

## Los cambios de paradigma en microbiología\*

Ricardo Guerrero<sup>1</sup> y Mercedes Berlanga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Microbiología y <sup>2</sup>Departamento de Microbiología y Parasitología Sanitarias, Universidad de Barcelona  
rguerrero@iec.cat, mberlanga@ub.es

El desarrollo científico es una continua interacción entre hechos e ideas. Los avances en el conocimiento del mundo natural van normalmente precedidos de innovaciones tecnológicas que permiten nuevas mediciones y observaciones del mundo que nos rodea, y también idear situaciones experimentales que antes no hubieran sido posibles. Las técnicas a pesar de su extraordinaria utilidad, son sólo herramientas que necesitan de la preparación intelectual para alcanzar el conocimiento e interpretar la realidad: “La casualidad sólo se presenta en las mentes preparadas” (en palabras de Louis Pasteur).

Nuestro conocimiento de los microbios ha tenido una vertiente negativa, el temor, ya que son los agentes causantes de las enfermedades infecciosas, y de la contaminación y deterioro de alimentos, materiales, etc. Sin embargo, empezamos a darnos cuenta de que somos completamente dependientes de la vida microbiana. La vida no sólo comenzó con los microorganismos procariotas, sino que la continuidad de la misma existencia de la vida sobre la Tierra recae sobre ellos. La simple observación de una bacteria al microscopio no es muy reveladora. La mayoría parecen sencillos bastoncitos o pequeñas esferas sin ningún rasgo distintivo. A pesar de esta aparente simplicidad morfológica, las bacterias presentan una enorme diversidad metabólica que les permite ocupar nichos ecológicos muy diversos y ser la base de todas las redes tróficas de la biosfera. Como las células procariotas carecen de orgánulos, característicos de las células eucariotas, durante años se creyó que el citoplasma procariótico era un saco que sólo contenía enzimas solubles y maquinaria molecular diversa. No obstante, ahora sabemos que su interior es sorprendentemente complejo (Tian et al., 2005; Scheffel et al., 2006; Shih & Rothfield, 2006).

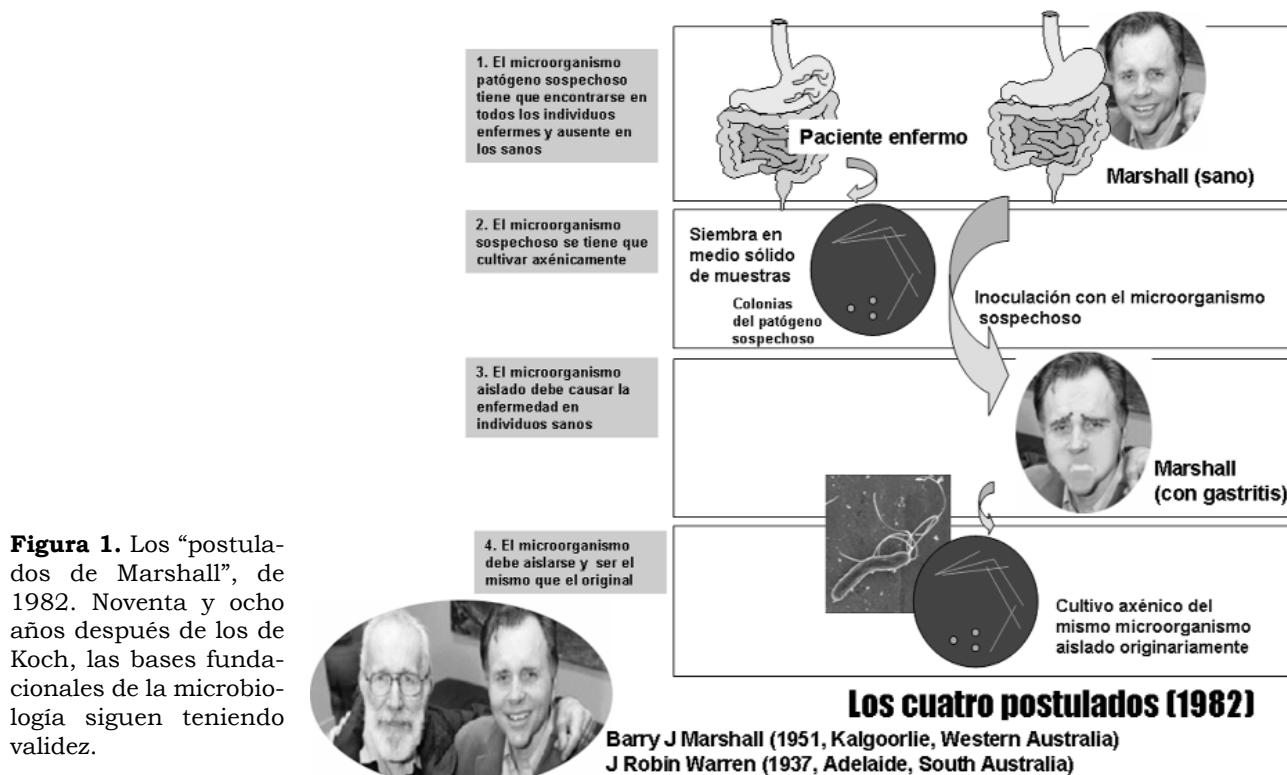
Durante más de un siglo las bacterias se estudiaron como poblaciones de células que actuaban independientemente. Hoy sabemos que hay muchos mecanismos de interacción y comunicación entre las células. Las bacterias pueden producir una gran cantidad de compuestos químicos

