobre la misma área^[64].

La testosterona, una hormona esteroide masculina, tiene una acción diferenciadora. [LÁMINA 57] Cuando se sustrae la reina de una colonia de ratas topo, los niveles de testosterona se disparan tanto en los individuos reproductores como en los estériles. En un experimento diseñado por Chris G. Faulkes, de la Sociedad Zoológica de Londres, se marcaron 100 machos y se estudió su conducta de desplazamiento a través de estrechos túneles de plexiglás. Los machos que pasaban por encima de los otros recibían la puntuación más alta. Cuando se eliminaba la reina, los rangos de dominancia se trastocaban. La colonia no puede tolerar la ausencia de reina, y pronto una hembra estéril ordinaria comienza a desarrollar tendencias regias mediadas por la testosterona. De los machos marcados, sólo uno, un gran semental en potencia, había obtenido una puntuación más alta que la futura reina: fue muerto por ella.

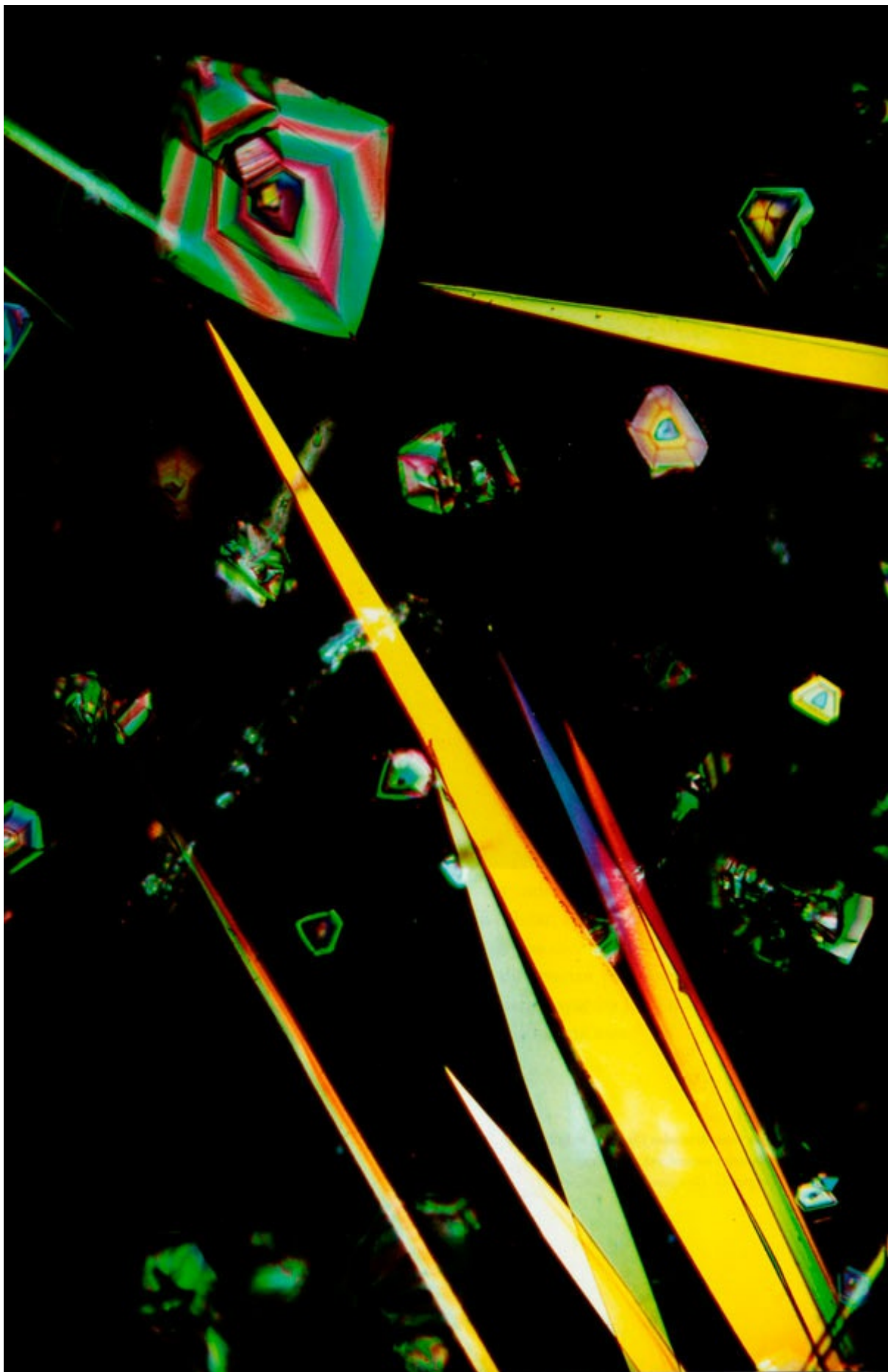


LÁMINA 57

Hormonas cristalizadas. Estas moléculas, que circulan disueltas en nuestro torrente sanguíneo, tienen profundos efectos sobre la vida y la sexualidad.

[Lennart Nilsson]

El comportamiento de la reina, así como sus niveles de testosterona, parece ser que inhiben el desarrollo sexual de los otros miembros de esta «dictadura reproductiva». Efectos similares se han observado en primates sociales. Tras derrotar a un macho dominante, los vencedores suelen mostrar niveles elevados de testosterona, mientras que los perdedores pueden experimentar descensos significativos de esta hormona. De algún modo, la lucha social y el nuevo rango en la jerarquía de dominancia se traduce en la fisiología. El consumo de drogas y compuestos químicos bioactivos, a menudo considerado un insensato ejercicio de apatía o inmoralidad, puede interpretarse a la luz de sus efectos sociales. Conectando, alterando y a menudo debilitando a los individuos, el consumo de drogas altera las poblaciones humanas. Los adictos a las drogas probablemente dejan menos descendencia que los que se abstienen. La marihuana, por ejemplo, con independencia de su uso recreativo y de sus posibles perjuicios o beneficios para la salud, disminuye temporalmente los niveles de testosterona. El potencial de las drogas para reducir el tamaño de la población es obvio. Este carácter destructivo del consumo generalizado de drogas, causante de pérdidas humanas predecibles, es comparable a la apoptosis, pero al nivel social en vez del celular.

A medida que las comunidades en estrecha relación se agregan en unidades mayores, tiene lugar una evolución por ramificación y fusión. Las ratas topo ermitañas, las termitas solitarias, las hormigas solitarias y los niños abandonados no viven mucho tiempo. Organismos reproductores y no reproductores coexisten en el seno de eficientes grupos sociales que funcionan como unidades. Hormonas que sirven para la comunicación celular entre distintos tejidos de un único cuerpo se encargan de organizar en un colectivo cientos de cuerpos de termita o rata topo. Los machos que inseminan a la reina son el equivalente social de los testículos. Así como las células embrionarias de un feto humano son totipotentes (pueden

multiplicarse sin límite y todavía no han sido expuestas a factores que determinan su especialización y restringen su reproducción), los ancestros de las ratas topo probablemente podían reproducirse en su gran mayoría. Los billones de células nucleadas diferenciadas en tejidos que componen nuestros propios cuerpos pierden su capacidad reproductiva muy pronto en el desarrollo embrionario. Es como si el desarrollo embrionario animal reprodujese *in utero* el gran drama del paso de una sociedad cuyos componentes pueden procrear a un colectivo en el que sólo una élite deja descendencia.

DISMINUCIÓN DE ESPERMATOZOIDES Y DENSIDAD POBLACIONAL |

Sigmund Freud recalcó una ironía de la vida moderna, a saber, la represión sexual. Pero la represión sexual, esa gran fuente de ansiedad personal, es fundamental para la cultura. La energía que de otro modo se invertiría en la búsqueda de parejas y la actividad sexual es recanalizada y «gastada» de maneras socialmente productivas.

La vida sexual del hombre civilizado está seriamente incapacitada... Da a veces la impresión de ser una función en el proceso de atrofiamiento, como el que parece afectar a otros órganos como los dientes y el vello... La importancia de la sexualidad como fuente de sensaciones placenteras, es decir, como un medio de cumplir con el propósito de la vida, ha decrecido perceptiblemente. A veces uno imagina percibir que no es sólo la opresión de la cultura, sino algo en la naturaleza de la función misma, lo que nos niega la satisfacción completa y nos impulsa en otras direcciones. Esto quizá sea un error; es difícil de decidir^[65].

Varias líneas de evidencia sugieren que la actividad sexual se está haciendo menos importante para la reproducción y más para la comunicación. La actividad sexual, que establece conexiones entre grupos humanos cada vez más interdependientes, ya no genera necesariamente tanta descendencia. La producción de espermatozoides parece estar disminuyendo en todo el mundo. La llamativa mengua en el número medio de espermatozoides por eyaculación ha sido atribuida a toxinas ambientales que imitan los efectos de hormonas sexuales. Un culpable principal puede ser la dioxina, un subproducto industrial análogo del

estrógeno (hormona femenina). Concentrados por las vacas y propagados en parte por la leche, estos compuestos feminizantes podrían ser responsables del observado declive planetario de la virilidad^[66]. Desórdenes de género en peces como, por ejemplo, la feminización de las carpas macho también han sido atribuidos a contaminantes químicos industriales que disminuyen la tasa reproductiva^[67].

Desde el principio la naturaleza ha incorporado accidentes. Tendemos a creer en una sexualidad «normal» de dos géneros, pero los géneros cambian a la larga. Imperfecciones, anormalidades de desarrollo, perversiones, mutaciones, nuevas formas «monstruosas» de comportamiento, incluido el reproductivo, surgen y persisten a medida que los organismos sexuales experimentan transformaciones sociales. Una persona llamada Emma nació con una vagina y un clítoris del tamaño de un pene. Siendo adolescente ejerció una actividad «heterosexual» con diversas chicas, y continuó esta actividad sexual con mujeres incluso después de casarse con un hombre a la edad de diecinueve años. Cuando el urólogo Hugh H. Young, de la John Hopkins Medical School, le informó de que sus deseos de ser un hombre eran médicamente realizables, Emma replicó:

¿Habría que eliminar esa vagina? No sé, porque es mi bono de comida. Si lo hicieran, tendría que prescindir de mi marido y buscarme un trabajo, así que creo que me quedaré como estoy. Mi marido me mantiene bien, y aunque él no me da ningún placer sexual mis novias me lo dan de sobra^[68].

Emma era excepcional, pero desde luego era natural. Necesariamente sociales, las atracciones, repulsiones y represiones sexuales existen a lo largo de un continuo. Con el tiempo evolucionan nuevas normas, nuevos estándares de apareamiento y fecundidad, nuevos comportamientos y claves químicas. Así como el sexo a tres entre dos adultos y un niño que practican nuestros parientes cercanos los bonobos puede parecernos perverso, puede que nuestros anuncios de automóviles y películas actuales parezcan, en retrospectiva, desmesuradamente sexuales a nuestros descendientes primates. Los organismos de mayor éxito reproductivo crean las mayores confusiones, las cuales, a su vez, crean los mayores

problemas para la multiplicación continuada de esos mismos organismos. Nuestro éxito en la reproducción sexual ha establecido las condiciones para la disminución de esa misma reproducción sexual.

HORMONAS Y FEROMONAS | Vertidos en el agua, el suelo o el aire por un organismo, los llamados alelos químicos tienen un sentido para sus congéneres. Estos compuestos pueden contemplarse como «hormonas ecológicas». Las feromonas, ejemplos de alelos químicos, son sustancias químicas sociales que envían señales entre miembros de la misma especie, y que incluyen moléculas producidas por los cuerpos de un género capaces de inducir cambios fisiológicos y comportamentales medibles en los miembros del género complementario. Las hormonas liberadas en un individuo señalizan el cuerpo de ese mismo individuo. Hormonas como la testosterona y el estrógeno, presentes en los mamíferos de ambos sexos, probablemente comenzaron actuando como feromonas que organizaban sociedades de células. Unas feromonas que en origen regulaban el comportamiento y la atracción entre protoctistas probablemente se convirtieron en hormonas que regulaban la multiplicación celular dentro de los cuerpos de animales individuales. Conforme las células permanecían juntas tras la reproducción mitótica para convertirse en organismos, los compuestos que regulaban el comportamiento entre los miembros de estas poblaciones celulares se convirtieron en los compuestos que regulan el comportamiento entre las células de un cuerpo. El proceso también puede invertirse: conforme los organismos se agregan para convertirse en sociedades, las hormonas dentro de ellos pueden «rezumar» hacia el entorno social.

La testosterona, por ejemplo, el mismo esteroide responsable del crecimiento de la barba y el vello corporal y del cambio de la voz durante la maduración física de los varones, también actúa como atractor —feromona— entre animales maduros. Por ejemplo, un macho de lamprea (un vertebrado pisciforme con dientes pero sin mandíbulas) puede atraer a una hembra emitiendo una ínfima cantidad de testosterona, unos 29 picogramos por mililitro. Los ratones machos jóvenes (*Mus musculus*) expuestos a la orina de machos adultos (que contiene testosterona)

maduran en adultos más pequeños con órganos reproductores reducidos. Las hembras no resultan afectadas. En cambio, las hembras jóvenes de los topillos de la especie *Peromyscus leucopus noveboracensis* desarrollan ovarios reducidos si son expuestas a la orina de un macho adulto durante un periodo crítico. La orina femenina, por el contrario, tiene poco efecto^[69].

La evidencia experimental, pues, sugiere que no existe un lenguaje universal para las hormonas y la quimiorrecepción: los mismos compuestos tienen efectos diferentes en animales diferentes y en condiciones diferentes. Culpamos de la disminución del número de espermatozoides a la polución derivada de las peculiaridades de nuestra tecnología y a la degradación medioambiental. Pero la polución es absolutamente natural y, de hecho, una consecuencia inevitable de la multiplicación rápida de cualquier forma de vida. Dado que todos los organismos tienen necesidades metabólicas que difieren de sus emisiones gaseosas, líquidas y sólidas, todos morirán ahogados en sus propios desechos si sus poblaciones crecen demasiado rápidamente en un área limitada sin asistentes metabólicamente diversos. Los organismos, compuestos de identidades antes independientes, aparecen a niveles cada vez más altos en la escena ecológica, y esto es así en parte porque las entidades de orden superior han resuelto problemas de autoenvenenamiento derivados de la superpoblación.

La disminución de la producción humana de espermatozoides es un ejemplo natural de «freno» reproductivo debido al envenenamiento causado por una reproducción desbocada. Un organismo del tipo que sea sólo puede multiplicarse desenfrenadamente antes de tener que enfrentarse con la acumulación de sus propios desechos. La dioxina es un producto contingente de la tecnología probablemente imprevisible, pero la aparición generalizada de influencias inhibitorias de la reproducción en la población humana es inevitable en razón de su rápido crecimiento. La dioxina y muchos otros contaminantes obstaculizan nuestra reproducción. Los pesticidas que usamos para proteger nuestras cosechas también nos perjudican cuando consumimos esas cosechas. Los antibióticos que usamos para matar bacterias patógenas seleccionan formas más virulentas de esas mismas bacterias.

La ecología, desde los ecosistemas locales hasta la biosfera planetaria, depende de, y fomenta de modo natural, diversas vías para asimilar la luz solar que incide sobre la superficie terrestre. Las poblaciones de ciertos organismos proliferan rápidamente por un tiempo mientras incorporan y liberan energía, pero las más aptas para persistir funcionan como totalidades, como organizaciones complejas con numerosas interconexiones metabólicas. No es difícil entender que el actual crecimiento indiscriminado de la población humana podría ser reemplazado por formas de expansión más ordenadas.

La relación sexual que ahora es un requisito previo para la reproducción podría asumir otros papeles en los colectivos humanos del futuro. La técnica médica ya permite fecundar óvulos sin orgasmo ni placer erótico alguno. Es más, ahora sabemos que el orgasmo no tiene por qué estar constreñido a los genitales. Se han documentado y estudiado orgasmos no genitales en mujeres con lesiones de la médula espinal. Estas mujeres pueden sentir placer orgásmico en los hombros, el pecho o la barbilla. Barry R. Komisaruk y Beverly Whipple, de la Universidad Rutgers, han mostrado que el nervio vago, presente ya en los primeros vertebrados, es una «vía primitiva y concurrida hacia el orgasmo»^[70]. El placer sexual conduce a la reproducción. Pero, a medida que el crecimiento de la población se hace asintótico, el sexo reproductivo, ahora excesivo, se libra a otras tareas que, desde el punto de vista de la reproducción, pueden parecer perversas. Así como lo que para unos es carne puede ser veneno para otros, la normalidad de una especie puede haberse derivado de la perversidad o (por emplear un tono menos moralista) la creatividad sexual de sus ancestros. Nuestros antepasados, como atestiguan los signos de competencia espermática, muy bien podrían haberse parecido más a los bonobos en cuanto a promiscuidad y actividad sexual que los seres humanos actuales. La evolución raramente se está quieta. A medida que perdemos nuestras prerrogativas reproductivas personales en aras de la integración grupal, es de esperar que el placer sexual individual se reoriente hacia el mantenimiento y la expansión de nuevas organizaciones sociales. El placer sexual individual conduce a excesos impredecibles sobre los cuales puede actuar potencialmente la evolución, rompiendo el antiguo vínculo entre sexo y reproducción. En

ninguna parte se revela esto de forma tan notoria como en la figura del Marqués de Sade.

EL DEPRAVADO MARQUÉS AZUL: LA OMNIPRESENCIA DEL SEXO | El océano besa la arena. El cielo acaricia el horizonte. Los «raperos» combinan sonidos insertando estrofas de otros artistas dentro de la identidad extática de sus propias obras. Ya algún muchacho de las cavernas debió darse cuenta, mucho antes de que Freud llamara la atención de sus colegas médicos sobre ello, de que casi todo puede tener una connotación sexual. En nuestra sociedad materialista, crecientemente globalizada y capitalista, cuando se hace mención explícita del sexo las ventas del producto aumentan. La poderosa dinámica funciona en virtud de una inclinación al sexo instintiva y modulada bioquímicamente que, por decirlo de manera imaginativa, trabaja encadenada a la reproducción para un chulo llamado Segunda Ley.

Probablemente no hay pervertido más prolijo en la historia de la sexualidad que el Marqués de Sade (1740-1814), quien afirmó que la sodomía no sólo era el método más placentero de control de la natalidad, sino también tan arrobador que, si el grueso de la humanidad lo hubiera descubierto, nuestra especie se habría extinguido rápidamente (lo que sería un fin a su medida). Los libros del Marqués eran tan nauseabundos que su propio hijo los quemó. Pero en defensa de su figura algunos críticos han argumentado que su obra fue especialmente consistente, y únicamente pretendía ganarle la partida a la naturaleza en su propio terreno. En opinión de estos críticos, si hubiera que señalar a alguien con el dedo, tendría que ser a la hipócrita sociedad en que vivió antes que al obsesivo Marqués. La feminista Simone de Beauvoir (1908-1986), autora de *El segundo sexo* y amante del filósofo existencialista Jean-Paul Sartre, llegó a decir de él que fue «un gran moralista».

El Marqués tenía una personalidad obsesiva. Llevaba siempre con él un estuche con grageas de cantárida o «mosca española», un irritante urogenital «afrodisíaco» que solía usarse para inducir la cópula en animales. Aun en las primeras semanas de su matrimonio continuó contratando los servicios de prostitutas, y acabó siendo encarcelado por

raptar, azotar y verter gotas de cera fundida en las heridas de una joven llamada Rose Keller. Obligó a su criado Latour a practicar la sodomía con él. Se fugó a Italia con su cuñada, la canóniga de Launay. Su esposa, que después se metería a monja, también participaba en las orgías que organizaba su depravado marido. En su obra sobre la Marquesa de Sade, el escritor japonés Mishima imagina una orgía en la que ésta azota a un muchacho desnudo colgado de un candelabro.

Encarcelado más de una vez por tales actividades, lo único que al Marqués quizá le divirtiera más que sus fiestas sexuales era escribir sobre ellas. Todos sus libros fueron prohibidos en febrero de 1784. Cinco años después, en 1789, durante la Revolución Francesa, fue trasladado del calabozo de Vincennes a la Bastilla en París. El «Marqués diabólico» pasó a la posteridad como el villano sexual más culto de la historia, prestando su nombre al término «sadismo» (aunque, de acuerdo con algunos de sus apologetas, su estética consistía en provocar no sólo dolor, sino sensaciones realzadas de todo tipo).

Uno podría pensar que la conducta del Marqués está fuera de los límites de lo natural, que una aberración tan extrema sólo puede ser producto de la demencia o de una conciencia pervertida. Ciertamente el Marqués fue un pervertido sexual y un criminal. La versión extrema de la asociación, natural o no, entre violencia y sexualidad que él encarnaba seguramente se desvía de la norma humana. Ahora bien, si se le compara con otros seres no humanos, el malvado Marqués parece de lo más manso. Al lado de la conducta habitual de ciertas especies de arañas, por ejemplo, las bufonadas del Marqués eran relativamente inofensivas. Steven Shaviro, de la Universidad de Washington, se lamenta así de la monotonía de las conductas y prácticas sexuales humanas:

Hasta nuestras fantasías sadomasoquistas más salvajes siguen demasiado a menudo fórmulas trilladas... Lejos de exaltar la variabilidad cultural, quizá sería mejor preguntarse por qué las culturas humanas no son *más* diversas de lo que de hecho son. Desde el punto de vista biológico, nuestras vidas sexuales son sumamente aburridas. Otros organismos tienen mucha más inventiva. Consideremos, por ejemplo, la chinche doméstica (*Climex lectularius*). Los machos de esta especie copulan lacerando y perforando el abdomen de sus congéneres. Cada cópula es una herida. Las víctimas de estas agresiones, tanto hembras como machos, quedan permanentemente marcadas, y llevan consigo el esperma de sus violadores en su torrente circulatorio por el resto de

sus vidas. En palabras de Howard Ensing Evans: «La imagen de un grupo de chinches retozando de esta manera a la espera de un ágape de sangre (copulando con ambos sexos y al mismo tiempo cebándose mutuamente con su semen) hace que Sodoma parezca tan pura como el Vaticano». Ni el mismo Sade pudo imaginar un cuadro semejante. ¡Ningún culto californiano del ego cabe aquí! Deberíamos agradecer que las chinches sólo nos contemplen como comida y no como parejas sexuales... No existe una línea divisoria clara entre cuerpo y pensamiento, o entre naturaleza y cultura, como no la hay entre el agua y la tierra. El lenguaje y la sexualidad no son las estructuras bien definidas y abstractas que las llamadas «ciencias humanas» han imaginado desde hace tiempo. Antes bien, son fuerzas en continua agitación en lo más hondo de nuestros cuerpos... Nuestros cuerpos se unen y se separan: ésta es la marca de lo *social*, ya sea en ranas, seres humanos o procariotas. Hablar de cultura humana es en gran medida lo mismo que hablar de «cultura» bacteriana. Sólo quienes se dejaron deslumbrar por el tipo móvil de Gutenberg, o por la concurrente figura del «Hombre», eran capaces de imaginar otra cosa. Pero ahora el «Hombre» está al borde de la desaparición. Está siendo gradualmente borrado, como dice Foucault, «como una cara dibujada en la arena al borde del mar^[71]».

El mundo es un lugar curioso. Como hemos visto, la reproducción sexual es un subproducto de la disipación termodinámica. En su antiguo afán de intercambio genético, las bacterias se entregan desesperadamente a un sexo no reproductivo para sobrevivir. Una larga y dolorosa historia evolutiva de dos mil millones de años ligó el imperativo sexual a la reproducción. No hay nada predestinado o intrínsecamente «natural» en esta ligazón. Se trata de un subproducto de la historia contingente de los protoctistas, seres estacionalmente estresados cuya supervivencia dependía de ciclos cerrados de fusión y meiosis. Estos diminutos seres con reproducción sexual son nuestros ancestros. El sexo nos resulta placentero porque, ligado a nuestra reproducción, es la manera que tenemos de mantener a raya el equilibrio termodinámico, sin dejar de obedecer, si no acelerar, la tendencia natural del universo a deshacer gradientes a medida que avanzamos en el tiempo lineal.

Desde esta perspectiva, el sexo es secundario con respecto a la disipación termodinámica. A corto plazo (durante nuestras vidas individuales) producimos entropía manteniendo nuestra identidad, lo que necesariamente conlleva la eliminación de líquidos, gases y sólidos a través de nuestros orificios. A largo plazo aseguramos la producción de entropía a través del apareamiento, el cual produce nuevos organismos

como nosotros que continúan la especial forma de disipación conocida como vida en la siguiente generación. La Segunda Ley de la Termodinámica, más que el sexo mismo, es la base física de nuestra concentración evolutiva en la cópula y otros actos sexuales. En otras palabras, la ligazón entre sexo y reproducción es contingente. Si otros procesos disipativos pueden reemplazarla, es probable que lo hagan. Pero la desvinculación entre sexo y reproducción nunca es una simple vuelta atrás. La vida siempre retiene indicios de su tortuosa y fantástica historia.

CIBERSEXO | La tecnología, que ha entrado en la órbita sexual a muchos niveles, ha adquirido una importancia creciente para la supervivencia de la humanidad global. A medida que la tecnología mejora los estándares de vida, el crecimiento de la población comienza a frenarse. Los sociólogos lo denominan «la transición demográfica». Este fenómeno es la versión humana de la tendencia de los mamíferos a dedicar cada vez más recursos a cada vez menos descendencia^[72]. Un mamífero lactante tiene más posibilidades de supervivencia que una cría de anfibio, reptil o pez. Existe una tendencia evolutiva a pasar de la estrategia primaria consistente en producir una descendencia numerosa y abandonarla a su suerte a una estrategia menos despilfarradora y más mesurada consistente en producir menos descendencia y dedicarle más atenciones. Todo indica que estamos avanzando por esta segunda vía, pero además las nuevas tecnologías exacerban este distanciamiento entre sexo y reproducción: muchos de nosotros, en vez de generar descendencia, estamos ahora reorientando nuestras energías sexuales^[73].

El ciberespacio, en su forma actual, es sólo un presagio de los mundos informáticos sin pantallas de la comunicación futura a larga distancia. Más que fotografías digitales y conversaciones instantáneas, los futuros mundos electrónicos serán visitados, reconocidos, tocados, controlados y reproducidos, suplementando en parte a sus predecesores basados en el carbono. Subrepticamente, casi de manera insidiosa, las máquinas se integran en nuestras vidas^[74].

Howard Bloom, un historiador y evolucionista que en su anterior encarnación vocacional de agente musical promocionó a los sosias de

Peter Gabriel, Bette Midler y Michael Jackson, proyecta el futuro de la realidad virtual de la siguiente manera. Nos pide que nos imaginemos a nosotros mismos como un hombre de 70 años, apenas capaz de caminar arrastrando los pies del dormitorio al cuarto de baño, conectándose a un sistema de citas virtuales:

Uno se embarca en una aventura dentro de un mundo sintético de 360° generado por ordenador, con imágenes, sonido, movimiento y tacto. En la realidad virtual busca una mujer soltera de menos de 25 años (o 18 si el argumento seleccionado está ambientado en la época medieval) a la que le gusten los largos paseos sobre prados llenos de margaritas. Pronto la encuentra, y resulta que se parece a Michelle Pfeiffer, la estrella del cine, solo que es aún más atractiva. Ella está igualmente impresionada.

¿Por qué? Porque en una cita digital uno deja de ser un viejo arrugado y consumidor impenitente de pañales para adultos para parecerse a... Arnold Schwarzenegger... Después de un largo paseo por el campo en un marco primaveral confiándose los secretos del alma, uno entra en un estado mezcla de pasión amorosa y deseo irrefrenable... Lo que no sabe es que la persona que ha adoptado esa pose digital de cine pesa en realidad más de 130 kilos, nunca ha sido capaz de pasar a menos de 10 metros de una barra de chocolate sin incorporarla a su sistema metabólico, y tiene 13 gatos cuyas cajas no limpia más de una vez cada seis meses, impedida por su poco agraciada mole. Pero debajo de todo ese tejido adiposo y ese dulce perfume de orina felina se oculta una personalidad encantadora, y gracias a la comunicación virtual uno es el decimocuarto hombre que ella ha conducido al éxtasis sexual este mes... Por otro lado, ella es sólo la segunda mujer que uno ha conseguido conquistar desde septiembre... [Tales fachadas digitales] probablemente serán una realidad justo para cuando nos hayamos convertido en ancianos decrepitos^[75].

«La seducción del ordenador es más que utilitaria o estética; es erótica... Nuestra estrecha relación con las máquinas informáticas anuncia una relación simbiótica..., un matrimonio mental con la tecnología..., nos sentimos engrandecidos y poderosos. Nuestros corazones laten en las máquinas»^[76]. A medida que nos adentremos en el próximo milenio, los individuos podrían convertirse en células sociales y los ordenadores en elementos de redes neuronales dentro de una nueva generación bastarda: los superorganismos «cyborg»^[77]. El placer, indicativo de que estamos procediendo favorablemente, puede incrementar la probabilidad de repetir las interacciones tecnológicas. Pero sería un error considerar nuestro libidinoso apego a las máquinas, nuestra fascinación por la tecnología,

como antinatural: este apego, incorporado a los grandes ciclos sexuales de la vida, incrementa el flujo de información, además del acceso a la energía, su reciclado y su degradación. Así como el orgasmo es la experiencia de una onda de placer que recorre el cuerpo individual, relacionada con la reducción de gradientes vía reproducción, el placer de la conexión electrónica con personas distantes amplía las actividades reproductoras y reductoras de gradientes de los cuerpos colectivos. En otras palabras, Eros puede metamorfosearse perdiendo su función en los individuos, pero asumiendo otra nueva en las sociedades futuras.

El espíritu humano está destinado a descubrirse a sí mismo con creciente frecuencia extendido al dominio de la radiación electromagnética. La predicción más orgiástica de la ciencia ficción es la repetidamente soñada evolución de la humanidad en una especie de energía pura. No debemos caer en la tentación y entregarnos a la fantasía, fruto del fervor religioso del fin del milenio, de que podemos evadirnos por completo de nuestros propios cuerpos para existir en el ciberespacio o en forma de bits almacenados en algún medio de registro^[78]. Ahora bien, lo cierto es que ya hemos desplegado nuestras actividades a lo largo del espectro electromagnético. Como cazadores y recolectores, nuestros cuerpos absorbían la luz y emitían radiación infrarroja. Mediante la televisión, los rayos X y la radioastronomía, hoy emitimos y captamos mensajes complejos procedentes del espacio exterior a lo largo de un espectro mucho más amplio; y nuestras tecnologías de vídeo, grabación y digital nos permiten guardar imágenes y pensamientos con creciente fidelidad a lo largo de periodos de tiempo más largos.

A pesar del alcance y la aparente singularidad de nuestra interconectividad mediada por la tecnología, la evolución de sociedades densamente agrupadas hacia organismos no es un fenómeno nuevo. El número siempre ha constituido una fuerza. Hace quinientos millones de años había células marinas agregadas que excretaban iones de calcio para formar caparazones de fosfato cálcico. Más tarde, como un equipo de construcción que coloca vigas de hierro, algunas comenzaron a formar esqueletos internos de fosfato cálcico. Reproduciéndose, las células se organizaron en organismos. En cierto modo, su tecnología era más avanzada que la nuestra, ya que el calcio utilizado era en origen una toxina

que, de manera oportunista, convirtieron en material de construcción.

A lo largo de miles de millones de años, conforme ha ido globalizándose, la vida ha incorporado cada vez más elementos químicos en sus cuerpos dispersos. Hoy la vida emplea el silicio para su comunicación a escala global. No en vano el óxido de silicio es el componente mayoritario de la corteza terrestre. Pero, en vez de usarlo para construir cuerpos, la vida lo emplea para producir hipercerebros. Los ordenadores organizan sus conexiones mediante componentes de silicio en vez de neuronas. Los semiconductores parecen estar suplantando a los neurotransmisores. De hecho, más que suplantarlos, los circuitos integrados, tarjetas y otros componentes informáticos producidos criogénicamente constituyen una expansión de los neurotransmisores. Se están incorporando en la carne de la vida. Hoy una sola fibra óptica del tamaño de un cabello transmite hasta un billón de bits por segundo, lo que equivale a transmitir la totalidad de los números publicados del *Wall Street Journal* en menos de un segundo^[79]. La vida, siempre creciendo y siempre transformando e intercambiando materia con su entorno, está incorporando materiales viejos (la sílice del cuarzo y la arena) en la última organización biosférica. Expuesta a las presiones derivadas de su propio crecimiento, hace tiempo que la vida se expandió del agua a la tierra y de la tierra al aire. Ahora, en la antesala de su expansión al espacio exterior, la vida profundiza en el espacio interior. La vida organiza átomos y electrones para formar cibersuperorganismos con zarcillos vivientes mucho más allá de la Medusa y las quimeras de la mitología griega.

