

## Bacterias magnetotácticas, hoy y hace 3800 millones de años

Ricardo Guerrero y Mercedes Berlanga

Departamento de Microbiología, Universidad de Barcelona, Av. Diagonal, 645, 08028 Barcelona.  
E-mail: guerrero@retemail.es

**E**lección, discriminación, memoria, aprendizaje, instinto, juicio y adaptación son palabras que normalmente identificamos con procesos neuronales "superiores". Pero, en cierto sentido, se puede decir que una bacteria posee todas estas propiedades. Sería imprudente concluir que las analogías son sólo semánticas, ya que parece haber relaciones subyacentes en mecanismos moleculares y funciones biológicas.

Las bacterias flageladas se encuentran normalmente en estado de continuo movimiento errático. Sin embargo, algunas de ellas pueden responder a diversas sustancias que provocan la respuesta de un movimiento orientado. Algunas de estas sustancias pueden actuar como atrayentes y otras como repelentes, y este comportamiento se conoce como quimiotaxia. Muchas bacterias fotosintéticas (cianobacterias, bacterias rojas y verdes del azufre y no del azufre) pueden responder a un gradiente de intensidad de luz, fenómeno conocido como fototaxia. Esta respuesta induce un movimiento que realizan mediante deslizamiento, movimiento flagelar, variación del volumen de las vesículas de gas, etc. Algunas bacterias no fotosintéticas, incluso, son también sensibles a la luz y se concentran en un punto iluminado del portaobjetos (5). Un grupo particular de bacterias tiene estructuras compuestas por minerales de hierro denominadas magnetosomas. Estos magnetosomas permite a las células interactuar con las líneas del campo geomagnético y orientarse en la columna de agua, buscando las condiciones que favorecen su metabolismo. Este comportamiento recibe el nombre de magnetotaxia.

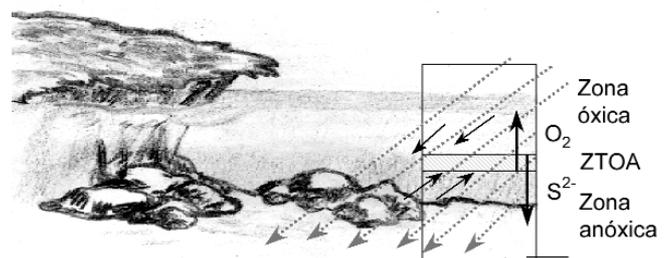
La primera indicación de que algunas bacterias eran sensibles al campo geomagnético la tuvo en 1975 Dick Blakemore, estudiante de doctorado entonces del Departamento de Microbiología de la Universidad de Massachusetts, en Amherst. Se hallaba observando las bacterias que colonizan el cieno de las lagunas salobres de Woods Hole (en Cape Cod, al sureste del estado de Massachusetts), cuando vio que algunos microorganismos nadaban persistentemente en un mismo sentido, moviéndose a través del campo visual del microscopio para concentrarse en el borde de una gota de agua fangosa. Que no se trataba de una respuesta fototáctica lo ponían de manifiesto las propias bacterias, que avanzaban hacia el mismo borde sin tener en cuenta la distribución de la luz

que llegaba a la preparación microscópica. Que no se trataba únicamente de una respuesta oxitáctica lo indicaba el hecho de que una sección del borde de la gota era preferida a las demás. Todo indicaba que las bacterias estaban dirigidas, posiblemente, por el campo magnético de la Tierra. Para demostrarlo, Blakemore examinó una gota de agua y barro con microscopía de campo oscuro. Las bacterias en movimiento refractaban la luz, y aparecían como puntos luminosos. En ausencia de otro campo magnético que no fuera el geomagnético, algunas bacterias nadaban persistentemente en dirección norte y se acumulaban en el borde norte de la gota. Si se aproximaba una barra magnética de laboratorio, las bacterias nadaban hacia el polo que atraía el extremo de una aguja imantada que señalaba el norte. Y a la inversa, nadaban apartándose del polo que atraía el extremo de la aguja que buscaba el sur (2).