para responder a diversos estímulos del medio ambiente. Algunos de esos compuestos regulan la expresión de ciertos genes cuando la población alcanza un determinado tamaño; es la respuesta denominada “percepción de quórum”. También hemos aprendido que la comunicación intercelular y la coordinación multicelular están muy extendidas entre los procariotas (Keller & Surette, 2006).

El último cambio de paradigma en microbiología ha sido la verificación de que la úlcera gastroduodenal es una enfermedad causada por una bacteria y que es posible su tratamiento con antibióticos. Durante largo tiempo se la consideró una afección “psicosomática”, incluso genética. Fueron necesarios más de diez años, y la concesión de un premio Nobel, para que la comunidad médica volviera a “creer” en los microbios. En ciencia no hay saltos en el vacío que puedan permanecer irresueltos por mucho tiempo; como tampoco hay errores duraderos (Guerrero, 2005).

Barry J. Marshall y J. Robin Warren, dos médicos australianos, fueron los ganadores del premio Nobel de Fisiología o Medicina de 2005 por un descubrimiento en el campo de la bacteriología que databa de 1982. Habían descrito la presencia de *Helicobacter pylori*, en el estómago humano, y la relacionaron con la producción de gastritis y úlceras pépticas. El discurso de recepción del premio Nobel de Marshall se titulaba “*Helicobacter. The Good, the Bad and the Ugly*”, en referencia no sólo a la famosa película de Sergio Leone, sino también al hecho de que la medicina debe cambiar la manera de considerar las enfermedades infecciosas y los microorganismos. Los microorganismos colonizan todas las superficies externas del cuerpo, proliferan en el tubo digestivo y mantienen un equilibrio dinámico con nuestro organismo, manteniéndolo en un estado sano al impedir que proliferen microorganismos patógenos. La relación entre los microorganismos saprófitos, e incluso beneficiosos e imprescindibles, y los claramente nocivos no siempre es clara. Depende de un delicado equilibrio entre el huésped y los microorganismos, y por lo tanto, de las variaciones de las condiciones del medio. Este equilibrio es lo que marca la profunda diferencia entre la salud y la enfermedad, entre la vida y la muerte.

\*Este artículo está basado en la conferencia de clausura del Congreso del Grupo Especializado de Microbiología Industrial y Biotecnología Microbiana, celebrado en La Coruña, los días 9 y 10 de noviembre de 2006.



**Figura 1.** Los “postulados de Marshall”, de 1982. Noventa y ocho años después de los de Koch, las bases fundacionales de la microbiología siguen teniendo validez.

Barry J. Marshall (nacido en 1951, en Kalgoorlie, Australia) y J. Robin Warren (nacido en 1937, en Adelaide, Australia) demostraron que la presencia de *Helicobacter pylori* estaba asociada a la inflamación de la mucosa gástrica. Para la comunidad médica, reconocer que la úlcera péptica o gastroduodenal podía estar causada por un microorganismo significaba un profundo cambio de paradigma: abandonar la idea de una afección psicósomática, a menudo hereditaria, cuyo único remedio en casos graves era la cirugía. Según Marshall y Warren, la enfermedad era infecciosa, estaba producida por una bacteria, y por tanto, podía ser tratada con antibióticos. En poco más de cien años de la historia de los premios Nobel, pocas veces se ha concedido el de Fisiología o Medicina al descubrimiento de una enfermedad infecciosa de origen bacteriano.

Los histopatólogos habían detectado la presencia de bacterias espirales en el estómago humano desde antes de 1906. Y aunque se hicieron observaciones similares en repetidas ocasiones, no llamaban la atención porque las bacterias observadas no podían ser cultivadas. Además, se pensaba que el estómago no podía tener microorganismos de manera permanente, debido al bajo pH (de 0 a 1) de los jugos gástricos. El cultivo, por parte de Marshall en 1982, de una nueva bacteria a partir de la mucosa gástrica hizo tambalear las ideas anteriores; la bacteria aislada fue llamada *Helicobacter pylori* (bacteria helicoidal del píloro).