La actual interdependencia tecnológica, predecimos nosotros, alterará espectacularmente las vidas sexuales de nuestros descendientes. Cuando hacemos el amor retrocedemos en el tiempo. Producimos semen y lubricante vaginal, fluidos corporales reminiscentes del entorno acuático celular ancestral. En la ovulación, la menstruación y la eyaculación vertemos nuestros óvulos, epitelios uterinos y espermatozoides protoctistoides. Hace dos mil millones de años no había ni plantas ni hongos ni animales sobre la superficie de la Tierra. Desde hacía más de mil millones de años no había habido otra cosa que bacterias. Luego evolucionaron las células nucleadas que dieron lugar a los protoctistas de reproducción sexual, antecesores de las plantas, los hongos y los animales.

[LÁMINA 58] Pero, a pesar de su compleja evolución y sus elaborados cuerpos, plantas, hongos y animales siguen retornando cada generación al estado de una o pocas células^[80]. El apareamiento de núcleos sexuales sigue teniendo lugar en el seno de tejidos cálidos y húmedos que contienen fluidos corporales. El cibersexo, al permitir el acoplamiento electrónico a distancia, podría superar este antiguo y desconcertante imperativo en un número creciente de individuos, pero la continuidad de la especie humana requiere que el ciclo húmedo primigenio persista en al menos unos cuantos.

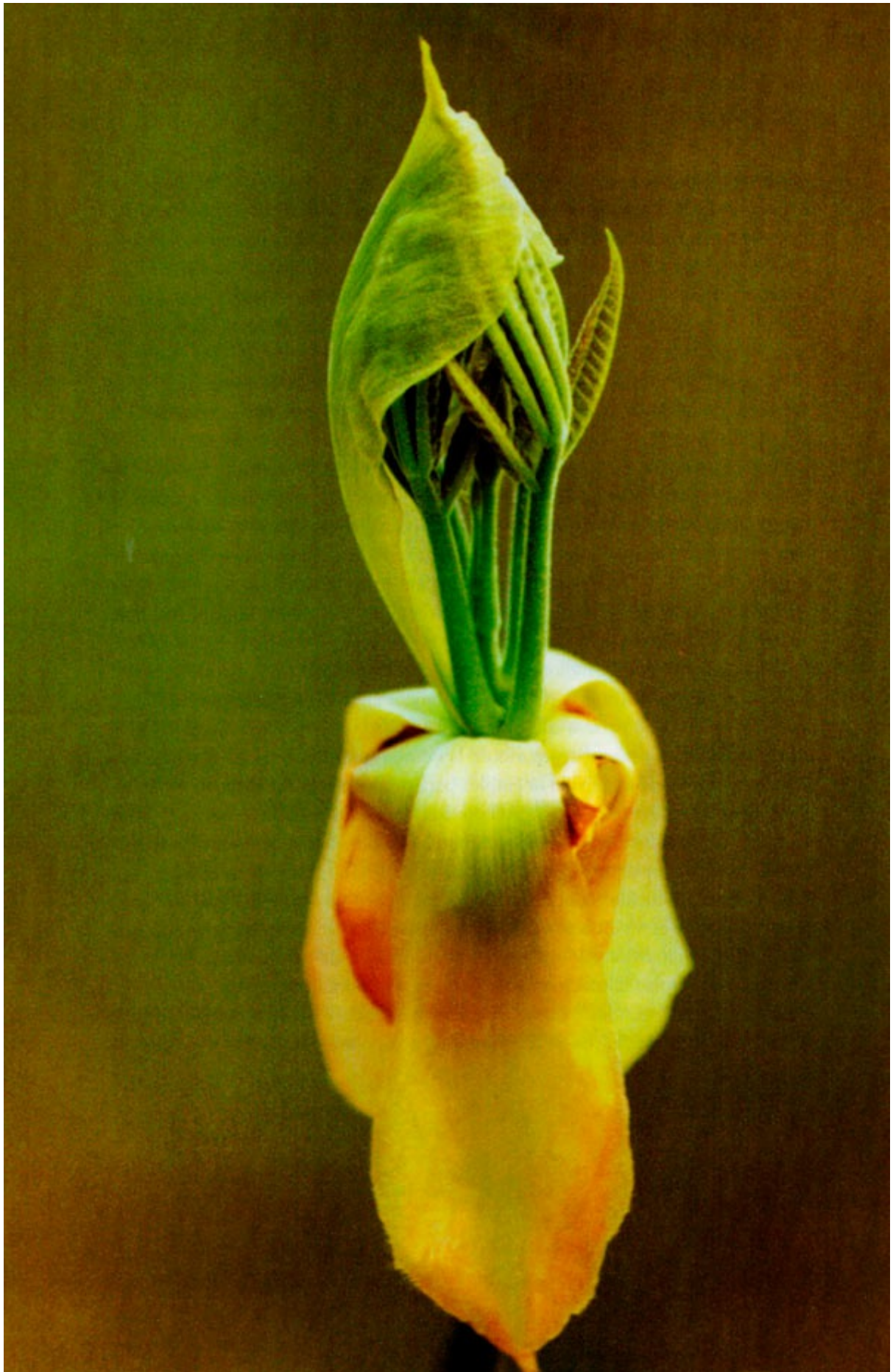


LÁMINA 58

La sexualidad nubil de las flores tiene su origen evolutivo en las hojas. Hojas jóvenes en un brote de castaño de indias (*Aesculus hippocastanum*).

[Lois Brynes]

La emoción del correo electrónico, los mensajes instantáneos y las conversaciones a distancia es la emoción de la conexión, del lazo, de la comunicación. Con la interconexión, el comercio sexual pierde importancia frente al comercio conversacional. El deseo a distancia facilita la interacción «cara a pantalla» y la intimación instantánea entre miríadas de parejas tanto como la interacción romántica o prematrimonial cara a cara. La tecnología de la comunicación a distancia proporciona a la humanidad el potencial para reorganizarse según la información y no la localización; esto posibilita estratificaciones y especializaciones a medida que millones, y después miles de millones, de personas localizadas por toda la superficie planetaria se vayan reorganizando de acuerdo con el flujo de información.

El escritor Gregory Stock ha acuñado el término «metahombre»^[81]. Antes, el geoquímico ruso Vladimir Vernadsky y el paleontólogo y teólogo francés Teilhard de Chardin escribieron sobre la «noosfera»^[82]. Nosotros hemos hablado de biosferas gaianas y de una «onda bióntica»^[83]. Pero, hasta ahora, no hay un nombre aceptado para las redes crecientemente integradas de seres humanos y máquinas interdependientes. Los medios de comunicación hablan de las autopistas de la información; pero estas autopistas no conducen más que a sí mismas y a una conectividad ulterior entre la gente. Lejos de ser rutas de viaje, las nuevas «superautopistas» de la información reducen la necesidad de locomoción real^[84]. Desde el punto de vista evolutivo, las crecientemente filigranadas redes de comunicación global instantánea (motivadas por el deseo humano, a menudo sexual, de estar conectados) se describe mejor como una nueva infraestructura neural y perceptiva, la inteligencia distribuida de un ser global multiespecífico en desarrollo. No tenemos por qué ser más conscientes de esta inteligencia de lo que los bastones retinianos sensibles a la luz y sus neuronas asociadas son conscientes de nuestra identidad e inteligencia visual.

¿Está la reproducción sexual humana en trance de desaparecer? ¿No es la clonación animal, combinada con el control de la natalidad, un reflejo en el nivel social de la reproducción asexual de nuestras células tisulares, por un lado, y de los límites impuestos a su multiplicación en otro tiempo sin trabas, por otro? Los miembros de la especie *Stentor coeruleus*, un ciliado azul presente en charcas y lagos de agua dulce, intentan de vez en cuando aparearse, pero cuando lo hacen ambos actores mueren en menos de una semana^[85]. Aunque en estos protoctistas vuelve a aflorar ocasionalmente el impulso de fundirse, la conjugación sexual es seleccionada negativamente, lo que la convierte en un punto muerto evolutivo. Huelga decir que, aunque de tarde en tarde se aparee, este organismo no requiere el sexo para su reproducción. De hecho, ¡debe rehuirlo si quiere reproducirse! Hasta ahora, y como especie, los seres humanos sí necesitan el sexo para reproducirse. Pero posiblemente llegue un día, quizá no tan lejano, en que el sexo y la reproducción se habrán desligado por completo en nuestra especie. Por muy incomparable que nos parezca, la tendencia hacia la moderación reproductiva dependiente de la densidad, incluyendo el desacoplamiento del sexo y la reproducción, no es nada nuevo. Se ha dado muchas veces en la historia de la evolución, especialmente en la transición de las sociedades de células y comunidades microbianas a los organismos de orden superior.

Nos gusta contemplarnos como seres especiales, superiores al resto de formas de vida, con nuestra tecnología como rasgo distintivo. Pero, en realidad, la vida siempre ha sido «tecnológica». Las bacterias, los protoctistas y los animales no humanos incorporan a su organismo materiales estructurales externos y construyen moradas. Nuestras máquinas, lo mismo que nosotros, forman parte del nexo extensivo de la vida planetaria que surgió, dejando trazas en el registro fósil, hace bastante más de 3000 millones de años. Todos los organismos sienten. Todos están vivos. Todos pueden elegir y alterar su entorno, aunque sea a una escala minúscula. Es más, todos están conectados (a través del aire, el agua y el suelo). La tecnología procede de la vida, y no al revés.

Cada uno de nosotros es un componente del superorganismo humano urbanizado. La gente, unida por los cables eléctricos, las cañerías, el alcantarillado, los conductos de gas y aire, los cables de fibra óptica y los

mercados globales, obra en consonancia. No somos independientes ni de los demás ni de la biosfera. Juntos ingerimos no sólo alimento, sino carbón, hierro, silicio y petróleo, este último a una tasa de más de 70 millones de barriles diarios. Coligados por la nación, la cultura y el lenguaje, mantenemos comunidades que incluyen ciudades, carreteras y flotas de submarinos nucleares.

Todos los organismos visibles a simple vista son superorganismos. El ejemplo más familiar es uno mismo, una masa de miles de millones de células termorregulada a 37,5°C. Las bacterias, los microbios mayores, los insectos sociales y hasta algunos roedores forman unidades vivientes cuyos componentes sólo existen en el agregado. Los seres humanos estamos cruzando el umbral que separa las sociedades de los grupos interdependientes hasta el punto de no poder sobrevivir desligados de los otros o desconectados de nuestras máquinas.

Necesitamos de la agricultura (incluyendo tractores y camiones), la medicina (incluyendo hospitales y escáneres para diagnóstico), la industria (con sus equipos y sus buques y camiones cisterna) para sobrevivir y mantener las cifras de población urbana actuales. Lo que ayer era lujo hoy es necesidad. Cualquier individuo desempleado o aislado de nuestra comunidad es más probable que esté estresado, deprimido y hasta fatalmente enfermo. La interconexión de miembros de sociedades en superorganismos ha seguido verificándose desde que las células se agregaron en «individuos» en la Tierra arcaica. Los automóviles, en otro tiempo meros vehículos de placer absolutamente prescindibles, son ahora esenciales para la vida laboral y el sustento de millones de personas. Los ordenadores, en otro tiempo meras curiosidades matemáticas, se integran de manera creciente en nuestros sistemas de supervivencia. Los teléfonos que nos interconectan pueden marcar la diferencia entre la vida y la muerte. Los canales electrónicos diseminados por la Tierra representan un nuevo capítulo humano en la antigua epopeya evolutiva de agregaciones y fusiones de seres vivos. Reduciendo su omnipotencia y moderándose para formar colectivos más poderosos que cualquiera de sus miembros por separado, las antiguas confederaciones, en los niveles de organización superiores, se convierten en individuos. El sexo, en sus muchas variantes y con su violenta y abigarrada historia, ha sido esencial en el pasado para la

reproducción humana. Ahora esas mismas pasiones sexuales están haciéndose cruciales para nuevos propósitos, a medida que los seres humanos, integrados en la sociedad, se integran ulteriormente en superorganismos cibernéticos.

AGRADECIMIENTOS | Como el acto sexual mismo, que siempre requiere más de un ser vivo, la confección de un libro nunca es un acto de los autores solos. Inspirados y ayudados por el incansable esfuerzo de Peter N. Nevraumont, sólo su generosidad y la de otros amigos hizo posible *¿Qué es el sexo?* Damos gracias especiales a Lois Brynes, Michael Chapman y Michael Dolan por su colaboración en la preparación del manuscrito y la documentación. Robin Kolnicki nos sugirió diversas líneas de investigación y nos ofreció una excelente asistencia técnica. Tonio Sagan nos animó entre bastidores. Agradecemos a Howard Bloom que nos permitiese compartir su trabajo sobre selección grupal y usar sus reflexiones sobre el cibersexo. Steven Shaviro nos permitió magnánimamente citar partes de su obra sobre el posmodernismo. Gracias a Terry Bristol por hospedarnos en Oregon y a Matt Rotchford por conducirnos al «Castillo del Caos», la casa de Jerry Andrus en Albany, a quien agradecemos que nos permitiera publicar su maravilloso «parabox», que aparece en la página 174. También recibimos ayuda de muchos estudiantes, colegas y amigos, entre ellos Ricardo Guerrero, Aaron Haselton, Jeremy Jorgensen, Kelly McKinney, Seth! Leary, Lorraine Olendzenski, Donna Reppard y Eric Schneider.

Damos las gracias a Charlene Forest, del Brooklyn College, por fotografiar el apareamiento de sus *Chlamydomonas* para nosotros en el último minuto de la producción del libro.

Estamos en deuda con la artista Kathryn Delisle, quien creó y recreó sus claras ilustraciones a partir de nuestras confusas notas, y con José Conde por su maravilloso diseño.

Damos las gracias a Ann J. Perrini, presidente de Nevraumont Publishing, y a Simone Nevraumont, editora adjunta, por sus muchas contribuciones al éxito de este libro, y a Katherine Hasal por su

competente corrección del manuscrito.

El apoyo financiero para nuestra contribución a la investigación científica fundamental en el laboratorio Margulis procede primordialmente de la NASA. La Fundación Richard Lounsbery y el Colegio de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad de Massachusetts en Amherst también han subvencionado nuestro trabajo.



LYNN MARGULIS (Chicago, 5 de marzo de 1938 - Amherst, 22 de noviembre de 2011). Zoóloga estadounidense titulada en Zoología y Genética por la Universidad de Wisconsin y Doctora en Genética por la Universidad de California-Berkeley. Catedrática de biología de la Universidad de Massachussetts y codirectora del departamento de biología planetaria de la NASA.

A finales de los años 60, el físico británico James Lovelock, con el respaldo científico de Lynn Margulis, lanzó la polémica y célebre hipótesis de que la Tierra y todos sus seres vivos constituyen una entidad compleja autorregulada, al que llamaron Gaia. Margulis es autora de la teoría de la simbiogenésis, que explicaría el origen de las primeras células con núcleo a partir de la fusión de bacterias primitivas hace miles de millones de años.

En su teoría endosimbiótica, propone que las células eucariotas (células de animales, plantas, hongos y protoctistas) se habrían originado a partir de diferentes células procariotas (sin núcleo) mediante una relación simbiótica que llegó a ser permanente. La expuso por primera vez en 1967. Las investigaciones de las últimas décadas han venido confirmando en casi todos sus puntos su teoría. Se descubrió, por ejemplo, que las estructuras moleculares de los cloroplastos y las mitocondrias están más relacionadas

con bacterias extrañas que con las células en las que están incorporados desde hace mil o dos mil millones de años.

Junto con el científico Robert Whittaker, propuso una clasificación de los seres vivos en cinco reinos a partir de la simbiogénesis (Monera, Protoctistas, Plantas, Animales y Hongos), en vez de los tres «vigentes» (Mineral, Vegetal y Animal).

Autora de casi 200 artículos de todo tipo. Miembro de la Academia nacional de las Ciencias de Estados Unidos desde 1983, de la Academia Rusa de Ciencias Naturales desde 1997 y de la Academia Americana de Artes y Ciencias desde 1998. En 1999 recibió la Medalla Nacional de Ciencia.

Estuvo casada desde 1957 a 1965 con el astrónomo Carl Sagan y es madre de Dorion Sagan, Jennifer Margulis, Jeremy Sagan y Zachary Margulis-Ohnuma.

DORION SAGAN (Madison, 1959). Es hijo del astrónomo y divulgador científico Carl Sagan y de la bióloga Lynn Margulis, con la que ha escrito varios libros, en especial sobre la evolución. Es colaborador habitual del *New York Times* y de la revista *Natural History*.

Apéndice:

VIDAS SEXUALES

Tipos y ejemplos de géneros

SEXO BACTERIANO (véanse láminas 8-11)

SUPERREINO PROCARIOTAS (REINO BACTERIAS)

En estos organismos los genes están sueltos (no contenidos en núcleos delimitados por una membrana). No hay estructuras celulares (orgánulos) como mitocondrias o cloroplastos. Las bacterias han ejercido una influencia más profunda sobre la biosfera que cualquier otra forma de vida durante más de 3000 millones de años. Sus modalidades de sexualidad se resumen en la lámina 9. En el sexo bacteriano un par sexual (el receptor) experimenta un cambio genético (se convierte en un nuevo organismo) adquiriendo genes del otro par, una bacteria donante. Dado que el número de organismos no aumenta (no se generan nuevos organismos), el sexo bacteriano no es un proceso reproductivo.

SUBREINO ARQUEOBACTERIAS

Fílum euriarqueotas (metanógenos, halófilos) *Halobacter*, *Methanococcus*
Fílum crenarqueotas (termoacidófilos) *Pyrodictum*, *Thermoplasma*

SUBREINO EUBACTERIAS

Fílum proteobacterias (bacterias purpúreas) *Escherichia*, *Pseudomonas*
Fílum espiroquetas *Spirosymplokos*, *Treponema*
Fílum cianobacterias (fotosintetizadores aerobios) *Nostoc*, *Anabaena*
Fílum saprospiras (bacterias fermentadoras deslizantes) *Bacteroides*,
Cytophaga

Fílum cloroflexos (fototrofos verdes no sulfúreos) *Chloroflexus*
Fílum clorobios (bacterias verdes sulfúreas anaerobias) *Chlorobium*
Fílum afragmabacterias (bacterias sin pared celular) *Mycoplasma*,
Spiroplasma
Fílum endospóreas (bacilos formadores de esporas) *Bacillus*, *Clostridium*
Fílum pirelulas (bacterias pedunculadas con paredes proteicas) *Pirellula*
Fílum actinobacterias (bacterias semejantes a hongos) *Streptomyces*
Fílum deinococos (bacterias grampositivas radiorresistentes) *Deinococcus*
Fílum termotogas (fermentadores termófilos) *Thermotoga*

Los detalles de las vidas sexuales de las arqueobacterias y eubacterias no se conocen en su totalidad.

SUPERREINO EUCARIOTAS

Los eucariotas están constituidos por células más grandes y complejas, con núcleos delimitados por una membrana; el ADN está organizado en cromosomas nucleares (dos como mínimo, y a veces más de mil). Todos se derivaron del hipersexo (véase lámina 7), es decir, de antiguos consorcios simbióticos cuyos constituyentes menores comparten ancestros comunes con distintos tipos de bacterias modernas. Los núcleos de las células eucarióticas son bien haploides bien diploides (lo que significa que contienen uno o dos juegos completos de cromosomas). El proceso de la meiosis, que divide por dos el número de cromosomas, asegura que la fusión ulterior de las células sexuales (por lo general haploides) restaurará la diploidía en el cigoto. La sexualidad eucariótica, pues, implica la meiosis, y por lo general está acoplada a la reproducción (en plantas y animales, por ejemplo, a partir del huevo fecundado sexualmente se desarrolla un nuevo organismo).

REINO PROTOCTISTA

Todos los protoctistas evolucionaron a partir de simbiosis integradas permanentes entre distintos tipos de bacterias (las algas verdes, por ejemplo, se derivaron de una asociación permanente entre arqueobacterias, eubacterias y cianobacterias). Los protoctistas incluyen algas, protozoos, plasmodios, laminarias gigantes y muchas otras formas de vida. Suman

unas 250 000 especies. Los protoctistas son los organismos en los que evolucionó la reproducción celular mitótica y el sexo meiótico. No forman ni embriones ni esporas fúngicas. Todos son eucariotas, esto es, están constituidos por células nucleadas. Muchos no tienen nombres comunes.

clave

+ = Presencia de sexo meiótico en al menos una especie

– = Ausencia de sexo meiótico en todos los taxones estudiados

? = Sexualidad posible pero no confirmada

Amitocondriados (hipocondrios, arqueozoos; carecen de mitocondrias)

+ Fílum arqueoprotistas *Pelomyxa*, *Tricbomonas*, *Giardia*

+ Fílum microsporidios *Glugea*, *Vairamorpha*

Ameboides

– Fílum rizópodos (amebas desnudas y con vainas) *Ameba*, *Dictyostelium*

+ Fílum granulorreticulosos (foraminíferos) *Globigerina*, *Rotaliella*

? Fílum xenofióforos (grandes protoctistas de aguas profundas) *Galatheammmina*

+ Fílum mixomicetes (plasmodios) *Cercomonas*, *Physarum*

Alveolados (con cavidades llenas de gas o líquido)

+ Fílum dinomastigotos (algas «de marea roja») *Gonyaulax*, *Gymnodinium*

+ Fílum cilióforos (ciliados) *Gastrostylax*, *Paramecium*

+ Fílum apicomplexos (parásitos celulares) *Eimeria*, *Toxoplasma*

Mastigotos nadadores

– Fílum haptomónadas (plancton formador de caliza) *Emiliana*, *Prymnesium*

– Fílum criptomónadas *Cryptomonas*, *Cyathomonas*

– Fílum discomitocondriados (protistas con crestas mitocondriales discoidales) *Naegleria*, *Trypanosoma*, *Euglena*

Heterocontos (portadores de dos undulipodios desiguales)

– Fílum crisomónadas (algas doradas) *Ochromonas*, *Synura*

- Fílum xantófitos (algas verdeamarillentas) *Ophiocytium*
- Fílum eustigmatófitos (algas verdeamarillentas) *Vischeria*
- + Fílum bacilariófitos (diatomeas) *Coscinodiscus*, *Navícula*
- + Fílum feófitos (algas pardas; sargazos) *Ascophyllum*, *Fucus*
- + Fílum laberintulomicetes (plasmodios reticulares) *Labyrinthula*, *Thrastochytrium*
- + Fílum plasmodióforos (parásitos vegetales plurinucleados) *Sorodiscus*
- + Fílum oomicetes (plasmodios ovoides) *Phytophthora*, *Saprolegnia*
- Fílum hifoquitridiomycetes (plasmodios acuáticos) *Anisopidium*, *Canteriomyces*

Parásitos formadores de propágulos

- Fílum haplospóreos (parásitos unicelulares esporógenos) *Haplosporidium*
- Fílum paramíxidos (parásitos pluricelulares esporógenos) *Marteilia*
- + Fílum mixospóreos (parásitos de peces formadores de cnidocistos) *Myxobolus*

Algas conjugadas (algas marinas con géneros complementarios)

- + Fílum rodófitos (algas rojas) *Amphiroa*, *Polysiphonia*
- + Fílum gamófitos (algas verdes conjugadas) *Micrasterias*

Heliozoos y radiolarios (plancton estrellado formador de tecas)

- + Fílum actinópodos *Acanthocystis*, *Acantharia*

Tipos ancestrales

- + Fílum clorófitos (algas verdes, ancestros de las plantas) *Acetabularia*
- + Fílum quitridiomycetes (ancestros de los hongos) *Blastocladiella*
- Fílum zoomastigotos (ancestros de los animales) *Jakoba*, *Acronema*, *Zelleriella*

REINO ANIMAL

Todos los animales derivan de protoctistas, muy probablemente del tipo zoomastigotos. Se desarrollan a partir de una blástula producida sexualmente. Los grupos que presentan apomixis (uniparentalidad resultado de una pérdida secundaria de la biparentalidad, en este caso

partenogénesis) en al menos una especie se señalan con «+»; la apomixis probable pero no confirmada se señala con «?». Los demás tipos taxonómicos practican la sexualidad biparental.

Esponjas y mesozoos

- ? Fílum placozoos *Trichoplax*
- + Fílum poríferos (esponjas) *Gelliodes*
- ? Fílum rombozoos *Dicyema*
- ? Fílum ortonéctidos *Orthonectis*

Radiados (animales con simetría radial)

- + Fílum cnidarios (medusas, corales) *Craspedacusta*, *Hydra*
- Fílum ctenóforos *Bolinopsis*, *Ctenoplana*

Gusanos aperitoneales (sin celoma ni cavidad corporal)

- Fílum gnatostomúlidos *Problognathia*
- + Fílum platelmintos (gusanos planos) *Planaria*, *Procotyla*
- + Fílum gastrotricos *Tetranchyroderma*
- + Fílum rotíferos *Brachionus*
- Fílum quinorrincos *Echinoderes*
- Fílum loricíferos *Nanaloricus*, *Pliciloricus*
- Fílum acantocéfalos *Leptorhynchoides*, *Macracanthorhynchus*
- Fílum nematodos *Rhabdias*
- Fílum nematomorfos *Gordius*
- Fílum priapúlidos *Tubiluchus*
- Fílum entoproctos *Barentsia*, *Loxosoma*

Gusanos peritoneales (con celoma o cavidad corporal)

- Fílum rincocelos (nemertinos) *Prostoma*
- Fílum sipuncúlidos *Themiste*
- Fílum equiúridos *Metabonellia*
- Fílum anélidos (gusanos segmentados) *Lumbricus*, *Hirudo*
- Fílum pogonóforos (gusanos barbados) *Riftia*
- + Fílum moluscos (almejas, caracoles, calamares) *Ensis*, *Crepidula*, *Loligo*

Invertebrados con patas inarticuladas

Fílum tardígrados (osos acuáticos) *Echiniscus*
Fílum pentastómidos *Linguatula*
Fílum onicóforos (gusanos andadores) *Speleoperipatus*

Artrópodos (con patas articuladas)

Fílum quelicerados (arañas, límulos) *Araneus*, *Limulus*
+ Fílum mandibulados (insectos, ciempiés)
Fílum crustáceos (cangrejos, gambas, percebes) *Balanus*, *Parthenope*

Lofoforados (provistos de lofóforos, órganos captadores de alimento en forma de herradura y ciliados)

Fílum briozoos *Plumatella*, *Symbion*
Fílum foronídeos *Phoronis*, *Phoronopsis*
Fílum braquiópodos *Terebratulina*

Deuteróstomos acordados (boca secundaria y ausencia de notocordio, el precursor embriónico de la espina dorsal)

Fílum equinodermos (estrellas y erizos de mar) *Asterias*, *Cucumaria*
Fílum quetognatos (gusanos saeta) *Bathybelos*, *Sagina*
Fílum hemicordados *Ptychodera*, *Saccoglossus*

Deuteróstomos cordados (boca secundaria, notocordio)

Fílum urocordados (ascidias o tunicados) *Didemnum*
Fílum cefalocordados *Branchiostoma*
+ Fílum craneados (peces, anfibios, reptiles, aves, mamíferos) *Homo*

REINO MICOTA

Los hongos derivan de los protocistas, muy probablemente de los quitridiomycetes. Todos se desarrollan a partir de esporas (en la fase haploide) de origen sexual o no. El signo «+» indica apomixis (uniparentalidad resultado de una pérdida secundaria de la biparentalidad) en al menos una especie. La mayoría de especies practica el sexo biparental.

+ Fílum zigomicetes (mohos) *Mucor*, *Rhizopus*
+ Fílum basidiomicetes (setas) *Agaricus*, *Schizophyllum*

+ Fílum ascomicetes (hongos imperfectos, líquenes, levaduras)
Neurospora

REINO VEGETAL

Todas las plantas proceden de protocistas, con toda probabilidad de las algas verdes (clorófitos). Todas se desarrollan a partir de esporas (en la fase haploide) y de embriones producidos sexualmente (en la fase diploide). El signo «+» indica apomixis (uniparentalidad resultado de una pérdida secundaria de la biparentalidad) en al menos una especie.

Fílum briófitos (musgos) *Polytrichum*, *Takakia*

+ Fílum hepatófitos (hepáticas) *Marchantia*

Fílum antocerófitos *Anthoceros*

Fílum esfenófitos (equisetos) *Equisetum*

+ Fílum filicinófitos (helechos) *Osmunda*, *Polypodium*

Fílum ginkgófitos *Ginkgo*

Fílum coniferófitos (coníferas) *Pinus*, *Taxus*

Fílum gnetófitos *Ephedra*, *Welwitschia*

Fílum cicadófitos (palmeras de sagú) *Cycas*, *Zamia*

+ Fílum antófitos (plantas con flores) *Aster*, *Avena*, *Oenothera*

Glosario

ADN Ácido desoxirribonucleico, molécula bicatenaria larga compuesta por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y fósforo. La doble hélice que lleva inscritos los genes de células y organismos.

Alelo químico Hormona medioambiental; una sustancia producida por un organismo y liberada en el medio que provoca la respuesta de otro organismo distinto. Los ejemplos incluyen toxinas transportadas por el aire o el agua, atractivos sexuales, aromas frutales y efluvios florales que imitan el olor de la carne putrefacta para atraer a las moscas. Una feromona es cualquier alelo químico que actúa sobre miembros de una misma especie; las feromonas sexuales son hormonas producidas por un género que inducen una respuesta en el género complementario. Véase *feromona*.

Anisogamia Desigualdad de tamaño o forma entre las células sexuales (gametos) que se fusionan (los óvulos y espermatozoides de los animales, por ejemplo, son anisogametos, mientras que los dos gametos iguales de *Chlamydomonas* son isogametos). La anisogamia se da en animales y plantas. Véase *isogamia*.

Apareamiento discriminado Selección sexual no aleatoria tal que el apareamiento de individuos similares es más exitoso (produce más descendencia) que el de individuos disímiles. El apareamiento exitoso entre parientes cercanos es discriminado, mientras que el apareamiento productivo entre miembros de poblaciones no

emparentadas es indiscriminado.

Apomixis (adj. apomíctico) Meiosis o fecundación uniparental que elude el apareamiento biparental (*mixis*). Un ejemplo serían los «partos virginales».

Apoptosis Muerte celular programada; en contraste con el citocidio (véase más adelante), la muerte celular codificada genéticamente acontece durante el desarrollo normal.

ARN Ácido ribonucleico, molécula unicatenaria larga estrechamente relacionada con el ADN, que actúa como mensajero entre éste y las proteínas y desempeña otros papeles esenciales para las células y organismos.

Autogamia Autofecundación; fusión de dos núcleos o células enteras derivados de un solo progenitor, núcleo o célula.

Autopoyesis Automantenimiento; conjunto de principios definitorios de la vida que rigen en sistemas internamente organizados, autolimitados y bordeados por una membrana, que mantienen dinámicamente su identidad en un entorno cambiante. Las entidades autopoyéticas son capaces de renovar y reparar sus partes componentes a expensas, en última instancia, de la energía solar.

Biparentalidad Condición de tener dos progenitores; característica de los organismos generados sexualmente.

Blástula Embrión característico de los animales, siempre *diploide* (con dos juegos de cromosomas) porque se desarrolla a partir de la fusión de un huevo y un espermatozoide. Una célula huevo fecundada se divide por fisión binaria para formar un animal inmaduro que en este estado semeja una esfera hueca; la blástula es el rasgo distintivo del reino animal.

Célula embriónica Célula inicial de la que se derivan estirpes celulares identificables en el embrión. Las células totipotentes de los embriones animales pueden diferenciarse en células oculares o sanguíneas, según su localización. En las plantas, la célula apical es una célula embriónica cuyas descendientes pueden formar capas de tejido específicas como la «piel» vegetal (epidermis) o la pulpa (médula).

Cinetocoro Centrómero: el motor cromosómico que desplaza los cromosomas a lo largo de los microtúbulos hasta los polos celulares durante la división celular mitótica y meiótica. Se trata de una estructura de ADN y proteína usualmente localizada en una región constreñida del cromosoma que mantiene unidas las cromátidas; también es el punto de fijación de las fibras del huso durante la *mitosis* y la *meiosis*.

Citocidio Muerte celular no programada a causa de algún traumatismo; la membrana celular se rompe y el contenido celular se vierte al medio.

Conjugación Apareamiento celular entre géneros complementarios que se traduce en recombinación genética. En las bacterias (procariotas) las células se fusionan en el punto a través del cual se verifica la transmisión de material genético del donante al receptor. (No todas las modalidades de sexo procariota son conjugaciones). En los eucariotas la conjugación hace referencia al apareamiento isógamo: la fusión de gametos, núcleos gaméticos u organismos de igual tamaño y/o forma.

Convergencia Evolución convergente o paralela que conduce al desarrollo independiente de estructuras o conductas similares en poblaciones no directamente emparentadas pero sometidas a las mismas presiones selectivas (un ejemplo es la evolución de diseños corporales parecidos en tiburones y delfines).