### Ecología de las bacterias magnetotácticas

**L**as bacterias magnetotácticas son ubicuas en los hábitats acuáticos. Se han encontrado en marismas y agua salobres, pantanos y ciénagas, estanques de oxidación de aguas residuales, y en aguas termales; sin embargo, no existen pruebas de su presencia en aguas bien aireadas o ácidas. Se encuentran en elevada densidad poblacional justo en la zona de transición óxico-anóxica (ZTOA) (Fig. 1).

Las bacterias magnetotácticas constituyen un



**Fig. 1.** Zona de transición oxi-anóxica (ZTOA) en una columna de agua. El campo geomagnético está representado por las flechas discontinuas. Las bacterias magnetotácticas se alinearían con el campo magnético y nadarían hacia arriba o hacia abajo para alcanzar la concentración óptima de oxígeno próxima a la zona ZTOA (flechas inclinadas).

grupo heterogéneo de procariotas -pertenecientes al reino Bacteria (Manual de Bergey, 2ª ed.)-, con morfologías muy diferentes, pudiendo presentarse como cocos, bacilos, vibrios o espirilos. Además, pueden vivir como células aisladas o bien formar agregados celulares. A pesar de esta diversidad morfológica, las bacterias magnetotácticas comparten algunas características comunes: (i) son gramnegativas, (ii) presentan movimiento flagelar, (iii) exhiben una respuesta táctica negativa frente a concentraciones atmosféricas de oxígeno, y (iv) poseen magnetosomas (1).

Las bacterias magnetotácticas se establecen en zonas con baja tensión de oxígeno, lo que sugiere que este grupo de microorganismos se desarrolló durante la historia geológica temprana de la Tierra -en el Arqueano antiguo, entre 3900 y 3500 millones de años-, cuando el contenido atmosférico de oxígeno era significativamente inferior al actual (6).

Las bacterias que buscan tensiones bajas de oxígeno se denominan microaerófilas, y este metabolismo es frecuente en muchos habitantes de sistemas acuáticos poco profundos. Los espirilos son organismos frecuentemente microaerófilos y su veloz movimiento les permite buscar la concentración de oxígeno adecuada. Un ejemplo reciente observado presenta células muy grandes (longitud: 20-30 mm, anchura: 3-5 mm), un gran número de glóbulos de azufre, numerosos flagelos (60-100), en cada polo e indicios de tener un movimiento no sólo flagelar sino también por flexión de su pared (7).

Las bacterias magnetotácticas resultan difíciles

de mantener en cultivo axénico. Aún así, en algunos casos se ha conseguido, pero sólo las que tienen magnetita (Tabla 1). Aquéllas que tienen greigita como mineral magnético no han podido ser mantenidas en cultivo axénico; no obstante, sobre su ecofisiología se sabe que se sitúan por debajo de la ZTOA, que son anaerobias y que utilizan el sulfhídrico (1).

**Origen evolutivo de la magnetotaxia en bacterias**

Los magnetosomas son estructuras intracelulares compuestas por cristales de un mineral magnético, y que se encuentran rodeados por una membrana lipoproteica o estructura similar. Generalmente, el mineral es magnetita (óxido de hierro, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) o greigita (sulfuro de hierro, Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>).

El análisis filogenético de la secuencia genética de la subunidad pequeña del RNA ribosómico de las bacterias magnetotácticas indica que el tipo de mineral del magnetosoma refleja una relación filogenética. Las bacterias magnetotácticas con magnetosomas de óxido de hierro (magnetita) se agrupan en la subdivisión α de las proteobacterias, mientras que los que están formados por sulfuro de hierro (greigita) se relacionan con las bacterias sulfatorreductoras, que se incluyen en la subdivisión δ de las proteobacterias. De este modo, la magnetotaxia basada en magnetita o en greigita tendría un origen evolutivo separado. Además, el proceso bioquímico de biomineralización y formación de los magnetosomas probablemente son también diferentes. La ventaja conferida por la