Marshall y Warren describieron bacterias espirales o curvadas en secciones histológicas de la mucosa gástrica, pero, además, podían encontrar bacterias de la misma forma en tejidos gástricos ulcerados o malignos. La prueba definitiva fueron los ensayos que mostraban que la eliminación de las bacterias cambiaba totalmente el desarrollo clínico de la úlcera. Estas observaciones fueron comprobadas por el mismo Marshall, quien ingirió (voluntariamente) un cultivo de la bacteria aislada y a los pocos días sufría de gastritis, un prelude de la úlcera. Sin embargo, el tratamiento con antibióticos lo curó (Fig. 1). (Warren no podía sumarse al experimento porque ya padecía de úlcera gastroduodenal). Después, otros pacientes con úlceras gastroduodenales fueron tratados con éxito con antibióticos antibacterianos, demostrando claramente que la causa de la enfermedad era una bacteria. En 1994, *Helicobacter pylori* fue la primera bacteria, y el segundo organismo infeccioso, después del virus de la hepatitis B, que fue considerado un carcinógeno de clase I, según los criterios de la Organización Mundial de la Salud.

Se podría pensar que, ante tal demostración, la comunidad médica aceptaría inmediatamente la osada propuesta de Marshall y Warren. No fue así en absoluto; cambiar una idea tan profundamente arraigada entre los médicos de todo el mundo no fue tarea fácil. Muchas personas se resistieron durante años a creer que las úlceras tenían un origen infeccioso. La idea iba en contra del

“dogma” tradicional, aceptado por décadas: la enfermedad se debía al estrés y el exceso de ácido. Si la causa real era una bacteria, se deberían parar las frecuentes extirpaciones de tejido ulcerado. La gran cantidad de medicamentos producidos por numerosas empresas farmacéuticas dejarían de venderse. Era necesario un cambio radical de pensamiento, un cambio de paradigma, que modificara la práctica médica y la producción de medicamentos específicos. Este cambio sólo comenzó hacia 1994, doce años después del descubrimiento.

Entender lo que significa este cambio de paradigma, es decir, el reconocimiento del origen microbiano de una enfermedad perfectamente conocida, muchos años después de la época gloriosa de los descubrimientos de Koch y Pasteur y de sus colaboradores o discípulos directos, nos obliga a retroceder en el tiempo. Hay que repasar históricamente la visión que los científicos han ido teniendo del inmenso e “invisible” mundo de los microbios.

### Las tres edades de la microbiología

En el descubrimiento de los microorganismos, podemos destacar tres grandes edades o etapas epistemológicas: la edad microscópica, la edad patogénica y la edad ecológica.

#### La edad microscópica

En la primera, un progreso tecnológico, el microscopio, permitió la observación de unos “bichos diminutos”, de un mundo desconocido presente allí donde se mirara: aguas, suelos, cuerpos de animales, plantas, el propio organismo humano. Pero esta presencia “universal” no produjo ningún avance intelectual además del propio conocimiento derivado de la observación. Era un mundo nuevo e “invisible” que no tenía ningún papel aparente. Los microorganismos existían, tenían una forma definida en el espacio y perduraban en el tiempo, pero sólo se les consideraba “curiosidades”. Era imposible pensar que aquellas criaturas tuviesen función alguna. Este pensamiento perduró durante prácticamente dos siglos, desde la mitad del XVII hasta la mitad del XIX.

Bien avanzado el siglo XVII, una compleja serie de circunstancias y un interés común por los microscopios condujo a dos personas, Robert Hooke (1635–1703), científico inglés, miembro de la Royal Society de Londres, y Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723), comerciante holandés de telas, al descubrimiento del universo microbiano. El libro de Hooke, *Micrographia or Some*

*Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries thereupon* (1665), es la primera descripción publicada del mundo microscópico y el acta fundacional de todas las ciencias biológicas. Es, además, uno de los primeros libros científicos de la edad moderna escrito en lengua vulgar (inglés), y no en latín. Hooke disponía de un microscopio compuesto, es decir, muy parecido a uno de los microscopios fotónicos actuales, aunque mucho menos potente y con numerosas aberraciones ópticas. El libro ilustra y describe diversos objetos biológicos: esponjas, rotíferos, el hongo *Mucor*, un diminuto caracol (que en realidad era una globigerina—un protista), la famosa primera observación de las celdas (*cells*) en el corcho, etc.

