

Nadando en miel: la extraña física de las bacterias

Claudia M. Cortesia^{1*} y Franklin W. Peña-Polo²

¹ Escuela Militar de Enfermería, Secretaría de la Defensa Nacional, México

² Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

* Dirección para correspondencia: ccortesia@gmail.com

Para un ser humano, nadar en agua parece una actividad relativamente sencilla. Basta con aplicar una fuerza para avanzar y, una vez adquirido cierto impulso, es posible continuar desplazándose durante un breve tiempo antes de que la resistencia del agua frene nuestro avance. Esta experiencia cotidiana cambia radicalmente cuando reducimos las dimensiones del nadador hasta la escala microscópica de una bacteria.

Para una bacteria, el agua no es un medio que le permita deslizarse aprovechando el impulso adquirido. Debido a su diminuto tamaño, las fuerzas viscosas dominan ampliamente sobre las fuerzas inerciales, lo cual, desde nuestro punto de vista macroscópico, da como resultado un mundo que parece extraño. Nadar en agua para una bacteria se asemeja más a intentar desplazarse en un medio extremadamente espeso, como la miel o la melaza (Purcell, 1977; Lauga y Powers, 2009).

Conviene aclarar que el agua no se vuelve realmente más viscosa para una bacteria. La comparación con la miel es solo una forma sencilla de imaginar lo que ocurre cuando cambiamos de escala: para una bacteria, moverse por el agua se

siente muy distinto de lo que experimentamos nosotros al nadar. Esta diferencia de escala nos obliga a cambiar nuestra forma de imaginar el movimiento. Lo que funciona para un nadador humano en nuestro mundo cotidiano puede ser completamente inútil para una bacteria. A esa diminuta escala, las reglas del juego cambian: la inercia deja de ser protagonista y la viscosidad pasa a dominar cada movimiento. (Lauga y Powers, 2009; Wadhwa y Berg, 2022).

Comprender cómo una bacteria logra desplazarse implica, por lo tanto, mirar más allá de la microbiología. Su locomoción es el resultado de una estrecha interacción entre biología molecular, termodinámica y mecánica de fluidos.

Un mundo donde la inercia pierde la batalla

El régimen físico del medio en el que se mueve un cuerpo u organismo puede describirse mediante el número de Reynolds, una cantidad adimensional que compara la importancia relativa de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. En organismos de gran tamaño, como peces o mamíferos marinos, las fuerzas inerciales pueden desempeñar un papel importante. Contrariamente, cuando las dimensiones del organismo se reducen hasta unos cuantos micrómetros, el número de Reynolds disminuye drásticamente y, dependiendo del tamaño del microorganismo, de la velocidad a la que se mueve y de las características del medio que lo rodea, puede alcanzar valores del orden de 10^{-5} a 10^{-2} (Purcell, 1977; Lauga y Powers, 2009). Debido a estas condiciones, el microorganismo se mueve

en un régimen en el que prácticamente no puede aprovechar su inercia y su movimiento queda determinado instantáneamente por el balance entre las fuerzas que genera y la resistencia viscosa del fluido (Wadhams y Armitage, 2022). En consecuencia, el microorganismo se mueve en un régimen en el que prácticamente no puede aprovechar su inercia y su movimiento queda determinado instantáneamente por el balance entre las fuerzas que genera y la resistencia viscosa del fluido (Wadhams y Armitage, 2022). A esta escala, la inercia no desaparece, pero deja de ser relevante frente a la viscosidad, haciendo que el agua se perciba, desde el punto de vista de la bacteria, como un medio extraordinariamente resistente al movimiento. Una consecuencia particularmente sorprendente es que, cuando una bacteria deja de impulsar sus flagelos, su velocidad disminuye prácticamente de inmediato. No existe un deslizamiento apreciable como el que se experimenta a escala humana al nadar. El movimiento debe ser generado de manera continua para compensar la resistencia viscosa del medio (Lauga y Powers, 2009). Esta condición impone una pregunta fundamental: ¿cómo puede una bacteria desplazarse si no puede aprovechar el impulso de la manera en que lo hace un organismo macroscópico? La respuesta se encuentra en una combinación de geometría, movimiento y una maquinaria molecular extraordinariamente sofisticada.