**Tabla 1.** Bacterias magnetotácticas aisladas y cultivadas.

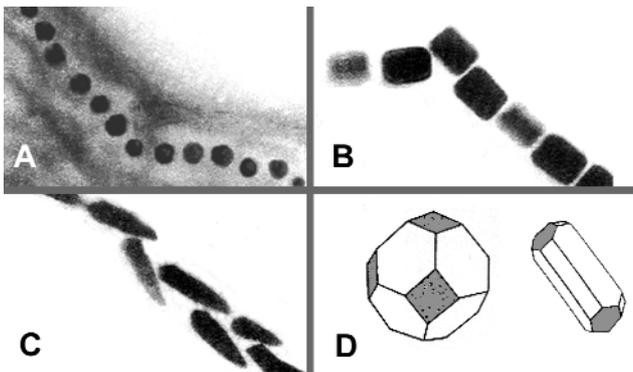
Cepa	Morfología	Hábitat	Morfología y tipo del mineral magnético	Fisiología / Autor *
<i>Magnetospirillum magnetotacticum</i> MS-1	Espirilo	Agua dulce	Cristales cubo-octahédricos de magnetita	Quimioorganoheterotrofo, microaerófilo estricto / Balakemore
<i>Magnetospirillum</i> AMB-1	Espirilo	Agua dulce	Cristales cubo-octahédricos de magnetita	Quimioorganoheterotrofo, en condiciones anaeróbicas utiliza NO <sub>3</sub> -como aceptor de
<i>Magnetospirillum gryphiswaldense</i> MV-1 y MV-2	Espirilo	Agua dulce	Cristales cubo-octahédricos de magnetita	(Desconocida) / Schleifer
	Vibrio	Agua salada	Cristales hexahédricos de magnetita	Quimioorganoheterotrofo, utilizando los ácidos orgánicos como fuente de C y E ; o quimiolitotrofo con tiosulfato o sulfhídrico / Bazylnski
RS-1	Bacilo		Partículas de magnetita en punta de flecah	Quimioorganoheterotrofo, no pueden utilizar los nitratos como aceptor final de electrones / Sakaguchi
MC-1	Coco	Agua	Cristales hexahédricos salada	Quimiolitoautotrofo con tiosulfato de magnetita / Frankel

\*Primer autor del artículo correspondiente. Para mayor información bibliográfica, escribir a guerreo@retemail.es

magnetotaxia presumiblemente aumenta la eficiencia para encontrar y mantener una posición óptima respecto a los gradientes de concentración química o de potencial redox. Es remarcable el hecho de que ambos tipos de bacterias magnetotácticas converjan hacia soluciones similares del problema de la magnetotaxia: la construcción de un momento dipolar magnético suficiente para orientar la célula en la columna de agua mediante la interacción con las líneas del campo geomagnético (3).

### Magnetosomas: composición y estructura

Los magnetosomas están dispuestos en una o más cadenas paralelas al eje mayor de la célula (se ha observado que el número de magnetosomas presentes en una cadena depende del tipo de bacteria; en el caso particular de la cepa MC-1, se han contado aproximadamente 10, mientras que para *Magnetospirillum magnetotacticum* son más de 20 (véase Tabla 1). Se han observado tres tipos de morfología de las partículas de mineral magné-



**Fig. 2.** Micrografías electrónicas de la morfología cristalina de los magnetosomas encontrados en varias bacterias magnetotácticas (9). (A) forma cubo-octahédrica, (B) morfología hexagonal prismática alargada, (C) morfología en forma de punta de flecha y (D) morfologías cristalinas de magnetita idealizadas derivadas del estudio de los magnetosomas de las bacterias magnetotácticas por microscopía electrónica de transmisión.

tico: cubo-octahédrica, prismas alargados hexagonales y en forma de punta de flecha (1, 10) (Fig. 2).