Leeuwenhoek construía sus propios microscopios, que eran muy potentes para la época, pese a que fueran propiamente lupas, pues tenían una sola lente. Construyó más de trescientos. Con ellos observa y describe el espermatozoide, los eritrocitos de muchos animales, invertebrados microscópicos, las levaduras, etc. Pero su contribución trascendental para la biología fue el descubrimiento de los protistas y las bacterias. Leeuwenhoek, sin poseer una formación científica, pero dotado de una gran paciencia, habilidad y curiosidad, observó los primeros protistas (principalmente ciliados) en el agua de un tonel en 1674. Los llamó *beesjes* (pequeñas bestias) o *cleijne Schepsels* (organismos diminutos), según si escribía en holandés, o *animalculi* (animalillos) en latín, según aparecía cuando sus cartas eran publicadas por la Royal Society. Años después, en 1683, observó por primera vez bacterias en la superficie de sus dientes. Curiosamente, algunas de ellas eran espiroquetas, seres pequeñísimos en relación con el resto del diminuto mundo microbiano observado previamente. En *Microscopium* (1678), Hooke confirma las observaciones de Leeuwenhoek, aumentando así la reputación y popularidad del aficionado holandés.

Es importante destacar aquí que, como en otras ocasiones en la historia de la ciencia, la curiosidad, el esfuerzo y la constancia de una persona compensaron su falta de formación científica o de preparación para hacer un descubrimiento. Leeuwenhoek no escribió artículos ni libros acerca de sus observaciones. En su casa de Delft, donde vivió prácticamente toda su vida, construía sus propios diminutos microscopios, examinaba todos los materiales que tenía a su alrededor y seguidamente escribía una multitud de cartas con sus observaciones (en holandés, la única lengua que conocía) a diferentes corresponsales. Algunos avisados editores reunieron parte de las cartas y

las publicaron como libros. Una magnífica colección en cinco volúmenes, bajo el título general de *Arcana Naturae Detecta* (descubrimientos de los secretos de la naturaleza), impresa durante la vida del autor, es una de las maravillas bibliográficas que tiene la Colección Salvador en el Instituto Botánico de Barcelona (*Arcana Natura Detecta*, Leiden: Joh Arnold Langerak, cinco volúmenes, de 1718 a 1722, con un total de 165 cartas, de las 375 que Leeuwenhoek escribió a la Royal Society) (Fig. 2).

### La edad patogénica

La importancia de los microorganismos como causantes de las enfermedades infecciosas no fue bien conocida por la comunidad científica, ni mucho menos por la población en general, hasta bien avanzado el siglo XIX. Tradicionalmente se creía que las enfermedades eran consecuencia de fuerzas sobrenaturales (vapores venenosos o “miasmas”, un castigo divino), o del desequilibrio entre los cuatro humores del cuerpo humano (sangre, flema, bilis amarilla [cólera] y bilis negra [melancolía]).

Entre las muchas enfermedades infecciosas tradicionalmente conocidas por todos, destacan por sus efectos rápidos y evidentes: la peste y la sífilis. La sífilis se empieza a conocer en los primeros años del siglo XVI. En 1520, para expresar

sus ideas sobre el origen de la enfermedad, el médico italiano Girolamo Fracastoro (1478–1553) escribió en verso la obra *Syphilis, sive morbus Gallicus* (sífilis o mal francés; ‘Sífilis’ es el nombre del personaje protagonista) en la que proponía que esta enfermedad de transmisión sexual se dispersaba mediante seres vivos invisibles (unas “semillas”) y por contacto íntimo. Pocos años después, describió el contagio de las enfermedades por contacto directo a través de las manos o la ropa, así como el “contagio a distancia” por “semillas” dispersadas por el aire (*De contagione*, 1546). Fracastoro se anticipó más de 300 años a uno de los principales cambios de paradigma en la medicina: la consolidación de la teoría microbiana de la enfermedad por Louis Pasteur (1822–1895) y Robert Koch (1843–1910), en la década de 1880.

La peste es una enfermedad conocida a lo largo de toda la historia de la humanidad. Ha causado graves epidemias en Europa en muchas ocasiones, hasta bien avanzado el siglo XIX. La más “famosa”, la Peste Negra, es la que se extendió desde el puerto de Génova en todas direcciones a partir del año 1347 y causó la muerte de un tercio de la población europea durante la segunda mitad del siglo XIV. También sirvió como “justificación” para el feroz ataque a los judíos en Barcelona, en 1348, en el cual se les acusaba, como era frecuente en casos de calamidades, de ser los responsables de la epidemia. Las aljamas o juderías



**Figura 2.** Las tres edades de la microbiología: edad microscópica, edad patogénica y edad ecológica. Ya en los albores del siglo XXI podemos predecir una nueva época de esplendor para nuestra ciencia.

de Cervera, Tárrega, Lérida y Gerona también fueron atacadas.

