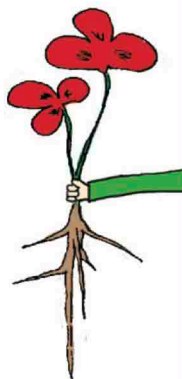


luis g. wall

plantas, bacterias, hongos, mi mujer, el cocinero y su amante

sobre interacciones biológicas,
los ciclos de los elementos
y otras historias



siglo veintiuno
editores

colección
ciencia que ladra...

Plantas felices, bacterias felices

La atmósfera de la raíz y sus astronautas

En principio, la función más conocida de la raíz es la de ser el lugar de la planta por donde se absorbe el agua y los minerales del suelo. Sin embargo, su desarrollo no sólo va modificando la estructura del suelo en forma física, abriendo surcos y túneles, sino que lo hace también en forma química y biológica. Ocurre que la raíz no sólo absorbe sustancias del suelo, sino que, a medida que crece en el suelo, también libera sustancias hacia el exterior. Este proceso de liberación de sustancias orgánicas al suelo se llama exudación radicular, y al conjunto de esas sustancias se las llama exudados radiculares.

En los exudados radiculares podemos encontrar azúcares, aminoácidos, proteínas y otras sustancias de desecho para la planta, que son productos secundarios de su metabolismo. Lo interesante es que algunas de estas sustancias que se exudan hacia afuera pueden actuar defendiendo a la planta del ataque de patógenos, o atraer la llegada de algunos microorganismos hacia la superficie de la raíz, donde los exudados radiculares que se van liberando constituyen un verdadero manjar nutritivo que garantiza el desarrollo de esas bacterias u hongos sobre la raíz, y en sus más cercanos alrededores. Esta selección de unos microorganismos con preferencia a otros y el desarrollo de esos microorganismos colo-

nizando la superficie de la raíz se llama en su conjunto *efecto rizosférico*. Por las mismas razones se llama RIZÓSFERA a la región del suelo que rodea a la raíz, como la atmósfera que rodea al planeta Tierra garantizando el desarrollo de la vida en el planeta. La presencia de las sustancias que libera la raíz en la rizósfera tiene como consecuencia el aumento de la actividad biológica, es decir el desarrollo de microorganismos, en ese lugar y sobre la raíz. Los microorganismos que se alimentan de estos exudados radiculares vienen a ser algo así como los astronautas que se encuentran dando vueltas en esa rizósfera y que terminan aterrizando sobre la superficie de la raíz para desarrollarse y multiplicarse sobre ella.

Para darnos una idea, si en 1 gramo de suelo donde no hay raíces creciendo podemos contar entre 1.000 y 10.000 bacterias, en 1 gramo de suelo rizosférico enriquecido por los exudados radiculares podemos encontrar de cien a mil veces más, es decir, entre 100.000 y 10.000.000 de bacterias por gramo de suelo cercano a la raíz. Y esta no es la mayor concentración de bacterias que encontramos sobre una raíz, pues cuando ocurre la colonización de la raíz se observan colonias o capas bacterianas (también llamadas *biofilms*) donde la concentración bacteriana puede alcanzar valores localizados de hasta 10.000.000.000 por gramo de tejido fresco vegetal.

Más adelante veremos que mientras algunas sustancias de los exudados radiculares son simplemente fuente de alimentación de las bacterias u hongos colonizadores de la raíz, otras sustancias exudadas actúan como verdaderas señales químicas que permiten, y definen, la comunicación entre las bacterias, o los hongos, y la planta. Justamente utilizando estas sustancias, las plantas pueden definir qué tipo de bacterias atraer hacia su superficie para que luego la colonicen y se desarrollen sobre ella, o incluso iniciando procesos de infección o invasión de las bacterias hacia el interior de la raíz. Así se generan diferentes respuestas en la planta como, por ejemplo, el desarrollo de nódulos radiculares o tumores en las raíces.

Todos estos procesos de colonización bacteriana o de microorganismos de la rizósfera ocurren porque de alguna manera esa asociación o esas interacciones otorgan ventajas competitivas para la reproducción de la planta y/o de los microorganismos en relación con su ambiente. En términos de la teoría de la evolución biológica descrita por Darwin para explicar la aparición de las diferentes especies vivientes en la Tierra, la asociación de las bacterias con la planta, o viceversa, otorga ventajas de desarrollo y reproducción de ambas respecto de otras especies. A la larga, esta ventaja determina el establecimiento o predominio de esta planta con estas bacterias en esos ambientes. Según Darwin, la selección que la naturaleza hace sobre los diferentes organismos vivos se expresa como la presión que las condiciones ambientales ejercen sobre todos los organismos, favoreciendo el desarrollo de unos y limitando el desarrollo de otros.²⁰ Los organismos o asociaciones de organismos que mejor funcionen en ese ambiente, es decir que mejor o más rápido se reproduzcan y generen descendencia en ese ambiente, serán los que prevalezcan. Los que no puedan hacerlo correrán el riesgo de desaparecer.

²⁰ Darwin escribió su libro *Origen de las especies* a comienzos del siglo XIX, pero su publicación demoró unos cuantos años por cuestiones familiares que combinaban controversias con la religión. Darwin desarrolló su teoría sobre la base de una gran cantidad de observaciones de especies naturales en muy diferentes ambientes geográficos. Luego, con los años, el desarrollo de la Biología, la Genética, la Bioquímica y la Biología Molecular otorgaron innumerables pruebas que corroboran una y mil veces la genial teoría de Darwin. Sin embargo hoy en día, a comienzos del siglo XXI, el fanatismo y fundamentalismo de algunos grupos siguen atacando esta teoría sobre la base de la desinformación y el menosprecio de las capacidades intelectuales del hombre. Personalmente respeto mucho las ideas diferentes, y me parecen muy necesarias para el desarrollo de la humanidad, pero es una lástima cuando se quieren imponer ideas por la fuerza, por el temor o aprovechando la ignorancia y las necesidades de la gente. Ocurre que en alguna interpretación no muy compleja de la teoría de la evolución de las especies de Darwin, con sólidos fundamentos en los conocimientos de la bioquímica moderna, se deja por tierra la necesidad de un Dios que haya creado las diferentes especies que

El conocimiento de las asociaciones entre los microorganismos y las plantas que ocurren en la rizósfera y el entendimiento de la manera en que se genera ese beneficio mutuo entre la planta y los microorganismos, se utiliza actualmente como base de desarrollo de una buena parte de la llamada *biotecnología agrícola* que tan de moda se ha puesto en el siglo XXI y que sin exagerar va conformando la nueva revolución agrícola en la historia de la humanidad.