La trampa de la vieira

El físico Edward M. Purcell explicó de manera especialmente intuitiva las dificultades de nadar a bajo número de Reynolds mediante un ejemplo conocido como el teorema de la vieira (Purcell, 1977). Imaginemos una pequeña vieira u ostión microscópico que intenta desplazarse abriendo y cerrando sus valvas. A escala macroscópica, una estrategia de este tipo produce un desplazamiento, en el cual el animal puede aprovechar la inercia del agua al expulsar el fluido rápidamente para moverse. Pero en un mundo dominado por la viscosidad, la situación cambia completamente. Cuando la inercia deja de desempeñar un papel importante, el fluido responde prácticamente de inmediato a cada movimiento.

Cuando el número de Reynolds es muy bajo, el movimiento del fluido está gobernado por las ecuaciones de Stokes y adquiere una característica sorprendente: el tiempo parece poder recorrerse en ambos sentidos, de modo que un movimiento hacia adelante puede deshacerse exactamente al invertirlo. Si la vieira abre y cierra sus valvas siguiendo exactamente el mismo movimiento hacia adelante y hacia atrás, el flujo generado durante una parte del ciclo se cancela con el generado durante la otra. En otras palabras, un movimiento perfectamente simétrico no produce un desplazamiento neto. Para nadar en este sistema viscoso es necesario romper esa simetría mediante una secuencia de movimientos no equitativos, cuya forma y trayectoria no puedan simplemente invertirse (Purcell, 1977). Esta descripción, conocida como el teorema de la vieira, constituye una de

las claves para comprender la locomoción microscópica. Los microorganismos necesitan encontrar formas de movimiento que sean diferentes de las estrategias que utilizamos intuitivamente a escala humana. Y las bacterias encontraron una solución extraordinaria.

El micromotor del flagelo

Una de las soluciones más eficaces desarrolladas por numerosas bacterias es el flagelo bacteriano, una estructura helicoidal formada principalmente por la proteína flagelina (Berg y Anderson, 1973). A diferencia de un remo que oscila hacia adelante y hacia atrás, el flagelo puede girar de manera continua alrededor de su eje, comportándose hidrodinámicamente de manera semejante a un pequeño sacacorchos. La geometría helicoidal resulta fundamental. Al rotar, el flagelo interactúa con el fluido y genera un empuje que permite a la célula avanzar incluso en un régimen en el que la inercia tiene poca importancia.

La organización de los flagelos varía entre las diferentes especies bacterianas. Algunas poseen un solo flagelo en uno de sus polos, otras presentan varios agrupados en un extremo, mientras que algunas distribuyen numerosos flagelos alrededor de la célula. Estas diferencias arquitectónicas permiten desarrollar distintas estrategias de locomoción (Figura 1) (Berg y Anderson, 1973; Macnab, 2003).