Ya desde la antigüedad, para evitar la dispersión de la peste, se establecieron una serie de normas higiénicas de relativa eficacia, como quemar la ropa, cerrar las casas, establecer períodos de aislamiento o cuarentena, etc. El médico y poeta valenciano, Lluís Alcanyís (ca. 1440–1506) comienza así su libro *Regiment preservatiu e curatiu de la pestilència* (Valencia: Nicolau Spindeler, 1490): “Mirando la naturaleza humana en tantos innumerables peligros y casos mortales, de todas las causas de morir no he visto ninguna más triste, más aguda y más cruel que esta epidemia, que así presta y escondidamente va descendiendo por nuestros miembros principales, según lo que por diversas experiencias se comprueba, mortificando las obras del corazón, cerebro e hígado en tal grado que el alma, no teniendo la disposición cumplida de instrumentos, necesariamente lo desampara”.

El microorganismo causante de la peste es *Yersinia pestis*. El género *Yersinia* es un cocobacilo gramnegativo, flagelado, que pertenece al grupo de las gammaproteobacterias. Las bacterias de la peste son móviles cuando se aíslan del ambiente, pero inmóviles dentro del huésped. Tres especies pueden causar enfermedades en humanos: *Y. enterocolitica*, *Y. pseudotuberculosis* y *Y. pestis*. Las dos primeras son enteropatógenas, infectan diversos mamíferos y normalmente no son mortales. La vía de entrada principal es la ingestión de agua o alimentos contaminados. La tercera especie, *Y. pestis*, infecta principalmente a roedores e, indirectamente, a las personas a través de las pulgas, que actúan como vectores entre las ratas y los humanos. Existen dos formas principales de manifestación de la peste humana: la peste bubónica y la peste neumónica. En la peste bubónica, la picadura de una pulga infectada con *Y. pestis* introduce en la corriente sanguínea las bacterias que “viajan” por la sangre hasta llegar a los nódulos linfáticos. Ahí, las bacterias proliferan dentro de los macrófagos. La respuesta inflamatoria generada provoca el crecimiento anómalo de ganglios (bubones). Muchas bacterias pasan de nuevo a la sangre, causando septicemia (una infección grave generalizada). La lisis de estas bacterias en la sangre libera lipopolisacáridos (componentes de la membrana externa típica de las bacterias gramnegativas), lo cual provoca en el huésped un choque séptico y la muerte. La peste neumónica se produce cuando, ocasionalmente, algunas bacterias llegan a los pulmones, en donde entran en los macrófagos pulmonares. Es este estado la transmisión a otras personas es a través de aerosoles (a

través de la expectoración) o por contacto directo. La inhalación de estos aerosoles produce una forma de la enfermedad que progresa mucho más rápidamente que la transmisión a través de las pulgas, probablemente porque la bacteria presenta inmediatamente todos los factores de virulencia necesarios para colonizar el cuerpo humano.

En la segunda mitad del siglo XIX, los avances tecnológicos (autoclaves, filtros, incubadoras, etc.) y el desarrollo de las técnicas básicas para el aislamiento y cultivo axénico (o “puro”), permitieron a los fundadores de la microbiología moderna, Pasteur y Koch, confirmar que los microorganismos eran la causa de las enfermedades infecciosas y agentes contaminantes de los alimentos y las aguas. También qué microorganismos específicos causaban enfermedades específicas. Koch desarrolló unos principios, o postulados, que probaban irrefutablemente que un determinado organismo causaba una determinada enfermedad.

El cultivo axénico, tal como lo conocemos hoy, no fue obtenido por Pasteur. El científico francés cultivaba las bacterias en medio líquido; cuando el medio de cultivo se enturbiaba, inoculaba una pequeña cantidad en otro medio “fresco” (sin bacterias), y así sucesivamente. Pasteur creía disponer así de un cultivo axénico. Con este método, sin embargo, la obtención de un cultivo axénico es totalmente fortuita y poco reproducible. Joseph Lister (1827–1912) utilizó el método de la dilución seriada hasta suponer que en el último tubo de la serie quedaba un único microorganismo. No obstante, como en el caso de Pasteur, el método era complicado y a menudo poco fiable. Los que finalmente resolvieron el problema, utilizando un medio sólido, fueron Koch y sus colaboradores.

La base de la técnica para el aislamiento de bacterias en medios sólidos o semisólidos fue propuesta en 1875 por Joseph Schroeter (1835–1894), un estudiante de Ferdinand Cohn (1828–1898), que utilizaba cortes de patata hervida dentro de recipientes esterilizados. Koch estaba totalmente familiarizado con los trabajos de Schroeter, ya que visitaba muy a menudo el laboratorio de Cohn; sin embargo, Koch no lo cita en sus trabajos. La patata hervida servía de medio nutritivo y de soporte para los microorganismos, pero muchos microorganismos patógenos no podían crecer. Además, la patata desprendía líquido, lo que hacía que los microorganismos crecieran y se dispersaran por la superficie, con lo que diferentes colonias se juntaban o tocaban.