Cromátida Medio cromosoma (tras la replicación de la cromatina). Las cromátidas se visualizan en la mitosis cuando se desplazan («se segregan») a cada polo de la célula. Cuando la célula se convierte en dos las cromátidas pasan a ser cromosomas (véase lámina 23).

Cromatina Material fácilmente teñible que constituye los cromosomas, a saber, el ADN junto con las historias y otras proteínas.

Cromosoma Estructura de cromatina que porta los genes, por lo general visible sólo durante la división nuclear mitótica o meiótica en células teñidas o con cromosomas grandes.

Cuerpos apoptóticos Fragmentos liberados por las células en proceso de apoptosis, consistentes en pequeñas estructuras membranosas ricas en ADN.

Dicromatismo sexual Un tipo de dimorfismo sexual caracterizado por diferencias de coloración entre machos y hembras de la misma especie. Es corriente en aves.

Dimorfismo sexual Diferencias de tamaño, forma, conducta y/o metabolismo entre machos y hembras de la misma especie. Presente en algas, algunas plantas con flores y la mayoría de los mamíferos.

Diploidía Condición de las células eucarióticas cuyo núcleo contiene dos juegos completos de cromosomas (núcleo diploide). Se denota por $2n$ para distinguirla de la haploidía (un solo juego de n cromosomas). Véase *haploidía*.

Endosimbiosis Condición de un organismo que vive dentro de otro en asociación simbiótica, bien dentro de las células (endocitobiosis, como la de las bacterias que acabaron convirtiéndose en

mitocondrias o cloroplastos) bien en los espacios intercelulares (como los protoctistas de las termitas o las asociaciones entre hongos y raíces).

Entropía Término termodinámico que expresa el grado de desorden de un sistema. La entropía del universo entero, y de la mayoría de sistemas que contiene, tiende a aumentar. Aunque la sustancia química constituyente es la misma (dos partes de hidrógeno por una de oxígeno, es decir, H_2O), la entropía asociada al vapor es mayor que la del agua líquida y ésta es mayor que la de los cristales de hielo.

Especie Conjunto de organismos identificados, clasificados y agrupados bajo un mismo nombre, usualmente reconocibles por sus rasgos corporales, metabolismo y comportamiento. Los miembros de una misma especie comparten la mayoría de sus genes; los apareamientos entre individuos pertenecientes a especies animales o vegetales diferentes no son fértiles.

Eucariota Célula nucleada u organismo formado por células de esa clase.

Evapotranspiración Evaporación del agua a través de los poros foliares de las plantas, lo cual crea una presión negativa que hace ascender hasta las hojas el agua absorbida por las raíces.

Fagocitosis (adj. fagocítico) Modo de nutrición heterotrófica y defensa inmunitaria que implica la ingestión celular de partículas sólidas. Es característica de amebas y macrófagos (un tipo de glóbulos blancos), cuyos pseudópodos (protuberancias citoplásmicas) se extienden engullendo bacterias invasoras u otras partículas transportadas por la sangre.

Fecundación Fusión de dos células sexuales (haploides) o bien de los

núcleos que albergan los cromosomas para formar un núcleo diploide (hongos, diversos protoctistas), un huevo fecundado (animales, muchas plantas y protoctistas) o un saco embrionario (plantas con flores). El resultado más corriente de la fecundación es el cigoto, una célula agrandada con un núcleo diploide.

Fenotipo Constitución física de un organismo respecto de rasgos específicos y/o un conjunto de condiciones ambientales en contraste con la base genética subyacente a esos rasgos (*genotipo*).

Feromona Sustancia química liberada por un organismo en el medio circundante que influencia el comportamiento o el desarrollo de sus congéneres. Una feromona sexual es aquella que es producida por un género e induce una respuesta en el género complementario.

Fisión binaria Modo de reproducción asexual en el que el progenitor (organismo, colonia, célula eucariota o célula procariota) se divide en dos vastagos aproximadamente iguales.

Flagelo Apéndice propulsor celular. El término todavía se aplica a los undulipodios, pero debería restringirse a la estructura extracelular propulsora típica de las bacterias, enteramente diferente del «flagelo eucariótico». Se trata de un filamento relativamente rígido de proteína (flagelina) que se mueve por rotación de la base. Al microscopio electrónico se observa que la base del flagelo está unida a la membrana celular mediante una serie de 4 o 5 anillos proteínicos.

Fotón Cantidad mínima de luz, una partícula (cuanto) de radiación electromagnética.

Fotosíntesis Fotoautotrofia. Modo de nutrición en el que la fuente de energía es la luz. Un organismo fotoautotrófico se vale de la energía lumínica para producir material celular a partir de

compuestos inorgánicos (dióxido de carbono, sales de nitrógeno, fosfatos).

Gametos Células sexuales, como los espermatozoides y huevos. Los gametos humanos, como los del resto de animales, son el producto de la *meiosis* (véase más adelante) y, por lo tanto, llevan la mitad de cromosomas. La fusión de espermatozoides y huevos (*fecundación*) restaura la dotación cromosómica completa en el *zigoto* (el producto de la fecundación).

Género Conjunto de diferencias entre organismos complementarios de la misma especie que posibilitan su apareamiento. Sólo las uniones entre organismos de distinto género son potencialmente fértiles. Muchas especies incluyen organismos sanos de cientos y hasta miles de géneros. En algunos casos las diferencias genéricas están determinadas por cambios mínimos: las combinaciones de genes que codifican proteínas específicas en la superficie de los filamentos fúngicos (hifas) dan más de 50 000 géneros diferentes en *Schizophyllum*, un hongo corriente. En los ciliados, cuyos géneros también dependen de diferencias mínimas en las proteínas de superficie undulipodiales (antígenos ciliares), los cambios genéricos pueden suceder según un ciclo diario. La masculinidad y la feminidad comúnmente asociadas a la fecundación anisógama, en la que los machos producen multitud de gametos nadadores diminutos (espermatozoides) mientras que las hembras producen gametos mayores y en menor número con una reserva de nutrientes (huevos) es sólo uno entre los muchos sistemas naturales existentes.

Genotipo Constitución genética de un organismo respecto de rasgos específicos, en contraste con la manifestación física de esos rasgos (*fenotipo*).

Glándula pineal Llamada así por su forma de pina. Se trata de una prominencia en la base del cerebro que produce la hormona

melatonina. La producción de melatonina se asocia con el ciclo diurno; en algunos mamíferos se ha podido demostrar que los niveles de melatonina afectan la producción de espermatozoides y óvulos, de manera que la reproducción queda «en suspenso» en respuesta a las largas noches de invierno.

Gradiente químico Estado medioambiental o fisiológico en el que la concentración de una sustancia química se distribuye de manera creciente o decreciente. Ejemplos: en los vertidos petrolíferos se establece un gradiente cuyo punto culminante (el centro) se sitúa en la fuente (la localización del vertido); puesto que se desplazan hacia puntos de mayor concentración de un atractor químico, las células componentes de un plasmodio de agregación se distribuyen a lo largo de un gradiente químico.

Haploidía Condición propia de los eucariotas (células, tejidos u organismos) en la que el núcleo contiene un solo juego completo de cromosomas (núcleo haploide). En forma abreviada se denota por n , para distinguirla de la *diploidía* (dos juegos de cromosomas, $2n$). La haploidía es restablecida por la meiosis, mientras que la diploidía lo es por la fecundación.

Heterocigosis (n. heterocigoto; adj. heterocigótico) Condición genética híbrida en los organismos diploides cuyos progenitores son genéticamente distintos. Los heterocigotos tienen uno o más pares de cromosomas que contienen alelos (estados) diferentes de un gen o genes; véase *homocigosis*.

Heterotrofia Modo de nutrición en el que los organismos obtienen el carbono que necesitan a partir de sustancias hidrocarbonadas (azúcares, proteínas y grasas derivadas a su vez de la quimio o fotosíntesis) y no del dióxido o monóxido de carbono. Los organismos heterótrofos incluyen osmotrofos (que se alimentan por absorción, como la mayoría de bacterias y hongos), insectívoros, herbívoros, carnívoros y muchos otros.

Hipersexo Simbiogénesis permanente, origen de nuevas células, órganos u organismos a través de la asociación física irreversible entre distintos tipos de organismos vivos. El hipersexo es el proceso que condujo a las algas unicelulares nucleadas, nadadoras y aeróbicas, fruto de la asociación entre distintas bacterias: unas fermentadoras, otras nadadoras, otras respiradoras de oxígeno y otras fotosintetizadoras. El hipersexo es un mecanismo de cambio evolutivo en el que simbioses primordiales se integran por completo, de manera que lo que comenzó siendo una asociación laxa se hace permanente. Véase *simbiogénesis*.

Homocigosis (n. homocigoto; adj. homocigótico) Condición genética endógama en los organismos diploides cuyos progenitores son genéticamente similares. Los homocigotos tienen uno o más pares de cromosomas que contienen el mismo alelo (estado) de un gen o genes; véase *heterocigosis*.

Huso mitótico Estructura microtubular transitoria que se forma en la división de las células eucarióticas y es responsable del desplazamiento cromosómico hacia polos celulares opuestos durante la *anafase* (véase *mitosis*).

Isogamia Igualdad de tamaño o forma entre las células sexuales (gametos) que se fusionan (como ocurre con los dos gametos iguales de *Chlamydomonas*). El apareamiento de gametos complementarios iguales en forma y tamaño (isogametos) es común en protoctistas y hongos. Véase *anisogamia*.

Macrofagia Modo de nutrición heterotrófica en el que los organismos (*macrófagos*) se alimentan de partículas relativamente grandes. El término macrófago se refiere también a las células sanguíneas ameboides que engullen patógenos como parte de la respuesta inmunitaria de los mamíferos.

Magnetotaxis (adj. magnetotático) Movimiento orientado de un

organismo vivo en el seno de un campo magnético (como, por ejemplo, la migración hacia el polo norte o sur magnético en algunas bacterias que contienen magnetita o en *Chlamydomonas*).

Meiosis División celular con reducción a la mitad del número de cromosomas, como la que da lugar a cuatro células descendientes haploides a partir de una célula diploide progenitora. En algunos organismos (los animales, por ejemplo) la meiosis de células corporales diploides antecede a la formación de *gametos* haploides. En otros (como los hongos) el *zigoto* diploide recién formado experimenta una meiosis que genera núcleos haploides. En la mayoría de variantes meióticas se observa un emparejamiento de los cromosomas. La meiosis es un componente esencial de los ciclos sexuales de la totalidad de plantas y animales, así como los hongos sexuales. El sexo meiótico se presenta también en bastantes protoctistas (véase lámina 16).

Metabolismo Conjunto de reacciones químicas de la materia viva que incluyen la síntesis del ADN (replicación genética) y la producción de proteínas (síntesis de ARN y proteínas) subyacentes tras la autopoyesis. La generación de energía metabólica conlleva la acumulación de productos de desecho.

Microtúbulo (adj. microtubular) Estructura proteínica filamentosa y hueca, esencial para la motilidad celular eucariota. Los microtúbulos varían en longitud pero no en diámetro (entre 24 y 25 nm); constituyen la subestructura de husos mitóticos, undulipodios y otras estructuras intracelulares.

Mitosis División celular en la que se conserva el número de cromosomas, como la que da lugar a dos células descendientes genéticamente similares a partir de una célula progenitora haploide o diploide. Por lo general se distinguen cuatro etapas: profase, en la que se condensan los cromosomas y se dividen los centriolos, metafase, en la que los cromosomas se alinean en el plano

ecuatorial del núcleo, anafase, en la que los cromosomas de cada par se separan desplazándose hacia polos opuestos, y telofase, en la que los cromosomas se desenrollan y la célula entera se divide.

Morfoespecie Especie distinguible sobre la base de su forma (morfología) y por lo tanto acreedora de un nombre propio.

Mutación Cambio heredable del ADN, la fuente última de variación genética en las poblaciones en evolución.

Necrosis Muerte de células, parte de un tejido o algún órgano en un organismo por lo demás vivo.

Neotenia Retención de rasgos juveniles en animales sexualmente adultos. Ejemplos: el cráneo humano adulto se parece más al cráneo de un niño que los cráneos de otras especies de primates a los cráneos infantiles respectivos. El cráneo del gorila cambia radicalmente a lo largo de su maduración. Los testículos y ovarios del ajolote adulto (una salamandra terrestre) se desarrollan en la fase juvenil acuática. La neotenia suele correlacionarse con la evolución reciente de una especie.

Núcleo Orgánulo universalmente presente en los eucariotas que contiene el ADN. Dentro de este cuerpo usualmente esférico, delimitado por una membrana, tiene lugar la síntesis tanto del ADN como del ARN. La cromatina se organiza en cromosomas dentro del núcleo.

Nucleoide También llamado genóforo, es la estructura que contiene el ADN en las bacterias, no delimitada por membrana alguna.

Número de Hayflick Número máximo de divisiones celulares (generaciones) que pueden verificarse antes de que se den cambios heredables (como mutaciones cromosómicas) o sobrevenga la

muerte celular en un cultivo de tejido (usualmente de mamífero).

Organismo transgénico Organismo que incorpora uno o más genes extraños (transgenes). Una variedad transgénica de la bacteria *Escherichia coli* a la que se le ha incorporado el gen de la insulina humana es usada para la producción comercial a gran escala de esta hormona.

Orgánulo Estructura intracelular visible. El núcleo celular, las mitocondrias, los cloroplastos o los undulipodios son ejemplos de orgánulos.

Partenogénesis Desarrollo de un huevo no fecundado en un individuo adulto; es propia de numerosos animales y protoctistas simbiotes que no necesitan aparearse para tener descendencia. Los animales son generados por un solo progenitor (la madre), cuyos huevos se desarrollan sin intervención de un espermatozoide.

Polo (véase *huso mitótico*) Cada uno de los extremos opuestos donde confluyen las fibras del huso mitótico durante la división celular; en los polos se localizan también los centriolos cuando existen.

Procariota Célula u organismo bacteriano.

Proteína Molécula de cadena larga compuesta de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Las proteínas representan la mayor parte del peso seco de los organismos. Funciones como el movimiento, la aceleración de reacciones químicas, el mantenimiento del equilibrio salino y muchísimas más son desempeñadas por las proteínas. La mayoría de células produce incesantemente más de mil clases de proteínas, esenciales para el funcionamiento de la materia viva.

Replicación Proceso de duplicación molecular que incrementa

mediante copia el número de moléculas de ADN o ARN.

Reproducción Cualquier proceso conducente al incremento del número de individuos vivos. Para la reproducción asexual (por fisión binaria, gemación o cualquier otro proceso que no implique sexo) basta con un solo progenitor, mientras que para la reproducción sexual hacen falta dos.

Respuesta SOS Activación de las proteínas bacterianas de reparación del ADN inducida por un deterioro del material genético causado por compuestos químicos, radiaciones, etc. El proceso de reparación mismo es propenso al error y puede conducir a nuevas mutaciones.

Selección desbocada Selección sexual caracterizada por una preferencia hacia fenotipos exagerados. La enorme cornamenta de los machos del extinguido alce irlandés (*Megaloceros*), de 3,5 metros de envergadura y 45 kilos de peso, se debía probablemente a la preferencia de las hembras por las cuernas exageradas.

Seme Carácter complejo con ventajas selectivas apreciables y, por ende, evolutivamente relevante, resultado de la evolución de un conjunto interactivo de genes. Unidad de estudio por parte de los evolucionistas (ejemplos: fijación del nitrógeno, motilidad celular, ojos).

Sexo Creación de un nuevo organismo con material genético procedente de más de una fuente. Su mínima expresión es la absorción de material genético en solución y la recombinación genética por parte de al menos una entidad viva (autopoyética). El sexo también hace referencia a un modo de reproducción eucariota que implica la formación de núcleos haploides (meiosis) y la fecundación para formar *zigotos* diploides.

Simbiogénesis El origen de nuevas células, órganos u organismos a través de la asociación física entre distintas formas de vida; puede ser cíclica o permanente. Véase *hipersexo*.

Simbiosis Asociación física prolongada entre dos o más organismos pertenecientes a distintas especies. Los niveles de integración de los participantes en la simbiosis pueden ser comportamental, metabólico o genético.

Sistema abierto En la disciplina física de la termodinámica, una región de estudio limitada y abierta a la entrada y salida de materia, y energía. Los sistemas vivos, como las células limitadas por membranas semipermeables, son abiertos.

Sistema aislado En la disciplina física de la termodinámica, una región de estudio limitada y cerrada a la entrada y salida de materia, y energía. Un termo sellado lleno de café caliente es una aproximación corriente, aunque imperfecta, a un sistema aislado.

Sistema cerrado En la disciplina física de la termodinámica, una región de estudio limitada y cerrada a la entrada y salida de materia, pero no necesariamente de energía. El sistema Tierra-Sol está casi enteramente cerrado a la materia (aparte de meteoritos y partículas cósmicas) pero está enteramente abierto a la energía (luz solar y demás radiaciones).

Superordenación Adquisición de un rango, posición o valor superior; en términos biológicos, la tendencia de una población a asumir las características de un organismo único a mayor escala, en particular a través de las conductas asociativas de los plasmodios, las ratas topo, las hormigas, las abejas o las termitas.

Termodinámica Rama de la física que trata de las relaciones cuantitativas entre el calor y las otras formas de energía.

Totipotencia Capacidad de una célula de repetir todos los pasos del desarrollo embrionario para dar un organismo nuevo completo o de diferenciarse en una amplia gama de tipos celulares. Véase *célula embrionica*.

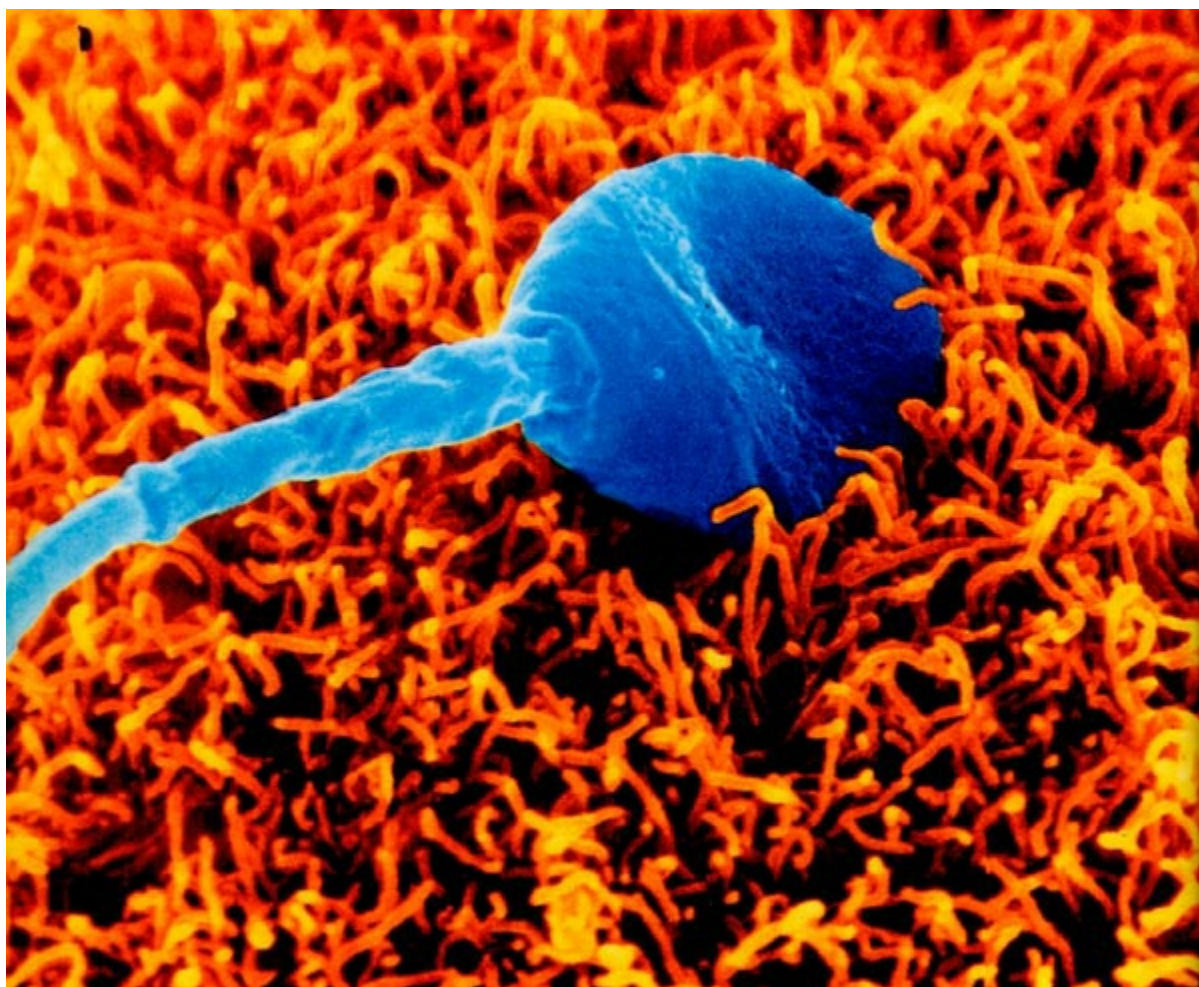
Transducción Transferencia de pequeños replicones (plásmidos o ADN vírico) de un orgánulo o célula bacteriana a otro orgánulo o célula bacteriana, usualmente mediada por un virus. (También se aplica este término a la transformación de una forma de energía en otra como, por ejemplo, luz en energía química o energía mecánica en calor).

Transfección Cambio genético natural inducido en células cultivadas por la absorción de ADN del medio acuoso.

Undulipodio Término que se aplica a los apéndices celulares motrices tradicionalmente llamados «flagelos eucarióticos», como las colas de los espermatozoides, y los cilios. Estos orgánulos móviles, que a veces cumplen funciones alimentarias o sensoriales, se componen de al menos 200 proteínas. En sección transversal, el undulipodio exhibe una estructura característica: la disposición microtubular [9(2)+2]. El término «flagelo» es ambiguo, dado que los undulipodios no tienen nada que ver con los flagelos bacterianos (los orgánulos motrices de los procariotas, mucho menores), por lo que es preferible no emplearlo.

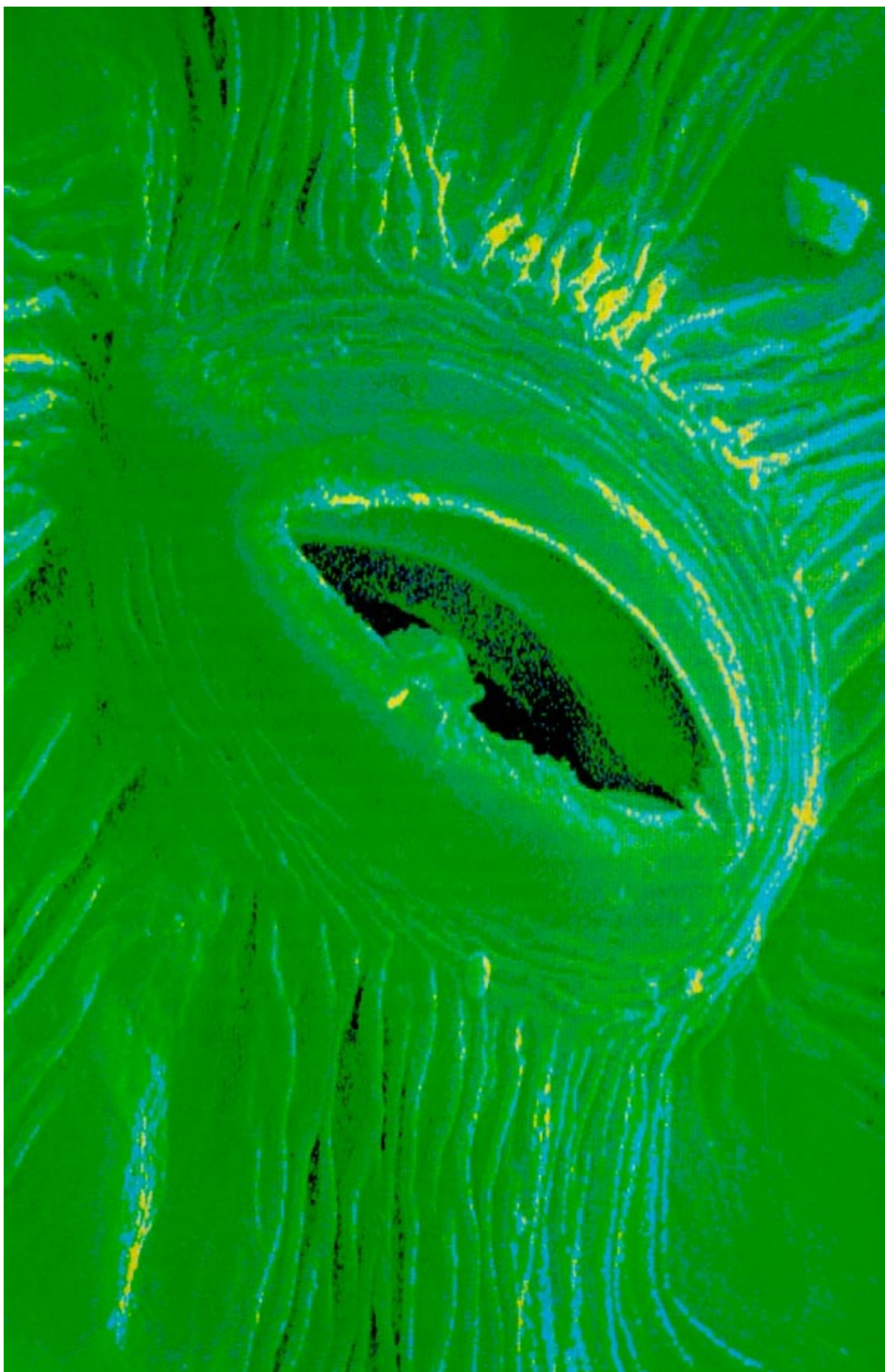
Zigoto Huevo fecundado o cualquier otra célula o núcleo diploide (2n) resultado de la fusión de dos núcleos o células haploides. En los animales, las plantas y algunos protoctistas (los que tienen meiosis gamética) el cigoto está destinado a desarrollarse en un nuevo organismo. En los hongos y los protoctistas con meiosis cigótica la fase de cigoto es muy corta: la meiosis produce de nuevo núcleos haploides poco después de formarse el cigoto.