El tamaño de una partícula de magnetita determina su momento magnético efectivo. Las partículas inferiores a 40 nm tienen un dominio magnético único, ya a temperatura ambiente son superparamagnéticas. En otras palabras, el momento magnético invierte rápidamente su orientación. Las que tienen tamaños mucho mayores presentan una estructura magnética de dominios; es decir, en el material existen zonas

con un momento magnético neto, pero con orientaciones diferentes. Los magnetosomas observados hasta el momento presentan un tamaño comprendido entre 40 y 120 nm (Tejada y Duran, Universidad de Barcelona, comunicación personal).

Como en todos los materiales magnéticos, la fuente última del magnetismo es el momento magnético asociado al momento angular del espín de cada átomo de hierro. Las interacciones entre átomos originan la alineación paralela de los espines en una región del material. El tamaño de una partícula de magnetita determina su momento magnético efectivo. Las interacciones magnéticas entre partículas hacen que éstas se orienten paralelamente entre sí, de tal manera que aparece un único momento magnético que es el resultado de la suma de los momentos de las partículas individuales. El tamaño y morfología prefijados en cada especie bacteriana para sus magnetosomas indican la existencia de un mecanismo de "mineralización controlado biológicamente" (MCB).

Éste fenómeno es equiparable al de otros procesos MCB, que originan diversos minerales, muchas veces en forma cristalina. Algunos ejemplos bien conocidos son la calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) -producida por muchos organismos marinos, desde los cocolitoforales a los moluscos-, o el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) -presente en las espículas de los radiolarios y de algunas esponjas. El organismo ejerce un control cristalográfico sobre la nucleación y crecimiento de las partículas minerales. En la actualidad se conocen más de cincuenta minerales cuya producción está controlada por las células vivas.

En otros muchos casos, los organismos producen minerales de forma indirecta, como resultado de sus actividades metabólicas y de las subsiguientes reacciones químicas en el ambiente. A este proceso se le ha denominado "mineralización inducida biológicamente" (MIB). Los microorganismos secretan o producen compuestos metabólicos que reaccionan con iones específicos o con otros compuestos del ambiente, que dan lugar a una mineralización extracelular. Las partículas del tipo MIB se forman extracelularmente, están mal cristalizadas, no tienen una morfología definida y suelen presentar impurezas por inclusión de otras sustancias. La magnetita y greigita también se pueden formar por este segundo mecanismo, que no está controlado por el microorganismo, y tiene lugar de forma indirecta (1).

En la Tabla 2 se indica la composición y estructura de diversos minerales de hierro. De entre ellos, solamente algunos presentan propiedades magnéticas. Y para acabar este apartado debemos

**Tabla 2.** Minerales con hierro

Grupo	Nombre	
Azufre	Mackinamita	FeS (tetragonal)
	Pirita	FeS <sub>2</sub> (cúbica)
	Mareasita	FeS <sub>2</sub> (ortorrómbica)
	Greigita *	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>
	Pirrotita*	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>
Oxígeno	Magnetita*	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	Goethita	FeO(OH)
	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Maghemita*	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Carbonato	Siderita	FeCO <sub>3</sub>
Fosfato	Vivianita	Fe <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·8H <sub>2</sub> O

\*Magnéticos

recordar que, a diferencia de la atracción gravitatoria, la fuerza magnética no es una propiedad universal de todos los cuerpos del espacio. Dentro de nuestro sistema solar, la Tierra presenta magnetismo debido al movimiento diferencial de las distintas partes que componen la litosfera, que funciona como una dinamo gigante. La Luna -al estar constituida sólo por una parte del manto de la Tierra- no tiene magnetismo. Pero es muy posible que existan campos magnéticos en algunos de nuestros compañeros en el espacio, los distintos planetas y satélites que danzan parsimoniosamente alrededor del Sol desde hace unos 4500 millones de años.

