

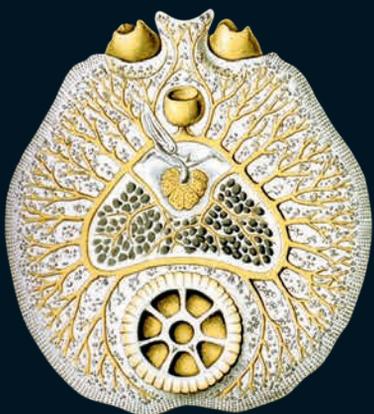


Tuomas Aivelo

Parásitos sin fin

Un viaje fascinante
por tu cuerpo
y los microorganismos
que lo habitan

PAIDÓS



TUOMAS AIVELO

PARÁSITOS SIN FIN

Un viaje fascinante por tu cuerpo
y los microorganismos
que lo habitan

Traducción de Laura Pascual

PAIDÓS Contextos

Título original: *Loputtomat Loiset*, de Tuomas Aivelo
Publicado originalmente por Like Kustannus, Finlandia, en 2018.
Esta edición ha sido publicada por acuerdo con Kontext Agency a través de
Oh!Books Literary Agency.

La publicación de este libro ha sido posible gracias al apoyo de FILI, Intercambio
de Literatura Finlandesa

F I
L I

1.ª edición, enero de 2023

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© Tuomas Aivelo, 2018
© de la traducción, Laura Pascual Antón, 2023
© de todas las ediciones en castellano,
Editorial Planeta, S. A., 2023
Paidós es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.
Avda. Diagonal, 662-664
08034 Barcelona, España
www.paidos.com
www.planetadelibros.com

ISBN 978-84-493-4030-7

Maquetación: Realización Planeta

Depósito legal: B. 22.063-2022

Impresión y encuadernación en Huertas Industrias Gráficas, S. A.

Impreso en España – *Printed in Spain*



SUMARIO

Introducción. Perspectiva de la biología evolutiva sobre las enfermedades infecciosas y los parásitos	7
1. ¿Por qué existen las enfermedades infecciosas? . . .	15
2. ¿De dónde proceden las enfermedades infecciosas?	51
3. ¿Por qué el ser humano tiene tantas enfermedades infecciosas?	77
4. ¿Por qué algunas enfermedades son más peligrosas que otras?	113
5. Cómo erradicar las enfermedades infecciosas	147
6. ¿Por qué nunca lograremos erradicar algunas enfermedades infecciosas?	179
7. ¿Por qué surgen cada vez más enfermedades infecciosas?	211
8. ¿Cómo afecta el entorno a la propagación de enfermedades?	237
9. ¿Hay personas sin enfermedades infecciosas?	281
Agradecimientos	309
Información adicional y observaciones sobre cada capítulo	313
Índice onomástico y de materias	359

¿Por qué existen las enfermedades infecciosas?

Las especies longevas, como el ser humano, se encuentran con una cantidad innumerable de parásitos durante su vida. Muchos de ellos consiguen atravesar nuestros mecanismos de defensa y provocarnos enfermedades. Una persona puede dar sustento a decenas de helmintos, cientos de ectoparásitos y millones o miles de millones de bacterias y virus. Es decir, que el parasitismo es una clara estrategia vencedora desde el punto de vista de la historia de la vida. No se puede exagerar la importancia que tienen los parásitos para el mundo: la mayoría de las especies son parásitos y todas las especies del mundo tienen parásitos. Esto significa que los parásitos perjudican a todas las especies y todas las especies tienen que estar de algún modo adaptadas a su presencia.

Cuando nos paramos a pensarlo, estas afirmaciones resultan sobrecogedoras. Si todas las especies tienen parásitos, ¿significa esto que los parásitos también tienen parásitos? Efectivamente, eso es justo lo que significa. Los parásitos de los parásitos se denominan con el término científico de *hiperparásitos*. Jonathan Swift escribió la siguiente poesía en el siglo XVIII:

Así observan los naturalistas, una pulga
es presa de otras pulgas más pequeñas,

a las que muerden pulgas aún más pequeñas,
y esto continúa *ad infinitum*.*

JONATHAN SWIFT

Sobre la poesía: una rapsodia

Las cadenas de parásitos pueden ser largas. La mariposa doncella punteada es un herbívoro en cuyo ciclo vital habitual el adulto pone huevos en verano. Las larvas que salen de esos huevos se alimentan de plantas de llantén menor o verónica espigada, hibernan en nidos comunes y continúan alimentándose en primavera. Después de esto, la larva se convierte en crisálida y de la crisálida nace una mariposa adulta que copula y pone huevos en la superficie inferior de las hojas de estas plantas. De estos huevos salen nuevas larvas. Sin embargo, a veces la avispa parasitoide *Hyposoter horticola* (que no tiene nombre en español, por lo que se utiliza su nombre científico) puede aovar dentro de un huevo de mariposa. Las avispas parasitoides viven dentro de la especie hospedante, donde crecen y experimentan la metamorfosis, hasta que salen del huésped y, en la mayoría de los casos, lo matan. La *Hyposoter* puede poner huevos únicamente en la etapa final del huevo de la mariposa, cuando la larva ya está muy desarrollada. Si la avispa parasitoide elige un huevo de mariposa como huésped, la larva de mariposa sale del huevo de forma habitual, hiberna y, en primavera, se alimenta con entusiasmo sin saber que nunca llegará a convertirse en adulta, sino que el alimento recogido por la larva se destinará a la madurez de la avispa parasitoide.