Láminas

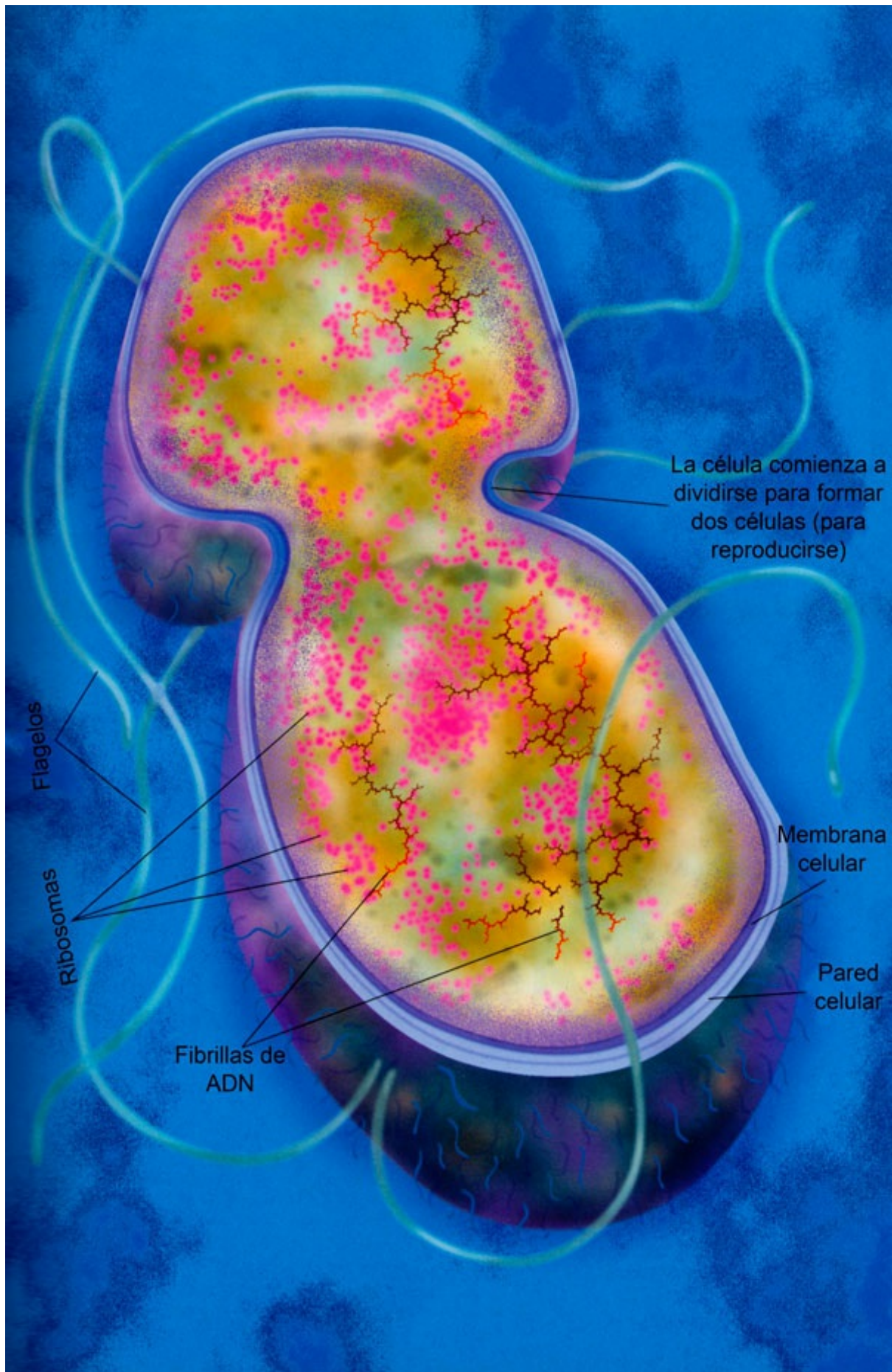


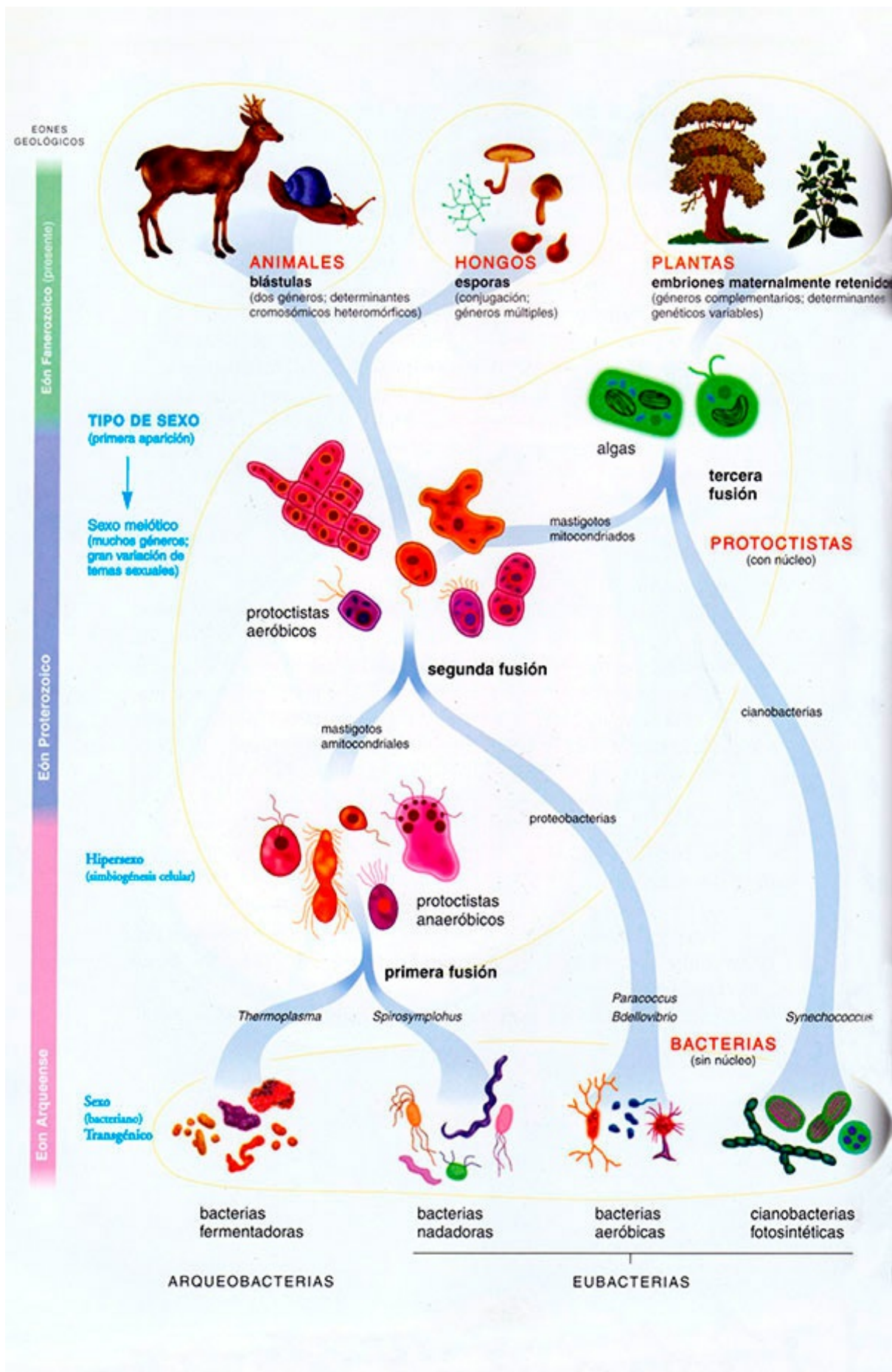


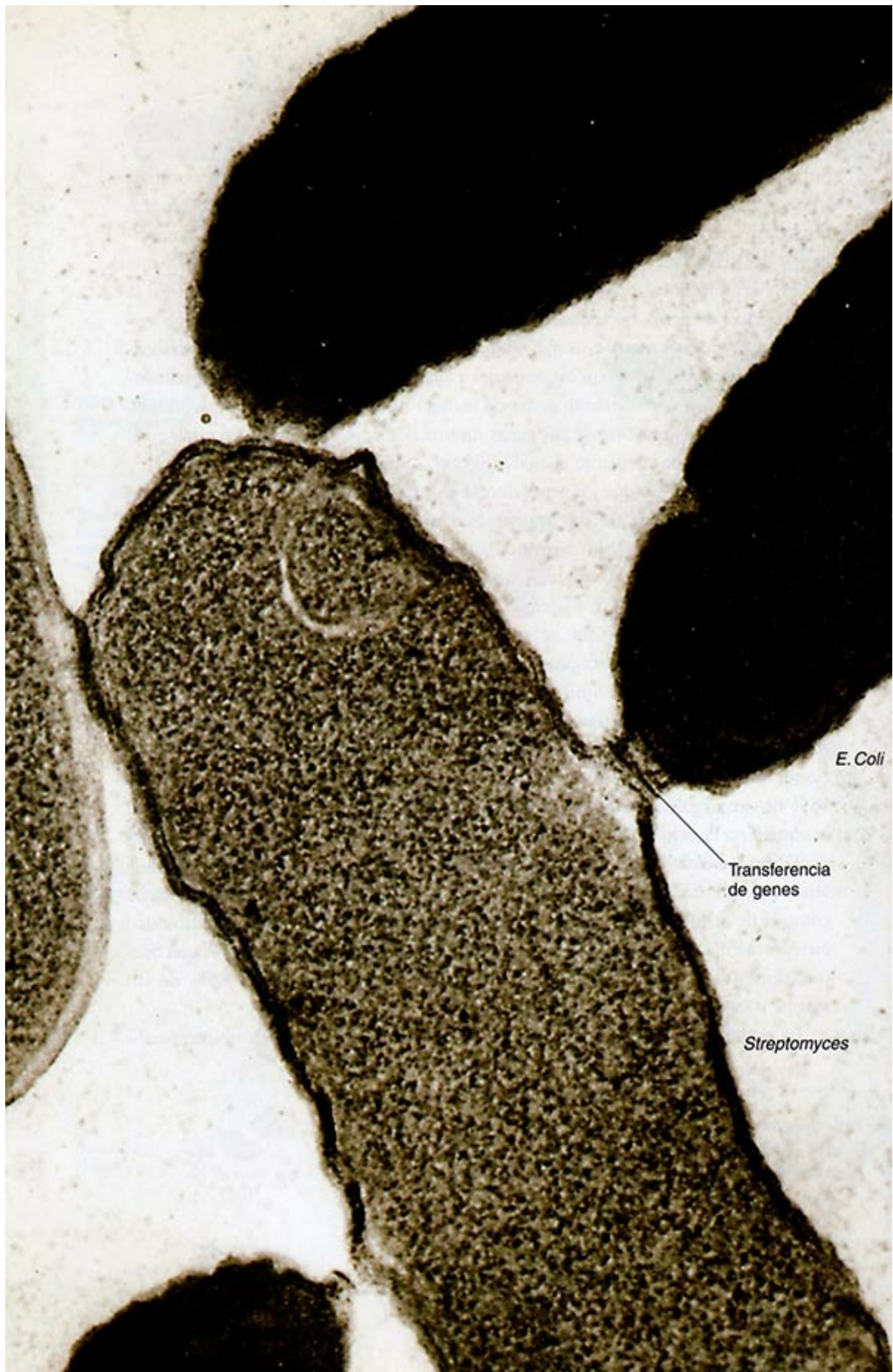


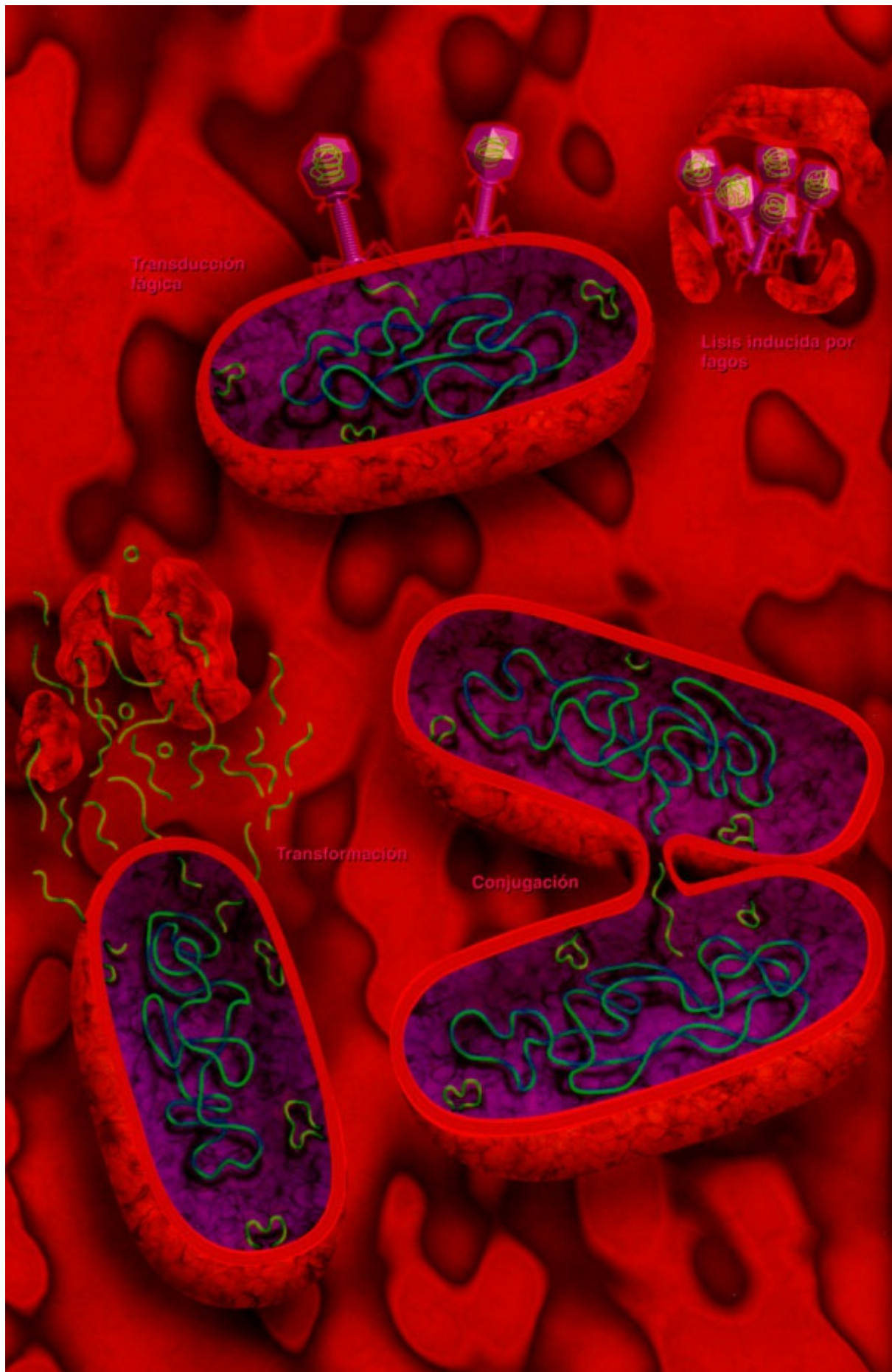


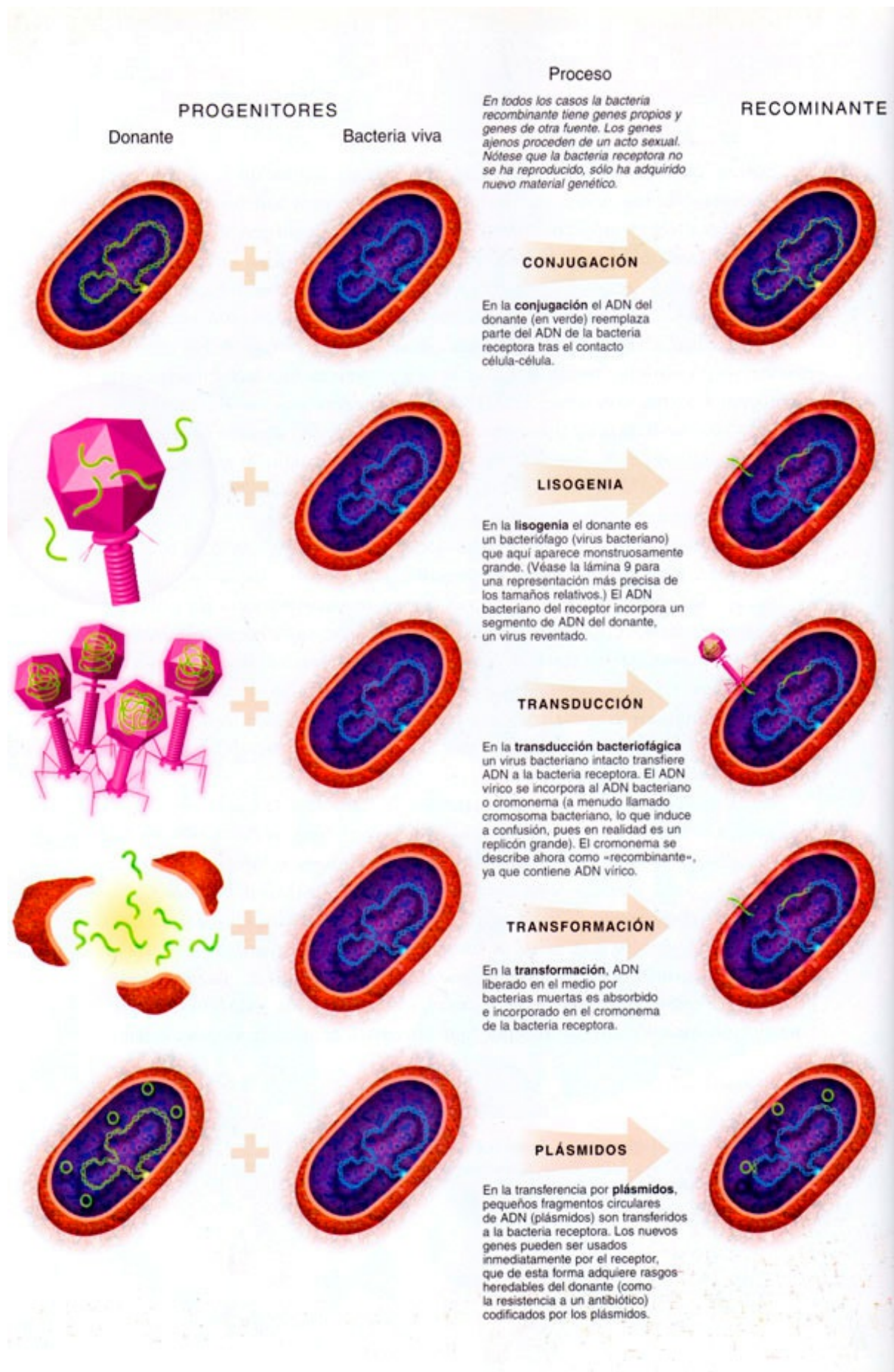


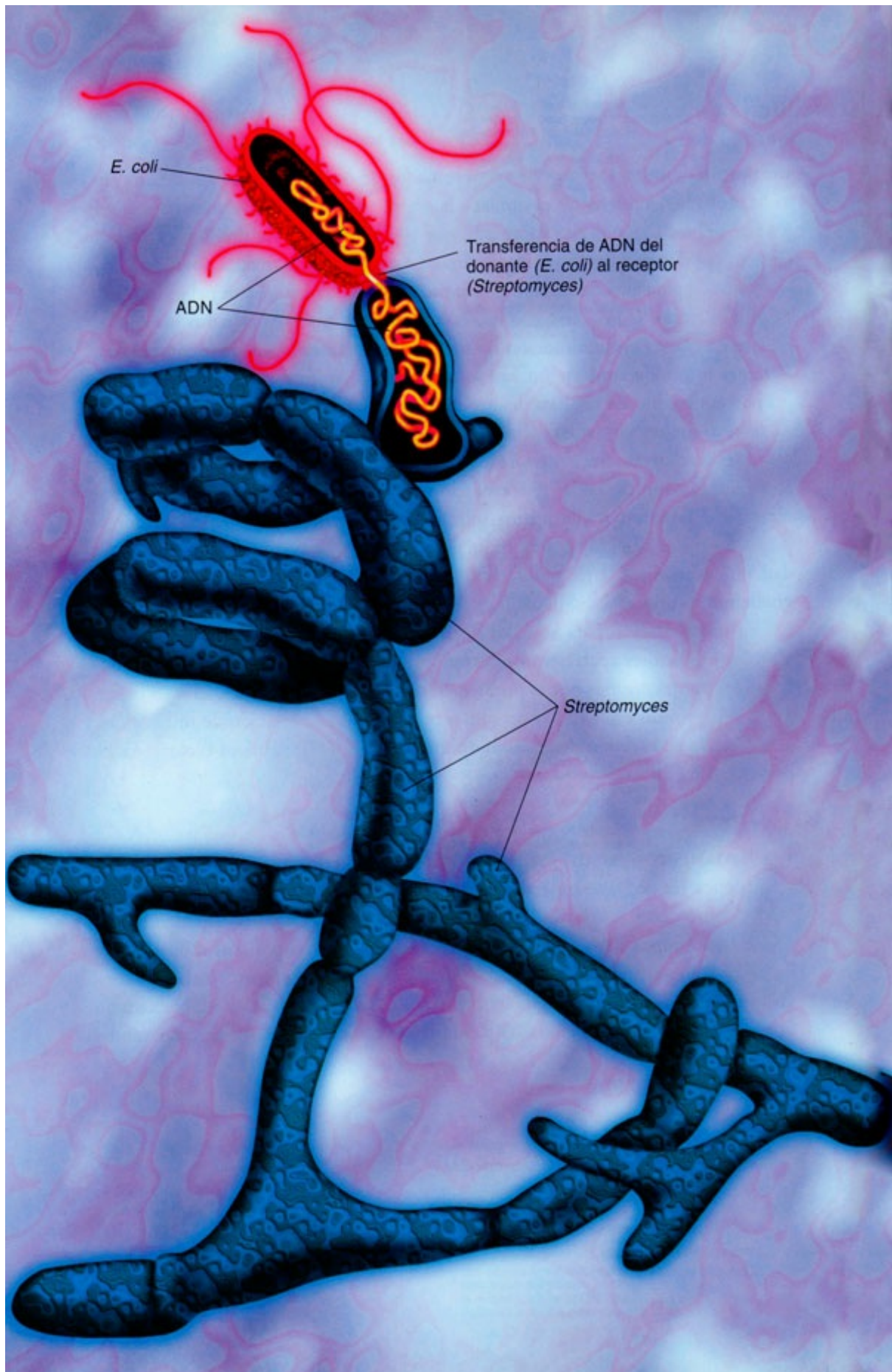


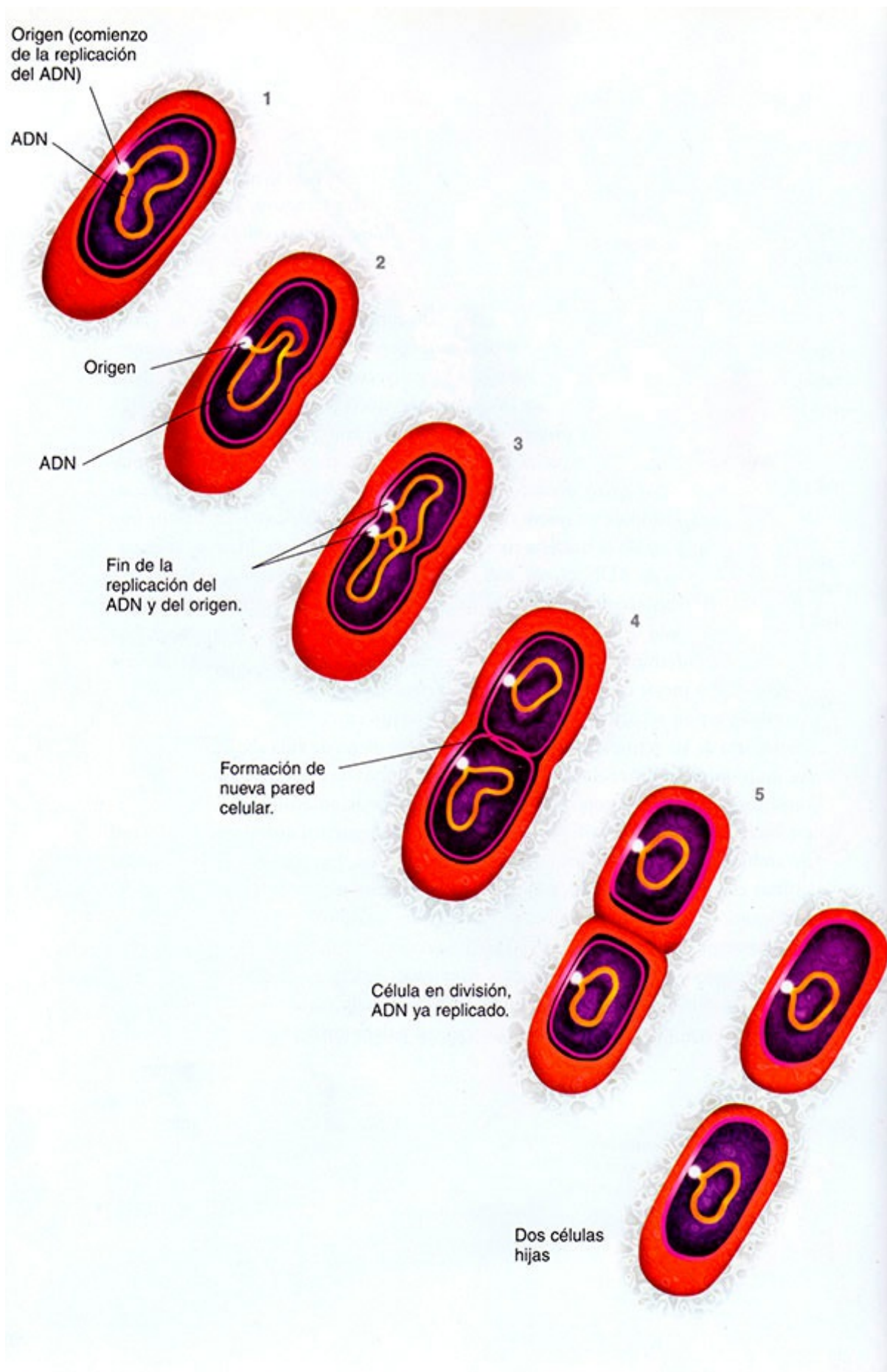


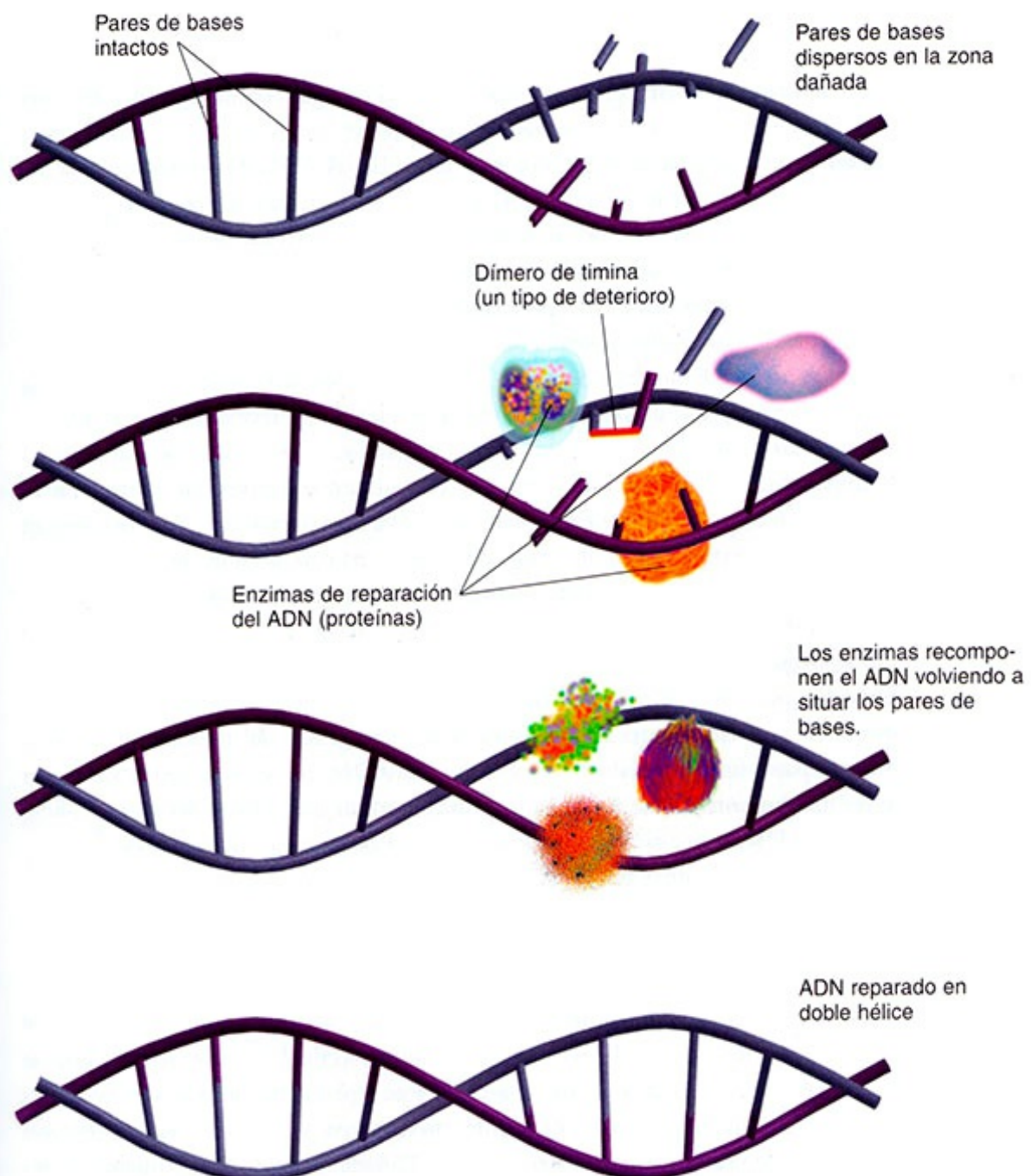


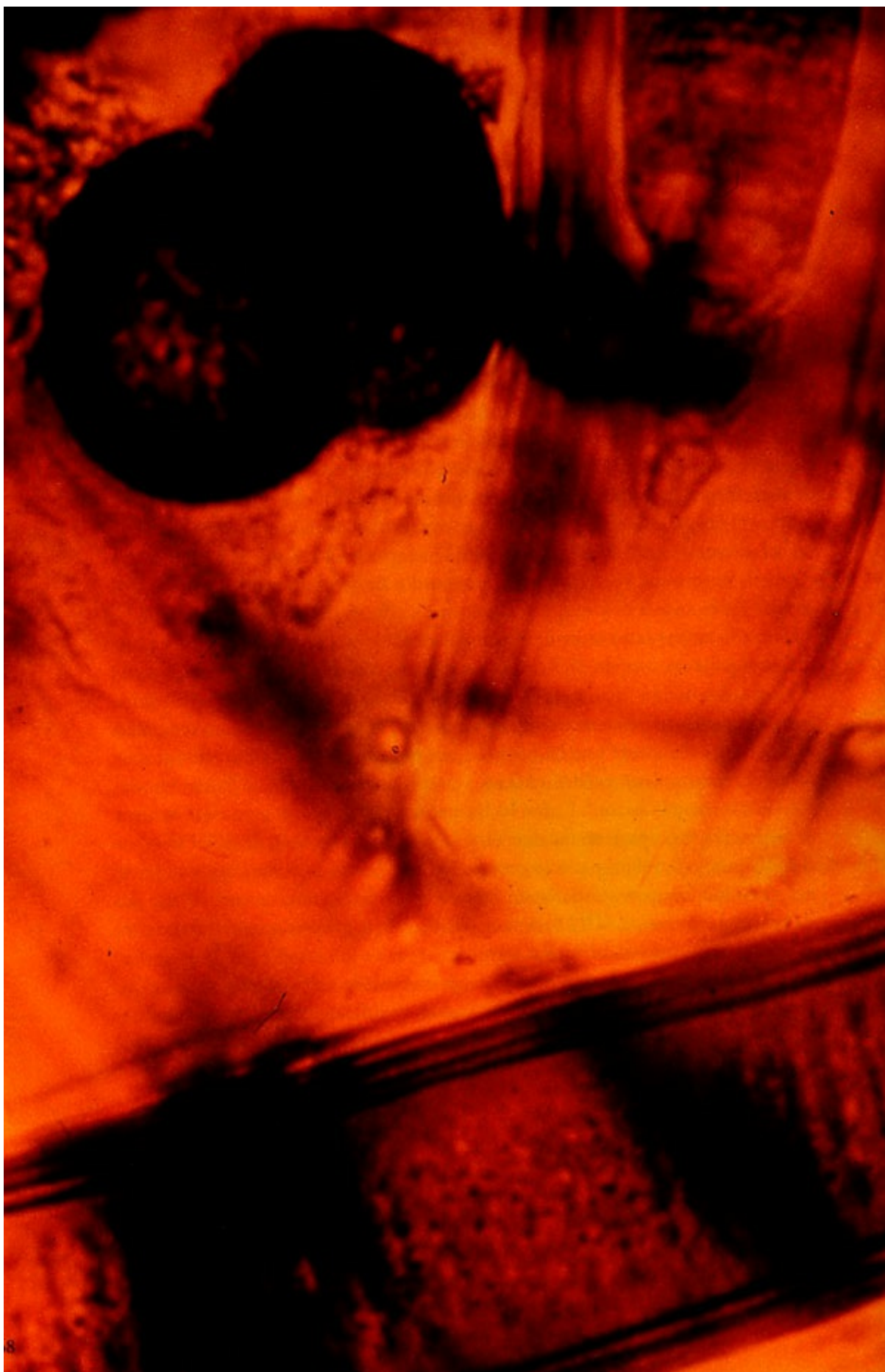






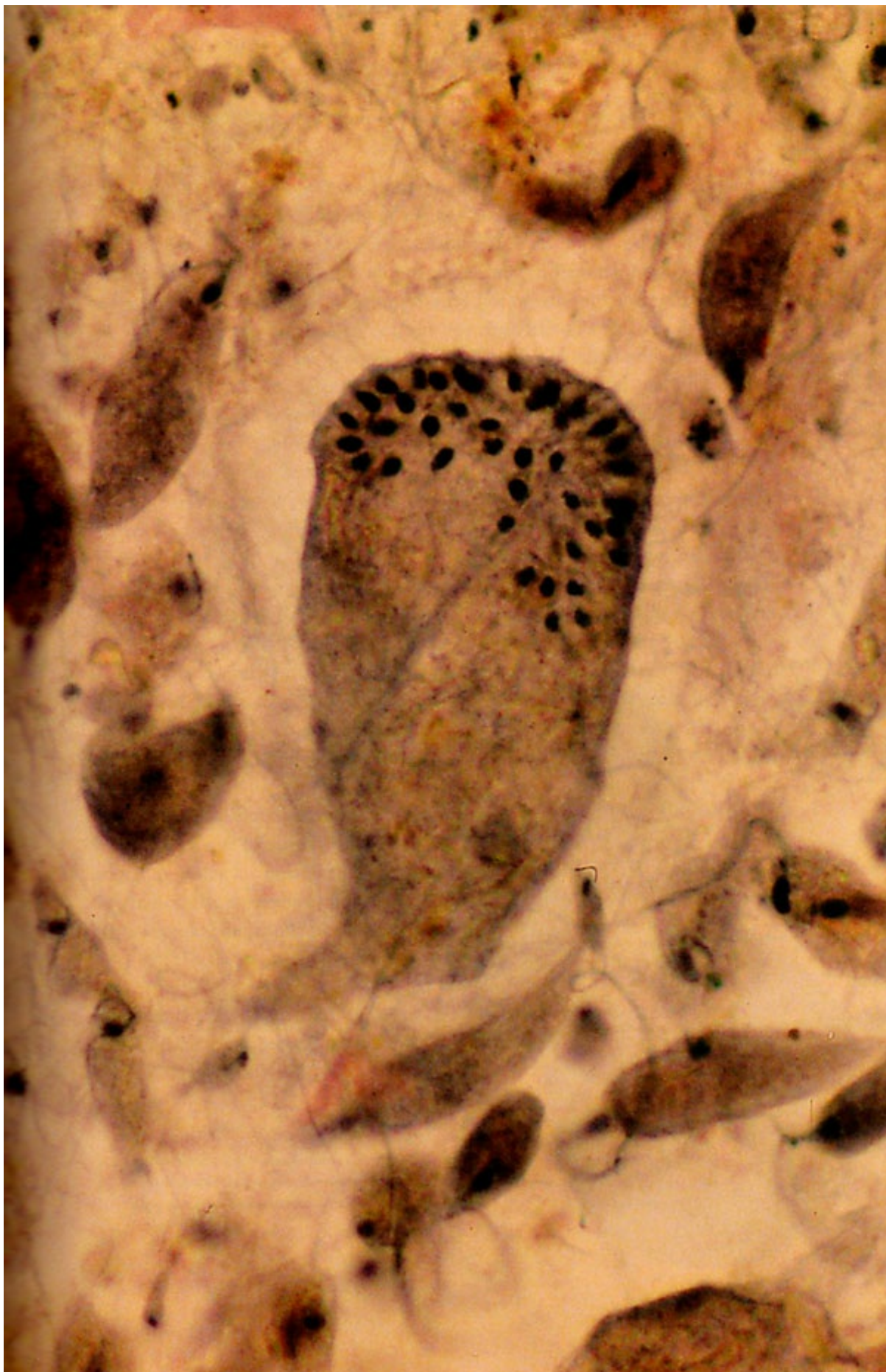


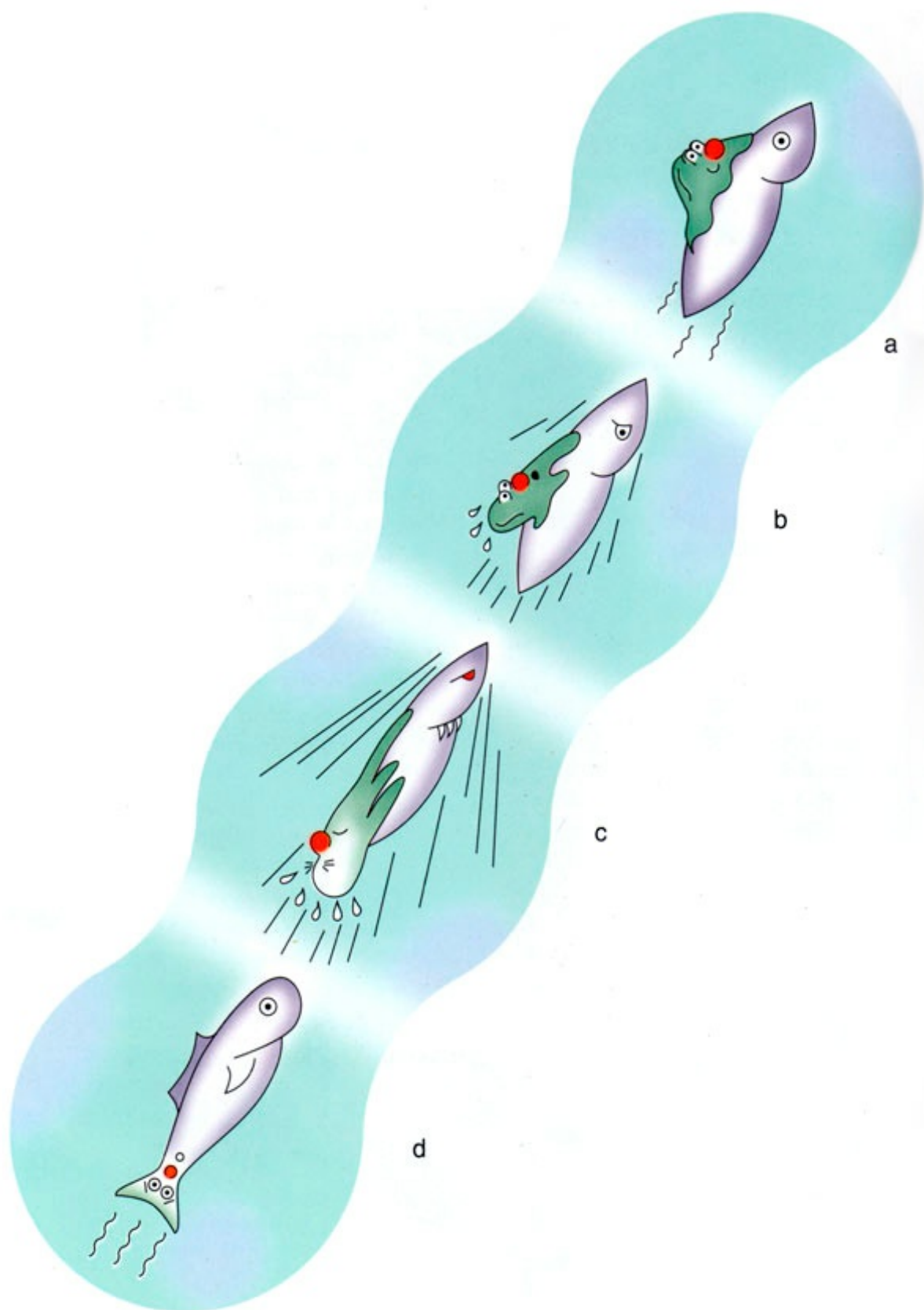


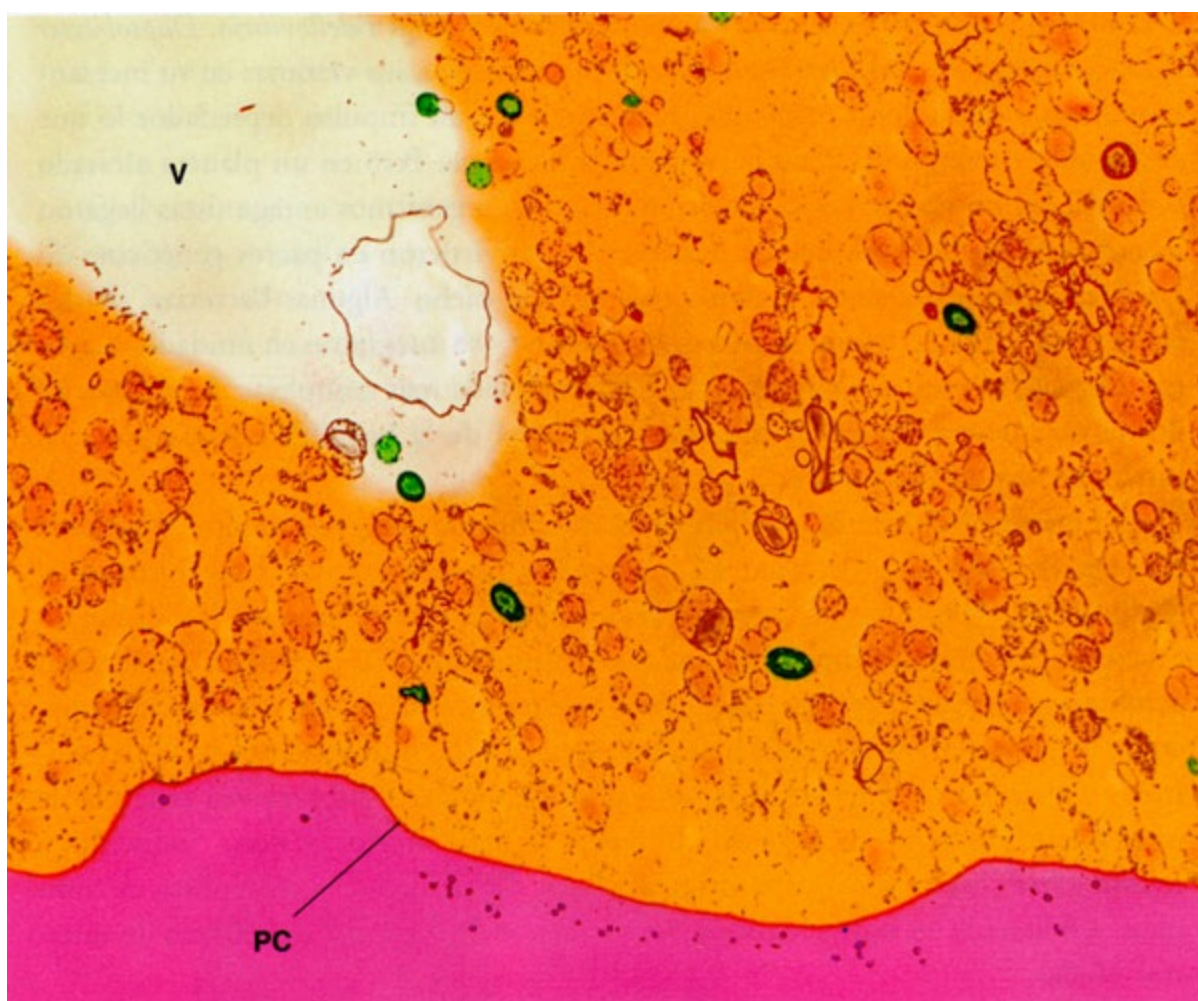


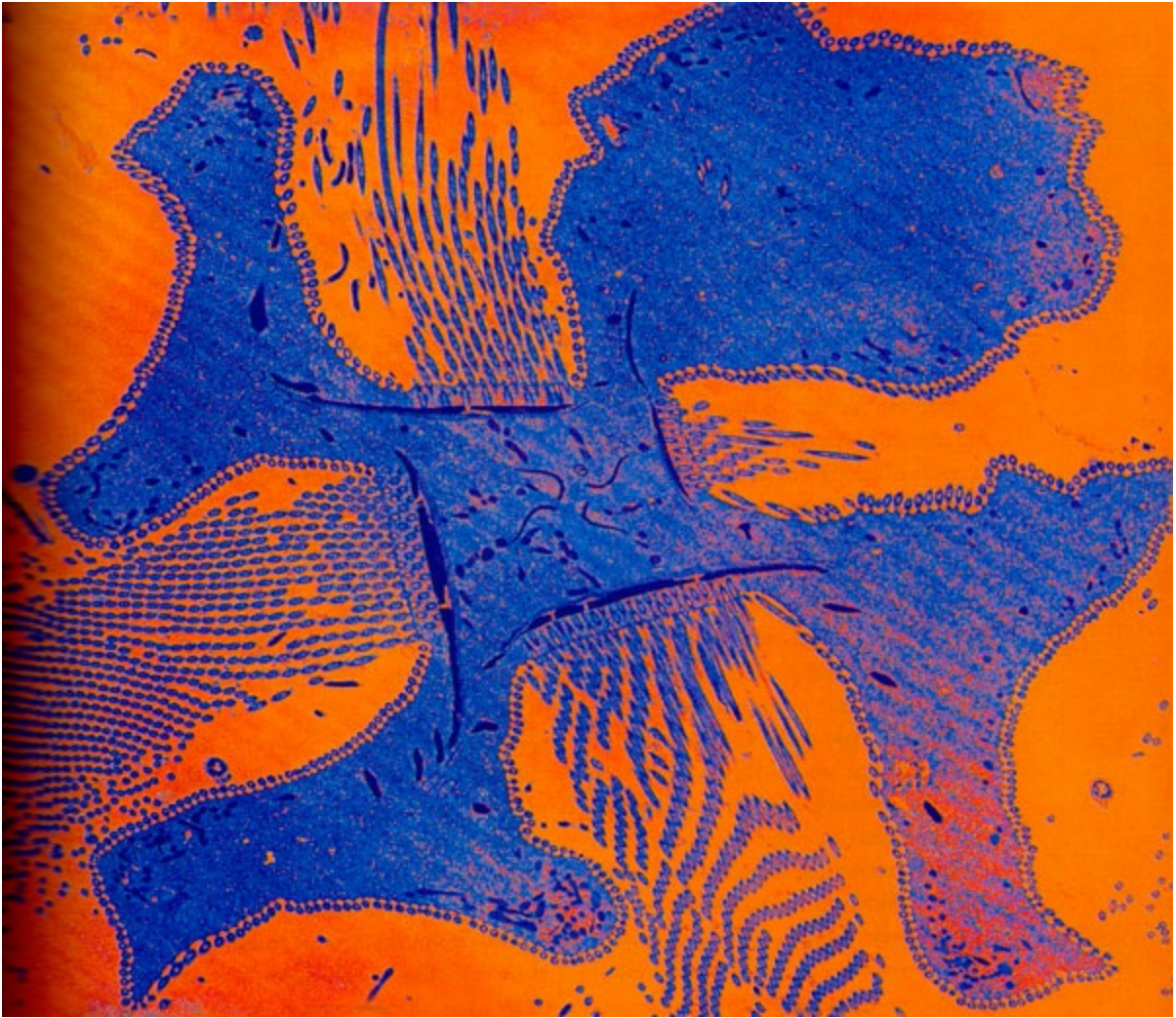




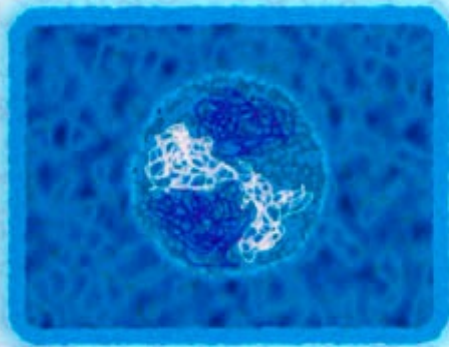




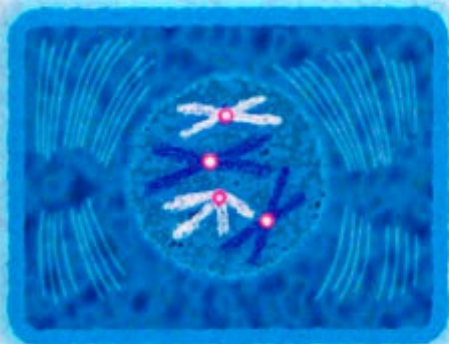