La comunidad del anillo

Quorum es una palabra que viene del latín y que quiere decir *de quién es*; sin embargo, la utilizamos para referirnos al número mínimo de miembros que tienen que estar presentes en ciertas asambleas o reuniones para que éstas tengan validez. Por eso es un término que muchas veces se oye en las noticias que hablan de las sesiones del Congreso de la Nación. Las bacterias también se enfrentan con el problema de saber si tienen *quorum* para iniciar determinadas acciones, por ejemplo, infectar una planta. Del mismo modo que en una fiesta, cuando se espera para saber si llegaron todos los invitados y servir la cena. De alguna manera lo que aparece es la necesidad de poder contar cuántos son, cuántos están presentes. Pero, ¿cómo hacen las bacterias para saber que han alcanzado un número suficiente para iniciar alguna acción en particular? Buena pregunta, diría un viejo pro-

viven en la Tierra. Pues todo parece indicar que desde el origen de las formas más sencillas de vida en la Tierra, y a lo largo de los largos tiempos, la combinación de cambios que surgirían por azar en los organismos y las presiones de selección que ejerce el medio, serían la razón del origen de la diversidad de especies biológicas que han ido poblando el planeta Tierra. Las especies actuales corresponden al tiempo que nos toca vivir y son el resultado de todo lo que pasó antes desde que se originó la vida en el planeta Tierra.

fesor mío que, inmediatamente, me retrucaba con una nueva pregunta aparentemente más compleja que casi mágicamente iba revelando las respuestas buscadas.

De algún modo las bacterias tienen que poder comunicarse y medir, detectar que alrededor de ellas, en el mismo lugar en el que están viviendo hay muchas más bacterias y que ese número es suficiente para iniciar alguna nueva actividad o acción, como puede ser infectar una raíz. En el caso de los diputados, o cuando de pronto caemos en la cuenta de que estamos metidos en medio de una manifestación o que se ha amontonado mucha gente en el mismo lugar en el que hace un rato estábamos muy tranquilos, lo que hacemos es contar. Mirar y contar, estimar la gente que tenemos alrededor. Pues bien, hasta donde sabemos, las bacterias no tienen el sentido de la vista... entonces, ¿cómo se dan cuenta las bacterias de que alrededor hay muchas más bacterias iguales y que han alcanzado el *quorum* necesario como para, por ejemplo, infectar una planta? ¿Cómo se enteran las bacterias que han alcanzado a formar una colonia? La respuesta es: las bacterias se dan cuenta de que han alcanzado a formar una colonia porque pueden detectar la presencia de unas señales químicas, algunas de las cuales tienen forma... de anillo. Y si sobre la raíz se desarrollan diferentes tipos de bacterias que logran llegar a formar sus propias colonias, se habrá formado sobre la raíz una comunidad de bacterias. Una comunidad del anillo, al decir del maestro J. R. R. Tolkien.²¹

²¹ J. R. R. Tolkien es el autor de la saga de libros alrededor de la novela épica *El Señor de los Anillos*, donde con una genialidad brillante y asombrosa inventa seres y universos en los cuales, entre otras cosas, aparecen unos seres como árboles enormes, los Ents, que poseen una característica que no encontramos en las plantas que evolucionaron en nuestro planeta, la de poder caminar y trasladarse. Esta propiedad, que parece no haber surgido en la evolución biológica sobre la Tierra, fue muy importante en el universo de Tolkien para contribuir al triunfo de la Comunidad del Anillo en una de las ba-

La cosa es más o menos así: las bacterias sintetizan, construyen, unas pequeñas moléculas en forma de anillos decorados llamados *homoserin lactonas*. Estas pequeñas moléculas son capaces de atravesar libremente las membranas y paredes que rodean a la bacteria y salir de la bacteria hacia el exterior. Del mismo modo pueden entrar desde el medio exterior hacia el interior de la bacteria. La física, la química y el sentido común nos enseñan que las sustancias difunden desde las regiones de mayor concentración hacia las de menor concentración. Entonces, a medida que la bacteria los sintetiza, estos pequeños anillos salen al exterior y difunden, alejándose de la bacteria. Si la bacteria está creciendo sola, eso va a seguir ocurriendo de esa forma y los anillos se escapan de la bacteria a medida que se forman. Si la bacteria se multiplica y el número de bacterias a su alrededor va aumentando exponencialmente, y todas las bacterias sintetizan estos pequeños anillos, los anillos que difunden hacia el exterior se van a ir concentrando y acumulando en los alrededores de estas bacterias (que también se van acumulando). Como los anillos pueden salir y *volver a entrar* en la célula bacteriana, a medida que la concentración de los anillos afuera aumenta, irá aumentando también la acumulación de anillos *dentro* de la bacteria... y eso justamente es lo que detecta la bacteria, el aumento de la concentración de anillos adentro de la bacteria como consecuencia del enorme número de bacterias que a su alrededor están produciendo el mismo tipo de anillo. El aumento de la cantidad de una sustancia dentro de una célula puede desencadenar nuevas reacciones químicas o procesos que no ocurren si la cantidad de anillos por célula es muy pequeño. Esas nuevas reacciones o procesos que se desencadenan son propios de las bacterias cuando están formando colonias y no ocurren cuando están viviendo ais-

tallas libradas contra el poder oscuro. Distintos Universos, distintas presiones de selección.

ladas o en muy bajo número. Por ejemplo, la virulencia de una bacteria (o sea, su capacidad de infección) puede aparecer sólo cuando se formó una colonia y no antes.

Recapitulando, las bacterias detectan o sienten la presencia de sus iguales de acuerdo con la cantidad de anillos que se van acumulando en su interior, como mensajes, como señales que se mandan unas a otras. Rudimentario, pero lenguaje al fin.

Lo interesante de este sistema de comunicación bacteriana, llamado en la jerga científica *quorum sensing*, es que se han descubierto varios lenguajes diferentes que pueden coexistir en un mismo lugar y en un mismo tiempo. Esto es similar a lo que ocurre en un aeropuerto internacional o en un evento deportivo internacional: conviven y se comunican simultáneamente (y a los gritos, si se trata de gente de origen latino) personas que hablan diferentes lenguajes. Como las personas de diferentes nacionalidades hablan distintos idiomas y, salvo en el caso de los que saben varios idiomas, en general no se entiende con la misma facilidad la lengua materna que otras lenguas, entonces no se interfieren, y pueden seguir conversando simultáneamente sin confundirse.

Más interesante aún ha sido el descubrimiento, a comienzos de este siglo XXI, de que las raíces de las plantas, en sus exudados radiculares liberan sustancias muy parecidas a las señales de *quorum sensing* de las bacterias. De esta forma las plantas sí pueden interferir y confundir las comunicaciones de las bacterias que tratan de colonizar la rizósfera. Por ejemplo, pueden hacerle creer que está en medio de una colonia a una bacteria que está solita, y cuando la bacteria se comporta como de colonia, pueden suceder cosas nuevas o diferentes que si no no sucederían hasta tanto las bacterias hubieran alcanzado a formar colonias o *biofilms*. O podrían interferir las comunicaciones entre bacterias que, a pesar de haber alcanzado números grandes y como para formar una colonia, siguen sin saberlo y siguen comportándose como bacterias sueltas. Si bien todavía no se entiende muy bien

el mecanismo, es bastante claro que el resultado final de colonización bacteriana de la superficie de una raíz en el suelo sería la consecuencia de conversaciones químicas entre las bacterias y de la intervención de la planta, que puede interferir con dichas comunicaciones, favoreciendo o no la colonización por un grupo bacteriano en detrimento de otro de diferente lenguaje.

