

UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE  
SEVILLA



## **EL FASCINANTE Y DESCONOCIDO MUNDO DE LOS MICROBIOS**

LECCIÓN INAUGURAL CURSO 2019 / 2020  
Prof. Dr. D. Eduardo Santero Santurino  
Catedrático de Microbiología

SEVILLA  
2019

## ÍNDICE

Objetivo .....	
Biodiversidad microbiana .....	
Importancia de los microbios en el planeta .....	
Asociaciones de los microbios con otros seres vivos .....	
El desconocido mundo microbiano .....	

# El Fascinante y Desconocido Mundo de los Microbios

Excelentísimo Sr Rector Magnífico de la Universidad Pablo de Olavide

Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades

Miembros de la Comunidad Universitaria

Señoras y Señores

Cuando el pasado mes de junio el Secretario General me llamó por teléfono proponiéndome el honroso encargo de dictar la lección inaugural de este curso, mi primera reacción fue obviamente la de aceptar gustosamente el reto pero inmediatamente a continuación, me planteé qué puede contar un microbiólogo que resulte instructivo a la vez que ameno a una audiencia tan distinguida como dispar. Recordé entonces que hacía precisamente unos días había leído un artículo de opinión en la publicación periódica de la Sociedad Española de Microbiología en el que un equipo de reconocidos microbiólogos se lamentaban de la poca o nula idea que la opinión pública general tiene del mundo microbiano, a pesar de la importancia, hoy indiscutible, que los microorganismos han tenido y tienen en la generación y mantenimiento de la vida en nuestro planeta tal como la conocemos actualmente. Y es cierto que los microbios han sido los primeros seres vivos de nuestro planeta, que proliferaron enormemente, tanto que modificaron las condiciones físicoquímica del planeta hace eones posibilitando otras formas de vida más complejas. Actualmente, son la forma de vida más abundante del planeta, son los principales responsables de las transformaciones de los distintos elementos que mantienen en equilibrio a nivel global los ciclos biogeoquímicos del planeta y son esenciales para el correcto funcionamiento de las otras formas de vida más complejas: los animales y las plantas. Sin embargo, la opinión pública desconoce que el mundo microbiano es el motor fundamental de la biosfera y cuando se tiene una idea genérica de ese mundo, normalmente es una idea negativa, asociada a enfermedades o a problemas de contaminación alimentaria, como el de este verano provocado por *Listeria*.

En este artículo, se planteaba la urgente necesidad de alfabetizar a la opinión pública en general y a nuestros responsables políticos en particular para que se tome conciencia de esta situación, lo que permitirá tomar decisiones en el futuro teniendo en cuenta el escenario (micro)biológico en el que nos movemos en este planeta. Rápidamente vi que ésta era una excelente ocasión para aportar mi grano de arena a esa campaña de alfabetización a la que urgían en su ensayo y que mi objetivo fundamental en esta disertación debía ser presentarles el extraordinariamente diverso mundo microbiano y hacerles ver que aunque existen microbios patógenos o al menos perjudiciales, eso es indudable, éstos son una minoría; que en general, los microorganismos son esenciales para las otras formas vida más complejas y para nuestra propia salud en particular.

## ***Biodiversidad microbiana***

Cuando se habla del mundo microbiano, el término por excelencia que se ha de utilizar para definirlo es biodiversidad. Pero BIODIVERSIDAD con mayúsculas, como veremos a continuación.

- Diversidad genética. Desde un punto de vista genético todos los seres vivos, organismos con capacidad de reproducción constituidos por al menos una célula con actividad metabólica,

proviene de un ancestro común a partir del cual fueron evolucionando y diversificándose las distintas especies. Por tanto, todos los seres vivos están relacionados entre sí, pudiendo visualizarse esta relación genética entre ellos en lo que se conoce como el árbol filogenético universal o el árbol de la vida (Figura 2). Esta relación se establece en función de unas secuencias de ADN concretas que existen en las células de todos los seres vivos y cuya comparación entre ellas permiten establecer las relaciones de parentesco entre las distintas especies, en función del grado de similitud o divergencia de esas secuencias.