La *Hyposoter horticola* tampoco está a salvo, porque la *Mesochorus stigmaticus*, de menor tamaño, puede aovar dentro de la larva de *Hyposoter*. La *Mesochorus* adulta acude a olfatear la larva

* En el original: *So nat'ralists observe, a flea / Hath smaller fleas that on him prey; / And these have smaller fleas to bite 'em. / And so proceeds ad infinitum.* [N. de la T.]

de doncella punteada y, si percibe que una *Hyposoter* ha aovado dentro de la larva, la *Mesochorus* deposita sus propios huevos detrás. Cuando sale del huevo, la larva de *Hyposoter* se alimenta ávidamente de las entrañas de la larva de mariposa, sin saber que nunca se convertirá en adulta, puesto que la larva que hay en su interior se comerá sus entrañas. La cadena no necesariamente termina aquí. Sin embargo, la *Mesochorus* es un insecto de varios milímetros de largo, por lo que es muy probable que contenga un montón de parásitos unicelulares. El destino de la pulga también es ser atacada por una pulga más pequeña.

Además, las cadenas suelen ser más bien entramados. La doncella punteada también puede albergar al parasitoide *Cotesia*, que a su vez puede estar infectado por *Mesochorus*. Las distintas especies o individuos parasitoides pueden competir dentro de la larva de mariposa para ver cuál de ellas se convierte finalmente en adulta.

No hay cadenas interminables; sin embargo, todos los organismos tienen parásitos. El motivo es que los parásitos más pequeños, los virus, no son propiamente seres vivos, por lo que tampoco son organismos. Sin tomar partido por el carácter de organismo de los virus, estos son completamente dependientes de su célula huésped, ya que no tienen un metabolismo propio. Tampoco se sabe si los virus pertenecen a la misma familia que todos los organismos conocidos, como tú, yo, los lémures ratón y las bacterias. En cualquier caso, todos los organismos, e incluso los virus, tienen otras especies molestas que intentan aprovecharse de sus especies hospedantes.

La interminable cadena de parásitos ofrece a la medicina oportunidades de luchar contra los parásitos. Para el tratamiento de enfermedades bacterianas humanas, en los últimos tiempos se han intentado desarrollar nuevos medicamentos más eficaces: los virus. Si queremos erradicar las bacterias que campan por el cuerpo humano, lo más práctico sería azuzarles los parásitos de esas bacterias. En ecología, el enemigo de mi enemigo es, claramente,

mi aliado. El uso de virus vivos tiene una ventaja enorme: por lo general, solo atacan a determinadas especies de bacterias. Por eso, un virus sería un medicamento considerablemente más preciso que un antibiótico, pues suele ser de amplio espectro.

PARASITISMO

El argumento básico de mi trabajo de campo es muy sencillo. Un par de horas antes de la puesta de sol, voy a la selva, coloco las trampas en las ramas de los arbustos a la altura de los ojos, pongo en ellas un trocito de plátano como cebo y vuelvo a comprobar las trampas un par de horas después de la puesta de sol. Mido y marco a todos los lémures ratón que haya atrapado. Les coloco un microchip en la nuca para identificar a cada ejemplar cuando vuelva a la trampa. Pongo nombre a cada individuo porque es más fácil hablar de nombres que de códigos de trece dígitos.

Durante mi vida, he puesto nombre a unos ciento cincuenta lémures ratón. Les he puesto los nombres de cada una de las personas que aparecen en los agradecimientos de mi tesis, por lo que por los bosques de Ranomafana deambulan lémures llamados Jukka, Heikki o Alan. Algunos lémures deben su nombre a un rasgo característico o a su apariencia, como el jactancioso pero pequeño Napoleon, el tranquilo pero insidioso Obama, la desvergonzada y dadivosa Queenie o el intrépido e inquieto Rambo. Con frecuencia, los investigadores que visitaban el centro acababan teniendo su tocayo lémur, por lo que en la selva también residen Stefan, Jürgen y Rafi.

Por la noche, trabajo con los lémures, mido su condición física, cuento los ectoparásitos y recojo muestras de excrementos; durante el día, cuento sus gusanos. Sería un trabajo aburrido si la selva no fuera tan fascinante y los lémures ratón no fueran los animales más monos del mundo. Nunca sabemos cuántos gusanos hay realmente en los intestinos de un lémur ratón porque no

llegamos a sus intestinos. Solo sabemos, de forma indirecta, cuántos gusanos en el interior de los lémures ponen huevos, ya que cuento la cantidad de huevos de los nematodos que salen con los excrementos. Para ser más exacto, los huevos ya han eclosionado cuando los cuento, por lo que cuento la cantidad de nematodos que serpentean en la muestra del microscopio.

Los gusanos intestinales de los lémures ratón son muy eficaces a la hora de reproducirse. La cantidad de nematodos en una muestra de excrementos puede ser desorbitada: por lo general, en un gramo de excrementos puede haber miles de nematodos. Contarlos es un proceso laborioso, sobre todo porque es necesario contar dos veces los nematodos de cada muestra para que las cifras sean lo suficientemente precisas. Los lémures ratón también tienen muchos parásitos. Cuando comienza la temporada de lluvias, prácticamente todos los lémures ratón tienen gusanos intestinales, lo que supone una cantidad curiosamente elevada.

Algunos investigadores también se han planteado si sería posible que los nematodos de los lémures ratón no fueran propiamente parásitos, sino de efecto neutral o, incluso, beneficiosos. Hasta ahora, he salido adelante con una explicación sencilla: todos los nematodos intestinales son perjudiciales, por lo que es muy probable que los gusanos de los lémures ratón también sean parásitos.