Otro predecesor de la técnica de cultivo axénico fue el micólogo Oscar Brefeld (1839–1925), quien en 1875 propuso los principios para la obtención de cultivos axénicos de hongos: (i) la

inoculación del medio debe ser con una única espora de hongo, (ii) el medio utilizado debe ser transparente y debe tener las características adecuadas para permitir el crecimiento del microorganismo y (iii) el cultivo se debe mantener completamente protegido de las contaminaciones externas durante todo el tiempo de la incubación. (A Brefeld se le atribuye la siguiente contundente observación: “Fuera del cultivo puro, todo es confusión y *Penicillium glaucum* [un contaminante habitual de los medios de cultivo]”. Esta frase, fue más adelante una de las varias cosas que Selman Waksman (1888–1973) se apropió inmerecidamente).

Quizá la principal contribución de Koch al desarrollo de la microbiología fue la introducción de la técnica de cultivo axénico utilizando medios sólidos o semisólidos. Koch quería encontrar unos medios que pudieran soportar el crecimiento de los microorganismos patógenos, sin que se tocaran, sobre una superficie sólida. El cultivo axénico y la utilización de sus postulados permitió el aislamiento de los microorganismos causantes de las principales enfermedades bacterianas de los humanos antes del finalizar el siglo XIX.

Todo el conocimiento del mundo microbiano (especialmente de los procariontes), de su genética y fisiología, se ha basado hasta hace poco en el crecimiento axénico de los microorganismos. Y aunque continúa siendo imprescindible para la microbiología clínica y de los alimentos, para la obtención de productos microbianos, etc., resulta insuficiente para los estudios actuales de ecología microbiana.

## La edad ecológica

La ecología microbiana es una de las ciencias microbiológicas más destacadas del último cuarto del siglo XX. Aunque ya comenzaba con los trabajos pioneros de Martinus Beijerinck (1851–1931) y Sergei Winogradsky (1856–1952); el primer libro de texto con el nombre de ecología microbiana (*Principles of Microbial Ecology*, de Thomas D. Brock) no fue publicado hasta 1966. El objetivo de la ecología microbiana es estudiar el papel de los microorganismos en la naturaleza y las relaciones existentes entre los microorganismos y otros seres vivos y el ambiente. Un ejemplo es la nueva visión del papel de los microorganismos en las enfermedades infecciosas. De hecho, se cree que es un problema ecológico del microbio y su ambiente, en otras palabras, del huésped que padece la enfermedad. Ahora sabemos que los microorganismos y sus actividades cierran los ciclos de la materia, que son la base de las redes tróficas, que

controlan los gases de la atmósfera, que contribuyen de manera esencial al funcionamiento global del planeta y ayudan al desarrollo sostenible de la biosfera.

Nuestra percepción de las bacterias como poblaciones clonales únicas (unicultivos), aisladas de la diversidad del medio, tiene su origen en el paradigma del cultivo axénico. No obstante, en la naturaleza, las bacterias raramente se encuentran solas y nadando en el medio (de vida planctónica). Las bacterias normalmente se adhieren a las superficies formando biopelículas. Son sésiles (o de vida béntica). Se encuentran en cualquier superficie en contacto con un medio líquido: piedras de un río, fuentes termales, cañerías, catéteres, dientes, etc. Una biopelícula es una asociación compleja de microorganismos, constituida por una o diferentes especies, unidas a una superficie e incluidas en una matriz de polímeros extracelulares que fabrican los propios microorganismos. La formación de biopelículas se considera una estrategia de supervivencia (los microorganismos están en un ambiente con disponibilidad de agua [hidratado], de nutrientes, de intercambio genético, de impermeabilidad a los antibióticos o de otras sustancias tóxicas, etc.).

La formación de biopelículas como mecanismo de protección puede tener profundas implicaciones para el huésped, porque los microorganismos que están creciendo en estas superficies son mucho más resistentes a los antibióticos y al sistema inmunitario del huésped. Los catéteres, las válvulas cardíacas, las prótesis, los tubos endotraqueales, etc., salvan muchas vidas, pero también suponen un riesgo intrínseco de infecciones a causa de la adhesión de microorganismos a sus paredes.

## La unidad y flexibilidad de la vida: el vínculo ecológico

Nuestro Sol empezó su existencia hace unos 5000 millones de años. Desde entonces gira alrededor de la Vía Láctea en una órbita casi circular que tarda unos 226 millones de años en completarse. El Sol, como otras estrellas de su clase, posee pequeños cuerpos no luminosos que giran a su alrededor, los planetas. En la tercera posición a partir del centro, la Tierra se distingue de Venus y Marte por tener una atmósfera alejada del equilibrio y por producir luz propia, debido a los grandes incendios forestales y a la luminosidad de las ciudades. Cada año, la Tierra gira alrededor de su estrella, y así como un año no es mucho en la vida de una persona, tampoco lo son 226 millones de años en la vida de la Tierra.