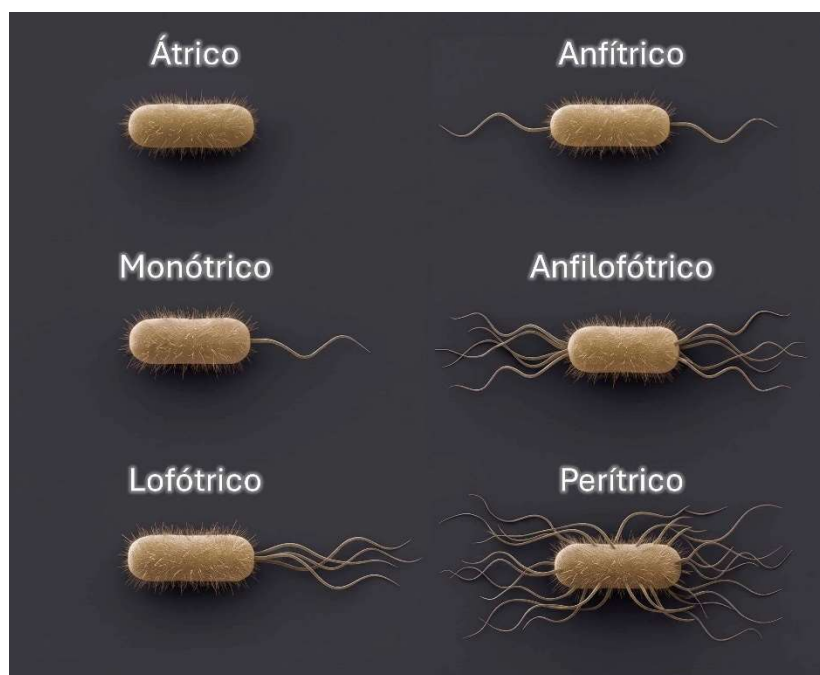


Figura 1. Tipos de arreglos flagelares bacterianos. Ilustración elaborada empleando IA con base en <https://es.dreamstime.com/tipos-de-flagelos-ilustración-esquemática-bacterianos-image174334138>.

No obstante, el filamento helicoidal no funciona por sí solo. En su base se encuentra una de las estructuras moleculares más fascinantes de la biología, el motor flagelar bacteriano. Este motor está integrado en la envoltura celular y contiene un rotor que gira respecto de un conjunto de proteínas denominado estator. Otros componentes proteicos contribuyen a mantener la estructura y a transmitir el movimiento hacia el filamento flagelar (Figura 2) (Macnab, 2003; Sowa y Berry, 2008). Su funcionamiento recuerda, en cierto sentido, al de un motor eléctrico microscópico, aunque resulta indispensable entender esta comparación exclusivamente como una analogía divulgativa y no como una equivalencia biológica o estructural. Sin embargo, su fuente de energía es muy diferente.

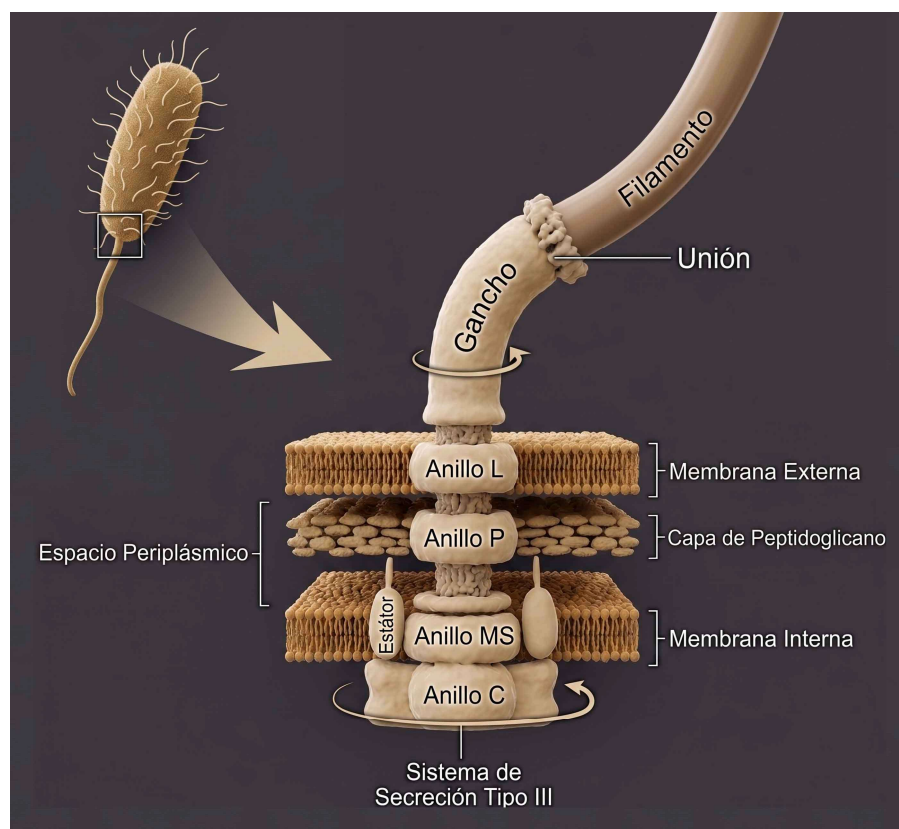


Figura 2. Estructura del motor flagelar anclado a la membrana. Ilustración elaborada con uso de IA con base en <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/bacterial-flagellum-taillike-structure-that-helps-2421015377>.