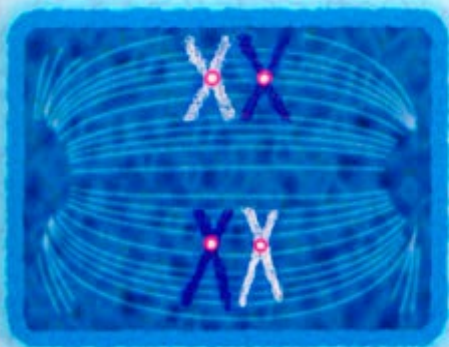


A

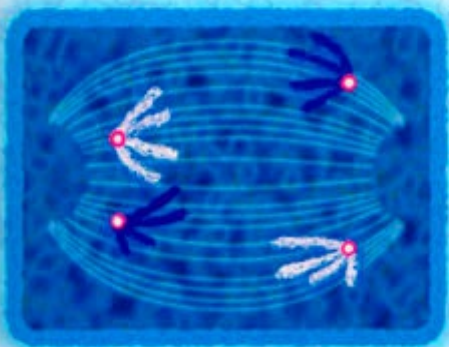


B

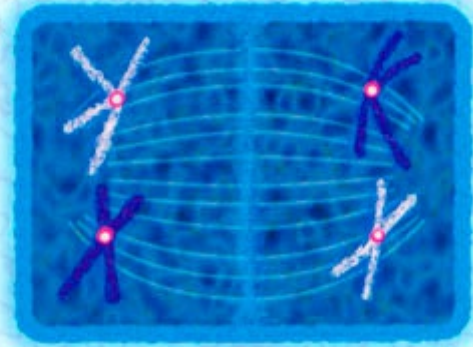
Cuatro cromosomas por célula



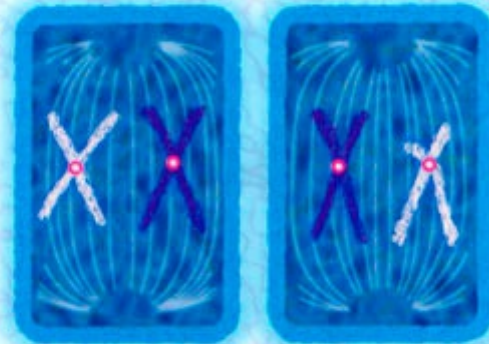
C



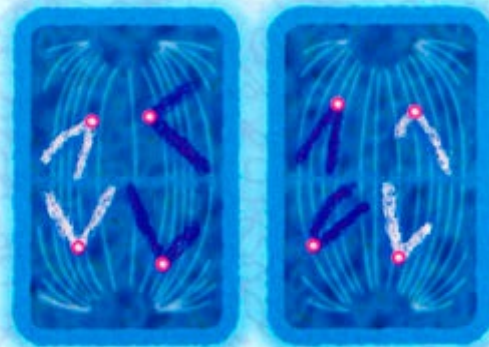
D



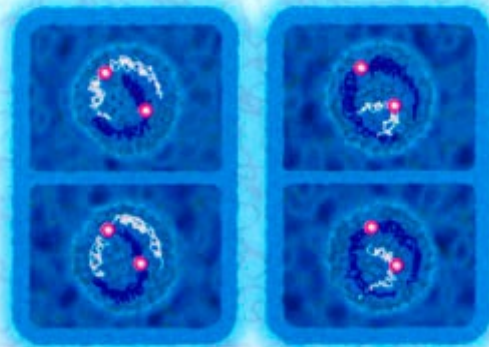
E



F

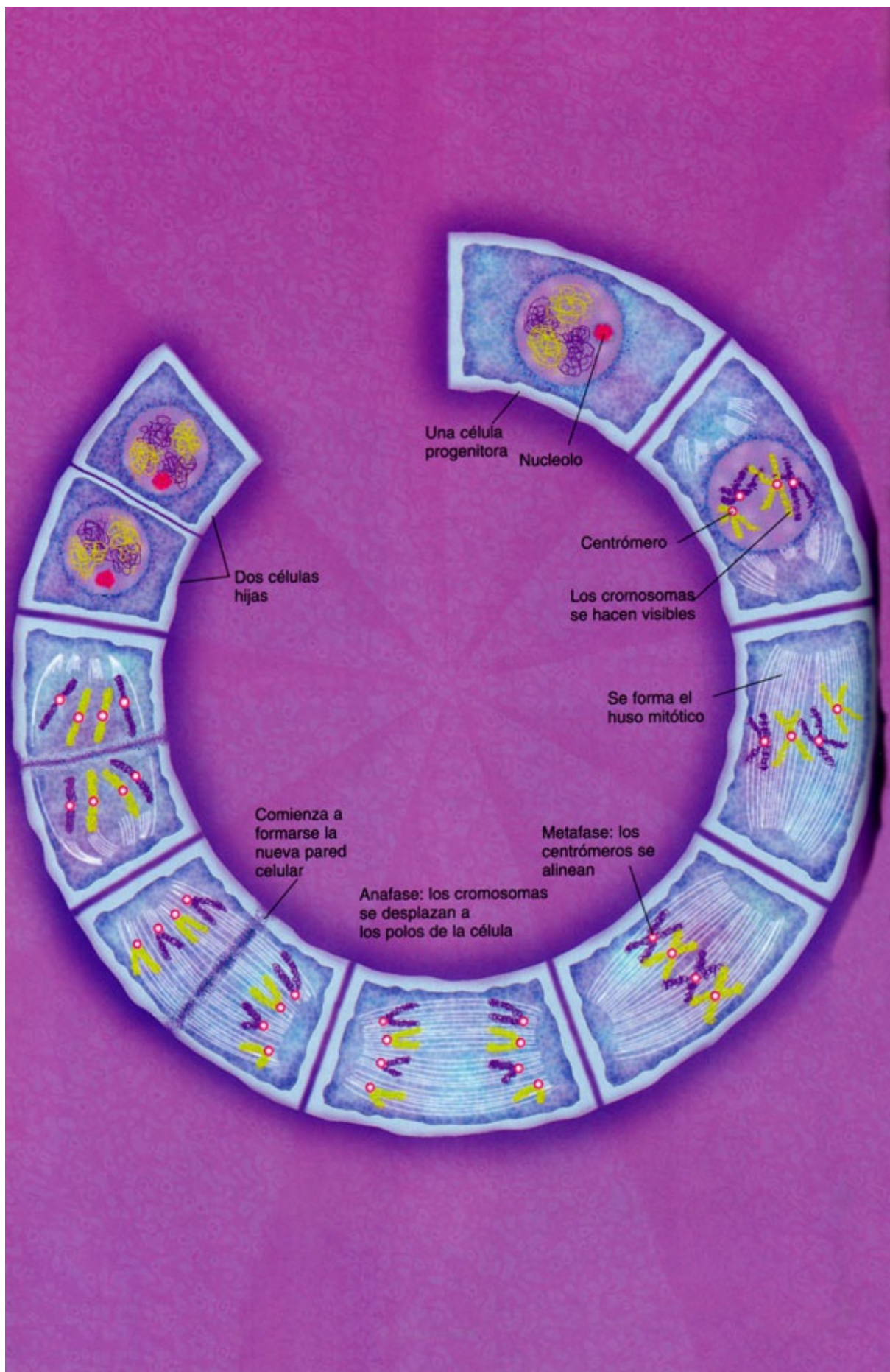


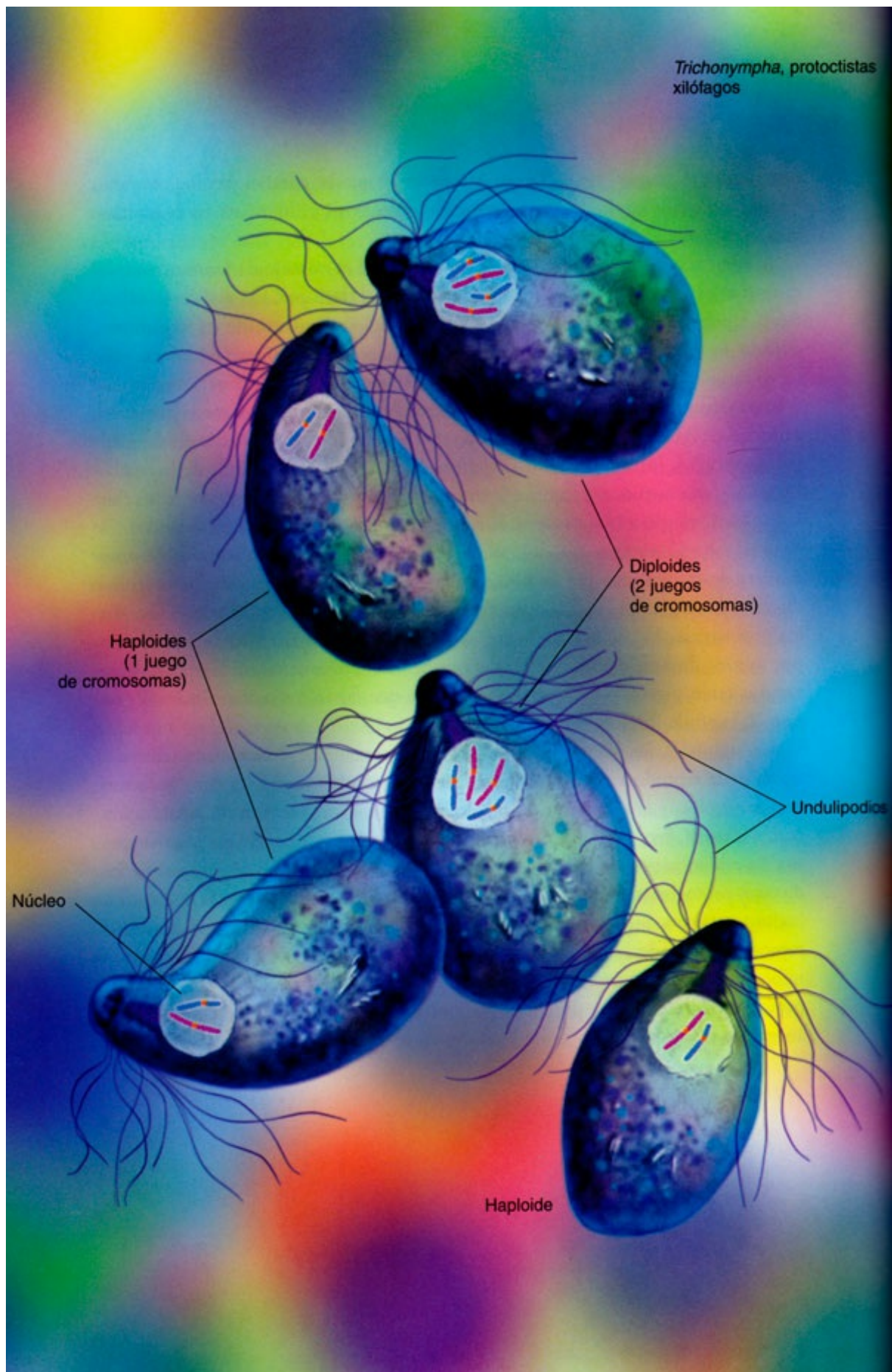
G

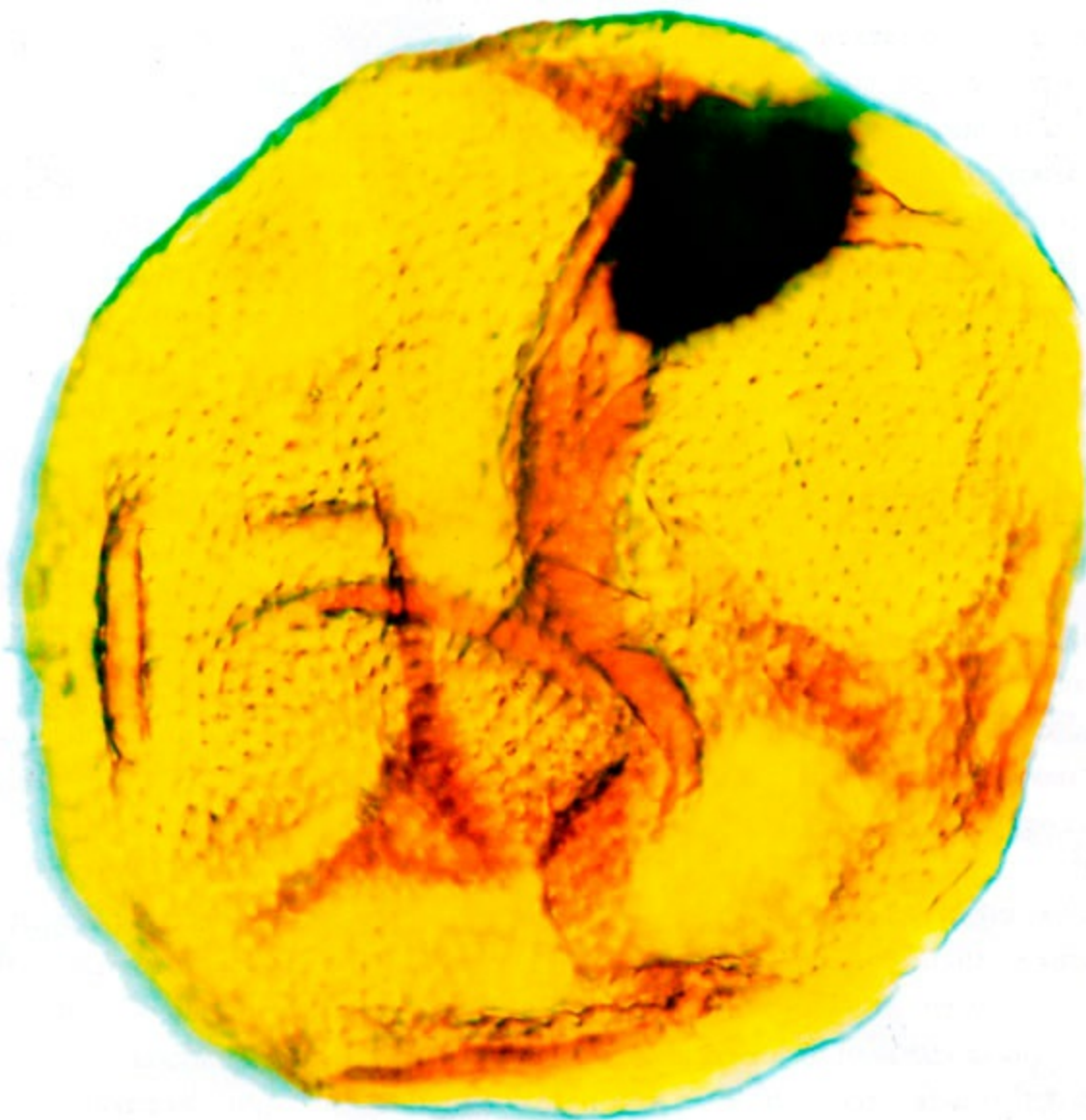


H

Dos cromosomas por célula

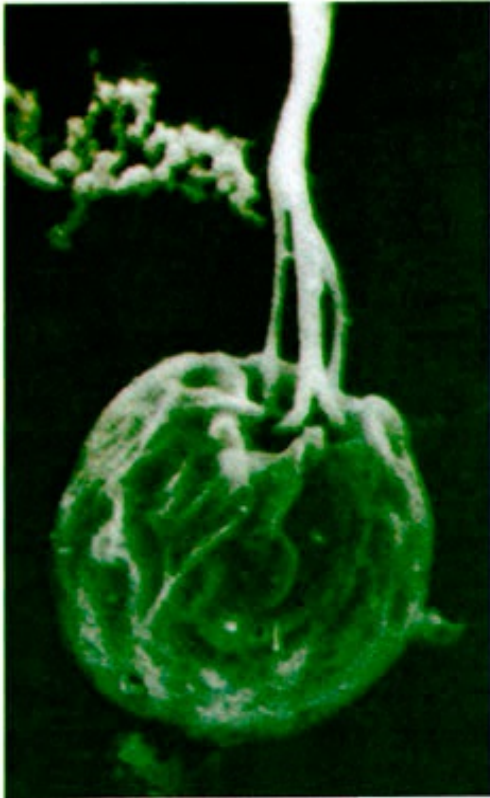




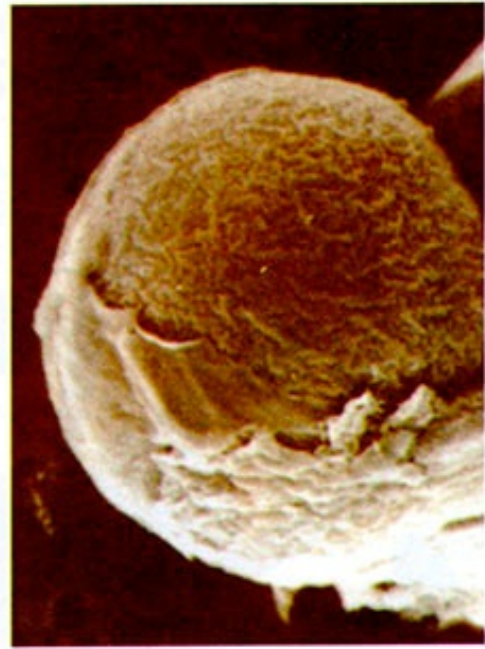




«Decoraciones» superficiales, quizá para facilitar la flotación (nadie sabe qué función tenían).