Todos los organismos intentan recoger de su entorno la energía y los materiales de construcción necesarios para vivir. Algunos organismos son productores de compuestos orgánicos complejos con ayuda de la luz solar o de la quimiosíntesis. La hierba, los abedules o las plantas de cultivo aprovechan el dióxido de carbono, el agua y los rayos del sol para producir azúcar para su uso y oxígeno para la atmósfera. La mayor parte de los organismos que viven en la Tierra dependen de estas plantas y de las algas asociadas. Otros organismos, como los humanos, son consumidores

que se alimentan de productores o de otros consumidores para vivir.

Los parásitos también son consumidores, ya que se aprovechan de los nutrientes que ofrecen otras especies. Ellos mismos no producen porque no se asocian. Un gusano ancho de los peces que reside en el intestino humano recibe la energía que necesita de su huésped. Por lo tanto, los parásitos son prácticamente el siguiente eslabón de la cadena alimentaria; los humanos tienen una cantidad extrañamente reducida de depredadores naturales, pero también cuentan con parásitos naturales.

Las diferentes especies de organismos influyen continuamente unas en otras. Cuando una persona come una lechuga, la lechuga y la persona tienen una interacción ecológica cuyo resultado es beneficioso para la persona y perjudicial para la lechuga. Para el ser humano, la obtención de otros alimentos supone el mismo tipo de depredación: cuando comemos jamón, el acto supone un perjuicio para el cerdo y un beneficio para nosotros.

Por definición, los parásitos son especies que se benefician de su especie hospedante y la perjudican. Es decir, en cierto modo, son depredadores. La diferencia entre un parásito y un depredador es, principalmente, la intimidad de la interacción. Mientras que el depredador y la presa se encuentran una vez (imagina el dramático encuentro entre un león y un ñu en un documental de naturaleza), el parásito está continuamente en contacto con su individuo hospedante y es dependiente de él. El gusano ancho de los peces se mantiene en tu interior y adquiere los nutrientes que necesita poco a poco. Naturalmente, no se trata de una distinción absoluta: la larva de mariposa que come su planta hospedante ¿es un parásito o un depredador? En cualquier caso, en este libro trato, principalmente, los parásitos de los humanos, con los que es más sencillo determinar qué especie es un parásito y cuál no. Aunque esto no siempre es posible.

¿Por qué existen los parásitos? La respuesta corta es «porque los organismos son una enorme mesa de bufé para quienes saben

aprovecharse de ellos». Evolutivamente, los parásitos son la consecuencia lógica a la existencia de organismos de vida libre, es decir, fuentes de nutrientes que se pueden aprovechar.

Hablar de parasitismo es solo una forma de interpretar las relaciones de interacción entre los organismos. Por supuesto, nuestra respuesta corta es una mera simplificación, ya que no se trata únicamente de explotación. En el mundo también hay lugar para la colaboración y la asistencia. Además de los parásitos, el ser humano está acompañado de una gran cantidad de especies que nos resultan beneficiosas: por ejemplo, muchas bacterias de nuestros intestinos son imprescindibles para la digestión de la comida.

A fin de cuentas, la mayor parte de las interacciones entre especies son insignificantes o su importancia es casi inexistente. La mayor parte de los organismos, incluidas las bacterias intestinales, son comensales o convidados, especies que pueden beneficiarse de otra especie, pero no le producen daños. Para ellos, el ser humano es una inmensa mesa de bufé, pero nunca comen hasta dejarla vacía.

UN ECOSISTEMA DENTRO DEL SER HUMANO

El ser humano es un animal inmensamente grande. Una biomasa de entre cincuenta y cien kilos sitúa al ser humano entre los grandes animales del planeta. La mayoría de los demás mamíferos son notablemente más pequeños, como los roedores o los murciélagos. La mayor parte de las especies animales pertenecen a la clase de los insectos; los más grandes solo miden unos pocos centímetros. Los organismos más pequeños o bacterias suelen medir alrededor de un micrómetro, es decir, la milésima parte de un milímetro, la millonésima parte de un metro. Por lo tanto, deberían amontonarse dos millones de bacterias al lado de una persona de dos metros para que la montaña de bacterias superase las medidas humanas.

Cuando en este libro hablo de nuestras especies acompañan-

tes, me refiero a los organismos con los que compartimos nuestro cuerpo. Debido a su gran tamaño, el ser humano proporciona un hogar a una gran cantidad de microorganismos. Se estima que en el cuerpo humano hay el doble de células bacterianas (dependiendo de la hora de la última visita al baño) que de células propias. En este caso, las visitas al baño tienen una importancia real, ya que la mayor parte de las bacterias compañeras viven en nuestro intestino. La masa fecal se compone en un 75 % de agua, y el resto, aproximadamente la mitad, son bacterias. Puede que no queramos considerar los desperdicios que desaparecen por el váter al tirar de la cadena como la culminación de la diversidad de la naturaleza, pero lo son. No hay en el mundo una biocenosis más compacta y diversa (suponiendo que el intestino funcione estupendamente; de ahí se puede inferir que el excremento está en la categoría «con forma de morcilla con grietas en la superficie» o «como una salchicha o serpiente, lisa y blanda» en la escala de Bristol).

En tus intestinos habitan treinta trillones de bacterias, de las cuales casi la mitad desaparecen con las deposiciones. Las especies de virus intestinales todavía no se conocen muy bien, pero es probable que su cantidad sea notablemente mayor a la de bacterias. En el intestino hay relativamente pocos microbios eucariotas, como los protistas. Aparte de los organismos que causan problemas intestinales, como las amebas y la *Giardia*, estos tampoco son muy conocidos. Lo más probable es que nos topemos con estos organismos en la comida sin cocinar o en cubitos de hielo durante un viaje turístico.