A diferencia de muchos motores celulares que utilizan directamente ATP como fuente de energía, el motor flagelar bacteriano aprovecha la energía almacenada en el gradiente electroquímico de la membrana. En numerosas especies, esta energía proviene del flujo de protones a través de proteínas especializadas del estator; en otras especies intervienen iones de sodio. El movimiento de estos iones a través de la membrana provoca cambios estructurales en las proteínas del estator, las cuales, al interactuar con el rotor mediante fuerzas

determinadas por la forma, el tamaño y las cargas eléctricas de sus componentes, generan el torque necesario para hacer girar el flagelo. De esta manera, la bacteria convierte la energía de un gradiente electroquímico en movimiento mecánico, un proceso cuya eficiencia puede variar según la especie y las condiciones del entorno, pero que ha sido perfeccionado por la evolución para permitirles desplazarse con eficacia en un mundo donde la viscosidad domina el movimiento. (Sowa y Berry, 2008).

El motor flagelar puede alcanzar velocidades de varios cientos de revoluciones por segundo, dependiendo de la especie y de las condiciones ambientales (Sowa y Berry, 2008). Todo este movimiento ocurre en una estructura de dimensiones nanométricas, capaz de transformar energía electroquímica en trabajo mecánico y, finalmente, en locomoción.

¿Correr o girar para encontrar alimento?

Para resolver el problema de la locomoción no basta con tener un sistema de propulsión eficiente. Una bacteria también necesita decidir hacia dónde dirigirse. Aquí surge otro reto, el movimiento browniano. Se trata del movimiento irregular y totalmente aleatorio que experimentan las partículas muy pequeñas cuando son golpeadas continuamente por las moléculas del líquido que las rodea. A escala microbiana, la bacteria vive en medio de un incesante bombardeo de moléculas de agua. Estos pequeños choques no solo la hacen desplazarse al azar, sino que

también la hacen girar una y otra vez. Esta intensa difusión rotacional hace que cambie constantemente de orientación, convirtiendo el movimiento en un verdadero desafío para cualquier bacteria que intenta avanzar en línea recta. (Lauga y Powers, 2009; Berg, 2003). Para nosotros, estos efectos serían prácticamente imperceptibles, pero para un organismo de apenas unos micrómetros representan una perturbación importante. Por eso, una bacteria no puede simplemente apuntar en una dirección y mantener una trayectoria perfectamente recta durante mucho tiempo mientras intenta avanzar: las constantes fluctuaciones térmicas hacen que su trayectoria cambie una y otra vez, desviándola de su rumbo.

¿Cómo puede una bacteria encontrar alimento o alejarse de sustancias perjudiciales?

Una de las respuestas más estudiadas se encuentra en la quimiotaxis, es decir, la capacidad de orientar el movimiento de acuerdo con cambios en la concentración de determinadas sustancias químicas del entorno. En bacterias como *Escherichia coli*, que se ha convertido en uno de los modelos biológicos más estudiados para comprender este fenómeno, esta estrategia se basa en alternar periodos de desplazamiento relativamente recto, conocidos como runs o corridas, con cambios rápidos de orientación denominados tumbles o volteretas (Berg, 2003). Cuando los flagelos giran en una determinada dirección, pueden agruparse en un haz que funciona como una estructura propulsora conjunta y permite a la célula avanzar.

Cuando cambia el sentido de rotación de algunos motores, el haz puede desorganizarse y la célula modifica rápidamente su orientación.