A



B

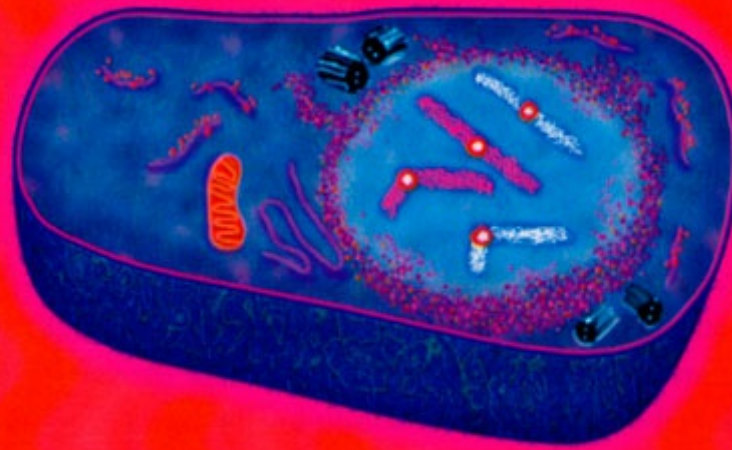


C

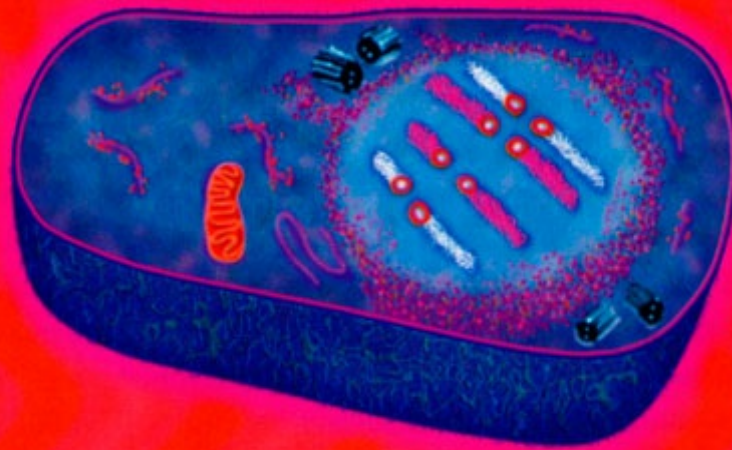








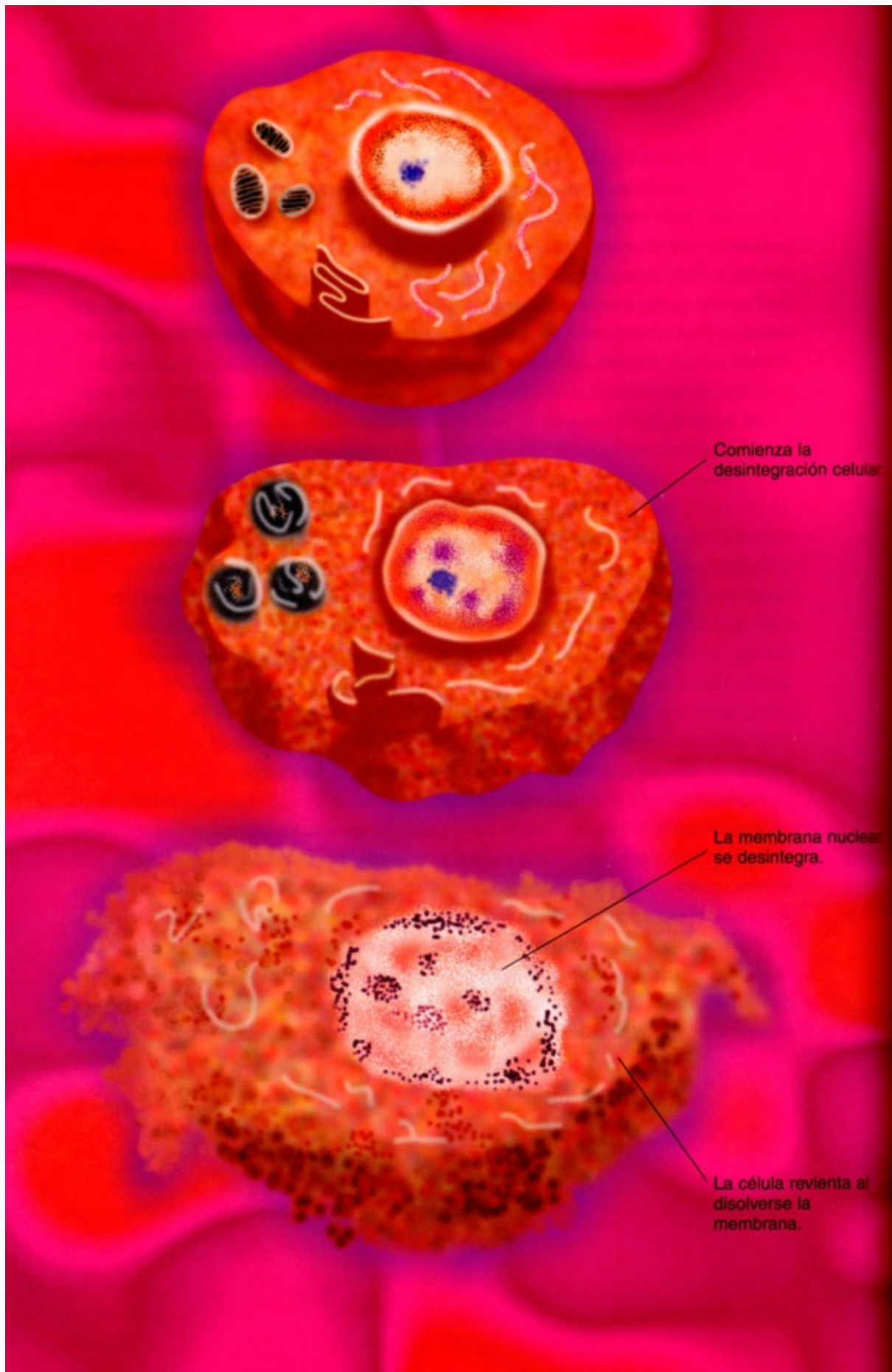
progenitor no
fisionado

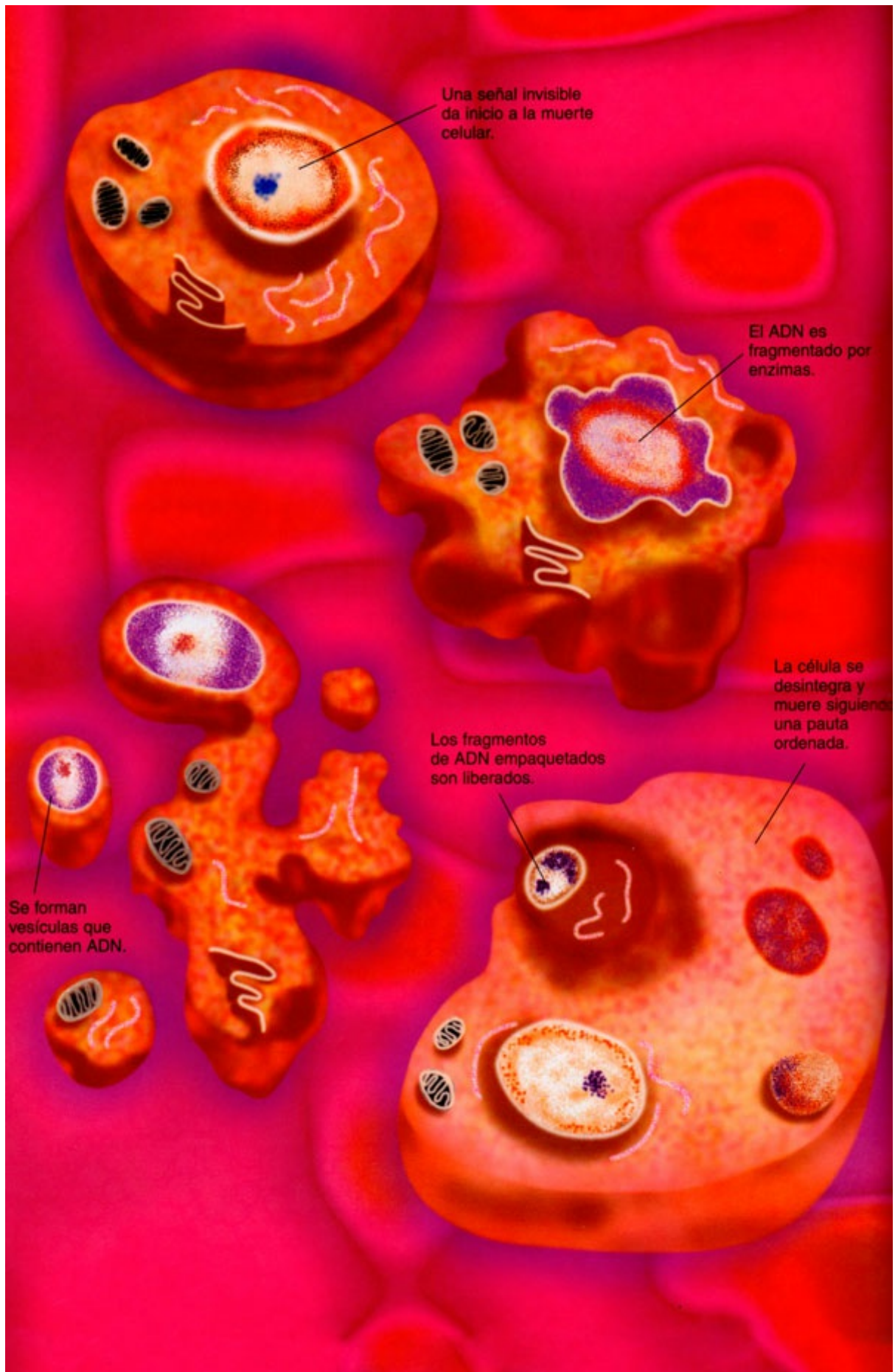


descendiente
fisionado

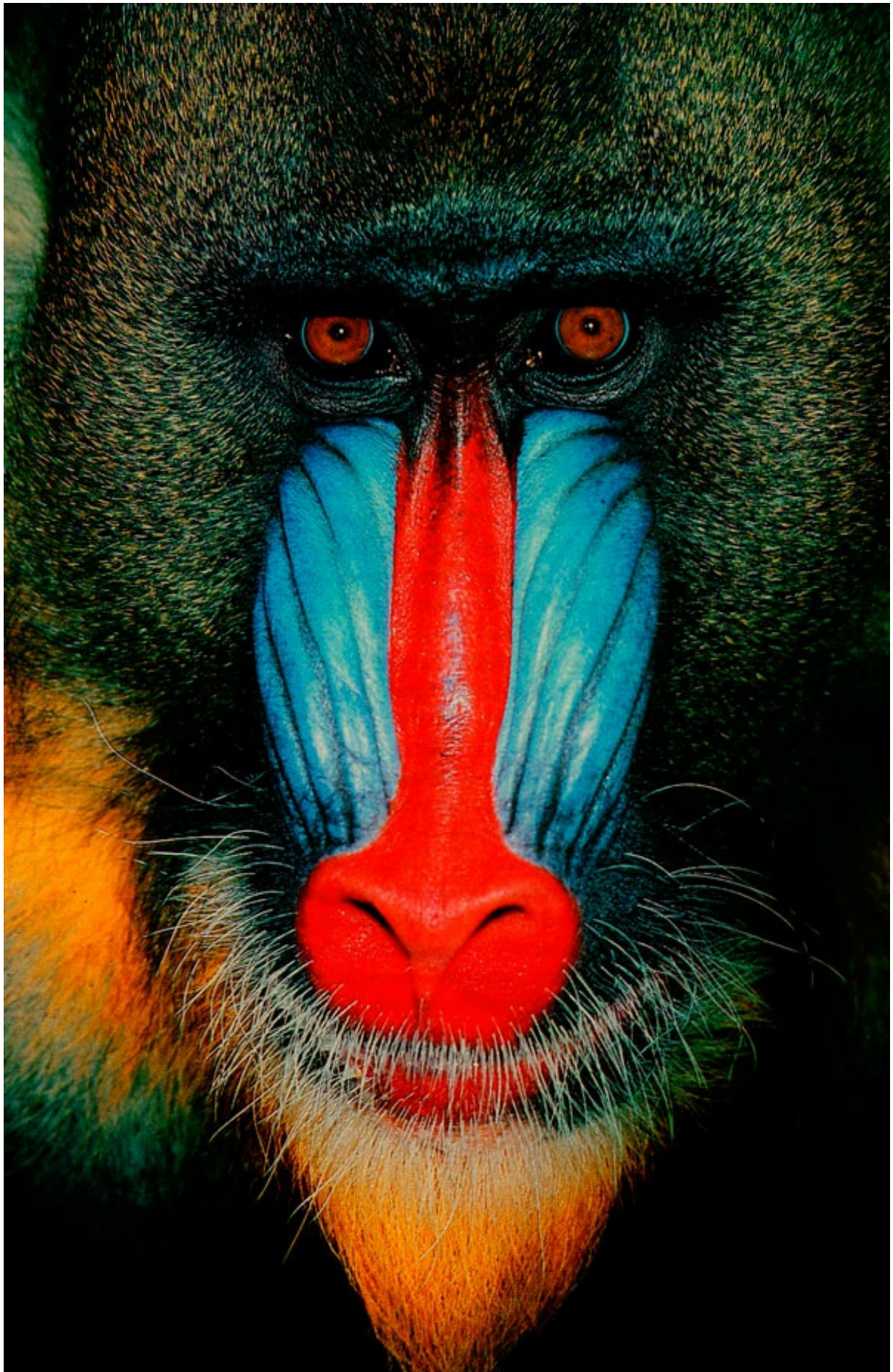


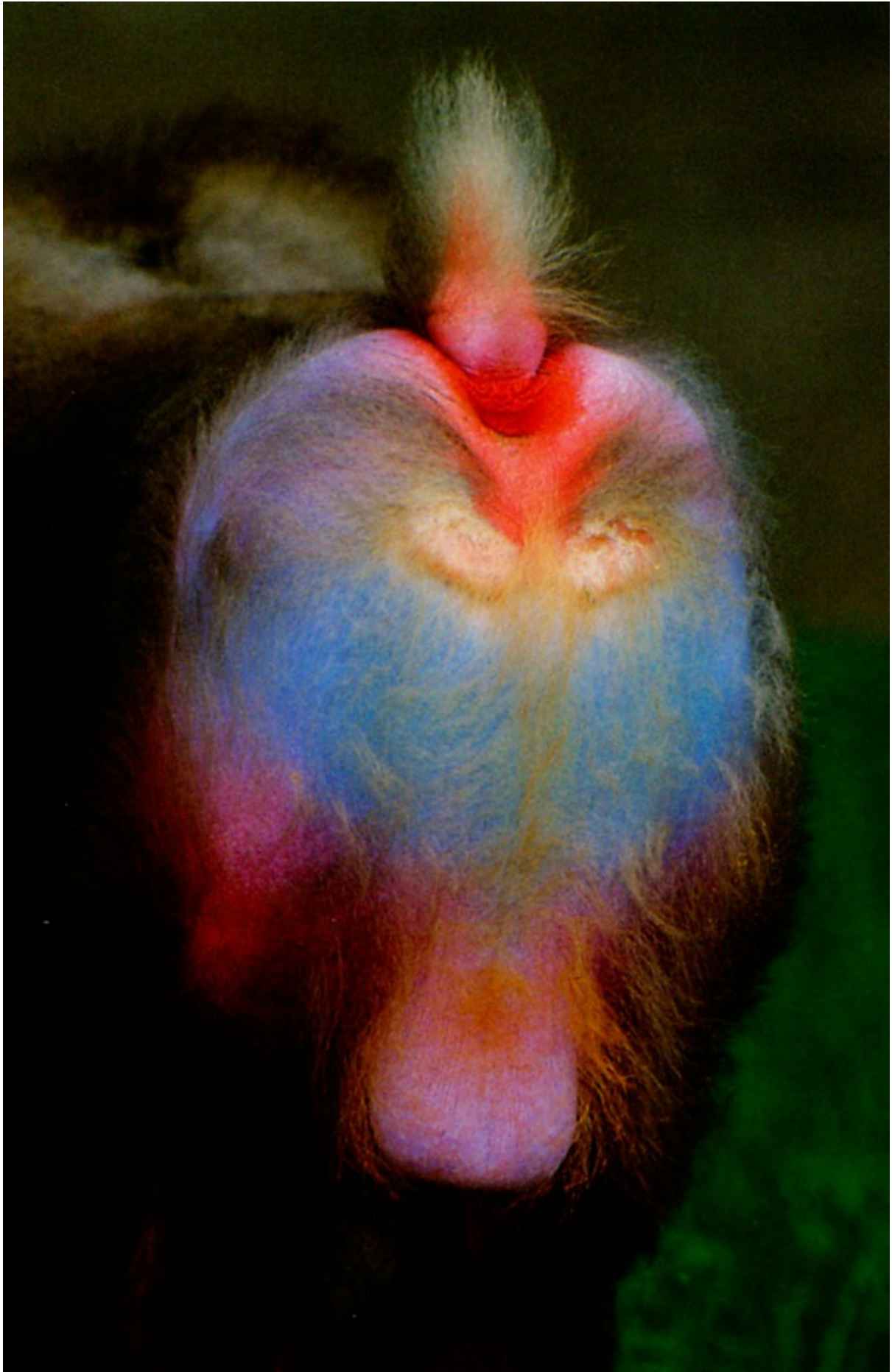
híbrido

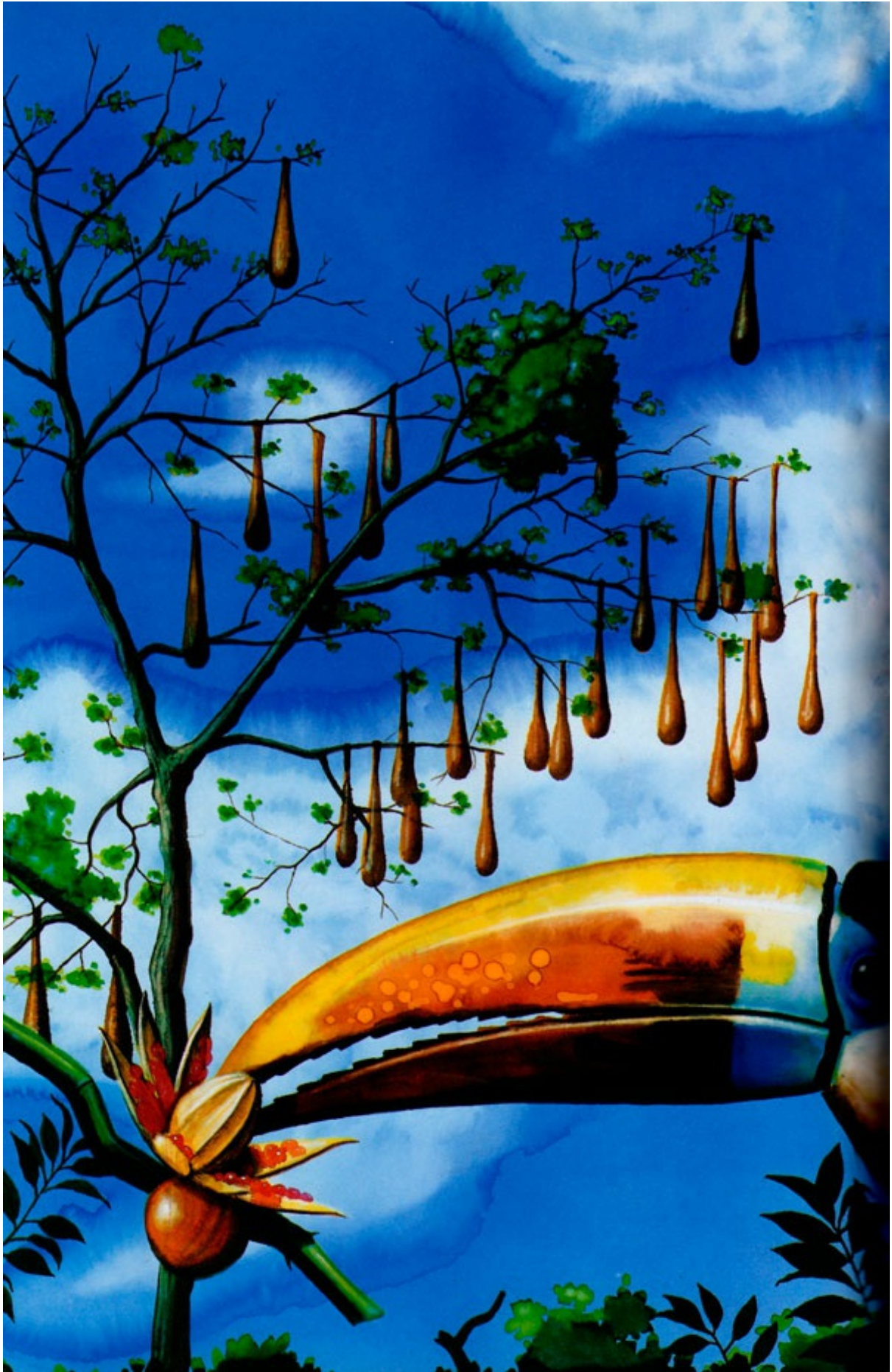


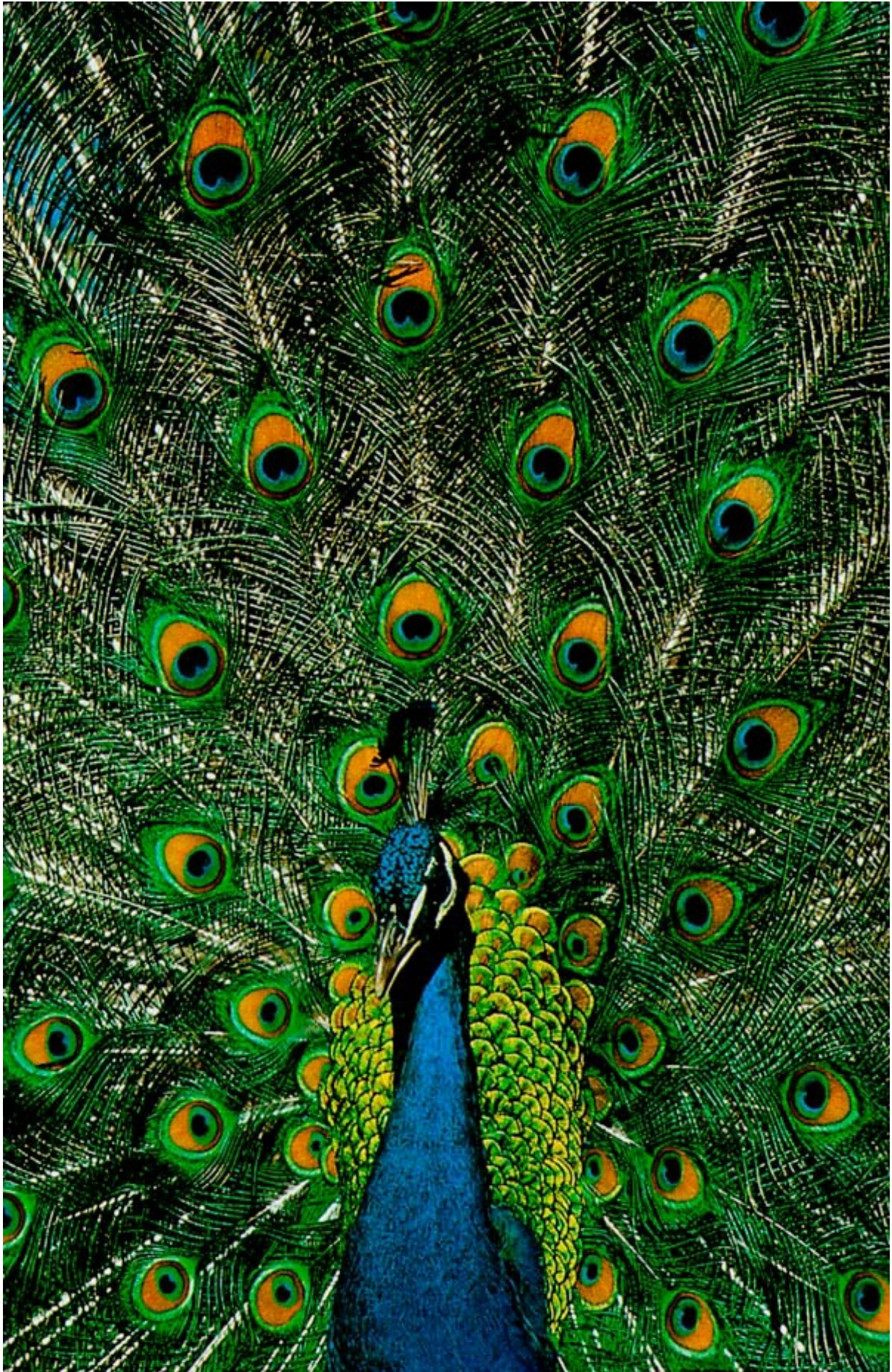






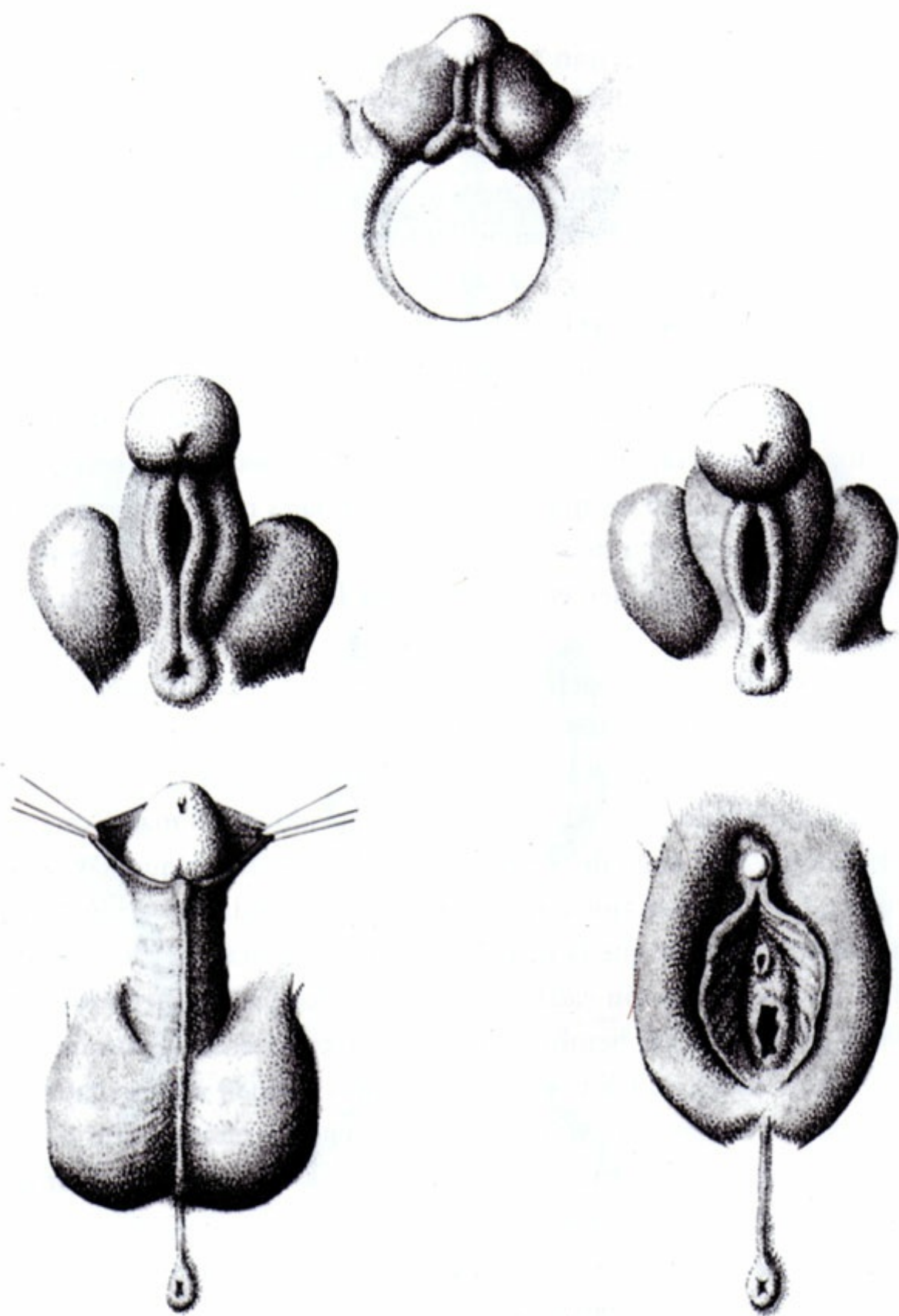


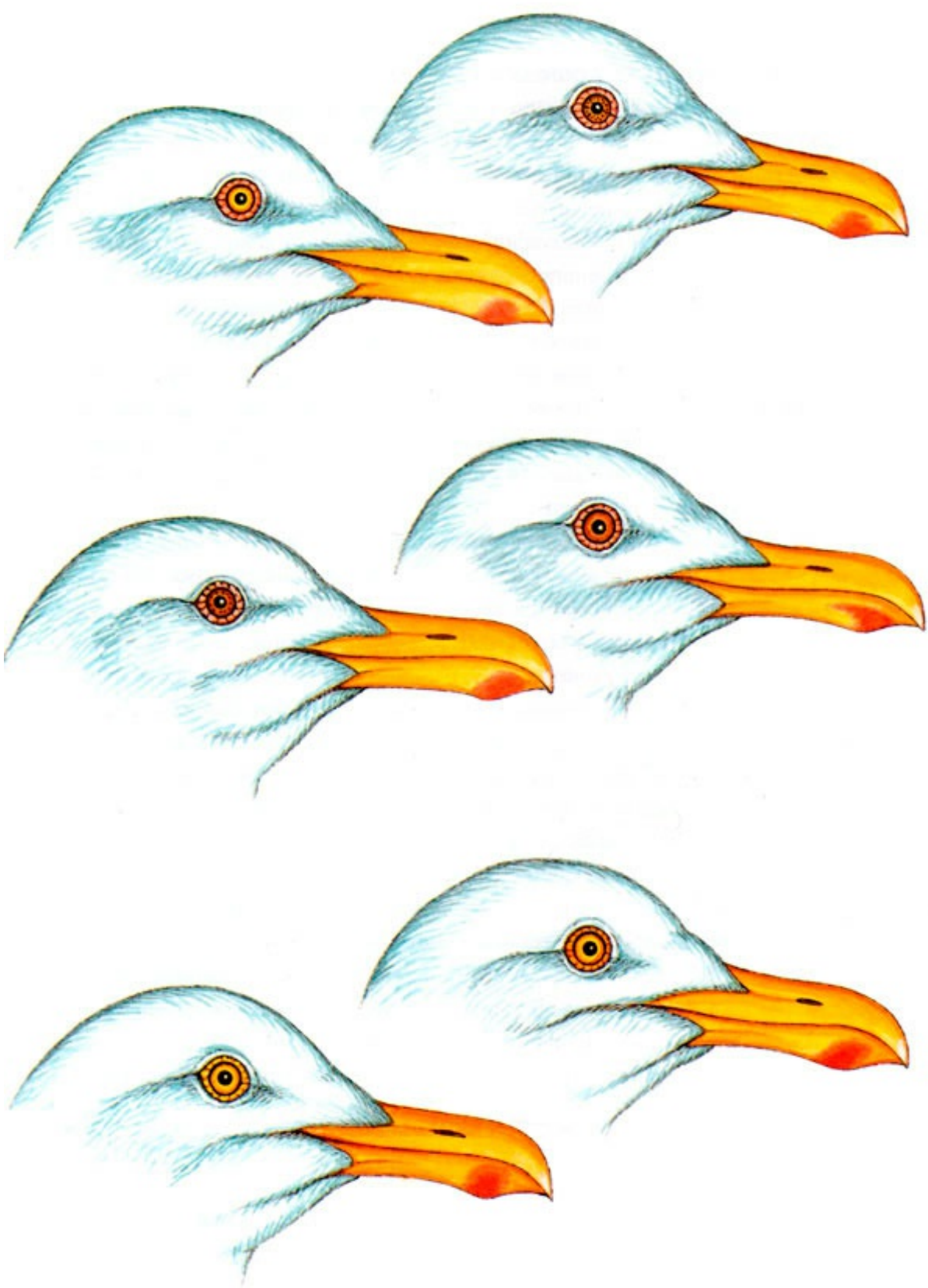


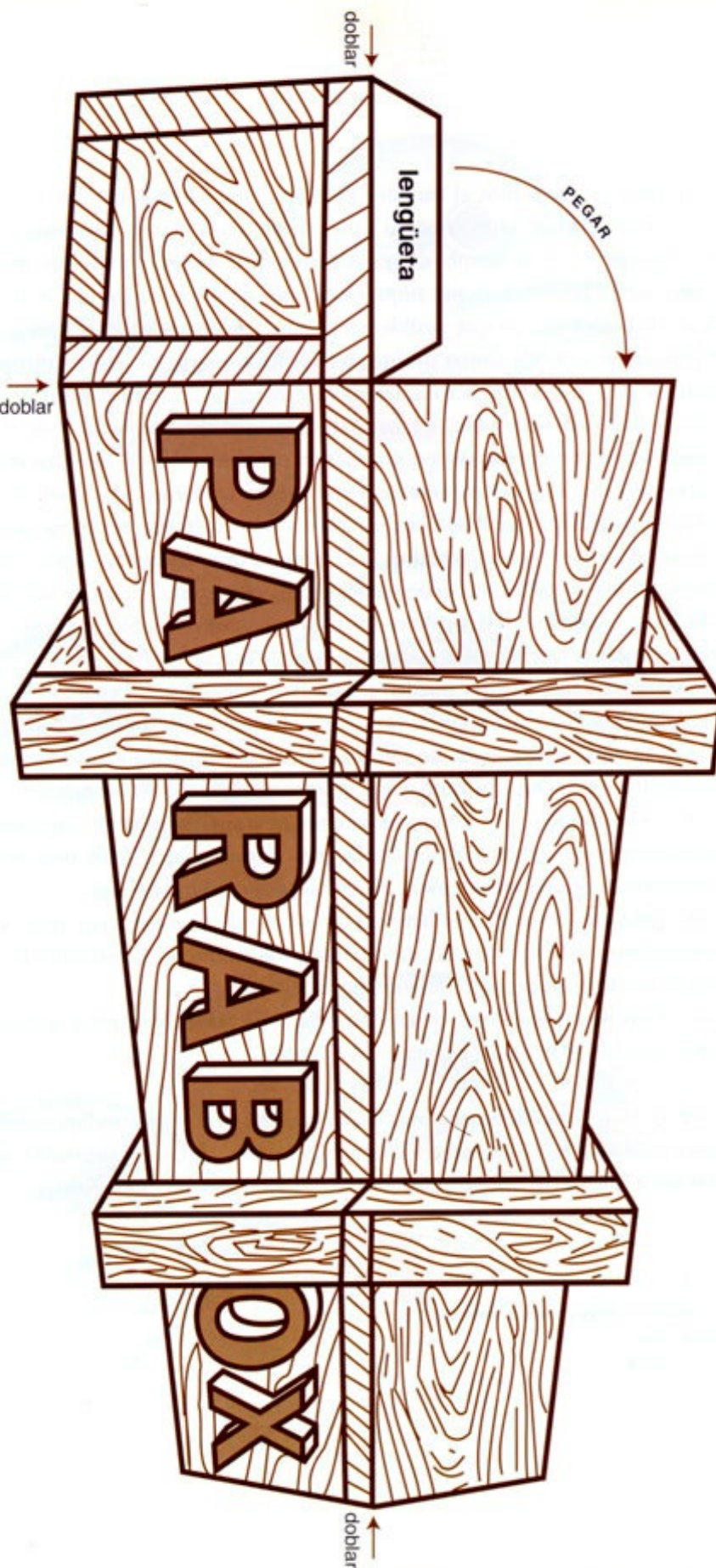




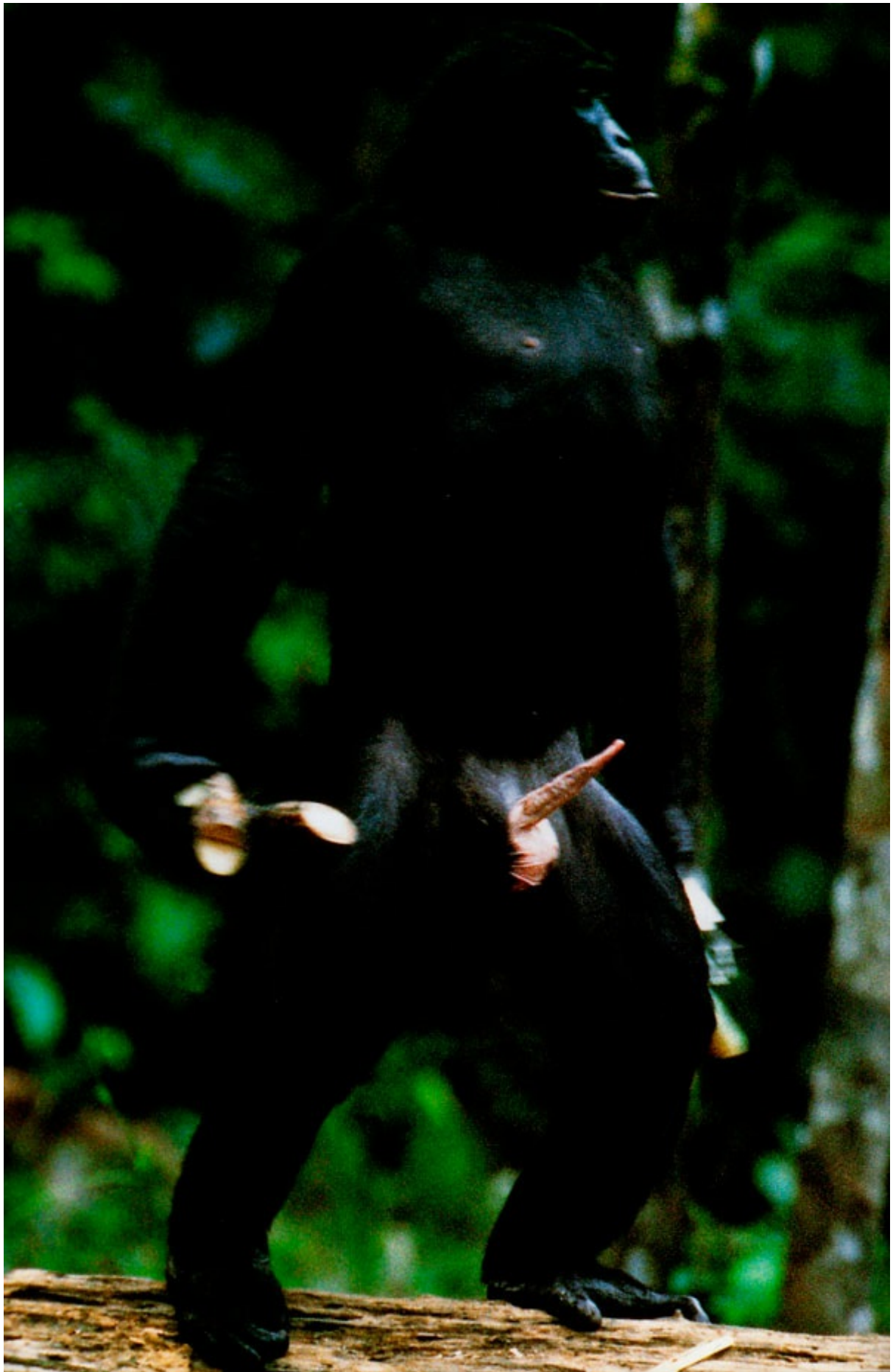


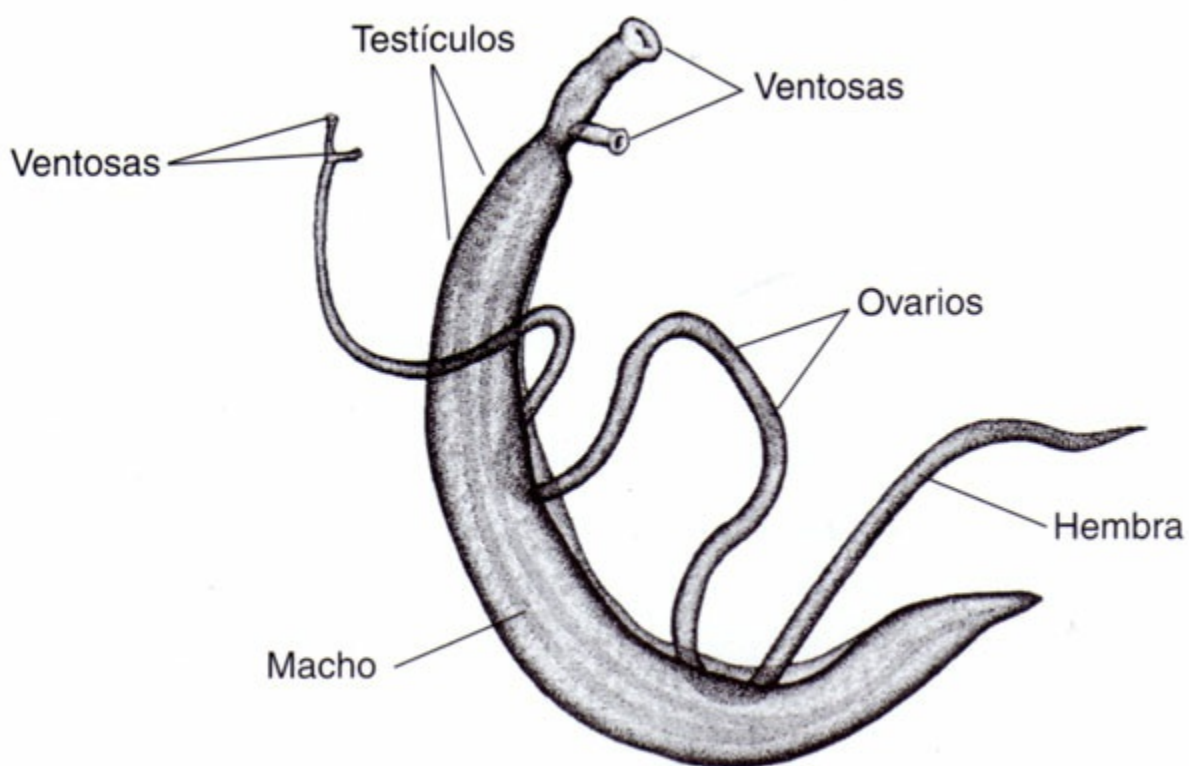
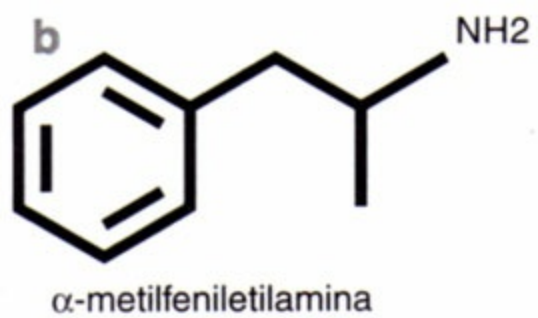
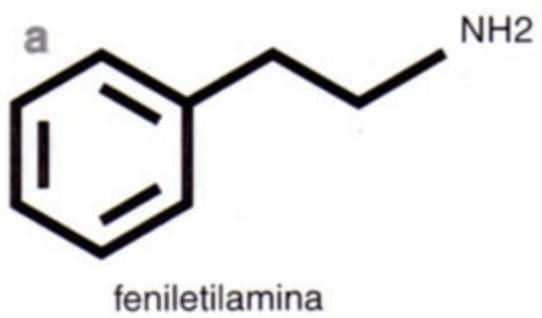






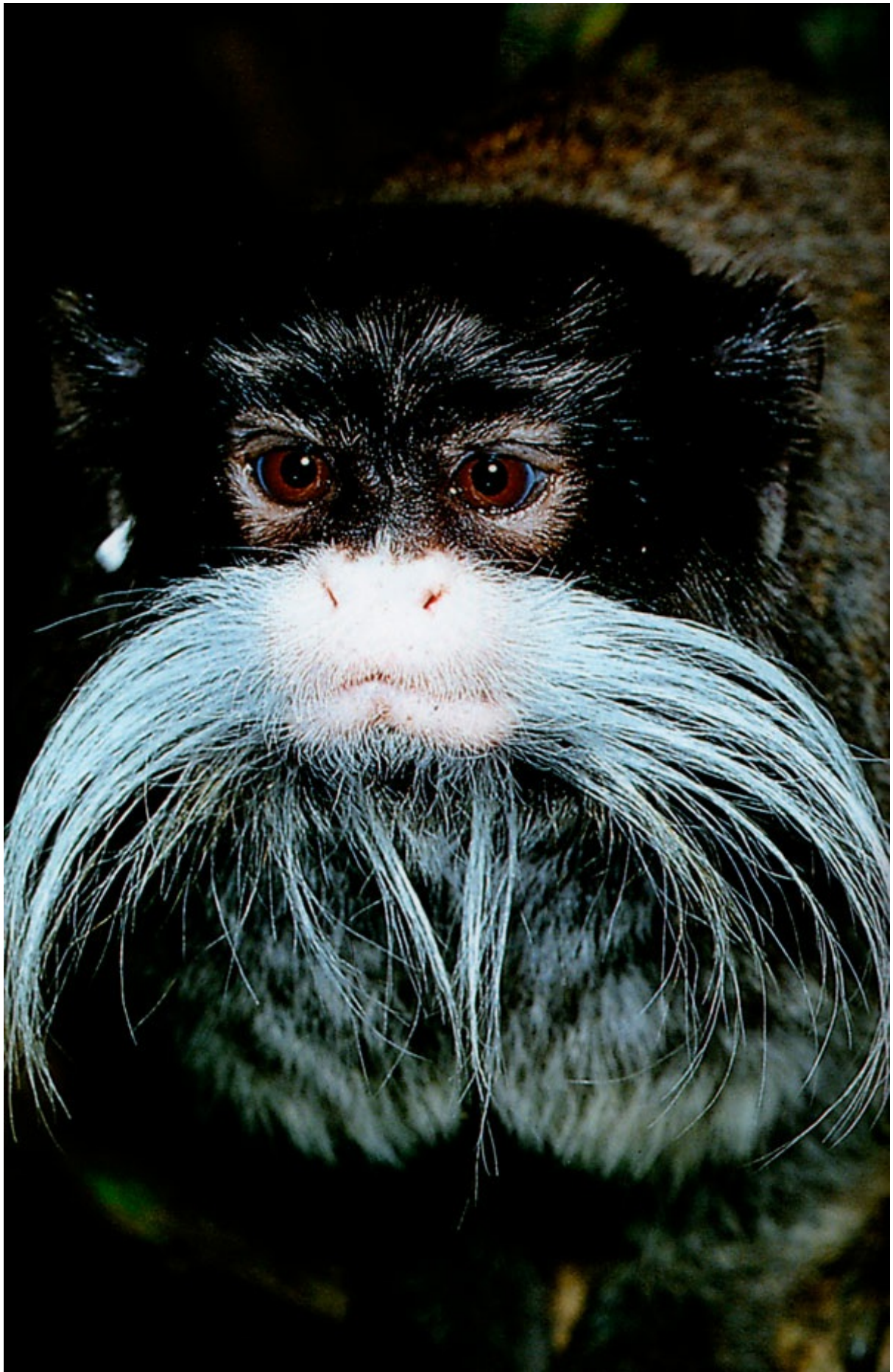


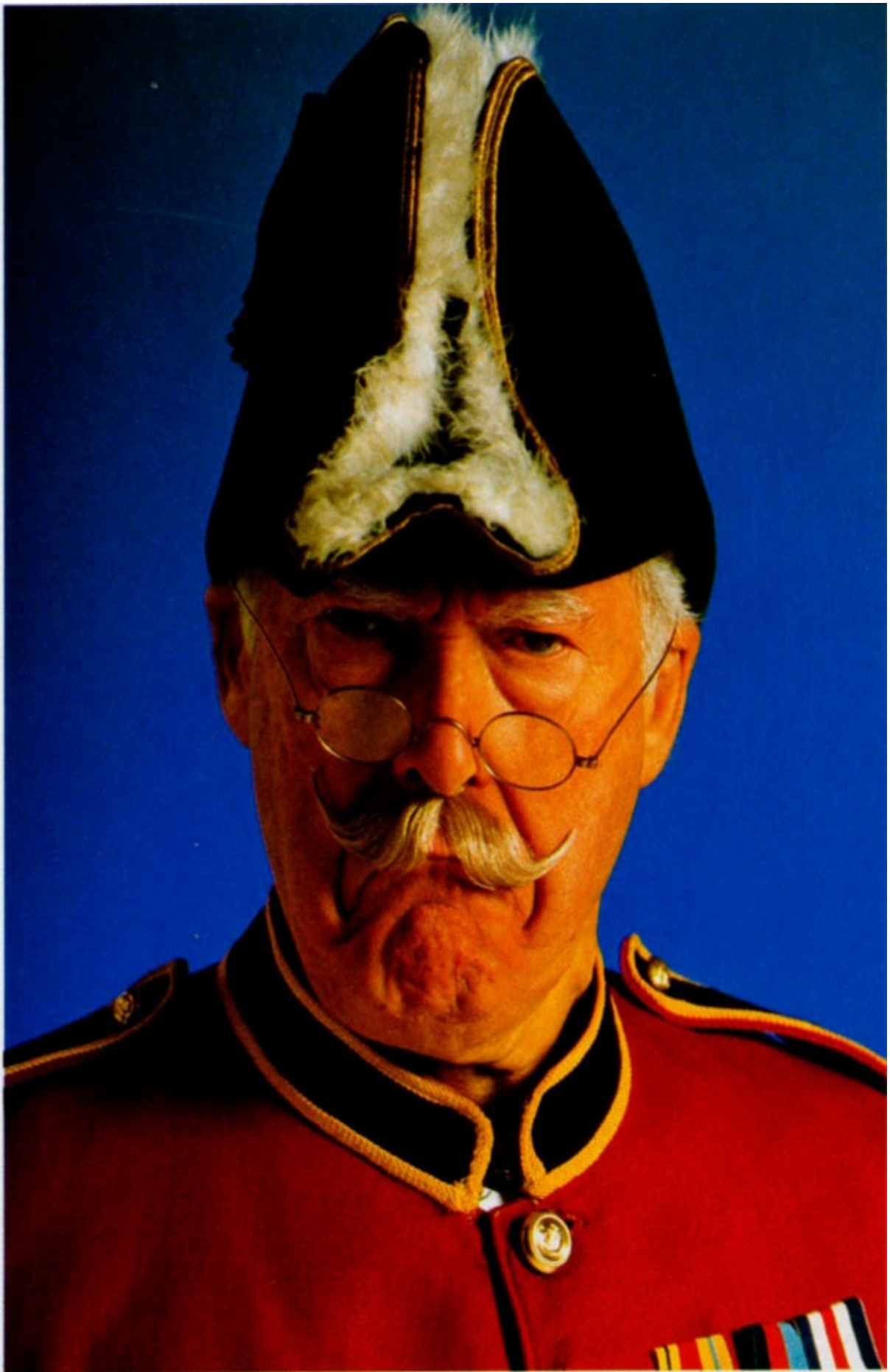




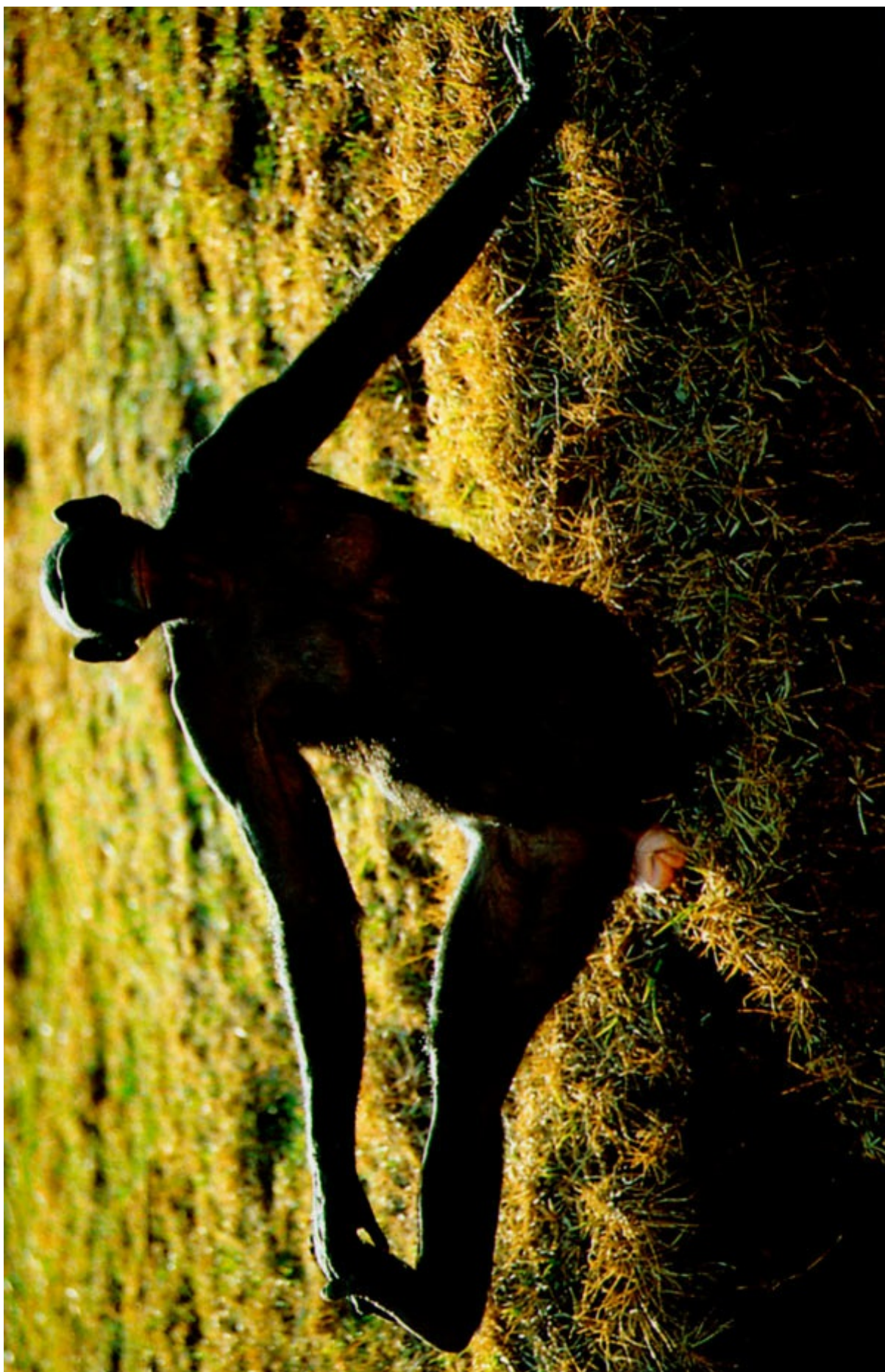




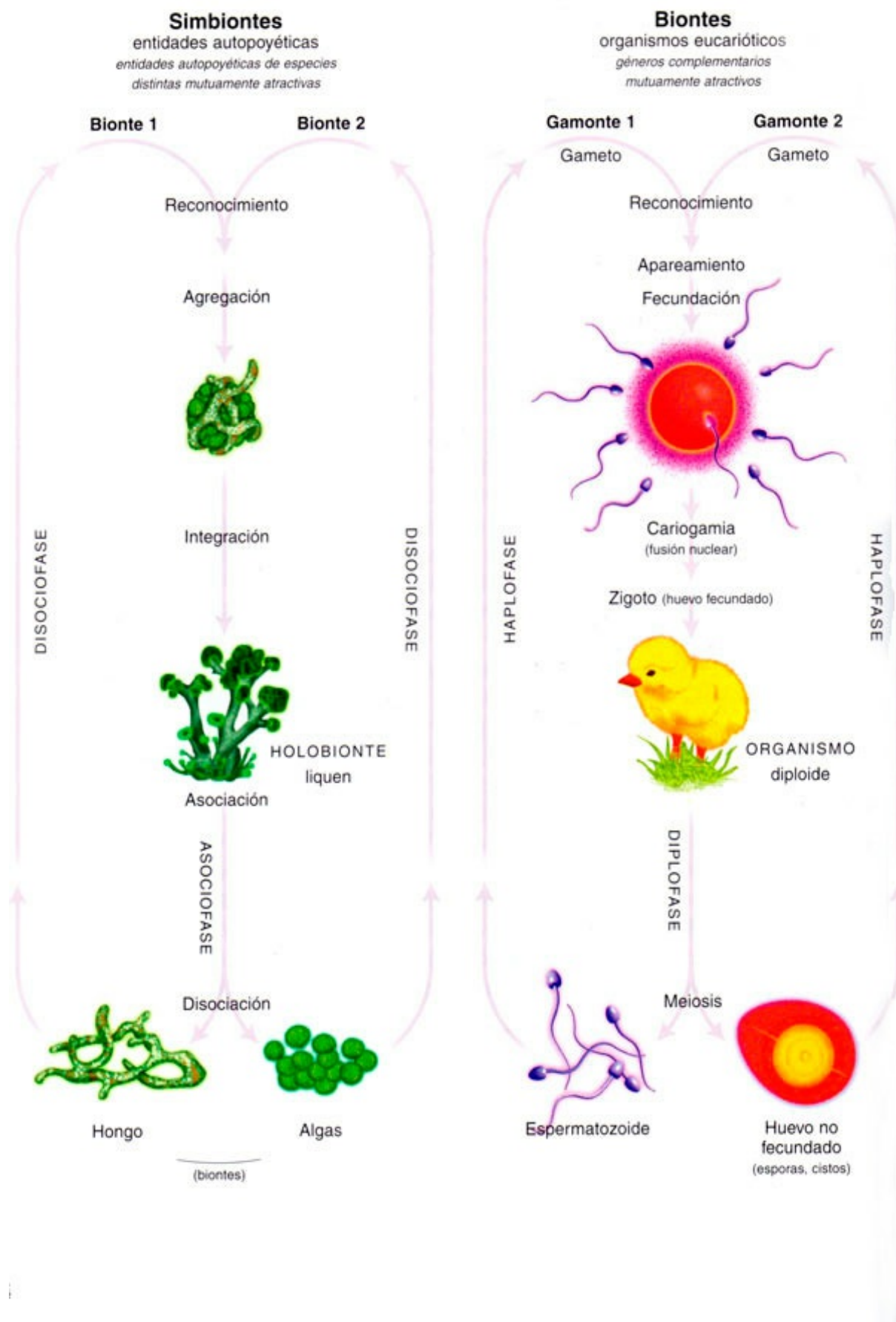




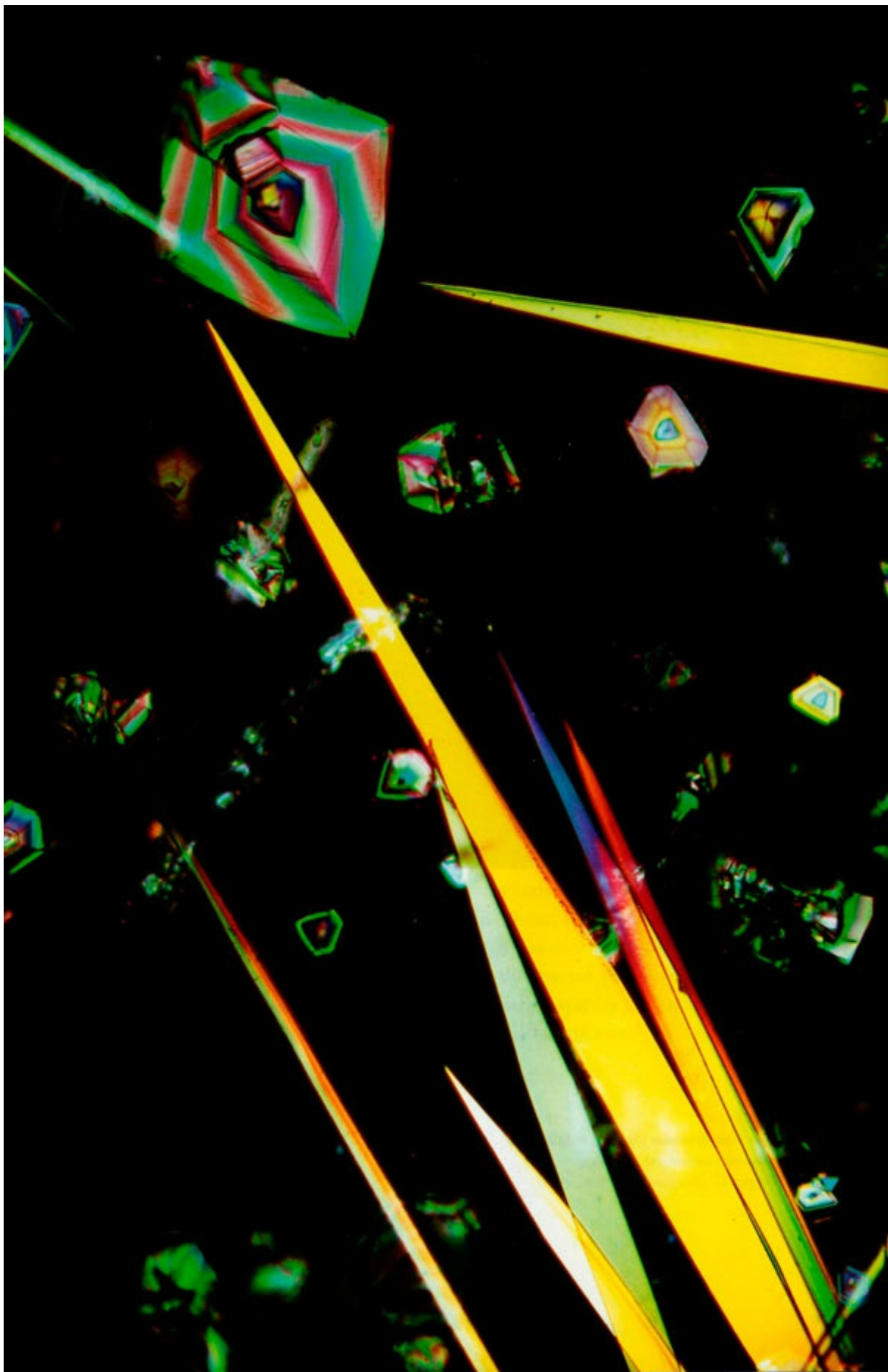


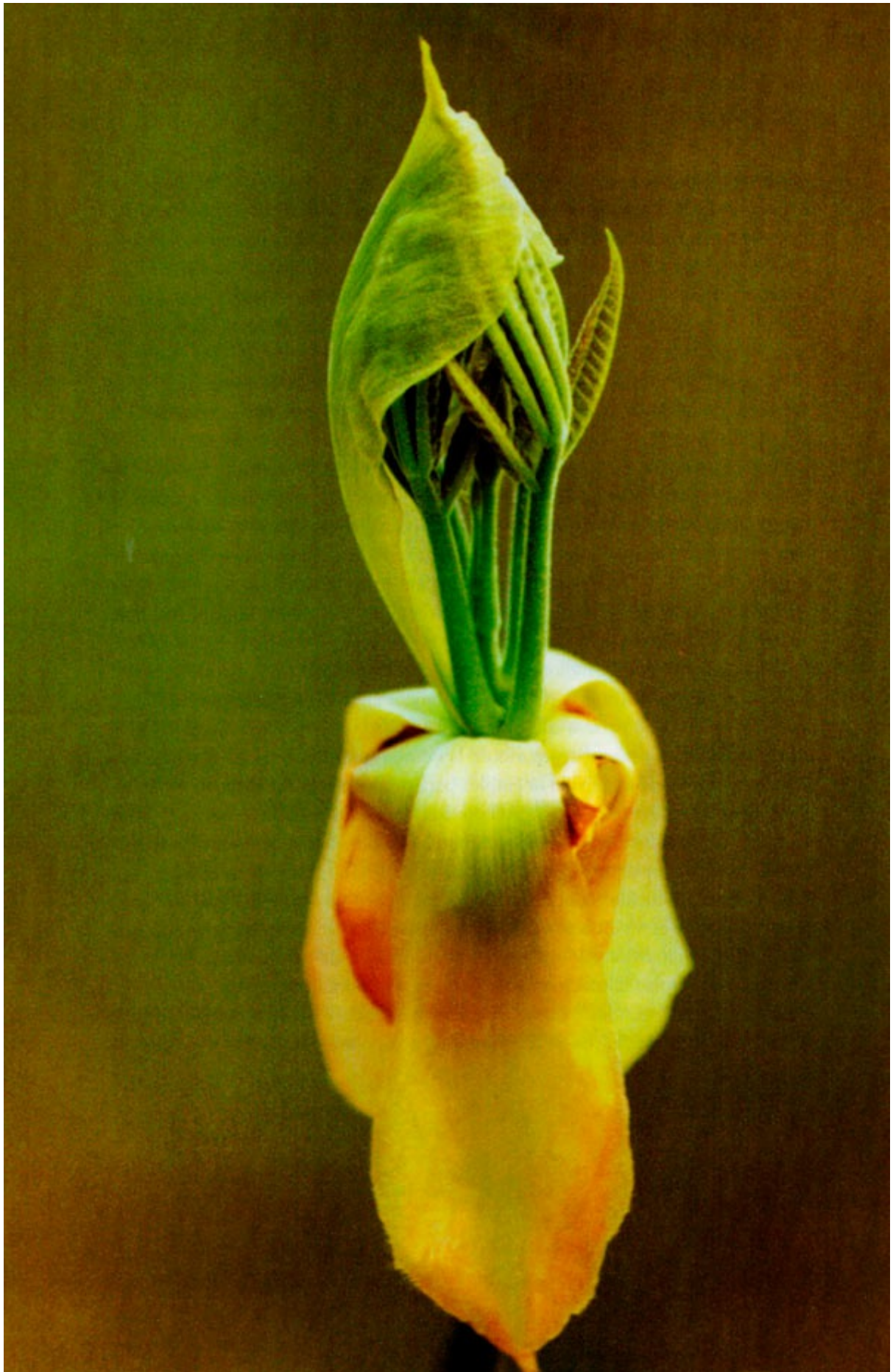












Notas

[0] En las discusiones sobre el sexo las palabras devienen gritos de batalla: al final del libro (accesible a través de la tabla de contenido) se ofrece un glosario de términos científicos y otros familiares pero ambiguos. También se incluyen todas las láminas referenciadas desde la tabla de contenidos para que puedan ser accesibles en cualquier momento de la lectura. <<

[¹] Redman, Alvin, ed., *The Wit and Humor of Oscar Wilde* (extraído de *Lady Windermere's Fan*), Dover, Nueva York, 1959, pág. 170. <<

[2] Toda forma de vida puede encuadrarse en uno de cinco grandes grupos o reinos: (1) bacterias, (2) protoctistas, (3) hongos, (4) plantas y (5) animales. En los tres primeros el sexo casi nunca es obligado, mientras que los dos últimos, formadores de embriones, por lo general necesitan del sexo para su reproducción y desarrollo. <<

[3] A pesar de la tradición léxica, en este libro, y de acuerdo con la convención moderna, emplearemos el término «género» para referirnos a las diferencias físicas que llevan al apareamiento entre los miembros de una especie. <<

[4] Vernadsky, W.I., «Problems of Biogeochemistry, II, The Fundamental Matter-Energy Difference between the Living and the Inert Natural Bodies of the Biosphere», (George Vernadsky tr., G.E. Hutchinson ed.), en *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, Yale University Press, New Haven, 1944, pág. 489. <<