Aunque la mayoría de los parásitos intestinales de mayor tamaño son un fastidio en los países en vías de desarrollo, también pueden encontrarse en Finlandia. El gusano parásito más común del mundo, el oxiuro, es algo común en nuestro país, sobre todo entre los niños: se estima que entre un 5 y un 10 % de los niños en las guarderías de Helsinki tiene oxiuros.* Unos trescientos mi-

* Según la Asociación Española de Pediatría, la infección por lombrices (u

llones de personas tienen al nematodo *Strongyloides stercoralis* en el intestino. En Finlandia, las personas que tienen gusanos son, principalmente, aquellas que han pillado una infección en el extranjero. Los gusanos en sí no son dañinos, por lo que tampoco se detectan ni es posible conocer su presencia real entre los finlandeses. En los trasplantes de órganos se comprueba de forma rutinaria la presencia de *Strongyloides*, puesto que la medicación que debilita el sistema inmunitario puede hacer que el gusano se des controle y produzca un fallo multiorgánico.

Cuando hablamos de parásitos intestinales, la mayoría de los finlandeses piensa inmediatamente en algún tipo de cestodo, como el gusano ancho de los peces o las tenias. A escala mundial, se estima que unos doscientos millones de personas tienen un cestodo en el intestino en este momento.

El hábitat más importante para nuestras especies acompañantes es el intestino, pero habitan por todo nuestro cuerpo. En la piel, en la retina de los ojos o en distintas mucosas viven diversos conjuntos de especies bacterianas que se han adaptado a esos entornos. La mayor parte de estas especies son comensales, es decir, no son perjudiciales, pero tampoco beneficiosas. Por lo general, este tipo de bacterias de las mucosas nos protegen de los agentes patógenos. Mientras que en nuestras mucosas habitan especies que no nos causen molestias, las especies perjudiciales no tendrán espacio para reproducirse. Esto se observa cuando hay que recurrir a un tratamiento con antibióticos: en ese caso, las especies bacterianas de las mucosas también disminuyen, lo que hace que el ser humano esté más expuesto, por ejemplo, a la candidiasis.

Es posible que la microbiota bucal sea la más problemática para nosotros. Las especies de la boca se adhieren a los dientes y a las encías, de modo que las bacterias no son arrastradas hacia el estómago junto con la comida y la bebida. Las bacterias de la ca-

oxiuriasis) afecta a entre el 40 % y el 50 % de los niños en edad escolar. Véase <<https://cinfasalud.cinfa.com/p/lombrices-intestinales/>>. [N. de la T.]

ries viven en la misma comunidad: corroen lentamente los minerales de los dientes utilizando el azúcar que llega a la boca como alimento.

Por tanto, no vivimos solos en nuestro cuerpo y, sobre todo, nunca hemos vivido solos. Los organismos pluricelulares siempre han tenido como compañía organismos unicelulares más pequeños que se han aprovechado de la protección y del alimento ofrecido por la especie mayor. No sabemos cuándo surgieron los primeros organismos unicelulares, pero los antepasados de todos los grupos de animales actuales ya existían hace seiscientos millones de años. Por tanto, el ser humano también se ha desarrollado durante los últimos casi mil millones de años hombro con hombro, de forma bastante literal, con sus microbios acompañantes.

Para este modo de vida cercano existe un bonito y descriptivo término: *simbiosis*. La palabra *simbiosis* procede del griego *sym-bíōsis*, que describe la convivencia. Como consecuencia de la simbiosis, nuestras bacterias intestinales realizan muchas funciones fundamentales para nosotros: descomponen los hidratos de carbono y facilitan la recuperación de calcio, magnesio, hierro y vitaminas. La *Bacteroides vulgatus* produce enzimas que ayudan a destruir la pectina, es decir, el hidrato de carbono de las paredes celulares de bayas y frutas. Por su parte, la *Ruminococcus bromii* produce enzimas que descomponen el almidón. Las especies del género *Bifidobacterium* descomponen de forma eficaz algunos azúcares de la leche. Sin embargo, son principalmente importantes en relación con nuestro desarrollo individual: muchas sustancias producidas por las bacterias intestinales son necesarias para que las paredes del intestino y el sistema inmunitario se desarrollen con normalidad.

El hombre comparte su existencia carnal con una cantidad inmensa de organismos. Vivimos juntos, para lo bueno y para lo malo. La idea es relativamente nueva en la historia de la ciencia y puede tener un efecto revolucionario. En la actualidad, también se habla del microbioma humano, es decir, la totalidad de espe-

cies con las que convivimos. Se está investigando con gran interés debido a que el desarrollo de la ingeniería genética ha facilitado la identificación de nuestras especies acompañantes.

El genoma de todos los organismos está compuesto de ADN. Debido a que todos los organismos se han desarrollado, presumiblemente, a partir de un genoma inicial que se replica, mediante las diferencias encontradas entre los genomas pueden estimarse las relaciones de parentesco entre especies. Si dos individuos tienen un genoma muy similar, es muy probable que pertenezcan a la misma especie.