En función de este criterio, los seres vivos se agrupan en tres dominios: Bacteria, Archaea y Eukarya. El dominio Eukarya está constituido por las especies que tienen células con verdadero núcleo, donde reside el genoma de la célula, aislado del resto de la célula por una membrana nuclear. Estas células son más complejas y contienen además otros orgánulos en su interior, como las mitocondrias y, en el caso de una célula fotosintética, los cloroplastos. En los otros dos dominios se agrupan los organismos que tienen células procarióticas, que son mucho más pequeñas que las eucarióticas y carecen de núcleo u otros orgánulos definidos. De hecho, el tamaño de las células procarióticas es similar al de algunos orgánulos de las células eucarióticas. Solo a partir de células eucarióticas la evolución ha conseguido generar formas de vida más complejas, es decir, organismos pluricelulares macroscópicos, constituidos por muchas células de distintos tipos, cada uno de los cuales realizan distintas funciones en el organismo: estos son los animales y las plantas.

Estamos acostumbrados a asociar el término biodiversidad a las distintas especies de plantas y animales que nos presentan en los documentales de naturaleza de la televisión, en los que observamos una asombrosa diversidad de formas y comportamientos. Pues bien, desde un punto de vista genético, la biodiversidad de todas las plantas y todos los animales se agrupa en este esquema filogenético en una simple rama. Imagínense la asombrosa diversidad del mundo microbiano, que en este esquema es todo lo demás. Esta diversidad microbiana se pone aun más de manifiesto si se tiene en cuenta que nosotros nos parecemos más a las plantas que una bacteria a otra. Por supuesto, esta diversidad genética generada a lo largo de la evolución se ha traducido en una diversidad observable a distintos niveles.

- Diversidad morfológica. Aunque los microorganismos son unicelulares y muy pequeños, por lo que no se pueden observar a simple vista, el desarrollo de los microscopios durante los pasados 3 siglos nos han permitido observar la diversidad morfológica de estas entidades microscópicas en todo su esplendor. Desde el primero diseñado en el siglo XVII con el que Anton van Leeuwenhoek describió los “animálculos” (en realidad ácaros, es decir, animales) (Figura 3), los microscopios ópticos actuales han incrementado muchísimo su resolución. Sin embargo, tiene una limitación inherente y es que el espectro de ondas de luz visible por el ojo humano está entre 0.4 y 0.7 micrómetros y, por tanto, un microscopio basado en la óptica del ojo humano no puede discriminar distancias menores. Con un microscopio óptico las células procarióticas se ven como pequeños puntos. Con los microscopios electrónicos se consigue mucha más resolución y se pueden ver detalles del interior celular. El máximo de resolución se consigue hoy en día con los sofisticados microscopios de efecto túnel, que permiten visualizar incluso macromoléculas como el ADN, la molécula de la vida. Gracias a estos avances tecnológicos podemos apreciar distintas formas de eucariotas unicelulares como los protozoos (Figura 4) o las algas (Figura 5). Algunos de los eucariotas unicelulares tienen a su vez un caparazón que los protege del ambiente exterior, con unas geometrías asombrosas, pudiendo ser de sílice como en las algas diatomeas o de

carbonato cálcico como en los cocolitóforos. Al microscopio electrónico se pueden apreciar detalles de bacterias (figura 6), arqueas (Figura 6). A pesar de ser microscópico, en el mundo microbiano también existen grandes diferencias de tamaño, tan grandes como las que pueda haber entre los insectos y las ballenas.