[5] En la cada vez más aceptada clasificación en cinco 7 reinos, los protoctistas son una miscelánea de microorganismos «grandes» y sus derivaciones, desde amebas y algas unicelulares hasta los plasmodios y las algas pardas gigantes. Aunque algunos protoctistas son afines a las plantas y otros a los animales y hongos en cuanto a sus modos de nutrición, los miembros de este reino acuático no son ni plantas ni animales, que se desarrollan a partir de embriones, ni tampoco hongos, seres 8 terrestres que se desarrollan a partir de esporas carentes de apéndices motrices (undulipodios). Dado que (entre otras razones) tienen núcleos delimitados por una membrana, tampoco son equiparables a las bacterias. Los protoctistas son organismos nucleados que evolucionaron a partir de fusiones bacterianas. No son encuadrables en ninguno de los otros tres reinos derivados de fusiones bacterianas (plantas, animales y hongos). Para una revisión profesional de este vasto y aún poco conocido grupo véase L. Margulis, J.O. Corliss, M. Melkonian y D.J. Chapman, eds., *Handbook of Protoctista: the Structure, Cultivation, Habitats, and Life Histories of the Eukaryotic Microorganisms and their Descendants Exclusive of Animals, Plants and Fungi: A guide to the algae, ciliates, foraminifera, sporozoa, water molds, slime molds, and the other protoctists*, Jones and Bartlett Publishers, Sudbury (Ma.), 1990. Para descripciones cortas véase L. Margulis, H.I. McKhann y L. Olendzenski, eds., S. Hiebert, coordinador editorial, *Illustrated Glossary of Protoctista*, Jones and Bartlett Publishers, Sudbury (Ma.), 1993. <<

[6] Odum, Eugene, *Fundamentals of Ecology*, Saunders, Filadelfia, 1953; citado en Fritjof Capra, *Web of Life*, Anchor Books, Nueva York, 1996, pág. 176 [trad. esp.: *La trama de la vida*, Anagrama, Barcelona, 1998]. <<

[7] Morowitz, Harold, *Cosmic Joy and Local Pain: Musings of a Mystic Scientist*, Charles Scribners Sons, Nueva York, 1987, págs. 92-93. <<

[8] Sabemos que el poder explicativo de la Segunda Ley puede ser y ha sido en ocasiones extralimitado. Una teoría que lo explica todo no explica nada. Estamos convencidos, sin embargo, de que la Segunda Ley, con su reconocimiento implícito de la unidireccionalidad del tiempo, es crucial para la comprensión del trasfondo físico del origen y evolución de la vida.