Una vez establecidas estas comunidades de bacterias en los alrededores de la raíz, es decir en la rizósfera, o sobre la misma superficie de la raíz (o incluso invadiendo la raíz como veremos más adelante), empiezan a ocurrir procesos que favorecen a unos y otros miembros de la comunidad, bacterias y plantas, muchos de ellos relacionados con la nutrición de la planta.

El consumismo de las plantas y los microorganismos calesiteros

El funcionamiento de los ciclos de los elementos, como el del Nitrógeno (N), puede explicarse en términos de reacciones químicas que ocurren sobre la faz de la Tierra. En general estos ciclos son muy lentos o al menos mucho más lentos que las sucesivas cosechas y siembras de los suelos de los campos cultivados de nuestro planeta. Todos los organismos que forman la materia viva de la Tierra, también llamada biomasa, sumarían un total aproximado de 15 billones de kilos de nitrógeno. Se ha calculado también que, por año, un 5% de esa cantidad de nitrógeno (es decir 750 mil millones de kilos de nitrógeno) pasan y se transforman a través de los diferentes organismos que se comen unos a otros. Esto no sería un problema si el reciclado no tuviese pérdidas, pero ocurre que en el suelo hay unos microorganismos que transforman el nitrógeno orgánico en nitrógeno gaseoso que vuelve a la atmósfera. Y ese nitrógeno gaseoso de la atmósfera es inerte y no puede ser utilizado por ninguno de los organismos superiores. Si esta pérdida de nitrógeno (llamada desnitrificación) se mantuviera constante, la vida en este planeta se terminaría en cincuenta años. Esta situación no ocurre²² pues el ciclo se cierra

²² ¡Qué alivio! ¡Con los proyectos que tengo! Y me imagino que ustedes también, ¿no?

con los procesos llamados de “fijación de nitrógeno” que transforman el nitrógeno gaseoso de la atmósfera en amonio o nitratos, y lo devuelven al suelo, para ser aprovechados nuevamente por las plantas. Una parte de este retorno, a lo sumo el 10% del total, está mediado por reacciones químicas que ocurren en la atmósfera durante las descargas eléctricas de tormentas, o por reacción con los gases de combustión de automóviles. Pero esto no alcanza para reponer el N que se extrae del suelo con las cosechas (el nitrógeno pasó del suelo a las plantas y, cuando las plantas se cosechan, se sacan del suelo para ser utilizadas por el hombre). El problema aparece cuando se quiere seguir cultivando el mismo suelo. Para lograr eso se incorpora nitrógeno al suelo a través de fertilizantes nitrogenados que se fabrican industrialmente a costa de fuentes de energía no renovables, principalmente gas natural y combustibles derivados del petróleo. Esto representa un 25% de la incorporación global anual de nitrógeno del aire a la Tierra. Pero no hay bien que por mal no venga, pues al menos el 50% del nitrógeno que se agrega a los suelos como fertilizantes no es absorbido por las plantas, quedando fuera del alcance de éstas, y se filtran en los suelos llegando a las napas de agua subterráneas. Si la cantidad de nitrógeno que se filtra por el suelo es muy grande, entonces lo que ocurre es un efecto para nada buscado cuando se pensó en invertir para fertilizar los campos: se termina contaminando los lagos o ríos con nitratos y se producen efectos tóxicos en los peces y se alteran las cadenas alimentarias y los ecosistemas. Una situación parecida ocurre con la fertilización de fósforo.

Los resultados de la investigación científica nos enseñan que algunos microorganismos del suelo, bacterias y hongos, participan en forma muy activa en el funcionamiento de los ciclos de estos elementos, haciendo que funcionen como una afinada calesita biológica, a mayor velocidad que la que da solamente el proceso geoquímico. Por ejemplo, son bacterias las responsables de retornar el 65% restante del nitrógeno del aire a la biosfera.

El conocimiento de estos microorganismos y su manejo adecuado puede permitir recuperar la fertilidad de los suelos o incorporar elementos como el nitrógeno y el fósforo en una forma mejor controlada y menos perturbadora del ecosistema. En lo que sigue del libro presentaremos algunos de los sistemas que existen en la naturaleza cuya utilización permitiría mejorar los rendimientos de nuestros suelos a menores costos económicos y con un menor impacto ambiental, contribuyendo a evitar la desertificación a largo plazo. Todo esto conduciría a desarrollar proyectos verdaderamente sustentables.

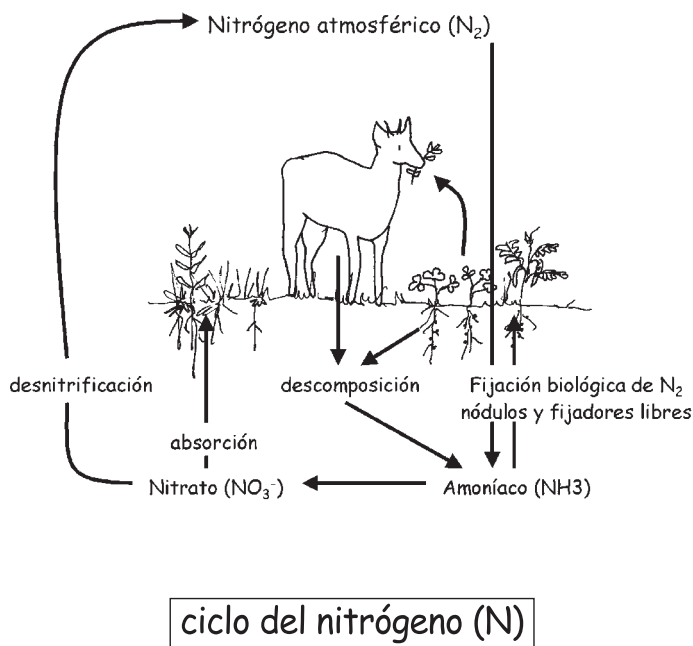


Figura 4

FBN

La sigla FBN no se refiere a una organización de espionaje internacional (mal que les pese a los que aún esperaban intrigas y suspenso en este libro) sino a uno de los procesos bioquímicos más importantes después de la fotosíntesis: la Fijación Biológica de Nitrógeno. Puede resultar paradójico, pero a pesar de estar rodeados de una enorme cantidad de nitrógeno, un gas cuya fórmula se escribe N_2 y que constituye el 78% del aire, para nosotros es lo mismo que la nada. Así como entra en nuestro pulmones, sale. Como si bebiéramos vasos y vasos de agua y no pudiéramos incorporarla, absorberla, y saciar nuestra sed. Y eso le pasa a la enorme mayoría de los seres vivos: necesitan el N como uno de los elementos más importantes para vivir, pero a pesar de estar inmersos en él, en la forma de N_2 , no lo pueden incorporar directamente. Las bacterias han sido el único reino de la naturaleza que desarrolló un sistema de reacciones químicas que permiten utilizar el nitrógeno del aire, transformando el nitrógeno (N_2) en amoníaco (NH_3), que se puede incorporar a las distintas moléculas de la célula. Algunas bacterias, no todas, poseen la información genética, es decir los genes necesarios para sintetizar una enzima²³ que lleva a cabo esta reacción química. Esta enzima se llama *nitrogenasa*. Se dice que, a través de esta reacción química, el nitrógeno (N) *se fija*. En realidad lo que se logra es que la sustancia nitrógeno (N_2) del aire se transforme en una forma más