- Diversidad metabólica. Para vivir y reproducirse los seres vivos necesitan energía y los nutrientes básicos para construir su propia biomasa, es decir, carbono, nitrógeno, azufre, etc. Hay distintos tipos de metabolismo en función de cual sea la fuente de energía que utilicen y la fuente de nutrientes, que es el componente principal de la biomasa. A su vez, su metabolismo puede requerir que la células respiren oxígeno o no. En la figura 8 se muestra el metabolismo de los animales, las plantas y los microorganismos. La fuente de energía y la fuente de los nutrientes principales de los animales es la propia materia orgánica de otros seres vivos. Por eso necesitan comérselos. Son quimioorganotrofos porque obtienen su energía de compuestos químicos orgánicos y heterótrofos porque no pueden fabricar su propia materia orgánica, solo pueden transformar la materia orgánica que consumen. A su vez, necesitan respirar oxígeno como parte de su metabolismo, con objeto de obtener su energía química. Es como si estuvieran “quemando” la materia orgánica consumida para obtener la energía que necesitan para su funcionamiento.

Por el contrario, las plantas obtienen energía de la luz, transformando la energía lumínica en energía química gracias al proceso de fotosíntesis. La fuente de carbono para producir su biomasa es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gas presente en nuestra atmósfera, que consiguen reducir hasta formar la materia orgánica que constituye su propia biomasa. Son organismos fototrofos porque obtienen energía de la luz y autótrofos o productores primarios, porque son capaces de fabricar su propia biomasa fijando el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Su fuente de nitrógeno son moléculas inorgánicas combinadas que contiene nitrógeno, nitrato o amoniaco. En definitiva, a diferencia de los animales, no necesitan materia orgánica para vivir. A su vez, las plantas también respiran oxígeno, porque su metabolismo nocturno es como el de los animales, “quemando” para obtener energía por la noche, cuando no hay luz, parte de la materia orgánica que han producido durante el día.

Existen microorganismos que son quimioorganotrofos y heterótrofos, con un metabolismo similar al de los animales, mientras que hay otros que son fototrofos y autótrofos, comportándose en este sentido como plantas. Por último, hay también microorganismos que son autótrofos, capaces de fabricarse su propia materia orgánica a partir del  $\text{CO}_2$  atmosférico, cuya energía no proviene de la luz sino de otros compuestos químicos inorgánicos reducidos como el hidrógeno, el sulfuro o incluso de metales como el hierro. Son los denominados quimiolitotrofos, literalmente, comedores de piedras. Por otra parte, algunos microorganismos son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico, una capacidad que es exclusiva del mundo microbiano, incorporando este nitrógeno atmosférico en biomasa. Se piensa que la quimiolitotrofia es la forma ancestral de obtención de energía por parte de los seres vivos primigenios, que posteriormente evolucionó hacia la fototrofia y la quimioorganotrofia, pero que se mantuvo en algunos microorganismos debido a la gran autonomía que les proporciona, no necesitando siquiera luz. A su vez, existen microorganismos que no necesitan oxígeno para vivir, a diferencia de los animales y las plantas. De hecho, el metabolismo anaeróbico representa la forma de metabolismo más antigua, porque el oxígeno, como veremos dentro de poco, no existía en la atmósfera terrestre, sino que fue creado por microorganismos fotosintéticos. En definitiva, existen microorganismos extraordinariamente autónomos que solo necesitan agua, la atmósfera y una pequeña cantidad de sales inorgánicas para prosperar (Figura 9).

- Diversidad en la tolerancia a condiciones ambientales. La diversidad que se ha ido generando evolutivamente a lo largo de los millones de años ha permitido también la aparición de ejemplares de microorganismos, principalmente del dominio Archaea, con un asombrosa capacidad de tolerar valores extremos de condiciones ambientales, que les han permitido colonizar nichos ecológicos de nuestro planeta que otros no pudieron colonizar. Algunos valores extremos de estas condiciones y representantes microbianos que los toleran, denominados genéricamente extremófilos, se indican en la figura 10.