La secuencia de bases del genoma se puede determinar de forma muy eficaz mediante los nuevos procedimientos de secuenciación. Sin grandes esfuerzos, podemos analizar las especies bacterianas presentes en una muestra de excrementos. Para su identificación, se utilizan genes que sabemos que varían relativamente poco entre especies. En las bacterias se trata del gen 16S rRNA, fundamental para la producción de proteínas. En la práctica, la investigación se lleva a cabo aislando el ADN de las bacterias de la muestra de excrementos, para lo que se utiliza una serie de reactivos ya preparada. Posteriormente, se reproduce la secuencia de bases del gen deseado de cada especie bacteriana en una máquina de reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés). Entonces, el producto genético reproducido puede secuenciarse, es decir, se puede leer su secuencia de bases en el dispositivo. Todo el procedimiento para cien muestras, que contienen miles de especies bacterianas, puede realizarse en un plazo mínimo de veinticuatro horas. Se trata de un desarrollo técnico espectacular, si tenemos en cuenta que la primera secuenciación del gen 16S de una bacteria llevó un mes de trabajo a principios de la década de los ochenta. Ahora, el proceso es más de un millón de veces más rápido.

Aunque el entusiasmo por el microbioma es, claramente, la moda del momento, la importancia de los microbios ya se conoce desde hace tiempo. Por ejemplo, las bacterias del ácido láctico

llevan usándose miles de años para equilibrar el intestino en diferentes productos. En la antigua Roma, se comía repollo fermentado con ácido láctico y, en la actualidad, los coreanos lo toman con el nombre de *kimchi*. El yogur se inventó en Oriente Próximo y, en el norte de Europa, las bacterias del ácido láctico se usaban especialmente en la preparación de pan de masa madre y cerveza. En un principio, los productos fermentados se crearon, sobre todo, con fines de conservación, pero también son bien conocidos sus efectos sobre la salud.

La levadura también se ha utilizado durante miles de años para producir la fermentación alcohólica. El ser humano lleva mucho tiempo aprovechando los procesos ecológicos, como la competencia entre especies. La ventaja de la fermentación de cerveza o de vino era que morían los agentes patógenos presentes en el agua. Por tanto, la cerveza era una bebida más segura que el agua, que era transmisora de enfermedades.

Hace varias décadas surgió el interés por los probióticos, los microbios que afectan a la salud. El concepto fue desarrollado en el año 1905 por Iliá Metchnikoff, padre de la gerontología y ganador del Premio Nobel. Metchnikoff declaró que una dieta correcta fomenta el crecimiento de las bacterias del intestino, de modo que las bacterias perjudiciales son reemplazadas por bacterias beneficiosas; un intestino equilibrado aumenta de forma significativa la esperanza de vida. Empezó a hablarse de la palabra *probiótico* en la década de 1950 como lo opuesto al antibiótico: la idea no era matar a las bacterias perjudiciales, como hacían los antibióticos, sino promover el crecimiento de las bacterias beneficiosas.

La importancia real de los probióticos todavía no se conoce en profundidad. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés) establece que la consideración de un producto como probiótico está relacionada con la salud y no con el valor nutricional, y que los productos alimenticios probióticos deben evaluarse como medicamentos. Por este motivo, des-

de el año 2012 en el territorio de la Unión Europea ha estado prácticamente prohibido considerar los productos alimenticios como probióticos, ya que la EFSA no ha aprobado ninguna declaración de salud relacionada con los probióticos.

BENEFICIO PERJUDICIAL

Hace al menos unos setecientos millones de años que tenemos acompañantes, desde que nuestros antepasados se desarrollaron como organismos pluricelulares. Durante millones de años, tanto nosotros como nuestras especies acompañantes hemos sufrido cambios. Los cambios sufridos por las especies de organismos se conocen como evolución y pueden deberse a la selección natural o a sucesos circunstanciales.

El principio de la selección natural se refiere a la idea planteada por Charles Darwin y Alfred Wallace de que el éxito reproductivo de los diferentes individuos conduce a un cambio lento pero significativo con el transcurso del tiempo. Debido a las diferencias existentes en el éxito reproductivo entre individuos y el carácter hereditario de los genes de una generación a otra, los genes de los individuos mejor reproducidos se generalizan en las poblaciones de organismos. Esto produce un cambio en las relaciones genéticas de la población de organismos y en las propiedades basadas en ellas. Con el tiempo, la población se adapta a su entorno; cuando se seleccionan los mejores reproductores de cada generación, la especie sabe aprovechar mejor la oferta del entorno.

Un ejemplo sencillo es la cantidad de genes de la amilasa de un ser humano. La amilasa es una enzima que se produce con la saliva y que ayuda a descomponer el almidón en azúcares más simples. Al principio, el ser humano probablemente tenía el gen de la amilasa en un solo punto del cromosoma 1. Debido a que cada cromosoma siempre es un par, un ser humano tiene dos genes que pueden producir la enzima amilasa. Sin embargo, con el inicio de la

agricultura, el ser humano empezó a consumir compuestos de azúcar cada vez más complejos. Entonces, el gen de la amilasa se duplicó en otro punto del genoma. Los humanos, que ahora tenían cuatro genes de la amilasa funcionales, podían utilizar de forma notablemente más eficaz nuevas fuentes de alimento, como los cereales. Así, estos humanos eran capaces de criar más niños y, en las futuras generaciones, empezó a haber cada vez más humanos con cuatro genes de la amilasa.

Sin embargo, la evolución no va en ninguna dirección determinada. En cada generación, maximiza únicamente la capacidad reproductiva en determinados hábitats. El entorno, a su vez, suele cambiar rápidamente, por lo que un individuo que se ha adaptado a la perfección al entorno de sus antepasados puede que no se las arregle tan bien después de un cambio en el entorno. Para nuestras especies acompañantes, este tipo de cambios en el entorno pueden deberse a un cambio de dieta, al traslado al extranjero o, incluso, a una diarrea.