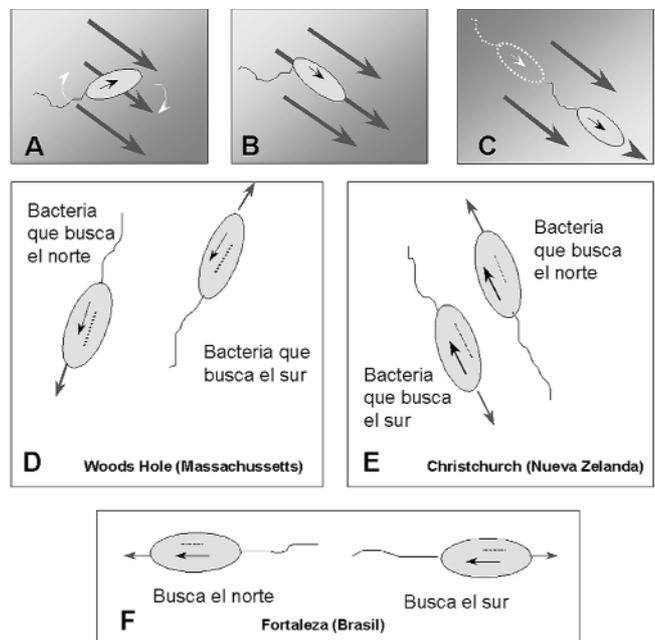
**Función de la magnetotaxia en las bacterias**

El desplazamiento de una bacteria puede ser o bien aleatorio o bien "dirigido" hacia algo; esto último se denomina taxia. Si disminuye el movimiento al azar se consigue una mayor direccionalidad del movimiento. Hay que destacar que las bacterias magnéticas ni son atraídas ni repelidas por el polo geomagnético solamente son orientadas. Las células muertas también se sitúan en las líneas de campo magnético como las células vivas, pero no se mueven (Fig. 3A).

El movimiento en una dirección u otra viene determinado por la rotación de los flagelos en un mismo sentido, como demostraron los experimentos ya clásicos de Julius Adler. El aparato flagelar está constituido por tres regiones distintas. La región más externa es el filamento helicoidal, rígido y de anchura constante, formado por una única proteína, la flagelina. Cerca de la superficie celular, el filamento está unido a un gancho de diámetro algo mayor, que a su vez se halla unido a un cuerpo basal rotatorio compuesto por discos alojado por completo dentro de la envoltura celular. Los flagelos son rotores helicoidales semirrígidos que giran en sentido horario o antihorario

alrededor de su eje longitudinal. El movimiento es comunicado al orgánulo en su base por un "motor" flagelar. Se ha sugerido que este motor funciona haciendo que los anillos giren unos contra otros.

Las bacterias magnetotácticas se alinean pasivamente con el campo geomagnético; se mueven bidireccionalmente, hacia arriba o hacia abajo, y no cambian de dirección dando giros como otras bacterias quimiotácticas (p.ej. *Escherichia coli*). Las bacterias magnetotácticas son microaerófilas o anaerobias, de tal manera que evitan las concentraciones de oxígeno elevadas; la navegación a lo largo de las líneas del campo magnético facilita la migración hacia una posición favorable de concentración de oxígeno, más arriba o más abajo de donde se encuentran, es decir, buscan la zona



**Fig. 3.** Orientación geomagnética de las bacterias que presentan magnetosomas. (A) Una bacteria magnetotáctica con un momento magnético intrínseco, tenderá "tozudamente" a alinearse con las líneas del campo geomagnético. (B) Una bacteria magnetotáctica muerta o inmóvil con magnetosomas también se alinea con la dirección del campo magnético; pero no se desplaza. (C) Las células magnéticas móviles nadan preferentemente a lo largo de las líneas del campo magnético, buscando la concentración adecuada de oxígeno. (D) En el hemisferio septentrional, una bacteria buscadora del norte se dirige hacia abajo, hacia la zona microóxica. (E) En el meridional, las bacterias buscadoras del sur también tienden a nadar hacia abajo. (F) Cerca del ecuador se dan ambos tipos, y uno u otro se desplazan más o menos horizontalmente.

donde la concentración de oxígeno disuelto sea la óptima para su metabolismo. Las bacterias magnetotácticas del hemisferio norte se orientan buscando el norte geomagnético, mientras que las del hemisferio sur predominan las que buscan el sur. Debido a la inclinación del campo magnético terrestre, las bacterias magnetotácticas de cada hemisferio se dirigirán preferentemente hacia abajo, lejos de la superficie del agua, donde la concentración de oxígeno es tóxica. No se excluye que algunas bacterias de un determinado hemisferio aparezcan con una polaridad opuesta. En estas circunstancias, las bacterias con magnetización invertida sufren una discriminación continua, ya que se dirigen hacia arriba, a zonas óxicas menos adecuadas para su crecimiento (Fig. 3B).