En cuanto a temperatura, el record por arriba lo ostenta una arquea termófila que no puede crecer a menos de 90 °C, pudiendo reproducirse a 122 °C. Esta arquea vive en el océano asociada a emanaciones de magma a una gran profundidad (2,000 m), por tanto a mucha presión (200 atm), lo que permite mantener agua líquida a temperaturas superiores a los 100 °C. En el polo opuesto está *Polaromonas vacuolata*, cuyo límite es la temperatura a la que el agua deja de ser líquida. Respecto al grado de acidez (pH) que un microorganismo puede tolerar, encontramos a la arquea *Picrophilus oshimae* aislada de una fumarola en Japón a pH 2.2 pero que luego se ha observado que puede tolerar hasta valores de 0.06. En el polo opuesto se encuentra *Natronobacterium gregoryi*, capaz de crecer prácticamente en sosa cáustica. Respecto a la tolerancia a la presión, se han encontrado bacterias a la mayor profundidad a la que se han obtenido muestras: 10,500 metros, por lo que vive a más de 1,000 atmósferas de presión. A menos de 5 km de profundidad la bacteria muere. La sal es un componente que se ha venido utilizando tradicionalmente como conservante alimentario porque los seres vivos no pueden tolerar concentraciones elevadas de sal. Sin embargo, existen arqueas halófilas que pueden tolerar la máxima concentración de sal posible, por encima de la cual, la sal precipita. En cuanto a la radiación capaz de ser tolerada por un ser vivo, encontramos que *Deinococcus radiodurans* es capaz de tolerar una dosis de radiación 300 veces superior a la considerada letal para un ser humano.

### ***Importancia de los microbios en el planeta***

Los microorganismos fueron los primeros seres vivos que surgieron en el planeta, lo cual tiene sentido porque son las formas de vida unicelular más sencillas. Según las estimaciones, la vida microscópica surgió relativamente pronto después que el planeta se creara, hará unos 4,570 años, y que su temperatura disminuyera lo suficiente como para que la corteza terrestre pudiese albergar agua líquida, lo que llevó unos 600 millones de años desde su creación. Los registros fósiles más antiguos hasta el momento son una especie de tapetes microbianos denominados estromatolitos, que tienen una edad aproximada de 3,800 millones de años (Figura 11).

En aquella época, la atmósfera terrestre era muy reductora, sin oxígeno, por lo que la vida tuvo que desarrollarse anaeróbicamente. Solo con la aparición de la fotosíntesis oxigénica hace menos de 3,000 millones de años, una forma de fotosíntesis que rompe la molécula de agua para generar oxígeno, la atmósfera terrestre empezó a cambiar hacia un ambiente más oxidante con el incremento paulatino de la concentración de oxígeno generado por aquellos microorganismos fotosintéticos, que eran los ancestros de lo que hoy conocemos como cianobacterias.

La aparición del oxígeno significó un cambio muy brusco en la evolución de la vida en el planeta porque significó la aparición de una forma de metabolismo mucho más eficaz que la existente hasta el momento, el denominado metabolismo respiratorio aerobio, que es el metabolismo

principal de todos los organismos pluricelulares actuales. Esto permitió un salto evolutivo considerable, consiguiéndose rápidamente formas de vida cada vez más complejas hasta los organismos pluricelulares actuales. A su vez, la vida estaba restringida inicialmente a los mares porque el agua actuaba como filtro de la extremadamente alta radiación ultravioleta procedente del sol, que impedía toda forma de vida en la corteza terrestre. Sin embargo, la acumulación de oxígeno en la atmósfera permitió que se formase el ozono ( $O_3$ ), un excelente filtro frente a la radiación de luz ultravioleta, que fue acumulándose a concentraciones paulatinamente mayores hasta que hace unos 600 millones de años su concentración fue lo suficientemente alta para que la vida se desarrollase fuera del agua.