Sabemos que existe vida en la Tierra, pero no en la Luna. El siglo XXI nos dirá si hay vida, o la hubo, en nuestros vecinos más cercanos del sistema solar, como Marte, Venus, Europa (luna de Júpiter) o Titán (luna de Saturno). En Marte, Europa, y Ganimedes (luna de Júpiter) existen pruebas de una pasada o actual existencia de agua, de fuentes de energía potenciales, y de la presencia de compuestos orgánicos. Con respecto a Titán y Encélado (luna de Saturno), a pesar de sus condiciones físicas extremas, las características químicas de ambos satélites podrían albergar o ser apropiadas para formas de vida desconocidas en la Tierra. La vida es una propiedad especial de la materia con un cierto nivel de complejidad. La distribución y función de las poblaciones microbianas depende en gran medida de diferentes factores abióticos. La ecología microbiana es el estudio de cómo los microorganismos interactúan con sus ambientes a escala microscópica, el "microambiente". Las características físicas y químicas del "macroambiente" pueden y de hecho son el resultado de las actividades metabólicas microbianas (Guerrero & Berlanga, 2006).

Los ecosistemas se expanden a lo largo del tiempo y del espacio. Mientras que el tiempo es un factor intrínseco del ecosistema mismo, el espacio es un componente extrínseco que contribuye al cambio, pero que también limita el número de interacciones entre los componentes del ecosistema. El consumo de los recursos ("alimentos") y la excreción de nuevas sustancias, fruto de la actividad metabólica de las poblaciones microbianas separadas espacialmente, conducen a la formación de gradientes. La limitación de nutrientes (fuente de carbono) normalmente provoca la disminución o cese de la actividad metabólica (síntesis de biomasa), pero la falta de sustratos energéticos (donadores de electrones) fuerza a una población a cambiar a otro tipo de metabolismo, o incluso puede causar un cambio en la composición de la población microbiana. Todos los ecosistemas tienen un gradiente de potencial redox y, como consecuencia de la vida, existe un flujo neto de electrones. La vida se organiza en función de gradientes fisicoquímicos. Los gradientes permitieron la diversificación metabólica de la microbiota y el reciclaje de la materia mediante las interacciones entre las diferentes poblaciones de una comunidad en el tiempo y en el espacio. La célula es la unidad mínima de la vida (tal como la conocemos hoy día). La comunidad es la unidad mínima del ecosistema.

La diversidad ecológica se considera una función del número de diferentes tipos de formas de vida y de la importancia relativa de estos elementos individuales. La identificación de poblaciones

es el primer paso para establecer relaciones entre el todo (la comunidad) y sus partes (las poblaciones). La diversidad microbiana de nuestro planeta es inmensa. Hoy día se han descrito más de 55 divisiones de *Bacteria* y 13 divisiones de *Archaea*, aunque esto sólo es el principio. Se ha descrito la diversidad ("conocida") en diferentes hábitats: el suelo puede contener más de 20 divisiones bacterianas, y aproximadamente 12 divisiones están representadas en el mar de los Sargazos. En el tubo digestivo de una persona adulta se han identificado sólo ocho divisiones, aparentemente una baja diversidad si lo comparamos con los otros. Pero parece haber una enorme diversidad a nivel de especie; se estima que hay más de 7000 filotipos, o especies reconocidas. La diversidad de los tapetes microbianos se encuentra entre los valores más altos, 42 divisiones (Fig. 3).