La magnetotaxia es particularmente ventajosa para los microorganismos porque aumenta la eficacia de encontrar y mantener la posición óptima relativa al gradiente de concentración vertical (oxígeno, sulfhídrico o potencial redox), reduciendo la búsqueda de las condiciones óptimas en un espacio tridimensional a uno bidimensional. En las bacterias magnetotácticas se han observado dos tipos de señales aerotácticas: magnetotaxia axial y magnetotaxia polar. El primer caso lo exhibe *Magnetospirillum magnetotacticum*, el cual invierte el sentido del movimiento cuando el microorganismo se encuentra en una zona donde la concentración de oxígeno está por debajo o por encima de su nivel adecuado. El campo magnético en este caso actuaría como una carretera de doble sentido. El segundo, se ha observado en el coco MC-1 (véase Tabla 1), que consiste en un mecanismo sensorial con dos estados. A concentraciones de oxígeno superiores a las preferidas (estado 1) los flagelos giran en sentido antihorario y las células nadan de forma persistentemente paralela al campo magnético (mismo sentido); a concentraciones de oxígeno por debajo de la óptima (estado 2), los flagelos rotan en sentido horario y las células nadan de forma antiparalela al campo magnético. Las bacterias persisten en uno de los dos estados hasta que "encuentran" la concentración de oxígeno umbral, que determina el cambio al otro estado, modificando el sentido del movimiento. En este caso, el campo magnético proporciona tanto la dirección como el sentido del movimiento (4).

### Minerales magnéticos biogénicos en Marte

Las bacterias magnetotácticas podrían utilizarse como "biomarcadores" para el estudio del paleomagnetismo, cambios temporales de las condiciones ambientales que se reflejarían por variaciones en la proporción de "magnetofósiles" en

diferentes fracciones de un sedimento; así como para la búsqueda de vida en otros planetas.

Recientemente, el estudio mineralógico, así como de otras características, del meteorito marciano ALH84001, ha sugerido que diversas estructuras o compuestos del meteorito podrían ser explicados por un proceso biológico, y que, por tanto, representan unas posibles pruebas de la existencia de vida pasada en Marte (9).

Hace de 3900 a 3800 millones de años, los tres planetas vecinos (Venus, la Tierra y Marte, por orden de proximidad al Sol), tenían probablemente en su superficie características compatibles con las condiciones necesarias para la aparición y mantenimiento de la vida, tal como la conocemos hoy. Estas condiciones eran, principalmente, la existencia de agua líquida en abundancia y de fuentes adecuadas de donadores y de aceptores de electrones. Pudo darse entonces -en los tres planetas- la biopoyesis, u origen de la vida. La aparición posterior de los ecosistemas, o ecopoyesis, dio lugar en la Tierra a ciclos biogeoquímicos, de tal manera que no se agotaran los materiales biogénicos de la superficie de nuestro planeta, lo cual habría pasado en un máximo de 200 a 300 millones de años de la primera historia de la vida (6). No es arriesgado pensar que Marte y Venus también pudieron experimentar en algún momento la biopoyesis, sin desarrollar sin embargo una ecopoyesis. El agotamiento de los elementos biogénicos no debió permitir que la vida se mantuviera, si es que alguna vez llegó a originarse. La aparición, y mantenimiento, de los ecosistemas marcó el destino que distinguió la evolución posterior de nuestro planeta y nos diferenció claramente de nuestros dos vecinos en el espacio.