<<

[9] Las conferencias de Dublín se reescribieron en E. Schrödinger, *What is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944 [trad. esp.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores (Metatemas 1), Barcelona, 1988]. Véase también L. Margulis y D. Sagan, *What is Life?*, Nevraumont/Simon & Schuster, Nueva York, 1995 [trad. esp.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores (Metatemas 45), Barcelona, 1996]. <<

[10] Las ecuaciones, sin embargo, son imperfectas porque ignoran la fricción, un fenómeno termodinámico que en la vida real se acrecienta sólo en un sentido temporal.

Para un tratamiento técnico de la importancia del flujo energético, véase Harold J. Morowitz, *Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics*, Ox Bow Press, Woodbridge (Connecticut), 1968 [trad. esp.: *Entropía para biólogos*, Blume, Madrid, 1978].

Para leer más sobre la alegada simetría auténtica del tiempo, véase Huw Price, *Times Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*, Oxford University Press, Nueva York, 1996.

Para leer más sobre los mecanismos de refrigeración global, véase James Lovelock, *Ages of Gaia*, W.W. Norton, Nueva York, 1988 [trad. esp.: *Las edades de Gaia*, Tusquets Editores (Metatemas 29), Barcelona, 1993] y Peter Westbroek, *Life as a Geological Force*, W.W. Norton, Nueva York, 1991.

Para leer más sobre ruptura de gradientes, véase Eric D. Schneider y James J. Kay, «Order from Disorder: The Thermodynamics of Complexity in Biology», en *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*, Michael P. Murphy y Luke A.J. O'Neil eds., Cambridge University Press, Cambridge, 1995, págs. 161-173 [trad. esp.: *¿Qué es la vida? Los siguientes 50 años*, Tusquets Editores, Barcelona, *en prensa*].

<<

[¹¹] Blake, William, *The Poetical Works of William Blake*, John Sampson ed., Oxford University Press, Londres, 1943, pág. 133. <<

[12] Sonea, Sorin y Maurice Panniset, *The New Bacteriology*, Jones & Bartlett, Sudbury (Ma.), 1983. <<

[13] Uno lee a menudo sobre «bacteriocromosomas», pero, estrictamente hablando, esta denominación es incorrecta. La estructura genética bacteriana, denominada genóforo (cuando se ve al microscopio electrónico) o cromonema (cuando se deduce de experimentos genéticos), no contiene histonas (proteínas cromosómicas) ni los apretados ovillos (nucleosomas) que componen los cromosomas (siempre en número de más de dos por célula) de los eucariotas. <<

[¹⁴] La relación entre las crisis y las formas de sexo más complejas (esto es, el sexo meiótico de los eucariotas, algunos de los cuales forman esporas sexuales sólo en respuesta al estrés ambiental extremo) se discute en el capítulo 3. <<

[15] Desde nuestra discusión sobre lo que es la vida en Lynn Margulis y Dorion Sagan, *¿Qué es la vida?* [Tusquets Editores (Metatemas 45), Barcelona, 1996], se nos ha hecho cada vez más evidente que la vida es uno de entre cierto número de procesos de degradación de energía (disipativos) que tienen lugar en el universo. Véase también Eric Schneider y Dorion Sagan, *Into the Cool: The New Thermodynamics of Creative Destruction*, Henry Holt & Co., Nueva York (en preparación). <<

[16] Para una exposición popular de la importancia evolutiva de la simbiosis, véase L. Margulis y D. Sagan, *Microcosmos: Four Billion Years of Microbial Evolution*, University of California Press, Berkeley, 1997 [trad. esp.: *Microcosmos*, Tusquets Editores (Metatemas 39), Barcelona, 1995]. Para detalles técnicos, consúltese L. Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution* (2ª edición), W.H. Freeman, Nueva York, 1993. <<

[17] Vidal, Gore, *Palimpsest: A Memoir*, Random House, Nueva York, 1995, pág. 23. <<

[18] En la meiosis zigótica, típica de los hongos, el cigoto experimenta una meiosis inmediatamente después del apareamiento. En la meiosis esporogénica, un progenitor diploide forma esporas vegetales (no gametos) por meiosis. En la meiosis gamética, típica de los animales, la meiosis sólo produce gametos (huevos y espermatozoides). <<

[19] La mayoría de textos biológicos emplea la expresión «células hijas». Esta terminología es, en el mejor de los casos, confusa (y en el peor francamente incorrecta), ya que ni la célula progenitora ni las descendientes tienen necesariamente género. Huelga decir que el problema se agrava cuando se introduce en las discusiones sobre los orígenes del sexo y el género. <<

[20] La meiosis nunca evolucionó en las amebas unicelulares, pero sí en sus descendientes pluricelulares, los plasmodios celulares. La meiosis evolucionó independientemente en ciliados, hipermastigotos, algas rojas, actinópodos, foraminíferos y quizá otros protoctistas. Ciertos linajes de protoctistas sexuales (a saber, los clorófitos, los quitridios y, quizá, los coanomastigotos) son probablemente los ancestros de las plantas, los hongos y los animales. Véase Apéndice. <<

[21] Los «cuerpos» de los hongos son masas de células filamentosas simples (haploides) que soportan sus propágulos producidos bien meióticamente (champiñones, colmenillas) bien mitóticamente (mohos). Las plantas desarrollan cuerpos en el estado simple (por ejemplo, los gametófitos masculino y femenino de los musgos), que producen gametos por mitosis. Los gametos se funden y forman el estado duplicado, denominado esporófito. Las células del esporófito se dividen meióticamente y ponen fin a la diploidía formando esporas haploides. Muchos hongos persisten en un estado producido sexualmente con núcleos no fusionados (y por lo tanto haploides) flotando dentro de filamentos cuyos citoplasmas sí se han mezclado. Esta masa haploide de núcleos no fusionados dentro de citoplasmas fusionados se denomina dicarión. <<

[22] Los tipos de plasmodios se distinguen por su biología fundamental: todos alternan entre individuos unicelulares y conglomerados pluricelulares que a nuestros ojos aparecen como individuos a mayor escala. Los acrasiomicetes consisten en amebas que se alimentan por separado y luego se congregan para formar esferas pedunculadas pluricelulares que se convierten en esporas resistentes. Los dictiostélidos consisten en amebas que se alimentan por separado y luego se congregan para formar una «babosa» migrante que se mueve como una sola masa pluricelular; al final la masa se detiene y se convierte también en una esfera pedunculada productora de esporas resistentes. Ni los unos ni los otros forman nunca células undulipodiadas. Las historias vitales de los plasmodios acelulares, los mixomicetes, son mucho más complejas. Las células individuales de los mixomicetes alternan entre amebas, amebomastigotos, mastigotos fusionables y amebas fusionables, además de los enormes plasmodios plurinucleados que semejan vegetales. <<

[23] Franks, N.R., «Army Ants: A Collective Intelligence», *American Scientist*, 77 (1989), págs. 139-145. Véase también E.O. Wilson, «Causes of Ecological Success: The Case of the Ants», *J. Anim. Ecol.* 56 (1987), págs. 1-9. Para un tratamiento más general véase Peter Corning, «Holistic Darwinism: Group Selection and the Bioeconomics of 10 Evolution», 19 Reunión Anual de la Sociedad Europea de Sociobiología, 22-25 de julio, 1996. Véase también Howard Bloom, *The Lucifer Principie: A Scientific Expedition into the Torces of History*, The Atlantic Monthly Press, Nueva York, 1995. <<

[24] Cuando hablamos de animales «superiores» queremos decir que son «más como nosotros». Cuando calificamos a los animales como nosotros de «superiores» quizá nos estemos refiriendo intuitivamente a su distancia del equilibrio termodinámico. El ARN, las bacterias, las fusiones bacterianas, las células nucleadas, las fusiones de células nucleadas y los cuerpos sexuales desarrollados a partir de la fusión específica de células nucleadas son pasos que se alejan cada vez más del «estado fundamental» de la materia inerte (no viva). <<

[25] La cuestión de que los animales uniparentales en realidad no son especies porque no tienen oportunidad de reproducirse entre ellos se plantea en «Sex and the Order of Nature», en Jeffrey S. Wicken, *Evolution, Thermodynamics, and Information: Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press, Nueva York, 1987, págs. 212-219. Pensamos que, en la práctica, las especies se definen por sus particularidades morfológicas («morfoespecies»). El criterio de la compatibilidad reproductora, aplicable a muchas plantas, hongos, protoctistas y animales, se limita a ciertos taxones, como pueden ser la mayoría de aves, mamíferos e insectos. Esta definición de especie no es útil para la vida en general. Aplicando el criterio morfológico, los animales uniparentales como las lagartijas de cola de látigo son fácilmente clasificables como especie reptiliana. <<

[26] Carrol, Lewis, *Through the Looking-Glass and What Alice Found There*, Macmillan, Londres, 1871. Citado en Man Ridley, *The Red Queen, Sex and the Evolution of Human Nature*, Macmillan, Nueva York, 1994, pág. 64. <<

[27] Gonick, Larry, «Science Classics», en *Discover*, diciembre 1995, págs. 108-109. Véase también L. Margulis y D. Sagan, *Origins of Sex*, Yale University Press, New Haven, 1990; D. Sagan y L. Margulis, «The Riddle of Sex», *The Science Teacher* 52 (1985), págs. 16-22. <<

[28] Rimbaud, Arthur, *Illuminations, and Other Prose Poems*, New Directions, Nueva York, 1957, pág. 147. <<

[29] Dobson, John L., «The Equations of Maya», en *Cosmic Beginnings and Human Ends: Where Science and Religion Meet*, Clifford N. Matthews y Roy Abraham Varghese, eds., Open Court, Chicago, 1995, pág. 272. <<

[30] Jantsch, Erich, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon Press, Nueva York, 1983, pág. 16. <<

[31] Una vez más, el término «especie» puede ser engañoso, ya que en estas poblaciones los organismos de género complementario no necesariamente se aparean para tener descendencia, y cuando se reproducen uniparentalmente no comparten un acervo genético común. Aunque no se pueden considerar una especie en el sentido zoológico tradicional, ciertamente son reconocibles como «morfoespecie». Para más ejemplos véase M.J.D. White, «The Cytology of Parthenogenesis», en *The Chromosomes*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1961, págs. 127-137. <<

[32] Holdrege, Craig, *Genetics and the Manipulation of Life*, Lindisfarne Press, Hudson (Nueva York), 1996. <<

[33] *Ibíd*, págs. 110-111. <<

[34] Sabemos que este concepto de demora relativa (del centrómero respecto de la reproducción cromosómica o viceversa) no es fácil de comprender y que la explicación aquí ofrecida es insuficiente. Para los necesarios detalles técnicos, incluyendo la explicación del comportamiento de los centrómeros en la fisión cariotípica, véase L. Margulis y D. Sagan, *Origins of Sex*, Yale University Press, New Haven, 1990, y especialmente L. Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution* (2ª ed.). Para una descripción corta véase «The Riddle of Sex», capítulo 21 de nuestro *Slanted Truths*, Springer Verlag, Nueva York, 1997, págs. 283-294. Nota: nuestra discusión sobre la muerte celular se ha basado parcialmente en la obra de William R. Clark, *Sex and the Origins of Death* (Oxford University Press, Oxford, 1996), por lo que queremos expresar nuestro agradecimiento. <<

[35] Darwin, Erasmus [abuelo de Charles], *Zoonomia: The Laws of Organic Life*, vol. 1, J. Johnson, Londres, 1794, págs. 503 y 519. Redman, Alvin, ed., *The Wit and Humor of Oscar Wilde* (extraído de *A Woman of no Importance*), Dover, Nueva York, 1959, pág. 105. <<

[36] Schneider, Eric D. y James J. Kay, «Order from Disorder: The Thermodynamics of Complexity in Biology», en *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*, Michael P. Murphy y Luke A.J. O'Neil, eds., Cambridge University Press, Cambridge, 1995, págs. 161-173 [trad. esp.: *¿Qué es la vida? Los siguientes 50 años*, Tusquets Editores, Barcelona, *en prensa*]. <<

[37] Abram, David, *The Spell of the Sensuous*, Pantheon Books, Nueva York, 1996. <<

[38] Darwin, Charles, *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*, Murray, Londres, 1874, pág. 257 [trad. esp.: *El origen del hombre*, EDAF, Madrid, 1982]. <<

[39] Andersson, M., «Female Choice Selects for Extreme Tail Length in a Widow Bird», *Nature*, 299 (1982), págs. 818-820. <<

[40] Wallace, A.R., *Darwinism*, 3^a ed., Macmillan, Londres, 1901, pág. 273. <<

[41] Extraído de F. Darwin y A.C. Seward, eds., *More Letters of Charles Darwin: A Record of His Work in a Series of Hitherto Unpublished Letters*, John Murray, Londres, 1903, págs. 62-63. <<

[42] Hamilton, H.D. y M. Zuk, «Heritable True Fitness and Bright Birds: A Role for Parasites?», *Science* 218 (1982), págs. 384-387. <<

[43] Eberhard, William G., *Sexual Selection and Animal Genitalia*, Harvard University Press, Cambridge, 1985, pág. 83. <<

[44] Una elección de Hobson no es una elección en absoluto, sino una respuesta a una sutil coerción por parte de un mago. La interesante naturaleza «forzada» de la elección sexual femenina suscita la cuestión más amplia de la elección en general. Como es bien sabido, el libre albedrío no casa bien con la visión científica del mundo prevaleciente, en la que todo, la vida incluida, es mayormente el resultado determinista de interacciones pasadas. Pero la sensación de poder elegir libremente entre leer o no esta frase hasta el final o cerrar este libro (e incontables decisiones más) es inmediata y fuerte. La «absurdidad de la elección» (frase que debemos a Robin Kolnicki) dentro de la moderna visión científica del mundo nos fuerza a llegar a una de dos conclusiones: o bien el libre albedrío existe y la ciencia debe encontrar la manera de acomodarlo, o bien es una ilusión. ¿Podría ser, nos preguntamos nosotros, que la sensación de poder elegir fuese un «atajo» mental que nos permitiese dar sentido a decisiones que de otro modo, aunque sólo sea por su número, nos abrumarían? ¿Y podría ser que los organismos no determinados, autómatas con una ilusión de libre albedrío, tuvieran más posibilidades de supervivencia que los robots bioquímicos sin una tal demencia? <<

[45] Eberhard, William G., *Sexual Selection and Animal Genitalia*, Harvard University Press, Cambridge, 1985, pág. 71. <<

[46] Smith, N.G., «Visual Isolation by Gulls», *Scientific American*, 217 (4), 1967, págs. 94-102. <<

[47] Existe, sin embargo, una objeción filosófica. Desde una posición de duda radical, nada puede realmente salvaguardar una epistemología evolutiva: si una creencia sobre la naturaleza contribuye a nuestra supervivencia, nos adheriremos a ella tanto si se corresponde con alguna realidad externa como si no. Por ejemplo, la creencia en unos dioses del viento y la lluvia malévolos persistirá si hace que las tribus dediquen más atenciones a sus cultivos. <<

[48] Shephard, Roger N., *Mind Sights: Original Visual Illusions, Ambiguities, and Other Anomalies, with a Commentary on the Play of Mind in Perception and Art*, W.H. Freeman, Nueva York, 1990, pág. 4. <<

[49] Delbruck, Max, «An Essay on Evolutionary Epistemology», en *Mind from Matter*, Gunther S. Stent y Peter Fischer, eds., Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1985. <<

[50] Angier, Natalie, «Illuminating How Bodies are Built for Sociability», *The New York Times*, 30 de abril de 1996, págs. CI y CII. Véase también Diane Ackerman, *A Natural History of Love*, Vintage Books, Nueva York, 1994, págs. 166-167. <<

[51] Liebowitz, Michael, *The Chemistry of Love*, Little Brown, Boston, 1983. <<

[52] Ackerman, Diane, *A Natural History of Love*, Vintage Books, Nueva York, 1994, págs. 164-166. <<

[53] Trivers, R.L., *Social Evolution*, Benjamin Cummings, Menlo Park (California), 1985. <<

[54] Smith, Robert, ed., *Sperm Competition and the Evolution of Animal Mating Systems*, Academic Press, Orlando (Florida), 1984. Véase también R.R. Baker y M.A. Bellis, *Human Sperm Competition: Copulation, Masturbation and Infidelity*, Chapman & Hall, Londres, 1994. <<

[55] El antiguo nombre científico del chimpancé, *Pan satyrus*, hace referencia al mito que ve al antropoide como un sátiro libidinoso. El vocablo gorila, derivado del nombre griego de una tribu de mujeres africanas velludas, habría sido un nombre más adecuado para los bonobos que *Pan paniscus*, de acuerdo con el primatólogo Frans B.M. de Waal. Véase Frans B.M. de Waal, «Bonobo Sex and Society», *Scientific American*, marzo, 1995, págs. 82-88. <<

[56] A la luz de la evolución de los sistemas de apareamiento, el rechazo del aborto por los partidarios del «derecho a la vida» es una institucionalización de los antiguos celos posesivos masculinos. Para nosotros, este activismo antiabortivo es, en parte, una forma de impedir la inseminación ulterior por otros machos de mujeres que ya han sido inseminadas por un macho «dominante». El control reproductivo de los cuerpos de las mujeres asegura que la elección femenina, vehementemente defendida por Darwin como factor evolutivo en el reino animal, continúe rigiendo en el ámbito humano: al elegir con quién se reproducen, las hembras continúan conformando la evolución humana. <<

[57] Frank, Laurence G., Mary L. Weldele y Stephen M. Glickman, «Masculinization Costs in Hyenas», *Nature* 577 (1995), pág. 6550. En «Sex and the Spotted Hyena», un coloquio celebrado en febrero de 1996 en el marco del programa de neurología y comportamiento de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Glickman notificó el descubrimiento de que los ovarios de las hienas producen poco estrógeno y mucha androstenodiona, el precursor bioquímico tanto de la testosterona como del estradiol, un estrógeno. En la mayoría de mamíferos, nosotros incluidos, los andrógenos que normalmente circulan por la sangre materna son neutralizados por proteínas que se fijan a ellos evitando la masculinización potencial de los fetos femeninos. En las hienas, sin embargo, la placenta sintetiza testosterona a partir de la androstenodiona de origen ovárico, cerca del embrión femenino en desarrollo. Un enzima llamado aromatasa convierte la testosterona en estradiol, la hormona responsable de asegurar la feminidad de la cría. Desde que se llevaron a cabo estos estudios, en San Francisco se ha diagnosticado una deficiencia de aromatasa en tres personas de sexo genéticamente femenino que mostraban caracteres sexuales secundarios masculinos. <<

[58] La cita del geoquímico Robert Garrels es una comunicación personal a Dorion Sagan en la cafetería de la Universidad de California en San José, en 1984. <<

[59] Los términos «conformidad» y «novedad» para describir estos dos polos cruciales de la dinámica de la vida han sido acuñados por el astrofísico Erich Jantsch. Véase Erich Jantsch, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon Press, Nueva York, 1983. <<

[60] Las comparaciones entre pulgas de agua, langostas, conejos y monos genéticamente idénticos han demostrado la existencia de una variabilidad neural resultado de las circunstancias del entorno y las pautas de desarrollo individuales. Véase Gerald M. Edelman, *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of the Mind*, Basic Books, Nueva York, pág. 26. <<

[61] Nuestra relación con el agua subraya nuestra cuasiconvergencia con animales acuáticos que evolucionaron a partir de ancestros terrestres. Varios rasgos característicos de nuestra especie, incluyendo la espina dorsal flexible, la capacidad para lagrimear copiosamente, la relativa ausencia de pilosidad, el reflejo de mordaza, la capacidad innata de aprender rápidamente a nadar, las manos palmeadas (y ocasionalmente los pies), han llevado a algunos a sugerir que, a diferencia de otros monos, nuestra especie pasó por una fase de evolución acuática. Los personajes de la novela *Galapagos*, de Kurt Vonnegut, experimentan una evolución convergente. Unos pocos turistas ricos y celebridades en una remota isla desierta sobreviven a la tercera guerra mundial y a una pandemia semejante a la del sida; sus descendientes acaban desarrollando grasa subcutánea, cabezas reducidas y puntiagudas, de manera que apenas salpican al zambullirse, y después de los tres años de edad son incapaces de recordar a sus madres. Vonnegut retrata a estos descendientes acuáticos nuestros tendidos al sol fuera del agua y recuerda al lector que el único rasgo que los liga firmemente a sus ancestros humanos es que, predicablemente, cuando uno de ellos se tira un pedo los otros estallan a carcajadas. En una especie de versión abreviada del argumento ficticio de Vonnegut, la teoría acuática sugiere que (como los ancestros de los leones marinos, focas, morsas, delfines y ballenas) los ancestros de la especie humana retornaron al agua, pero esta evolución no siguió su curso y nos readaptamos a la tierra. La teoría de que un periodo crucial de nuestra evolución, quizá durante el Pleistoceno, habría transcurrido cerca y dentro del agua fue inicialmente propuesta por el biólogo marino Sir Alister Hardy. Esta teoría pretendía dar cuenta de nuestra capa de grasa subcutánea que, como había hecho notar un anatomista, falta en los chimpancés, nuestros parientes más cercanos. «La visión de Hardy... de un primate ancestral conducido hasta las islas costeras de lo que entonces era la costa oriental africana... de un “pingüino tropical”... ha sido criticada por los más tradicionalistas, quienes aducen que es puramente conjetural y no existe la más mínima traza de evidencia directa que la apoye. Lo que no admiten es que su propia teoría del “cazador de sabana”

es igualmente circunstancial». Véase Desmond Morris, *The Human Animal: A Personal View of the Human Species*, Crown Publishers, Nueva York, 1994, págs. 53-61. La importancia de los ácidos grasos esenciales en la dieta humana, obtenibles directamente del pescado, podría apoyar también la idea de Hardy de un pasado acuático. <<

[62] Butler, Samuel, *Unconscious Memory*, vol. 6 de *The Shrewsbury Edition of the Works of Samuel Butler*, Jonathan Cape, Londres, 1924, pág. 57. Para leer más sobre la transición evolutiva de las sociedades a los organismos véanse las siguientes referencias: D. Sagan, «Metametazoa: Biology and Multiplicity», en *Incorporations (Zone 6; Fragments for a History of the Human Body)*, Jonathan Crary y Sanford Kwinter, eds., Zone, Nueva York, 1992, págs. 362-385; D. Sagan, «What Narcissus Saw: The Oceanic “I”/Eye», en *Slanted Truths: Essays on Symbiosis, Gaia and Evolution*, Springer Verlag, Nueva York, 1997; y D. Sagan, *Biospheres*, Bantam Books, Nueva York, 1990 [trad. esp.: *Biosferas*, Alianza Editorial, Madrid, 1995]. Véase nuestra exposición de las teorías de Samuel Butler en el capítulo 9 de L. Margulis y D. Sagan, *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores, (Metatemas 45), Barcelona, 1996. <<

[63] Sherman, Paul W., Jennifer U.M. Jarvis y Richard D. Alexander, *The Biology of the Naked Mole-Rat: Monographs in Behavior and Ecology*, Princeton University Press, Princeton, 1991. <<

[64] Aunque nos resulte difícil concebir un cuerpo sin cabeza o una nación sin rey, primer ministro, presidente o cualquier otro jefe de estado, la estratificación orgánica no incluye ninguna cabeza ni la estructura jerárquica vertical que implica. Los holones son entidades compuestas de holones menores, de la misma forma que las comunidades están compuestas de individuos. Tomados en conjunto, los holones forman «holarquías». Las holarquías hacen referencia a organizaciones con distintos centros de poder, con muchas «cabezas». Sin embargo, la importancia central de una cabeza para nuestra noción de cuerpo nos alerta de que la focalización del poder y la comunicación en un área central es una ruta trillada en la reorganización biológica. <<

[65] Freud, Sigmund, *Civilization and its Discontents*, Joan Riviere tr., The Hogarth Press, Londres, 1955, págs. 76-77. <<

[66] Colborn, Theo, Dianne Dumanoski y John Peterson Myers, *Our Stolen Future: Are We Threatening Our Fertility Intelligence, and Survival? —A Scientific Detective Study*, Dutton, Londres, 1996. <<

[67] Gimeno, Sylvia, Anton Gerritsen y Tim Bowmer, «Feminization of Male Carp», *Nature* 384(21), 1996, págs. 221-222. <<

[68] Fausto-Sterling, Anne, «The Five Sexes: Why Male and Female are Not Enough», *The Sciences*, marzo/abril, 1993, págs. 20-24. <<

[69] Terman, Richard C, «Sexual Maturation of Male and Female White-Footed Mice (*Peromyscus leucopus noveboracensis*): Influence of Physical or Urine Contact with Adults», *Journal of Mammalogy*, 65(1), 1984, págs. 97-102. <<

[70] B.R. Komisaruk y B. Whipple han demostrado después la vía del nervio vago en ratas cortándoles la médula espinal, estimulando la cerviz y observando luego la dilatación de las pupilas y un incremento en el umbral del dolor de los animales. También obtuvieron el mismo resultado eliminando segmentos de la médula espinal. En 1990, Matthew J. Wayner, de la Universidad de Texas en San Antonio, inyectó un trazador químico en los genitales de las ratas y observó que éste era absorbido por el nervio vago, «lo que indicaba que había una ruta que circumnavegaba la médula espinal». DeKoker, Brenda, «Sex and the Spinal Cord: A New Pathway for Organism», *Scientific American*, 275(6), 1996, págs. 30-32. <<

[71] Shaviro, Steven, *Doom Patrols: A Theoretical Fiction About Postmodernism*, Serpent s Tail, Nueva York y Londres, 1997, págs. 37-38.

<<

[72] Los biólogos distinguen entre la llamada estrategia de la «r», propia de especies como los robles, las ranas y las tortugas, que típicamente producen muchos descendientes de los cuales sobreviven unos pocos, y la estrategia de la «k», propia de organismos como las orquídeas, los canguros y los babuinos, que producen menos descendientes pero dedican más atención y recursos a cada uno, incrementando la tasa de supervivencia relativa. La mayoría de peces y cucarachas son estrategias de la «r», mientras que los elefantes y nosotros somos estrategias de la «k». Las letras hacen referencia a los coeficientes en la ecuación que describe la dinámica poblacional. De hecho, la pronosticada pérdida de totipotencia en los seres humanos es en cierto sentido una extensión lógica de la estrategia de la «k». <<

[73] Incluso la promulgación autoconsciente e irónica de ser inteligente sin tener un sitio, una función social proporcionada, una «vida» (los «vagos» de la «generación X») puede contemplarse como un síntoma de la reorganización sociorreproductiva. <<

[74] La posición de la tecnología es una interesante cuestión futurística. ¿Es una extensión de la humanidad que se suma a nuestra grandeza o, más bien, algo incubado por la humanidad que acabará escapando a nuestro control y superándonos? ¿Llegará un día en que la inteligencia artificial y los robots se impondrán a sus amos, o acaso es la tecnología una especie de segunda piel, un sistema orgánico suplementario que proporciona a quienes lo controlan los poderes de un supermán? En una serie de artículos publicados en un periódico neozelandés bajo distintos pseudónimos, Samuel Butler argumentó sobre ambos aspectos de la cuestión tecnológica en el siglo XIX. Para leer más sobre Butler y las máquinas véase George B. Dyson, *Darwin Among the Machines: The Evolution of Global Intelligence*, Addison-Wesley, Reading (Mass.), 1997. Véase también D. Sagan, *Biospheres*, Bantam Books, Nueva York, 1990 [trad. esp.: *Biosferas*, Alianza Editorial, Madrid, 1995], y el último capítulo de nuestro *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores (Metatemas 45), Barcelona, 1996. <<

[75] Bloom, Howard, «Love with the Proper Stranger», *Net Guide*, febrero, 1995, págs. 1-2. Véase también Sherry Turkle, *Life on the Screen: Identity in the Age of the Internet*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995. <<

[76] Heim, Michael, «The Erotic Ontology of Cyberspace», en Michael Benedikt ed., *Cyberspace: First Steps*, The MIT Press, Cambridge (Mass.), 1991, pág. 61. <<

[77] Haraway, Donna, «A Cyborg Manifesto: Science, Technology, and Socialist-Feminism in the Late Twentieth Century», en *Simians, Cyborgs, and Women: The Reinvention of Nature*, Routledge, Nueva York, 1991. <<

[78] Dery, Mark, *Escape Velocity: Cyberculture at the End of the Century*, Grove Press, Nueva York, 1996. <<

[79] Negroponte, Nicholas, *Being Digital*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1995, pág. 23 [trad. esp.: *El mundo digital*, Ediciones B, Barcelona, 1996].

<<

[80] Los animales, obviamente, forman un huevo haploide (célula simple) que es fecundado por un espermatozoide haploide (célula simple), aunque son muchos los que intentan penetrar. Los hongos retornan al estado simple cuando forman propágulos denominados conidios (haploides, producidos por un único progenitor) o bien ascósporas o basidiósporas (también haploides, pero producidas por dos progenitores). En las plantas el relato del retorno al estado simple es algo más complejo (el apareamiento es húmedo y dulce, pero en las plantas con flores se verifica entre el núcleo de un grano de polen elongado y el núcleo de la hembra, dentro de un saco embrionario rodeado de tejido floral. Se puede establecer la siguiente generalización: todos los organismos sexuales grandes vuelven en cada generación al estado de células simples (espermatozoides, huevos, esporas fúngicas) o su equivalente (esporas fúngicas pluricelulares, núcleos de tubos polínicos, núcleos de sacos embrionarios, etc.). Véase L. Margulis y D. Sagan, *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores (Metatemas 45), Barcelona, 1996. <<

[81] Stock, Gregory, *Metaman: Humans, Machines, and the Birth of a Global Superorganism*, Bantam Press, Londres, 1993. <<

[82] Grinevald, J., «A History of the Idea of the Biosphere», en P. Bunyard y E. Goldsmith eds., *Gaia: The Thesis, the Mechanism and the Implications. Proceedings of the First Annual Camelford Conference on the Implications of the Gaia Hypothesis*, Quintrell & Co., Cornwall (GB), 1988. Reimpreso como J. Grinevald, «Sketch for a History of the Biosphere», en P. Bunyard, ed., *Gaia in Action: Science of the Living Earth*, Floris Books, Edimburgo, 1996, págs. 34-53. <<

[83] Sagan, D., *Biospheres*, Bantam Books, Nueva York, 1990, págs. 6-7
[trad. esp.: *Biosferas*, Alianza Editorial, Madrid, 1995]. <<

[84] El «movimiento» hacia la inmovilidad se refleja en la composición de las existencias que componen el índice S&P 500. En 1960 había 43 compañías de transportes, 24 de automóviles y camiones y sólo 8 de informática y telecomunicaciones en la lista. Hacia 1995 las compañías de informática y telecomunicaciones habían ascendido a 37, mientras que las de transportes se habían reducido a 15 y las de automóviles a 13. <<

[85] Para leer más sobre las peculiaridades y tecnicismos del sexo en el micromundo véase L. Margulis y D. Sagan, *Origins of Sex*, Yale University Press, New Haven, 1990. Para una introducción a la creciente literatura sobre el control genético de estas peculiaridades sexuales véase John Horgan, «A mutant gene alters the sexual behavior of fruit-flies», *Scientific American*, junio 1997, págs. 26-31. <<

Índice

¿Qué es el sexo?	3
1. Un universo en celo: energía sexual	12
2. Caldeados y hostigados: comienzos sexuales	47
3. Caníbales y otras vírgenes: sexo de fusión	90
4. El beso de la muerte: sexualidad y mortalidad	134
5. Atracciones extrañas: sexo y percepción	160
6. Convergencia: el futuro del sexo	220
Autores	252
Apéndice	254
Glosario	261
Láminas	276
Lámina 1	276
Lámina 2	277
Lámina 3	278
Lámina 4	279
Lámina 5	280
Lámina 6	281
Lámina 7	282
Lámina 8	283
Lámina 9	284
Lámina 10	285
Lámina 11	286
Lámina 12	287
Lámina 13	288
Lámina 14	289
Lámina 15	290
Lámina 16	290
Lámina 17	292
Lámina 18	293
Lámina 19	294

Lámina 20	295
Lámina 21	295
Lámina 22	297
Lámina 23	298
Lámina 24	299
Lámina 25	300
Lámina 26	300
Lámina 27	302
Lámina 28	303
Lámina 29	304
Lámina 30	304
Lámina 31	306
Lámina 32	307
Lámina 33	308
Lámina 34	309
Lámina 35	309
Lámina 36	311
Lámina 37	312
Lámina 38	313
Lámina 39	314
Lámina 40	315
Lámina 41	315
Lámina 42	317
Lámina 43	318
Lámina 44	319
Lámina 45	320
Lámina 46	321
Lámina 47	321
Lámina 48	321
Lámina 49	323
Lámina 50	324
Lámina 51	325
Lámina 52	326
Lámina 53	327

Lámina 54	328
Lámina 55	328
Lámina 56	330
Lámina 57	330
Lámina 58	332
Notas	333