²³ Las enzimas son sustancias que aumentan la velocidad de las reacciones químicas que ocurren en la célula y por eso se les dice *catalizadores biológicos*. Las enzimas también se pueden extraer de las células y utilizar fuera de ellas, por ejemplo para mejorar la calidad de vida de las amas de casa. De hecho las enzimas han alcanzado gran popularidad luego de que comenzaron a utilizarse como sustancias que mejoran la acción de los jabones en polvo, pues aceleran la reacción de descomposición de las manchas de la ropa (los pioneros fueron aquellos televisivos *verdes ensolves* con aspecto de *Pacman*).

universalmente asimilable por los organismos vivos como el amoníaco (NH_3). El amoníaco disuelto en la célula se incorpora directamente a algún derivado de los azúcares (las moléculas que se sintetizaron en las hojas gracias a la fotosíntesis) y así se convierte en N orgánico, es decir, en un átomo de nitrógeno que ya forma parte de las sustancias celulares.

Parece ser que esta reacción evolucionó hace muchos millones de años entre las primeras formas de vida que se desarrollaron en nuestro planeta, en respuesta a una necesidad de incorporar nitrógeno y aprovechar el que está en la atmósfera. Esto ocurrió mucho antes de que apareciesen las plantas y la fotosíntesis, cuando aún no había oxígeno (O_2) en la atmósfera del planeta Tierra.²⁴ El oxígeno apareció en el aire de la atmósfera como consecuencia de la fotosíntesis de las algas y plantas que evolucionaron y se desarrollaron mucho tiempo después de que la reacción de la nitrogenasa fuera adoptada por los microorganismos prehistóricos. Esto trajo un grave problema.

Resultó que el oxígeno que las plantas producen por la fotosíntesis y liberan a la atmósfera, es sumamente tóxico para la actividad de fijación de nitrógeno. El oxígeno inactiva y destruye las moléculas que hacen funcionar el proceso bioquímico de la fijación de nitrógeno. A pesar de haberse generado una situación de serias incompatibilidades, semejante problema no pudo ser resuelto por la evolución. Al menos hasta hoy no apareció ninguna actividad biológica de fijación de nitrógeno que fuese resistente al oxígeno del aire, ni una fotosíntesis que no libere oxígeno.

²⁴ Vale la pena recordar aquí que el oxígeno, que nosotros necesitamos tanto para nuestra respiración, apareció recién cuando las plantas comenzaron la fotosíntesis, pues cuando las plantas o los organismos con clorofila combinan el dióxido de carbono del aire con el agua para fabricar azúcares, liberan al medio (es decir a la atmósfera) oxígeno. El mismo gas, que hoy a nosotros nos resulta tan común e indispensable, es un simple producto de desecho de la bioquímica prehistórica.

Evidentemente, la nitrogenasa, que se inventó hace millones de años lo mismo que la fotosíntesis, resultaron ser reacciones bioquímicas *insuperables*.

Reflexión al pasar: “la vida fue, es y será una actividad que se plantea alrededor de sucesivos conflictos o contradicciones y sus resoluciones” (¿o no?)

Volviendo a nuestro conflicto entre la fijación de nitrógeno y la fotosíntesis, éste se ha resuelto en diversas formas, todas ellas relativamente complejas, pero ingeniosas; todas ellas buscando generar situaciones para que el oxígeno desaparezca de la zona donde funciona la nitrogenasa. Las bacterias fijadoras de nitrógeno que evolucionaron en la nueva atmósfera con oxígeno, simplemente buscaron formas indirectas de protección. Por otra parte, la evolución de las formas vivientes en esa atmósfera cada vez más rica en oxígeno permitió seleccionar organismos que hoy llamamos *aeróbicos* (que respiran como nosotros), que utilizan el oxígeno como combustible para obtener la mayor cantidad de energía posible²⁵ a partir de los alimentos que ingieren y digieren.

Un listado de soluciones diferentes

Desde niños sabemos que ante un problema lo más fácil es esconderse. Parece que esa estrategia no es sólo propia de nues-

²⁵ El azúcar nos proporciona una cierta cantidad de energía cuando la consumimos o metabolizamos para obtener energía. En ausencia de oxígeno (proceso que se denomina anaeróbico) se obtiene, en números arbitrarios, un valor de energía por unidad de azúcar igual a 2. Cuando la misma cantidad de azúcar metabolizada en presencia de oxígeno da un rendimiento de 36, es decir 18 veces más. ¿Cómo no se iban a seleccionar estas formas de vida a lo largo de los tiempos?, dirían los economistas de hoy.

tra infancia: algunas bacterias fijadoras de nitrógeno se las arreglaron para crecer donde no hay oxígeno o donde su concentración es muy baja, o en lugares donde están protegidas del oxígeno exterior.²⁶

Todo libro de ciencia que se precie debe incluir una clasificación de las cosas, que podemos repetir mientras vamos caminando al almacén de la esquina a comprar margarina, y este libro no puede ser menos. En líneas muy generales, a las bacterias fijadoras de nitrógeno se las puede clasificar en los siguientes grandes grupos:

- 1- *Fijadores libres.*
- 2- *Fijadores asociados.*
- 3- *Fijadores simbióticos.*

UNO – FIJADORES LIBRES

Los *fijadores libres* son aquellas bacterias o cianobacterias que fijan nitrógeno “en vida libre”, es decir, no necesariamente asociados a otro organismo. Su contribución al ciclo del nitrógeno tiene que ver con la producción de biomasa por la multiplicación directa y descomposición de estas mismas bacterias en el ambiente en que se encuentren, sea el agua, el suelo o dentro de otros organismos (como simples colonizadores de éstos). O sea, hay un montón de bacterias que fijan nitrógeno, se repro-

²⁶ Recordemos aquí que el proceso de transformación del N_2 del aire en amoníaco (NH_3) requiere MUCHA energía. Si bien las bacterias no usan la combustión del petróleo (como en el caso de la síntesis industrial de amoníaco para la fabricación de fertilizantes), necesitan esa energía y la obtienen de la combustión de los azúcares de los cuales se alimenta. Como vimos antes, si la combustión es con oxígeno el rendimiento en calorías es muchísimo mayor. Entonces, las bacterias tienen que evitar el oxígeno para no destruir la nitrogenasa, pero si lo pueden utilizar para obtener energía metabólica, mejor.