El registro fósil de organismo pluricelular que podríamos considerar no microbiano data de unos 800 millones de años, lo que nos dice que la vida en el planeta ha sido exclusivamente microbiana durante 3,000 millones de años, que nosotros somos unos recién llegados. Durante todo este tiempo, los microorganismos han ido proliferando y diversificándose en el planeta, colonizando todos los nichos ecológicos posibles, y alcanzando una abundancia tan grande como para incluso modificar las condiciones ambientales del planeta, lo que permitió la aparición de otras formas de vida hasta llegar a las actuales.

Para que se hagan una idea de la abundancia, fijémonos en los famosos acantilados de Dover en el Reino Unido (Figura 12). Estos acantilados son asombrosas acumulaciones de carbonato cálcico que hace cientos de millones de años eran sedimento marino pero que los movimientos de las placas tectónicas terrestres sacaron a la luz. Una mirada detallada de esos acantilados nos revela que son ni más ni menos que acumulaciones del esqueleto calizo de cocolitóforos, unas algas marinas cuyos caparazones se fueron acumulando durante cientos de millones de años. La abundancia de microorganismos no solo fue pretérita, en la actualidad siguen siendo la forma de vida más abundante en el planeta (Figura 13). En los océanos existen mil millones de microbios por cada litro de agua. En un gramo de suelo existen más microbios que seres humanos en todo el planeta. Incluso en nuestro propio cuerpo tenemos más células microbianas asociadas que células propias. Como es de esperar, su extraordinaria abundancia hace que su actividad metabólica juegue un papel esencial en el equilibrio de los ciclos biogeoquímicos de los elementos a nivel planetario, que es lo que en definitiva mantiene un equilibrio ecológico a nivel global que permite el mantenimiento de la vida en el planeta:

- Ciclo biogeoquímico del carbono. El carbono en el planeta sufre una serie de transformaciones biológicas debido a la actividad metabólica de los distintos tipos de los seres vivos (Figura 14). Buena parte de estas reacciones de transformación solo la pueden realizar los microorganismos y en las otras reacciones, incluida la reacción esencial de fijación de carbono, que transforma el  $CO_2$  atmosférico en materia orgánica, los microorganismos contribuyen sustancialmente. Por ejemplo, la fijación de  $CO_2$  se asocia generalmente a las plantas que, como hacen fotosíntesis, se piensa que son los productores primarios por excelencia del planeta. Pues bien, la mitad del  $CO_2$  atmosférico que se fija en materia orgánica proviene de la actividad de microorganismos. Y no siempre deriva de una actividad fotosintética. Hay bacterias quimiolitotrofas que son capaces de constituirse en los productores primarios fundamentales de ecosistemas concretos, como los que se generan asociados a las chimeneas hidrotermales, una especie de pequeños volcanes submarinos de los que sale material magmático y gases del interior de la corteza terrestre (Figura 15). Estas emanaciones gaseosas contienen compuestos químicos reducidos que son los que utilizan como fuente de energía y algunos también, como el amonio o el sulfuro, como fuente de

nutrientes (Figura 16). Con estos compuestos y el CO<sub>2</sub> disuelto en agua, que es su fuente de carbono, fabrica su propia biomasa, que sirve de alimento a otros seres vivos, generando una red trófica en la que se sustentan incluso la vida de vertebrados de bastante complejidad de una forma completamente independiente de la luz (Figura 7).

- Ciclo biogeoquímico del nitrógeno. La importancia de los microorganismos en el planeta se visualiza incluso mejor en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Figura 18). En este caso, a diferencia del ciclo del carbono, los únicos seres vivos capaces de fijar el nitrógeno atmosférico en materia orgánica son microorganismos, es decir, son los únicos productores primarios en lo que a nitrógeno se refiere. Aparte, hay otros dos procesos fundamentales para el equilibrio de las distintas formas de nitrógeno que solo lo llevan a cabo microorganismos por lo que la vida en la tierra sería imposible sin microorganismos.