La bacteria no necesita construir un mapa del ambiente ni conocer de antemano la dirección en la que se encuentra el alimento. En cambio, sus sistemas de quimiorrecepción comparan los cambios en el entorno químico a lo largo del tiempo. Cuando las condiciones mejoran, la célula tiende a prolongar sus corridas; cuando empeoran, aumenta la probabilidad de cambiar de dirección (Wadhams y Armitage, 2004). De esta manera, un comportamiento aparentemente sencillo surge de la interacción entre receptores moleculares, señales bioquímicas, motores flagelares y las leyes de la mecánica de fluidos.

Es importante señalar que no todas las bacterias utilizan exactamente este mecanismo para cambiar de dirección. Existen otras estrategias de reorientación, entre ellas mecanismos asociados con la deformación o el pandeo del gancho flagelar (Son et al., 2013). La diversidad de soluciones demuestra que la evolución ha encontrado diferentes maneras de resolver un mismo problema físico: desplazarse de manera eficaz en un mundo dominado por la viscosidad.

Cuando las bacterias se mueven en equipo

Cabe destacar que las bacterias no se limitan a adaptarse pasivamente a las leyes de la mecánica de fluidos; en determinadas condiciones, también pueden modificar su entorno para favorecer su desplazamiento. Cuando encuentran superficies

sólidas húmedas o condiciones en las que la movilidad individual resulta poco eficiente, algunas especies adoptan una estrategia de motilidad colectiva conocida como swarming o movimiento en enjambre. Durante este proceso, todo puede cambiar dependiendo de la especie y de las condiciones particulares del pequeño mundo que la rodea. Algunas bacterias pueden aumentar el número de flagelos y producir sustancias tensioactivas que modifican las propiedades de la superficie y favorecen la expansión del enjambre. De esta manera, lo que comienza como el movimiento de células individuales puede transformarse en un desplazamiento coordinado de grandes poblaciones bacterianas (Kearns, 2010).

El swarming constituye un ejemplo particularmente interesante de comportamiento colectivo. Cada célula posee su propia maquinaria molecular de movimiento, pero cuando muchas células se desplazan juntas, las interacciones entre sí y con el entorno pueden producir un comportamiento colectivo que ninguna célula podría generar por sí sola. A diferencia de los grupos organizados que vemos en el mundo macroscópico, en estos agregados microbianos no hay una sola célula que marque el rumbo del grupo; el comportamiento colectivo surge de la interacción entre muchos individuos que responden simultáneamente a su entorno. En las bacterias ocurre algo semejante, aunque mediante mecanismos físicos y biológicos mucho más complejos. Cada célula consume energía, genera fuerzas y modifica el medio que la rodea, mientras las demás responden a esas modificaciones. Así, del movimiento individual emerge un comportamiento colectivo capaz de transformar el entorno.

De las bacterias a los microrrobots

El interés por comprender la locomoción bacteriana no se limita a la microbiología. Las soluciones desarrolladas por estos microorganismos también han inspirado investigaciones en física, ingeniería y nanotecnología. Uno de los desafíos de los llamados micronadadores artificiales es trasladarse eficientemente en fluidos a escalas en las que predominan las fuerzas viscosas. En estas condiciones, las estrategias de propulsión deben diseñarse teniendo en cuenta las mismas restricciones físicas que enfrentan los microorganismos (Lauga y Powers, 2009; Elgeti et al., 2015). Por ello, algunos investigadores han tomado como inspiración este mecanismo y han desarrollado pequeñas estructuras helicoidales artificiales que pueden desplazarse al hacerlas girar. En algunos diseños, un campo magnético externo permite controlar el movimiento de la estructura y producir el torque necesario para hacerla rotar (Elgeti et al., 2015). La semejanza con lo que ocurre en las bacterias es bastante clara: tenemos una estructura helicoidal, un movimiento de rotación y un medio en el que la inercia prácticamente deja de ser importante.