El debate de la presencia de vida en Marte se remite -si prescindimos de las novelas de ciencia ficción- a los experimentos realizados en 1976 por la sonda espacial *Viking*. Aunque los resultados fueron negativos para la vida en muestras de la superficie, sí se observaron canales excavados por antiguos ríos, lo que alimentó la esperanza de que a pesar de todo pudiera encontrarse alguna prueba de vida pasada en el planeta rojo. Tampoco se descartó la posibilidad de que se encontrara vida en otras localizaciones. Los resultados del *Viking* no contenían información de posibles fósiles, ni tampoco era el objetivo de la sonda *Pathfinder*, de julio de 1998. Puede añadirse, como colofón demostrador de nuestras limitaciones tecnológicas, que una sonda similar analizó muestras en la Antártida, siendo incapaz de detectar vida (!). Observaciones microscópicas y análisis de ATP y LPS, por el contrario, han podido demostrar la presencia de vida microbiana abundante hasta en

muestras tomadas cerca de la superficie del lago Vostoc (una masa de agua de extensión casi doble que la Comunidad Autónoma de Madrid, situada bajo 4 km de hielo antártico) (8).

Otra fuente de información acerca de la posibilidad de vida pasada en Marte son los meteoritos del tipo SNC (Shergotty, India, 1865; Najla, Egipto, 1911; y Chassing, Francia, 1815; tres localidades donde se han encontrado meteoritos de ese tipo, que impactaron sobre la Tierra en distintos momentos y lugares). En los meteoritos SNC se buscan biomarcadores marcianos basándose en los conocidos en la Tierra. Si existiera un biomarcador exclusivo de Marte, seríamos, por el momento, incapaces de reconocerlo. Se ha examinado el meteorito ALH84001 ("Allan Hills, primera muestra de 1984"), que es del tipo SNC y se encontró en 1984 en la Antártida. La roca del meteorito se formó en el planeta rojo hace 4000 millones de años; los glóbulos de carbonato hace 3600 millones de años; el meteorito debió desprenderse de Marte en el choque con un asteroide hace unos 16 millones de años. Desde entonces estuvo girando por el espacio cercano a nuestros dos planetas hasta que cayó en la superficie helada de la Antártida hace 13.000 años, centurias después de que la gente de Altamira decorara profusamente sus cuevas.

El examen del meteorito ALH84001 muestra los siguientes indicios que serían compatibles con la existencia de vida (pasada) en Marte: (i) La roca marciana es de origen ígneo y fue penetrada por un fluido a través de las fracturas y poros, los cuales constituyeron los sitios de formación mineralógica secundaria (glóbulos de carbonato), posiblemente debida a actividad biogénica. (ii) La edad de formación de los glóbulos de carbonato es menor que la edad de la roca ígnea. (iii) La selección de un glóbulo de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro para el estudio de microscopía electrónica de transmisión (TEM) y de barrido de alta resolución muestra la presencia de minerales de magnetita y de greigita, que son similares en tamaño y forma a los encontrados en sedimentos fósiles terrestres. (iv) Se encuentran hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados con la superficie de los glóbulos de carbonato. No es aventurado pensar que uno de los primeros microorganismos de Marte fueran las bacterias magnetotácticas, como tal vez lo fueron en la Tierra, hace 3800 millones de años. Al igual que en la Tierra, las bacterias marcianas habrían dejado fósiles no solamente fácilmente conservables, sino también fácilmente identificables con la tecnología actual. Las bacterias magnetotácticas constituirían, por tanto, un testigo durmiente que esperaría pacientemente su descubrimiento gracias a la evolución de vida inteligente en el vecin-

dario de las profundidades cósmicas. (Dos investigadores en España, Carmen Ascaso, CSIC-Madrid, y Jacek Wyrzchos, Universidad de Lérida, están haciendo detallados estudios sobre la presencia de magnetita en ALH84001. Este extraordinario hallazgo quizá contribuya a esclarecer si existió vida en el planeta rojo.)

Es posible que las características descritas en ALH84001 puedan ser explicadas por procesos inorgánicos, pero éstos parecen requerir condiciones muy restringidas, difíciles de conseguir simultáneamente; mientras que la explicación de estas características por un origen biogénico parece más plausible.