### ***Asociaciones de los microbios con otros seres vivos***

Aparte de la importancia de los microorganismos en el mantenimiento del equilibrio biogeoquímico del planeta, muchos microorganismos son de importancia capital para otros seres vivos debido a las asociaciones que forman con ellos.

- Asociaciones perjudiciales. Ciertamente, son las asociaciones mejor conocidas por la opinión pública. En la figura 19 se indican algunos representantes de microorganismos perjudiciales, muchos de los cuales son conocidos por ustedes. Dentro de las bacterias, existen especies patógenas propiamente dichas, como *Yersinia pestis*, cuyo nombre lo dice todo, la responsable de las epidemias de peste que asolaron Europa, Asia y África en la Edad Media, matando a unos 50 millones de personas. Afortunadamente, estas bacterias patógenas son perfectamente conocidas y pueden mantenerse a raya gracias a tratamientos preventivos como las vacunas, o al uso de antibióticos. También existen otras que, aun no siendo patógenas o particularmente peligrosas, pueden crecer en los alimentos a una concentraciones lo suficientemente elevadas como para provocarnos serios trastornos si ingerimos esos alimentos en mal estado. Típicos representantes de esta categoría son la tristemente célebre bacteria del verano *Listeria monocitogenes*, o *Clostridium botulinum*, una bacteria anaerobia que puede aparecer en latas de conservas mal esterilizadas. Es muy infrecuente que esto ocurra pero quien consuma conservas contaminadas por esta bacteria puede morir muy fácilmente porque produce una toxina que es el veneno más potente que existe: 100 g de la toxina botulínica pura es suficiente para matar a toda la humanidad. También existen microorganismos patógenos eucarióticos, como algunos protozoos y hongos. ¿Quién no conoce la enfermedad del sueño o la de la malaria, que son transmitidas por la picadura de mosquitos infectados? O dentro los hongos, las conocidas candidiasis vaginales. Sin embargo, hay que decir claramente que los microbios perjudiciales son una inmensa minoría, que además los conocemos y que podemos tratar eficazmente a la mayoría de ellos.

- Asociaciones beneficiosas. Prácticamente todos los seres vivos establecen relaciones positivas con microorganismos y los organismos superiores no son una excepción. Fijándonos en nosotros mismos, tenemos bacterias y hongos asociados a prácticamente todas las partes de nuestro cuerpo exceptuando los pulmones (Figura 20). Realmente, si aparecen bacterias en los pulmones, es que algo malo está pasando. Todos estos microorganismos constituyen la microbiota normal del cuerpo humano, que es extraordinariamente abundante (Figura 21), sobre todo en el tracto



intestinal, que contiene un total de 1 kg de microbios, principalmente bacterias. En conjunto, el microbioma humano pesa aproximadamente 1,3 kg y llega a tener un número de células 10 veces superior al de las propias células humanas. Aunque algunos microbios de los considerados normales puedan tener algún efecto no deseado como el del acné juvenil o el mal olor corporal (si, nosotros no olemos mal, son nuestras bacterias asociadas a la piel), en general son completamente inocuas o tienen un efecto claramente positivo. Su efecto puede ser sutil, como el que tienen muchas bacterias asociadas a la piel: su presencia nos protege frente a microbios potencialmente perjudiciales, ¡Y nosotros empeñados en eliminarlas con sobredosis de duchas y detergentes! Afortunadamente, ellas son más tozudas que nosotros y rápidamente colonizan de nuevo nuestra piel. Un ejemplo muy claro de este tipo de beneficio se ha observado con la presencia en nuestra boca de la bacteria *Streptococcus dentisani*, que actúa como un escudo protector frente a bacterias productoras de caries. Pero la mayoría de los efectos beneficiosos que se vienen describiendo están asociados al microbioma intestinal. Los beneficios indudables que se han descrito son, por una parte, alimenticio, facilitándonos la digestión de algunos alimentos difíciles de digerir por nosotros, como el almidón y fibras vegetales, y produciendo una serie de vitaminas y otros metabolitos que nosotros podemos luego incorporar, por otra, refuerzan nuestro sistema inmunitario y, por otra, se están asociando muchos de los metabolitos de origen microbiano a cambios en el funcionamiento de nuestro propio organismo que conduce a la prevención de diversas patologías, incluida la obesidad, cáncer colorectal o desórdenes neurológicos y hematológicos. Queda aún mucho por descubrir del microbioma humano y su función en el correcto funcionamiento de nuestro cuerpo por lo que en los próximos años asistiremos a una auténtica revolución del conocimiento de las interacciones entre humanos y microbios.