Pero una cosa es inspirarse en la naturaleza y otra muy distinta haber conseguido reproducirla por completo. Los microrrobots y micronadadores artificiales son actualmente un área muy activa de investigación y podrían tener aplicaciones interesantes en el futuro, por ejemplo, para transportar sustancias de manera dirigida dentro del organismo. Sin embargo, muchas de estas tecnologías apenas están dando sus primeros pasos en el laboratorio y todavía tienen

importantes desafíos por delante. Entre ellos están lograr que estos diminutos dispositivos se muevan con precisión, puedan orientarse hacia un destino específico y sean seguros y compatibles con el organismo. Además, deben ser capaces de funcionar de manera eficaz en los fluidos reales del cuerpo, un entorno mucho más complejo y cambiante que el agua cuidadosamente controlada de un laboratorio. La bacteria, en cambio, lleva millones de años enfrentándose a estos problemas y resolviéndolos mediante evolución.

Una lección de física escrita por la evolución

La locomoción bacteriana demuestra que comprender la vida microscópica requiere observar simultáneamente la biología y la física. Cuando reducimos las dimensiones, no solo hacemos las cosas más pequeñas: también cambia el mundo físico en el que se mueven. A esa escala, la viscosidad se convierte en la gran protagonista, mientras que la inercia, tan importante para nosotros, pierde buena parte de su utilidad. Incluso movimientos que parecen perfectamente naturales a nuestra escala dejan de funcionar.

La respuesta de la vida a estas condiciones ha sido extraordinaria. Las bacterias han desarrollado filamentos helicoidales que giran como diminutos sacacorchos, motores moleculares capaces de transformar gradientes electroquímicos en movimiento, sistemas sensoriales que les permiten detectar

cambios en su entorno y comportamientos colectivos con los que pueden modificar las superficies que habitan.

Detrás de la aparente sencillez de una bacteria se esconde un mundo de enorme complejidad. Cada giro, cada cambio de dirección y cada desplazamiento es el resultado de una delicada interacción entre moléculas, membranas, estructuras celulares y las propiedades del medio que la rodea. Estudiar estos mecanismos no solo nos ayuda a comprender cómo viven y se desplazan los microorganismos; también nos permite descubrir algo más profundo: cómo las leyes de la física, moldeadas durante millones de años por la evolución, pueden dar lugar a soluciones biológicas extraordinariamente sofisticadas.

Tal vez esa sea una de las lecciones más fascinantes de la locomoción bacteriana: cambiar de escala significa cambiar también nuestra manera de entender el movimiento. El agua que para nosotros parece ligera y fácil de atravesar puede representar, para una bacteria, un entorno dominado por la viscosidad. Allí, avanzar no es simplemente cuestión de empujar el agua y dejarse llevar por la inercia. Es necesario encontrar otra manera de moverse, de orientarse y de aprovechar las reglas de ese diminuto universo.

Y así llegamos a la paradoja que da sentido a este viaje: para nosotros es agua; para una bacteria, puede sentirse como miel. En ese mundo microscópico, sobrevivir significa aprender a nadar en ella.

Referencias

Berg HC (2003). *E. coli in Motion*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/b97370>.

Berg HC and Anderson RA (1973). Bacteria swim by rotating their flagellar filaments. *Nature* 245:380-382. DOI: <https://doi.org/10.1038/245380a0>.

Elgeti J, Winkler RG and Gompper G (2015). Physics of microswimmers—single particle motion and collective behavior: a review. *Reports on Progress in Physics* 78:056601. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/5/056601>.

Kearns DB (2010). A field guide to bacterial swarming motility. *Nature Reviews Microbiology* 8:634-644. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2405>.

Lauga E and Powers TR (2009). The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics* 72:096601. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/9/096601>.

Purcell EM (1977). Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics* 45:3-11. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.10903>.

Son K, Guasto JS and Stocker R (2013). Bacteria can exploit a flagellar buckling instability to change direction. *Nature Physics* 9:494-498. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys2676>.

Sowa Y and Berry RM (2008). Bacterial flagellar motor. *Quarterly Reviews of Biophysics* 41:103-132. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0033583508004691>.

Wadhams GH and Armitage JP (2004). Making sense of it all: bacterial chemotaxis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 5:1024-1037. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrm1524>.

Wadhwa N and Berg HC (2022) Bacterial motility: machinery and mechanisms. *Nature Reviews Microbiology* 20:161–173. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00626-4>.