ducen y cuando se mueren lo dejan por ahí. Un ejemplo de estas bacterias son las del género *Clostridium*, ampliamente distribuidas en suelos y aguas salinas, sedimentos, intestinos y heces. Como crecen en lugares donde no llega el oxígeno se las llama bacterias anaeróbicas (es decir que no respiran el aire), y entonces fijan N_2 sin preocuparse por el O_2 . Otro ejemplo diferente lo dan las bacterias llamadas *Azotobacter*, presentes en suelos alcalinos, donde fijan nitrógeno protegidas del oxígeno por una cubierta de mucopolisacáridos (un tipo de moco parecido al de la nariz) que ellas mismas secretan al medio. Tenemos otro ejemplo en las cianobacterias que crecen sobre rocas y sedimentos en las costas de los cursos de agua y forman lo que comúnmente llamamos “verdín”. Las cianobacterias están formadas por varias células unidas como en una cadenita. Las cianobacterias poseen clorofila y son capaces de hacer fotosíntesis con lo cual *producen su propio oxígeno a partir del agua*. Sin embargo se protegen solitas, pues algunas de las células de la cadenita se diferencian engrosando muchísimo su pared externa de modo de generar una barrera para que no entre el oxígeno. En estas células especializadas, que se llaman *heterocistos*, se lleva a cabo la fijación de nitrógeno. Además, parece que cuando la cianobacteria fotosintetiza no fija nitrógeno y viceversa.

Se conocen muchas variedades más de adaptación de la fijación de nitrógeno a la atmósfera con oxígeno, y seguramente existe otro tanto por conocer ahí afuera.

DOS – FIJADORES ASOCIADOS

Los *fijadores asociados* son aquellos que pueden fijar nitrógeno en vida libre *sólo* en lugares donde la concentración de oxígeno sea muy baja, pero no cero. A esta situación se la llama *microaerofilia*. Investigaciones realizadas en Brasil en los años setenta, cerca de Río de Janeiro, permitieron descubrir bacterias asociadas a gramíneas o pastos que fijan nitrógeno de esta ma-

nera. Aparentemente, vivir asociadas a las raíces de estas plantas les provee a estas bacterias un ambiente de microaerofilia necesario para realizar la fijación de nitrógeno. Esta asociación entre la bacteria y la planta no genera nuevas estructuras en la planta para alojar a las bacterias (como veremos en otros ejemplos más adelante). Sin embargo, estas bacterias colonizan preferentemente la zona del suelo circundante de la raíz (rizósfera), y el nitrógeno que fijan es liberado al medio y rápidamente absorbido por la planta. Por esta razón se cree que estas bacterias contribuyen significativamente al desarrollo de estas plantas. Otra teoría no excluyente es la que explica que estas bacterias producen unas sustancias, llamadas hormonas vegetales, que estimulan el crecimiento de las raíces de las plantas, entonces, las plantas tienen mayor superficie para explorar el suelo y absorber nutrientes, y así pueden crecer más. Ejemplos de estas bacterias son las diferentes especies de *Azospirillum* asociadas a raíces de trigo y maíz. Otro de los descubrimientos más interesantes de los últimos años fue el aislamiento de la bacteria *Gluconacetobacter diazotrophicus* del interior de la caña de azúcar. Este descubrimiento fue también realizado por el grupo dirigido por la doctora Johanna Dobereiner en la Universidad Rural de Río de Janeiro. Si pensamos en la importancia que tiene el cultivo de la caña de azúcar en nuestro país y en Sudamérica, pareciera ser que el estudio y manejo de estas bacterias merece mucha atención...

TRES – FIJADORES SIMBIÓTICOS

Los *fijadores simbióticos* son aquellas bacterias que se asocian en simbiosis²⁷ con algunas plantas de modo que fijan el ni-

²⁷ La palabra *simbiosis* puede tener diferentes significados técnicos. En este libro utilizamos *simbiosis* para referirnos a las asociaciones entre dos organismos que resultan en beneficio mutuo para ambas partes. En otra nomenclatura un poco más exquisita esta situación se denomina *simbiosis mutualista*.

trógeno del aire *dentro* de estas plantas, en órganos especiales desarrollados por la planta para alojar a dichas bacterias. En general estas nuevas estructuras donde se alojan las bacterias se encuentran en las raíces de la planta y se llaman *nódulos radiculares*. Allí, en los nódulos radiculares, las bacterias encuentran un ambiente que las protege suficientemente del oxígeno como para poder producir la nitrogenasa y fijar el nitrógeno del aire. Este nitrógeno fijado como amoníaco es asimilado inmediatamente por la planta. De este modo, la planta no necesita absorber nitrógeno del suelo como nitratos o amonio, pues la bacteria lo fabrica para ella y para la planta a partir del aire. Esto parece bastante conveniente para la planta. La bacteria se beneficia también por crecer en un ambiente libre de competencia por su fuente de alimentos, en este caso los carbohidratos derivados de la fotosíntesis de la planta. Es decir, desde una perspectiva humana, en esta simbiosis ambas partes resultan mutuamente beneficiadas por la asociación.

Estas bacterias se dividen en dos grandes grupos: 1) las genéricamente llamadas *Rhizobium*,²⁸ que se asocian con un grupo muy grande de plantas conocidas como leguminosas (la soja, las arvejas, los porotos, los maníes, las lentejas); 2) las genéricamente denominadas *Frankia* que se asocian con árboles y arbustos, llamadas plantas actinorrícicas (como las casuarinas y los alisos).

Las cianobacterias también se asocian formando simbiosis con plantas y algas. Tal es el caso de la simbiosis con un alga denominada *Azolla* (que se puede utilizar para fertilizar los cultivos de arroz) o las simbiosis con algunas plantas del tipo de las palmeras.

²⁸ Hasta hace unos quince años los *Rhizobium* eran sólo *Rhizobium*, pero como los biólogos son muy inquietos e investigan mucho, hoy en día se han dividido para su mejor caracterización en cinco grupos diferentes: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium*. En el libro nos referimos a todos juntos como antes, por simplicidad.

Cuando el hongo metió la cola

-La hifa, para ser más preciso.

-¿Qué hifa?

Volvamos a describir cómo son los hongos y nos entenderemos un poco mejor. Los hongos son organismos vivos que por sus características estructurales, celulares y funcionales determinan un reino independiente en la diversidad biológica de la que hemos venido hablando: el Reino Fungi. Los hongos se caracterizan por ser organismos filamentosos, en su mayoría multicelulares, formados por células con núcleo al igual que las plantas. Sus células están rodeadas de una pared formada por una sustancia llamada quitina, que no está presente en las bacterias ni en las plantas, aunque sí en los insectos.³⁷ Los hongos no son capaces de fotosintetizar como las plantas, pero son capaces de una variedad enorme de procesos metabólicos que les permite alimentarse a expensas de las sustancias más insólitas. Podría decirse que los hongos están en todos lados y que generalmente son organismos que no se ven (son microscópicos, *microorganismos* como las bacterias). Las hifas son los filamentos que forman el

³⁷ La quitina es la sustancia que forma el exoesqueleto de los insectos (lo que los hace crujir cuando los pisamos).

cuerpo del hongo. El hongo crece desarrollando y ramificando esos filamentos que pueden verse con microscopio o con lupa. Puede multiplicarse por ruptura de esos filamentos y nuevo crecimiento a partir de los pedacitos de filamentos liberados, o también en una forma un poco más sofisticada como es la reproducción sexual del hongo. Este tipo de división es relativamente complicado y resulta ser toda una ceremonia, que escapa a los alcances objetivos de este libro, en la que es un paso importante la formación de esporas y su posterior germinación. Las esporas se desarrollan en lo que se denominan *cuerpos de fructificación*, que no son otra cosa que la forma en que nosotros conocemos a los hongos macroscópicamente, con esa enorme variedad de sombreritos de diferentes formas y colores.