---

## Conclusiones y perspectivas

Las bacterias magnetotácticas se orientan y migran a lo largo de las líneas del campo geomagnético. Esta capacidad se basa en la presencia de estructuras magnéticas intracelulares, los magnetosomas, los cuales son de tamaño nanométrico, y contienen un mineral magnético magnetita o greigita rodeados de una membrana lipoproteica. La formación de los magnetosomas es un proceso controlado biológicamente, en el que la deposición de la partícula de magnética tiene un tamaño y una localización específica dentro de la célula. Las bacterias magnetotácticas son un interesante grupo heterogéneo de procariotas. Su ecofisiología y filogenia las emparenta con las bacterias que pudieron vivir en los ambientes microóxicos del Arqueano antiguo, en la Tierra. Es posible también que hayan existido en Marte, aunque este hecho no podrá ser verificado o falsado hasta dentro de algunos años. Los magnetosomas son una fuente insustituible de partículas magnéticas unidominio. La magnetita bacteriana podría tener múltiples aplicaciones biotecnológicas, en campos tan diversos como nuevos materiales para ingeniería o la biomedicina, aunque en la actualidad no se ha explotado a escala comercial, principalmente debido a problemas relacionados con el cultivo masivo de las bacterias magnetotácticas, así como al desconocimiento bioquímico y genético de la biomineralización de las partículas ferromagnéticas. Si se identificasen los genes implicados, éstos podrían ser expresados en un organismo huésped "cultivable", de tal manera que se eliminarían las dificultades asociadas con el cultivo de las bacterias magnetotácticas. El conocimiento de cómo una bacteria magnetotáctica es capaz de controlar el proceso de biomineralización podría ser empleado en la síntesis de partículas ferromagnéticas "a medida", con diferentes morfologías cristalinas y propiedades deseadas. Después de 10.000 años de domesticación,

nuevos microorganismos, hasta ahora impen-  
sados, siguen teniendo -como diría Pasteur-  
"la última palabra".

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bazylinski DA (1999) Synthesis of the bacterial mag-  
netosome: the making of a magnetic personality.  
Internatl. Microbiol. 2: 71-80.
2. Blakemore RP (1975) Magnetotactic bacteria. Science  
190: 377-379.
3. Delong EF, Frankel RB, Bazylinski DA (1993)  
Multiple evolutionary origins of magnetotaxis in bac-  
teria. Science 259: 803-806.
4. Frankel RB, Bazylinski DA, Johnson MS, Taylor BL  
(1997) Magneto-aerotaxis in marine coccoid bacteria.  
Biophys. J. 73: 994-1000.
5. Guerrero R, Ashen A, Solé M, Margulis L (1993)  
*Spirosymplokos deltaeiberi* nov. gen., nov. sp.: variable-  
diameter composite spirochete from microbial mats.  
Arch. Microbiol. 160: 451~470
6. Guerrero R (1998) Crucial crises in biology: life in the  
deep biophere. Internatl. Microbiol. 1: 285~294.
7. Guerrero R, Haselton A, Solé M, Wier A, Margulis L  
(1999) *Titanospirillum velox*: a huge, speedy, sulfur-  
storing spirillum from Ebro Delta microbial mats.  
Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 96: 11584-11588.
8. Karl DM, Bird DF, Björkman K, Houlihan T,  
Shackelford R, Tupas L (1999) Microorganisms in the  
accreted ice of Lake Vostok, Antarctica. Science  
286:2144-2147.
9. McKay DS, Gibson EK, Thomas-Keprta KL, Vali H,  
Romanek CS, Simon JC, Chillier XDF, Maechling CR,  
Claude R, Zare RN (1996) Search for past life on Mars:  
possible relic biogenic activity in martian meteorite  
ALH84001. Science 273: 924-930.
10. Schüller D, Frankel RB (1999) Bacterial magnetoso-  
mes: microbiology, biomineralization and biotechnologi-  
cal applications. Appl. Microbiol. Biotechnol. 52: 464-473.