Un ejemplo mucho más claro y también muy cercano de asociaciones beneficiosas con microorganismos a nivel nutricional nos lo proporciona la vaca (Figura 22). La vaca es un rumiante y su sistema digestivo es bastante complejo. El aspecto más relevante es que el rumen de la vaca es como un incubador de microbios en el que proliferan hasta más de 200 especies microbianas distintas, de los 3 dominios de la vida, que trabajan en conjunto para digerir la hierba que come el animal y alimentándose de ella. En el rumen se establecen una serie de relaciones complejas de comensalismo entre todas las especies microbianas, que incluyen las arqueas metanógenas. Por eso las vacas eructan unos 200 L de metano diario, lo que, por otra parte, supone un problema medioambiental porque el metano tiene un efecto invernadero 25 veces superior al del propio CO<sub>2</sub>. Pero la vaca en realidad no se alimenta de la hierba que come, sino de las bacterias que proliferan en el rumen y de sus productos metabólicos.

Otras asociaciones a nivel nutricional son incluso más estrechas, como la que tiene lugar en la profunda oscuridad oceánica entre los gusanos tubulares y las bacterias quimiolitotrofas asociadas a las chimeneas profundas (Figura 23). El gusano no tiene un sistema digestivo bien definido sino que tiene un tejido denominado trofosoma. Las células de su trofosoma alojan a unas bacterias quimiolitotrofas, capaces de obtener energía del sulfuro (SH<sub>2</sub>). La hemoglobina del sistema circulatorio de los gusanos está modificada y, además de transportar oxígeno y CO<sub>2</sub>, como nuestra hemoglobina, también es capaz de transportar sulfuro. El sistema circulatorio del animal le lleva entonces a la bacteria su fuente de energía. La bacteria, que es autótrofa y, por tanto, capaz de fijar CO<sub>2</sub>, produce materia orgánica y se la pasa al animal para alimentarlo.

Algo conceptualmente parecido pero relacionado con el nitrógeno es lo que ocurre entre bacterias de la familia *Rhizobiaceae* y las plantas leguminosas (Figura 24). Estas bacterias son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico, incorporándolo en materia orgánica. Las raíces e las leguminosas generan unas estructuras especiales denominadas nódulos que son infectados por bacterias de la familia *Rhizobiaceae*, las cuales se introducen dentro de las células vegetales especializadas. En el interior de las células del nódulo, las bacterias reciben el carbono que el vegetal ha producido fijando CO<sub>2</sub> y las bacterias, en compensación fijan y le ceden a la planta el nitrógeno que necesita, por lo que las leguminosas no dependen para su crecimiento de que el suelo donde crecen tenga suficiente cantidad de nitrógeno. De hecho, el suelo donde crecen las leguminosas se enriquece en nitrógeno por la acción de sus bacterias simbiotes. Esto es un hecho conocido por los agricultores de forma empírica desde hace siglos, lo que llevó a desarrollar la técnica de rotación de cultivos entre leguminosas y no leguminosas para evitar el “agotamiento” del suelo, que se sigue utilizando actualmente.