A los hongos en general se los denomina organismos descomponedores, pues crecen y se alimentan a expensas de degradar otros organismos generalmente muertos. Si se la agarran con organismos vivos entonces se puede generar una situación de enfermedad o *micosis* que puede destruir enormes plantaciones para la desdicha de los productores. Pero, ¿qué tienen que ver los hongos con las plantas sanas?

Un poco de historia al natural sin almíbar

De acuerdo con una visión no religiosa del origen de la vida, que se puede o no compartir,³⁸ los primeros organismos vivos se habrían originado y desarrollado en las aguas de océanos, mares, lagos y ríos hace millones de años, en cuanto la Tierra comenzó a enfriarse. Al comienzo la sopa biológica habría sido muy rica en nutrientes y sustancias orgánicas que servían de alimento a las

³⁸ O se le pueden dar diferentes matices, pero que resulta una explicación e hipótesis atractiva para los científicos y otros hombres no científicos.

diferentes formas que allí se originaban. El crecimiento y la multiplicación de estas formas fueron, obviamente, agotando las góndolas de ese supermercado marino de sustancias orgánicas. Entonces, aparecieron organismos que fueron capaces de fabricar su propia comida a expensas de la única fuente de energía gratuita que es el Sol. Estos fueron los primeros microorganismos fotosintéticos que –repasemos– gracias a sustancias como la clorofila pueden absorber la energía de la luz del sol y transformarla en otras formas de energía química para que las células fabriquen azúcares, y con ellos sus propios alimentos y componentes.

Las evidencias fósiles encuentran los primeros microorganismos fotosintéticos o *autótrofos* asociados a rocas de 3.400 millones de años de antigüedad, casi 100 millones de años *después* de que los primeros organismos *heterótrofos*³⁹ se habían desarrollado en la rica sopa primitiva. Cuando los nutrientes en la sopa nutritiva comenzaron a escasear, la posibilidad de dejar de vivir en las aguas y pasar a vivir en la tierra se puede interpretar como una alternativa muy válida para buscar alimentos. En tierra firme los organismos fotosintéticos podían encontrar una excelente disponibilidad de la luz solar, mucho aire con dióxido de carbono para la fotosíntesis, oxígeno para la respiración y muchos minerales en los suelos. El problema de esta alternativa se encontraba en la dificultad para conseguir agua desde la superficie del suelo.

Algunas algas, organismos fotosintéticos muy relacionados con las plantas que mejor conocemos (y que seguramente hemos visto en fotos o en las costas de mares o ríos o dibujadas en frascos de modernos champús), desarrollaron mecanismos de sostén y aprehensión a las rocas costeras, lo cual les aseguraba vivir en el lugar de aguas más ricas. Estas algas agarradas a la costa pue-

³⁹ Se llama *heterótrofo* al que come lo que ya está preparado, a diferencia del *autótrofo* que fabrica su propia comida.

den interpretarse como formas primitivas de lo que luego fueron las plantas con sus tallos, hojas y raíces. Los científicos creen que, con el tiempo, los hongos se asociaron a estas plantas primitivas y establecieron una situación de beneficio mutuo: mientras los hongos con sus filamentos extensos y ramificados pueden explorar amplias superficies buscando nutrientes en las profundidades de los suelos costeros como un sistema radicular muy primitivo, las plantas les proveen, con sus azúcares sintetizados por fotosíntesis, alimento listo para ser digerido.

Existen registros fósiles que demuestran la existencia de estas asociaciones de hongos con plantas del período Devónico (¡hace aproximadamente 400 millones de años!). Esto indicaría que la simbiosis tuvo su origen juntamente con la colonización de la Tierra por las plantas.

Esta situación primitiva habría evolucionado luego hasta llegar a las plantas que hoy conocemos desarrollando sistemas de raíces que les permiten sostenerse en tierra firme y buscar aguas en las profundidades de los suelos. Sin embargo, los hongos siguieron allí asociados a las plantas, ahora a través de sus raíces, ampliando su capacidad de exploración y absorción de nutrientes del suelo.

¿Cómo?

Sí señora, sí señor, sí estimado muchacho o hermosa niña asombrada, como acaban de leer, **todas** las plantas, en la naturaleza, están asociadas a hongos en sus raíces.

Estos hongos no son, en general, necesarios para que las plantas crezcan y se desarrollen pues, de hecho, cuando sembramos una planta en una maceta o la hacemos crecer sobre un soporte húmedo, ésta puede crecer muy bien sin necesidad de asociarse con ningún hongo o cosa que se le parezca. Pero en la naturaleza, afuera, en el campito, el parque, el bosque, la selva,

las raíces de casi todas las plantas están colonizadas por hongos. Parece que los hongos en realidad forman intrincadas redes subterráneas que conectan diferentes plantas entre sí y podrían pasarse sustancias de una a otra⁴⁰ (como los fundamentales papelitos de la escuela primaria que las maestras *nunca* pudieron interceptar).

Más aún, las investigaciones más recientes de algunos ecólogos sugieren con mucho fundamento que una comunidad vegetal en un lugar está fuertemente determinada por los hongos que allí existen. Por supuesto algunos botánicos, para quienes las plantas son lo más importante, dicen todo lo contrario, y así se generan interesantes debates científicos. Algunos micólogos (estudiosos de los hongos) fanáticos dicen que las plantas en realidad son simples apéndices de los hongos...

Pues vaya si la cosa se ha puesto complicada. Quiere decir que los hermosos paisajes verdes que vemos cuando salimos al campo, bosques y selvas no son en realidad una colección de

⁴⁰ En 1995 se publicaron los resultados de un experimento de campo en el cual una planta *A* se embolsaba con aire conteniendo dióxido de carbono con carbono radiactivo, de modo que, por la fotosíntesis, la radiactividad se incorporase a los azúcares que dicha planta sintetizaba. Luego de un tiempo se encontró que una planta *B* vecina que nunca había sido tratada con radiactivo, tenía en su interior carbono radiactivo, mientras que otra planta *C*, también vecina de *A* y *B*, no tenía radiactivo. Al analizar las raíces de las tres plantas se encontró que las plantas *A* y *B* compartían la misma especie de hongo de sus raíces pero no así la planta *C* que tenía una especie de hongo diferente. Eso sugería que la radiactividad podría haber pasado de una planta a la otra a través de las redes formadas por un hongo común entre dos plantas. Y en apoyo de esta hipótesis se encontró que si a la planta *B* se le hacía sombra, impidiendo entonces que el sol llegue a sus hojas y la planta pudiera fotosintetizar y formar sus propios alimentos, los azúcares radiactivos pasaban aún más de la planta *A* con sol a la planta *B* con sombra. Pero si luego se tapaba la planta *A* y se destapaba la planta *B*, la radiactividad volvía a la planta *A*. La planta *C* nunca variaba su radiactividad aunque se la pudiese en sombra total. Como si las plantas *A* y *B* fuesen estaciones de una red de subterráneos y la *C* perteneciese a otra red diferente.