Los ciclos vitales de vida del ser humano y de nuestras especies acompañantes son bastante desproporcionadas. Como especie, el ser humano cambia de forma muy lenta; en Finlandia hay actualmente más de treinta años de diferencia entre generaciones. Por el contrario, la diferencia entre las generaciones de nuestras bacterias intestinales puede estar más cerca de los treinta minutos. Durante la vida de un individuo hospedante, las especies acompañantes pueden experimentar una evolución relativamente larga, lo que tiene un impacto claro y directo. Nuestras especies acompañantes pueden adaptarse a nosotros de una forma muy personal: se adaptan a nosotros como individuos. Los seres humanos no gozamos de la misma ventaja y nuestra adaptación es mucho más lenta.

Por otra parte, el cambio evolutivo del ser humano también puede ser más rápido de lo que generalmente se piensa. Nuestra capacidad de beneficiarnos de la leche es buena muestra de ello. La leche materna contiene lactosa en abundancia y su descom-

posición requiere una enzima propia. Cuando un mamífero se desteta, ya no necesita descomponer la lactosa y se interrumpe la producción de la enzima lactasa. Un mamífero adulto se vuelve intolerante a la lactosa y ya no es capaz de descomponerla. Sin embargo, en muchos lugares, el ser humano tiene tolerancia a la lactosa, es decir, la posibilidad de beneficiarse de la leche también en la edad adulta. La capacidad de consumo de lactosa en la edad adulta surgió hace tan solo algunos miles de años en zonas independientes en las que se utiliza mucho la leche como alimento. Aunque la mutación solo se produjo hace varios cientos de generaciones, en la actualidad, la mayoría de la población cuenta con esta mutación. La capacidad de beneficiarse de la leche suponía una ventaja tan grande que la selección natural se apresuró a deshacerse de la mayor parte de aquellos individuos que no eran capaces de hacerlo.

No obstante, *evolución* no significa que cualquier nueva propiedad pueda desarrollarse libremente. La tolerancia a la lactosa surge con facilidad porque su único requisito es que el gen responsable de la producción de lactasa no quede inactivo en la edad adulta. Las propiedades un poco más complejas, como la sociabilidad o la capacidad de aprovechamiento de la celulosa de las plantas, son mucho más difíciles de desarrollar porque requieren más mutaciones. La evolución también está limitada por la historia y por las propiedades ya acumuladas: un ser humano no puede desarrollar la capacidad de volar porque es demasiado pesado. Por otra parte, la evolución también puede llevar al estancamiento a las especies que se han especializado demasiado, lo que dificulta el cambio evolutivo. Cuando se producen cambios en el entorno, estas especies pueden llegar a extinguirse.

Un buen ejemplo de estancamiento es el de una especie de piojo que parasitaba a la paloma migratoria. Las palomas migratorias son una especie de América del Norte con una cantidad inmensa de individuos: miles de millones de palomas migratorias recorren las praderas norteamericanas. Era la especie ideal para

los parásitos: abundante, se reproducía y se movía rápidamente, y era capaz de alimentar a una cantidad inmensa de individuos parásitos. Sin embargo, el rápido cambio medioambiental y la caza eficiente mataron a todas las palomas migratorias en varias décadas. Cuando las palomas migratorias se extinguieron, a principios del siglo XX, también se extinguió el piojo de la paloma migratoria, que no había conseguido vivir en ninguna otra especie hospedante. Al menos, eso se creía, hasta que en 1999 se volvió a encontrar dicha especie de piojo en una especie cercana, la paloma de collar.

La adaptación no siempre garantiza el éxito, ya que también se producen hechos circunstanciales que influyen en la evolución. Cuanto más pequeña es una población de organismos, más débil es su selección natural y con más frecuencia el éxito de los individuos depende de la suerte. Los genes no determinan el número de descendientes de un organismo individual, pues el éxito de un individuo depende de muchos hechos circunstanciales. Un individuo dentro de un grupo de hermanos puede acabar en las garras de un depredador, morir de frío o perderse por accidente. La utilidad de determinados genes y propiedades solo se manifiesta en grandes poblaciones. Se trata del mismo fenómeno que cuando se tira un dado. Lanzando un dado diez veces, no se puede saber qué tipo de distribución de números va a tener lugar. Si se aumenta la cantidad de lanzamientos, la distribución de los puntos se equilibra de tal forma que cada cara aparece el mismo número de veces.

¿Y si el dado está cargado de manera que el número 1 sale con una frecuencia 1,06 veces mayor que las demás caras? No parece haber una gran diferencia entre 1 y 1,06, pero es la mayor ventaja de elección conocida que le ha surgido al ser humano debido al desarrollo de una nueva característica. Hace ocho mil años, se estimaba que los individuos con tolerancia a la lactosa tenían 1,06 veces más descendientes que los intolerantes a la lactosa. La diferencia es tan pequeña que será necesario lanzar el dado muchas

veces antes de poder empezar a sospechar con un fundamento sólido que se trata de un dado cargado. Sin embargo, la población del norte de Europa ya contaba entonces con miles de individuos, por lo que la selección natural podía permitirse actuar. De nuevo, se trata de una ventaja tan grande que, en varias decenas de generaciones, casi todos tenían tolerancia a la lactosa.