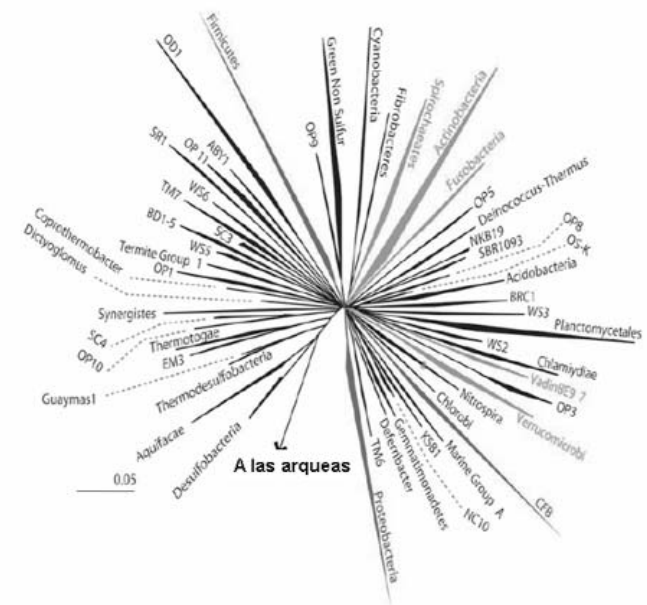
Uno de los principales objetivos de la ecología es identificar los mecanismos que mantienen la biodiversidad. Los ambientes estructurados (gradientes fisicoquímicos) permiten la divergencia genética entre poblaciones idénticas (segregación espacial) y seleccionar aquellos genotipos que estén mejor adaptados a los nuevos nichos no explotados (por ejemplo la adaptación a la luz de *Prochlorococcus* en hábitats marinos y de las distintas poblaciones de cianobacterias y *Sulfolobus* que se encuentran en las fuentes termales). La estabilidad funcional de un ecosistema no depende de la diversidad de las poblaciones *per se*, sino de una redundancia funcional, esto es, de la presencia de un reservorio de especies capaces de llevar a cabo la misma función ecológica. El aumento de esta redundancia funcional asegura una respuesta a una perturbación determinada a lo largo del tiempo. Si se pierden varios individuos después de este desafío, otros individuos casi idénticos (funcionalmente) están disponibles para reemplazarlos y reparar de este modo el sistema.

Tal vez el mayor reto de la microbiología hoy día sea el problema de unir función y filogenia. Métodos basados en el análisis del 16S rRNA proporcionan abundante información respecto al taxón presente en un ambiente, aunque muy poco acerca de la función de cada grupo filogenético. El análisis metagenómico proporciona cierta información funcional mediante la secuencia genómica y lo que ésta revela acerca de la expresión de rasgos, pero se necesitan otros métodos para asociar funciones específicas con el grupo responsable de ellas. Por ejemplo, los análisis de genes de rRNA y de genes que codifican enzimas clave en relación con factores ambientales pueden ser usados para obtener información sobre la filogenia y ecología de grupos bacterianos funcionales responsables de procesos tales como la

> 55 Divisiones descritas en *Bacteria*



**Figura 3.** Diversidad microbiana en diferentes hábitats: mar, suelo, tapetes microbianos e intestino humano.



**Microbiota del intestino humano: 8 Divisiones, aprox. 800 “especies”, > 7000 cepas**

desnitrificación, la nitrificación y la oxidación del metano. La información evolutiva sobre la funcionalidad de los microbios en un ambiente particular puede conducirnos a entender la diversidad funcional de las comunidades microbianas, y finalmente las funciones del ecosistema en su totalidad.

**Coda**

Los microbios poseen características notables. Son de pequeño tamaño, ubicuos, presentan variabilidad y flexibilidad metabólicas, y plasticidad genética (transferencia horizontal) que les permite soportar y adaptarse rápidamente a las condiciones ambientales desfavorables y/o cambiantes. Los microbios exhiben una potencialidad funcional desconocida en el resto del mundo vivo. Los procariontes poseen complejas envolturas que contienen moléculas que no se encuentran en ninguna otra parte del mundo biológico. Y aunque la célula procarionte carece de los orgánulos que caracterizan a sus equivalentes eucariotas, su interior es asombrosamente complejo. Los procariontes sienten su medio y responden como células individuales a desafíos ambientales específicos; pero también actúan de forma cooperativa, mostrando actividades comunitarias. En muchos ecosistemas microbianos, la unidad funcionalmente activa no es una sola especie o población (descendencia clónica de la misma bacteria), sino un

consorcio de dos o más tipos de células que vive en estrecha asociación simbiótica. La comprensión de los microbios como la base del funcionamiento de la biosfera es algo muy reciente. Nos encontramos en un momento en que la interacción de avances tecnológicos y el conocimiento exponencial de la actual diversidad microbiana permitirán avances significativos en microbiología — y en biología y en otras ciencias en general — en el siglo que está alborando.

**Bibliografía**

Guerrero R (2005) Year’s comments for 2005. *Int Microbiol* 8:231-234.

Guerrero R, Berlanga M (2006) “Life’s unity and flexibility”: the ecological link. *Int Microbiol* 9:225-235.

Keller L, Surette MG (2006) Communication in bacteria and ecological and evolutionary perspective. *Nat Rev Microbiol* 4:249-258.

Scheffel A, Gruska M, Faivre D, Linares A, Pitzko JM, Schüler D (2006) An acidic protein aligns magnetosomes along a filamentous structure in magnetotactic bacteria. *Nature* 440:110-114.

Shih Y-L, Rothfield L (2006) The bacterial cytoskeleton. *Microbiol Mol Biol Rev* 70:729-754.

Tian J, Sinskey AJ, Stubbe J (2005) Kinetic studies of polyhydroxybutyrate granule formation in *Wautersia eutropha* H16 by transmission electron microscopy. *J Bacteriol* 187:3814-3824.