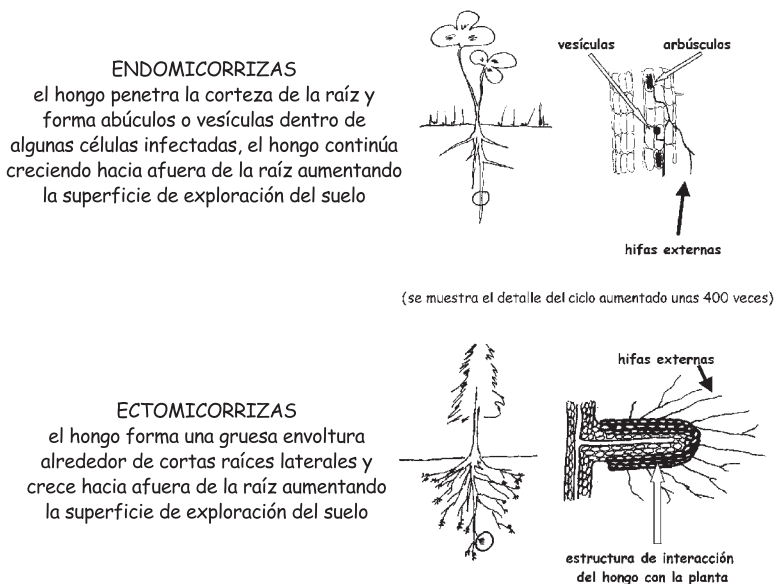
plantas individuales como de macetas superpuestas, sino la punta emergente de un *iceberg* biológico cuya mayor actividad está bajo tierra, y parece ser muy entretenida.

La risa de los hongos

Esta parte de la historia comenzó a escribirse con más énfasis hace unos años, cuando se descubrieron y empezaron a estudiar ciertos hongos que se asocian a las raíces y, en general, promueven el crecimiento de la planta. En algunos casos incluso se encontró que estos hongos son *necesarios* para que las plantas crezcan bien, sobre todo en el caso de árboles y arbustos que se utilizan para forestar. Esta asociación entre las plantas y los hongos se describe como otra asociación simbiótica en la cual ambas partes obtienen beneficio. Por una parte, el hongo se beneficia de la planta pues ésta le suministra azúcares como alimentos. Por otra parte, el hongo le aumenta a la planta la capacidad de absorción de agua y de nutrientes, facilita especialmente la absorción de fósforo (cuyo símbolo químico, recordemos, es P), que es el otro gran limitante del crecimiento de las plantas luego del nitrógeno. Estas asociaciones simbióticas entre hongos y las raíces de las plantas se denominaron genéricamente *micorrizas*, *mi-*co por los hongos y *rizas* por la localización en las raíces.

Los estudios sobre micorrizas nos enseñan que existen dos grandes grupos de asociaciones entre hongos y plantas, aunque si se las clasifica con un poco más de precisión se pueden distinguir cinco o más tipos diferentes. Los dos grandes grupos se diferencian en las formas de asociación: una parece más íntima que la otra. Uno de los grupos de asociaciones se llama *endomycorrizas* (*endo* significa *dentro*), y el otro gran grupo se llama *ectomycorrizas* (*ecto* significa *afuera*).

Figura 7



“Adentro”, como en la zamba

En las *endomycorrizas* el hongo se adentra en la raíz hasta el punto en el que una hifa o filamento del hongo se mete dentro de la célula vegetal, donde puede ramificarse formando “arbuscúlos” (arbolitos) dentro de la célula, o formando vesículas. Por eso estas simbiosis se llaman VA-micorrizas. V por vesícula y A por arbusculo. Estas simbiosis son bastante inespecíficas, es decir que una especie de hongo es capaz de infectar a muchas especies diferentes de plantas. Por lo tanto, son muy comunes. Hoy se cree que más del 80% de las plantas superiores tiene endomycorrizas.

Los hongos endomicorrícicos más abundantes pertenecen al orden de los Glomales, y algunos otros son llamados Zigomicetes u hongos imperfectos.⁴¹ Y por si alguien les pregunta o se los nombra en una importante reunión mientras come algunos saladitos de parado, les doy el dato para que puedan poner cara de entendido mientras asienten con la cabeza: los hongos formadores de endomicorizas más conocidos y estudiados se llaman *Glomus* y *Gigaspora*.

Sin embargo, no todo es color de rosa y hay un serio problema: estos hongos no se han podido cultivar en el laboratorio. Por esta razón se los considera simbiosientes obligados, es decir que sólo pueden vivir en simbiosis con las plantas. Por lo tanto su estudio y manejo comercial tiene serias limitaciones. Sólo se los puede cultivar dentro de las raíces de las plantas, donde crecen y se desarrollan hasta formar esporas, que son sus formas de propagación. Las esporas de los hongos son algo así como las semillas de las plantas. Las esporas son muy resistentes y entonces pueden permanecer en el suelo por mucho tiempo y diseminarse por el agua o el viento hasta que encuentren buenas condiciones de germinación y reinicien su ciclo de vida. Es decir, a partir de una espora puede crecer un nuevo hongo completo. Entonces las mismas raíces de las plantas micorrizadas, mezcladas con la tierra donde crecen, que suele estar llena de esporas del hongo, son la mejor fuente de hongo micorrícico que se utiliza para inocular nuevas plantas. Si uno se pone exquisito y quiere tener un inoculante más puro, lo que se puede hacer es, con ayuda de una buena lupa, separar las esporas que están sueltas en la tierra y ponerlas todas juntas en un frasquito con una linda etiqueta.

⁴¹ Se llama *Hongos Imperfectos* a aquellos hongos cuyo ciclo de reproducción no se conoce en forma completa, por lo tanto su clasificación resulta imperfecta. Pobres hongos, los imperfectos son los científicos que no saben reconocer lo que no saben y adjetivan descaradamente a los que no pueden hablar, como los hongos.