Junto con la evolución se suele hablar de dos sucesos específicos de deriva genética, el fenómeno del cuello de botella y el efecto fundador. El fenómeno del cuello de botella hace referencia a la situación en la que la población de la especie ha experimentado un suceso que ha matado a los individuos (en su mayor parte) con independencia de sus genes, es decir, de forma aleatoria. En los libros de biología se suele hablar de erupción volcánica: cómo los organismos, en ese caso, mueren de forma más o menos aleatoria. El ser humano pasó por un fenómeno de cuello de botella hace unos setenta mil años, cuando el cambio medioambiental producido por la erupción del volcán Toba redujo de forma significativa la cantidad de seres humanos. Al parecer, el humano moderno de aquellos tiempos se limitaba únicamente al continente africano y el cambio medioambiental redujo el tamaño de la población humana hasta tan solo varios miles de individuos. En consonancia con los temas de este libro, la diarrea constituye un buen ejemplo: el aceleramiento de la actividad intestinal destruye el ecosistema del intestino de tal modo que las especies bacterianas que quedan son más o menos una colección aleatoria. Un cóctel de gambas en Tailandia puede ser tu propio volcán para las especies acompañantes.

La mayor parte de los casos de cuello de botella son notablemente menos drásticos y de menor duración que las erupciones volcánicas. Un cuello de botella conocido para la naturaleza finlandesa es la fluctuación de los periodos glaciales. A medida que el clima se enfriaba, las poblaciones de especies se veían obligadas a abandonar sus hábitats originarios, lo que, por lo general, hacía reducir bruscamente el tamaño de las poblaciones. Estas circuns-

tancias dieron lugar al surgimiento de los refugios, es decir, zonas en las que las especies consiguieron sobrevivir durante el periodo de la estación fría y, desde allí, se propagaron una vez que el clima volvía a calentarse. Cuando la capa de hielo era más extensa, la gran mayoría de los humanos europeos se retiraron a diversos refugios, como las zonas de la cultura solutrense occidental y la cultura gravetiense oriental.

Por su parte, se llama efecto fundador a la situación en la que un pequeño grupo de la población se muda a una nueva zona o se ve repentinamente aislado y funda una nueva población. En ese caso, la diversidad genética de la nueva población es una muestra mucho menor, casi fortuita, de la diversidad de la población original. Los finlandeses son un buen ejemplo de este fenómeno: la región de Finlandia ha estado habitada por un grupo relativamente pequeño de personas y, en particular, las comunidades del norte del país han podido surgir a partir de un número muy reducido de pobladores originarios. Las enfermedades de herencia finlandesa son un gran grupo de afecciones prácticamente inexistentes en el resto del mundo, lo que se debe, precisamente, al efecto fundador. Una de ellas es la enfermedad de Salla, un trastorno del desarrollo psicomotor que suele derivar en una discapacidad grave del desarrollo. El nombre de la enfermedad se debe a que se presenta en el mundo casi únicamente en personas con ascendencia en el municipio finlandés de Salla. Los antepasados de Salla sufrieron las mutaciones genéticas responsables de la enfermedad, que se han generalizado a toda la población de Salla. Nuestras especies acompañantes sufren el efecto fundador al menos una vez en la vida: un bebé recién nacido es un lienzo en blanco en relación con las bacterias intestinales, pero el intestino y las mucosas reciben rápidamente las primeras especies, especialmente procedentes de las mucosas y de la piel de la madre.

Por tanto, nuestra relación con nuestras especies acompañantes ha ido tomando forma a lo largo de mucho tiempo, durante el cual tanto los eventos circunstanciales como la adaptación han

moldeado la relación. Las bacterias beneficiosas para nosotros lo son porque las propias bacterias también son beneficiosas para ellas mismas. Asimismo, las bacterias perjudiciales para nosotros se benefician de serlo. La selección natural mantiene la relación entre nosotros y nuestros acompañantes.

Debido a que la evolución de las especies acompañantes es rápida en comparación con la evolución humana, los efectos que tienen en nosotros también pueden cambiar con relativa rapidez. El efecto más típico son los cambios en la peligrosidad de las nuevas enfermedades infecciosas. Con frecuencia, una enfermedad muy peligrosa en sus inicios puede evolucionar en una enfermedad menos peligrosa a lo largo de los años. Sin embargo, también pueden producirse cambios mayores y nuestras especies acompañantes pueden transformarse de perjudiciales a beneficiosas. Por ejemplo, la bacteria común del intestino humano *Bacteroides thetaiotaomicron* era, inicialmente, un agente patógeno. Ahora tiene especial importancia en la descomposición del almidón y otras sustancias vegetales complejas en nuestro intestino.

En principio, de esto se puede deducir que, si una especie bacteriana beneficiosa para nosotros prospera en el intestino, también puede transformarse en perjudicial. Desde el punto de vista de la evolución, el éxito relativo es importante: si en la población se desarrolla una cepa bacteriana que prospera mejor que las demás, naturalmente empezará a reproducirse y puede propagar rápidamente sus genes a toda la población. Si un individuo de una especie beneficiosa para nosotros se transforma en perjudicial y, además, prospera mejor que una cepa beneficiosa, podemos perder rápidamente la cepa beneficiosa y obtener, en su lugar, una cepa perjudicial. Sin embargo, esto no parece estar muy generalizado, ya que no se conoce ningún ejemplo. Otra opción más probable es que el cambio en este sentido sea evolutivamente desequilibrado y la cepa bacteriana que ha empezado a buscar pelea se extinga rápidamente.