Por último, la simbiosis en grado superlativo podemos visualizarla cuando comparamos los distintos tipos de células microbianas (Figura 25). Como comentaba al principio, las células eucarióticas contienen diversos orgánulos, como el núcleo celular donde reside el genoma, las mitocondrias, que son los orgánulos donde se “quema” la materia orgánica para obtener energía, o, en el caso de células fotosintéticas, los cloroplastos, que son los orgánulos donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Por el contrario, las células procarióticas, representadas en la figura por una bacteria quimioorganotrofa y por una cianobacteria fotosintética, son células mucho más sencillas que las células eucarióticas y carecen de verdadero núcleo ni de otros orgánulos distintivos y separados del resto por membranas. De hecho, son mucho más pequeñas y si las representamos a la misma escala, serían del tamaño de las mitocondrias y cloroplastos. Pues bien, tanto las mitocondrias como los cloroplastos de las células eucarióticas contienen en su interior una molécula circular de ADN. Analizando esas secuencias de ADN se ha visto claramente que las mitocondrias provienen de bacterias quimioorganotrofas y los cloroplastos de cianobacterias. En definitiva, que las células eucarióticas no aprendieron durante la evolución a respirar ni a hacer fotosíntesis, lo que en realidad ocurrió es que incorporaron en su interior a bacterias que habían aprendido a hacerlo, convirtiéndose éstas finalmente en lo que actualmente consideramos orgánulos celulares.

### ***El desconocido mundo microbiano***

La microbiología tradicional ha venido aislando, cultivando y estudiando en el laboratorio las características morfológicas y funcionales de los microorganismos, así como su genoma codificante (Figura 26). Dada la gran cantidad de microorganismos aislados durante el pasado siglo, la enorme diversidad encontrada en ellos y las pocas especies nuevas que se estaban identificando en los búsquedas más recientes, los microbiólogos teníamos la idea de que habíamos conquistado el mundo microbiano y que, en líneas generales, lo conocíamos en su mayor parte. ¡Craso error!

Esta idea ha cambiado radicalmente desde el último cuarto del siglo pasado, cuando se desarrollaron técnicas moleculares que permitieron empezar a analizar las poblaciones microbianas en la naturaleza sin necesidad de que estos microorganismos fuesen cultivados previamente en el laboratorio (Figura 27). Desde el principio se puso de manifiesto que la diversidad encontrada por métodos moleculares en un nicho determinado era muy superior a la

conocida por los métodos convencionales, ya que la mayoría de las secuencias identificadas no eran conocidas y no podían asignarse a las especies previamente identificadas, lo que indicó que en realidad existen muchos más microorganismos distintos de los que nos habíamos imaginado y que realmente podíamos cultivar y caracterizar un pequeña minoría, lo que se representa en la figura 28 utilizando el símil del iceberg. Aunque esta idea ha revolucionado la microbiología, en realidad era esperable ya que sería muy pretencioso pensar que somos capaces de cultivar la mayoría de los microorganismos existentes.

Volviendo al árbol de la vida reconstruido recientemente con todas las secuencias disponibles, sean de microorganismos cultivados o no, podemos observar de nuevo que la biodiversidad de animales y plantas, e incluso la del dominio eukarya completo, es muy inferior a la perteneciente al mundo procariótico de las bacterias y las arqueas (Figura 29). Pero lo que es realmente espeluznante de esta representación es que todos los grupos taxonómicos (ramas) marcadas por un círculo rojo, existen, están en la naturaleza, porque detectamos sus secuencias de ADN pero no los conocemos porque hasta el momento no disponemos de un solo ejemplar aislado que hayamos podido cultivar y estudiar en el laboratorio. Y que esta biodiversidad escondida aún es muy superior a la que conocemos actualmente.

En definitiva, es un hecho incuestionable hoy en día que la vida en nuestro planeta es eminentemente microbiana y espero que las pinceladas que he podido presentarles durante esta disertación hayan servido para que tomen conciencia de su existencia y de su importancia para el mantenimiento de nuestro planeta y de nuestra propia existencia.

Muchas gracias por su atención.