Segundos afuera

Las *ectomicorrizas*, es decir los hongos que se asocian con las raíces pero que quedan siempre por fuera de las células vegetales, pertenecen a otros grupos de hongos, principalmente a los llamados Basidiomicetes y los Ascomicetes. Estos hongos, para alegría de los biólogos y los viveristas, pueden cultivarse en el laboratorio con lo cual se pueden aislar, guardar en frasquitos y volver a inocular en condiciones controladas sobre nuevas plantas, e incluso comercializarse. De todos modos, la inoculación con raíces y suelo, como en el caso de las *endomicorrizas* también es muy válida y de hecho constituye una práctica habitual en algunos viveros. En algunos casos estas *ectomicorrizas*, pueden reconocerse a simple vista. Si desenterramos raíces de un árbol en el bosque podemos encontrar algunas raíces laterales muy cortitas y engrosadas respecto del resto de las demás raíces, como si en una mano tuviésemos algunos dedos vendados y otros no. Estas estructuras están formadas por el hongo, cuyos filamentos crecen alrededor de las células de las capas más externas de las raíces y luego las envuelven, como si se tratase de la venda alrededor del dedo lastimado. Esta estructura permite aumentar las superficies de contacto entre la raíz y el hongo, lo que facilita el intercambio de nutrientes.

A diferencia de las *endomicorrizas*, las *ectomicorrizas* son un poco más específicas y no siempre cualquier hongo Basidiomicete se asocia con cualquier planta. Las razones de esta especificidad o reconocimiento aún no están muy claras y resultan determinantes para que los inóculos que se utilizan sean realmente efectivos. Si pensamos que las *ectomicorrizas* son muy importantes en el cultivo de las coníferas (como los bosques de pino para la producción de madera), se entiende en parte el interés sobre el estudio de esta simbiosis.

Micosis que no pican

Hemos visto entonces que hay algunas infecciones producidas por hongos, también llamadas micosis, que resultan muy buenas, al menos para las plantas, y no como las que nos pueden amargar el día más caluroso del año cuando, en el examen antes de ir a la piscina, el doctor las descubre entre los dedos de nuestro pie...

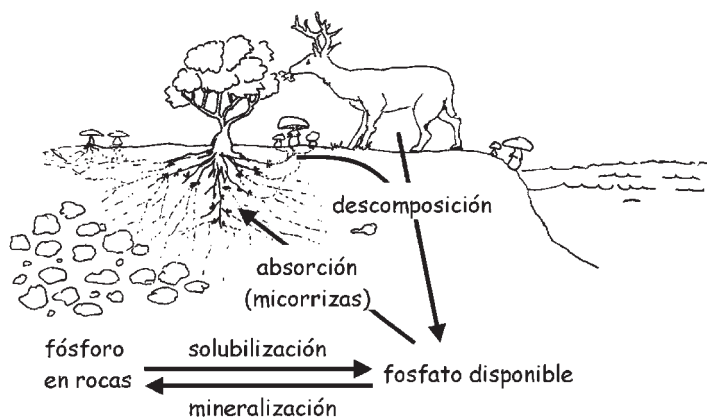
El establecimiento de estas simbiosis micorrícicas supone efectos benéficos para el crecimiento y desarrollo de la planta. El principal beneficio es que de esta manera se aumenta la tolerancia de la planta al estrés por falta de agua y a la deficiencia de nutrientes. También proporcionan a la planta mayor resistencia a la acción de microorganismos patógenos. Por esas razones resultan de tanto interés para la aplicación agronómica y forestal. El desarrollo externo de los hongos asociados a las raíces de las plantas se llama *micelio* y está formado por las hifas o filamentos del hongo que se extienden y ramifican en el suelo como una enorme y muy fina red. Este micelio aumenta enormemente la capacidad de exploración de los suelos contribuyendo a una mayor captación de agua, que junto con otros nutrientes es absorbida por el hongo y translocada o transferida a la planta.

En términos de nutrición de las plantas parece que el hongo mejora principalmente la captación o absorción de fósforo. El hongo tendría la capacidad de transformar en *disponible* cierto fósforo que se encuentra en el suelo en una forma química que la planta no puede absorber directamente. En otras palabras, el hongo facilita la absorción de uno de los macronutrientes fundamentales y más limitantes del crecimiento de las plantas, el fósforo.

Desde otro punto de vista, los hongos micorrícicos resultarían de suma importancia en la entrada de fósforo a su ciclo biológico. Se ha demostrado que las plantas asociadas a hongos micorrícicos crecen significativamente mejor en suelos con muy bajas concentraciones de fósforo, que aquellas plantas sin mico-

rrizas. Además, si se aumenta la concentración de fósforo disponible en los suelos esta asociación simbiótica no se establece o deja de funcionar. Una situación similar a lo que ocurre con las simbiosis fijadoras de nitrógeno, que se inhiben si existe nitrógeno listo para ser utilizado por las raíces de la planta.

Figura 8



Índice

| | |
|---|----|
| Introducción | 9 |
| Elemental, Watson | 10 |
| Capítulo 1. Plantas, bacterias, hongos... | 15 |
| Plantas | 15 |
| Bacterias | 18 |
| Hongos | 19 |
| Mi mujer | 21 |
| El cocinero | 21 |
| Y su amante | 23 |
| Capítulo 2. Chonp | 25 |
| Capítulo 3. De cadenas y aguas | 29 |
| Un caso de patriotismo donde no debería aplicarse el Himno | 29 |
| El valor de la regadera | 30 |
| Capítulo 4. ¿Qué tienen esas plantas que no tenga yo? | 33 |
| Capítulo 5. Todo por el suelo | 37 |
| Capítulo 6. Sea moderno, sea <i>sus-ten-table</i> | 39 |
| Capítulo 7. Plantas felices, bacterias felices | 41 |
| La atmósfera de la raíz y sus astronautas | 41 |
| La comunidad del anillo | 44 |

| | |
|---|-----|
| Capítulo 8. El consumismo de las plantas y los microorganismos calesiteros | 49 |
| FBN | 52 |
| Un listado de soluciones diferentes | 54 |
| Capítulo 9. Peas on earth | 59 |
| La historia del poroto equivocado | 62 |
| Dulces conversaciones subterráneas | 64 |
| La hermana bacteriana de Frankenstein y el bosque | 66 |
| Plantas primas lejanas | 68 |
| Dulces conversaciones subterráneas (la película) | 71 |
| Capítulo 10. Integrando conceptos | 75 |
| ¿Y dónde está la simbiosis? | 75 |
| Las simbiosis fijadoras de nitrógeno tienen su reglamento | 76 |
| Capítulo 11. Cuando el hongo metió la cola | 81 |
| Un poco de historia al natural sin almíbar | 82 |
| ¿Cómo? | 84 |
| La risa de los hongos | 86 |
| “Adentro”, como en la zamba | 87 |
| Segundos afuera | 89 |
| Micosis que no pican | 90 |
| Capítulo 12. Esto no es todo | 93 |
| Los suelos sanadores | 94 |
| PI-YI-PI-AR | 95 |
| Como el Superagente 86 | 96 |
| Por suerte las plantas no llenan el frasquito para el análisis | 98 |
| Capítulo 13. Pasados de revoluciones | 101 |
| El futuro es nuestro | 102 |
| Glosario | 105 |
| Bibliografía comentada | 111 |

INSTRUCCIONES PARA UNA BUENA LECTURA: Señor lector, señora lectora, cuando encuentre palabras técnicas cuyo significado desconozca, éstas muy probablemente se encuentren explicadas en el GLOSARIO que se encuentra al final del libro. Vaya y vea.