La evolución de la patogenicidad también puede ocasionar,

de forma relativamente rápida, que la especie perjudicial se transforme en una especie fugitiva de la evolución. En ese caso, el agente patógeno rápidamente se vuelve aún más perjudicial y peligroso para su huésped. Cuantas más sustancias necesarias pueda recoger la bacteria en el intestino y más pueda beneficiarse de su huésped, mejor prosperará. Cuantas más sustancias recoge la bacteria, más perjudicial es para nosotros. Es decir, una bacteria puede volverse cada vez más perjudicial a medida que evoluciona. La evolución puede continuar durante tanto tiempo que la bacteria perjudicial pierda la competición con las demás especies del intestino y nuestro sistema inmunitario logre controlar la especie, o la gane y la bacteria consiga matar al ser humano. Por lo tanto, una especie fugitiva puede acabar extinguiéndose con facilidad.

Por lo tanto, nuestras especies acompañantes no siempre evolucionan hacia una convivencia más armoniosa con nosotros. Los beneficios a corto y largo plazo producidos por la evolución pueden ser dos cosas diferentes, pero el proceso evolutivo siempre empieza allá donde la barrera es más baja. Desde el punto de vista de la selección natural, solo tiene importancia aquello que haga más eficiente la reproducción a corto plazo.

VIENE LA ENFERMEDAD... O NO

En el año 1854, estalló una horrible epidemia de cólera en la zona del Soho de Londres. Hasta el 15 % de los residentes de la zona de Broad Street murió en un periodo de dos semanas. Entonces, todavía no se conocía cómo se contagiaba el cólera, aunque se suponía que el aire contaminado contribuía a la propagación de la enfermedad. Sin embargo, el médico John Snow dudaba de la teoría imperante y consideraba el agua contaminada como una fuente de contagio mucho más probable. Para probar su teoría, Snow entrevistó a los residentes del Soho, marcó todos los casos de cólera de la zona en un mapa y se dio cuenta de que se agrupaban en el en-

torno del pozo de Broad Street. Snow examinó muestras de agua en el microscopio, pero no encontró el agente patógeno. Sin embargo, retiró la manivela del pozo para que la gente no pudiera seguir sacando agua de allí y la epidemia de cólera desapareció gradualmente. En investigaciones posteriores, se descubrió que en las cercanías del pozo de Broad Street había una letrina desde la que las bacterias del cólera habían pasado al agua potable del pozo. Tras los descubrimientos de Snow, poco a poco se empezó a organizar la red de alcantarillado de la ciudad de un modo más higiénico y, con la llegada del siglo xx, el cólera desapareció de los países occidentales. En la actualidad, sabemos que el cólera se contagia, principalmente, por medio de la comida o del agua potable contaminadas. A pesar de eso, todavía no se sabe a qué se debe realmente el inicio de la epidemia de cólera. El cólera se presenta ampliamente en las aguas, pero parece que solo causa epidemias en humanos con muy poca frecuencia.

En el capítulo anterior analizamos la importancia de la evolución y cómo los cambios en la cantidad de genes de una población entre generaciones afectan a la evolución del ser humano y de nuestras especies acompañantes. Sin embargo, la mera comprensión de los genes no es suficiente para explicar por qué algunas bacterias son perjudiciales y otras no. Los genes no determinan las características de los organismos, sino que el desarrollo individual modifica las características del organismo en función de las pautas de los genes. El genoma y el fenotipo son dos cosas diferentes. En ocasiones, los genes ofrecen marcos muy estrechos para el desarrollo de una propiedad. Por el contrario, el entorno tiene un gran efecto sobre algunas propiedades.

Los gemelos idénticos suelen desarrollar una altura prácticamente idéntica. Esto se debe a que los genes determinan de forma relativamente exacta la altura que puede alcanzar un ser humano. Sin embargo, el entorno también puede influir en la altura: la desnutrición, el tabaquismo o los desequilibrios hormonales pueden ocasionar que un individuo acabe siendo mucho más bajo o más

alto. La altura media del ser humano ha aumentado muchísimo en los últimos doscientos años: mientras que un holandés en 1850 medía unos 162 centímetros de media, la altura media de los holandeses en la actualidad es de 178 centímetros. La cuestión fundamental de la biología evolutiva es si este cambio se debe a la evolución, es decir, al hecho de que las personas más altas se las arreglan relativamente mejor y tienen más hijos, o a la influencia del entorno, es decir, a que el entorno hace posible un mejor desarrollo individual. Como suele suceder, la respuesta a esta pregunta es que tanto una cosa como la otra. Las investigaciones demuestran que, cuando mejora la situación nutricional, las personas altas sobreviven mejor por término medio. Por otra parte, la nutrición y la reducción de la cantidad de enfermedades posibilitan un desarrollo sin trastornos, lo que parece que hace crecer a las personas.

Las interacciones ecológicas siempre suceden en un determinado momento en un entorno determinado. La virulencia, la infecciosidad y la capacidad de propagación de los parásitos son propiedades que siempre se ven afectadas por los genes y el entorno. La misma cepa de agentes patógenos puede comportarse de distintas maneras dependiendo de su entorno. Aunque la mayor parte de los parásitos siempre son perjudiciales, algunos no siempre son peligrosos. Estos son oportunistas o agentes patógenos perjudiciales. Los organismos que pueden reproducirse únicamente cuando causan una enfermedad se llaman *agentes patógenos obligados*.

Las especies bacterianas suelen tener diversas cepas que pueden ser notablemente diferentes entre sí. *Escherichia coli* constituye, aproximadamente, un 1 % de la flora normal del intestino y la mayor parte de sus cepas no causan enfermedades. Sin embargo, algunas cepas de *E. coli* producen diarrea y muchas otras enfermedades, como infecciones de orina. La *E. coli* enterotoxigénica (es decir, que segrega toxinas intestinales) causa cada año más de doscientos casos de diarrea en el mundo.