

Marco Nuti es profesor emérito de la Universidad de Pisa y actualmente está afiliado a la Escuela Sant'Anna de Pisa, Instituto de Ciencias de la Vida. Estudió en Francia, Inglaterra, Países Bajos y EE. UU. Desde 1968 ha llevado a cabo investigaciones en el campo de la microbiología agrícola mediante la publicación de más de 400 artículos científicos.

Ha ocupado numerosos puestos en organismos internacionales de las Naciones Unidas, el PNUD, la FAO, la EFSA, la ECHA y la Comisión Europea. En el ámbito docente, ha enseñado en universidades de Chile, Ecuador, Irlanda, Lituania, Mozambique, Somalia e Italia. Es académico del Georgofili y ha formado parte del coro de la Universidad de Pisa hasta 2019.

Carlo Sabaini es Ingeniero Agrónomo PUCV. Investigador y director del programa de Restauración Biológica de Suelos del Centro Ceres PUCV. Docente universitario. Encargado de la Quinta Ramos del colegio Waldorf San Francisco de Limache.

Escrito en la primavera europea de la pandemia del Covid-19, este libro nos invita a un fascinante viaje hacia el mundo de los microbios: seres invisibles para el ojo humano, a menudo considerados sordo-mudos, tontos y desprovistos de las características propias de los seres vivos. Sin embargo, es gracias a ellos, que hablan y escuchan, a quienes debemos la continuidad de la vida en la Tierra, desde que aparecieron como sus primeros habitantes hace más de cuatro mil millones de años. El autor comparte sus aprendizajes y reflexiones, fruto de sus cincuenta años de experiencia como microbiólogo del suelo, con un énfasis sobre la vital y nutricia influencia del universo microbiano en la agricultura.

Marco Nuti es profesor emérito de la Universidad de Pisa, académico del Georgofili, y actualmente está afiliado a la Escuela Sant'Anna de Pisa, Instituto de Ciencias de la Vida.

PIEDRA
MOLLE
EDICIONES

LOS INVISIBLES EN LA AGRICULTURA

MARCO NUTI

LOS INVISIBLES EN
LA AGRICULTURA
MARCO NUTI



Edición original:

Una società invisibile: L'importanza dei microbi in agricoltura

Carocci Editore

Roma, 2021



**PIEDRA
MOLLE**

EDICIONES

Primera Edición: Verano del 2021

ISBN 978-956-09583-0-3

Piedra Molle Ediciones

Limache, Chile

www.piedradelsur.com/editorial

Traducción al español:

Carlo Sabaini

Diseño de portada e ilustraciones:

Eduardo Aravena

Diagramación:

Marlene Soffia

Edición y corrección:

Arturo De Sarratea y Germán Gautier

Agradecemos al proyecto R19F10005 del V concurso de fortalecimiento de centros regionales mediante proyectos de I+D Ciencia Territorio 2019.

También nuestra gratitud a Andrés Moreira-Muñoz y el proyecto ANID-PIA SOC 180040/ ANILLOS: «Geo-Humanidades y (Bio) Geografías Creativas aproximándose a la sostenibilidad y co-conservación rizomática».

Para Latinoamérica, se permite la reproducción total o parcial de esta obra, siempre que no sea con fines comerciales o de lucro, y se cite al autor y la edición respectiva.

**LOS INVISIBLES EN
LA AGRICULTURA**
MARCO NUTI

Traducción de Carlo Sabaini

A Pietro, Marco, Vivian, Otto, Inigo y Edoardo

Sabemos más sobre el movimiento de los cuerpos celestes
que sobre el mundo que está bajo nuestros pies.

LEONARDO DA VINCI

HACIA UNA FENOMENOLOGÍA DE LO IMAGINARIO

*Las habas en sus vainas rebosantes
son acechadas a diario por un zorzal
ocasionalmente alguna rara*

*Aves medias a pequeñas
desde un punto de vista humano
para estas semillas más tiradas a grande son gigantes*

*Un poco más lejos
en la chacra
veo crecer los brotes de maíces y porotos de la milpa*

*Refugiados se resguardan
bajo la ley de la abundancia*

El pensamiento ecológico es un asunto de escalas. Una apuesta por ampliar los límites perceptivos que condicionan nuestra relación con los mundos que habitamos. Pareciera ser que el tiempo nos ha ido (mal)educando engualar la acción de mirar a la creencia de conocer. Si a esto le sumamos un monolítico sesgo antropocéntrico, la experiencia de habitar la existencia se reduce bastante: el mundo se transforma en lo que nuestros ojos de mono creen ver.

En el caso de la agricultura, la ceguera es aún más seria. La llamada tristemente «revolución verde», cargada con sus agrotóxicos y monocultivos, ha fijado la mirada en la producción y acumulación de alimentos bajo la ilusión de riqueza, obteniendo paradójicamente lo contrario. Frente a la caravana de devastación que lidera esta agricultura convencional, en las últimas décadas hemos visto germinar una diversidad amplia de movimientos agronómicos que desde prácticas más conscientes (y amorosas) buscan restaurar la vida en los suelos, reparando en parte el daño que como especie hemos generado a nuestra casa común. El tiempo dirá si permitimos que florezcan plenamente estos impulsos.

Los Invisibles en la Agricultura, del profesor Marco Nuti, se suma y aporta a la resistencia frente a la agricultura convencional. Este libro nos invita a considerar que bajo el suelo hay otro universo en movimiento, que con sus conversaciones y relaciones microscópicas sostiene el mundo de lo visible todo el tiempo. Lo mismo pudiésemos decir que ocurre a la inversa, pues tal es la manera en como el vacío se entremezcla con la forma, sin comienzo ni final. Estos seres invisibles, dirá el autor, gozan de existencia y desde ahí proclama la «carta de los derechos microbianos», tensionando nuestra mirada humana sobre lo que es necesario respetar, a través de este gesto amable y solidario hacia estas otras formas de vida por mucho tiempo ignoradas.

Para quienes tengan un camino recorrido en microbiología, seguramente este libro les parecerá un intento amable de suavizar una disciplina que difícilmente pudiese ser digerida para personas que no poseen este tipo de conocimiento «científico». Imagino que la actualizada bibliografía, fruto de ser un texto publicado de manera casi simultánea que en su idioma original, pudiese ser un aporte importante en cuanto mapa de búsqueda para nuevas exploraciones. En el caso de las personas que al igual que yo sigan considerando a los microscopios como objetos animistas un tanto lejanos, espero que puedan considerar este libro hermano a

la «ciencia ficción», donde no es necesario ver para imaginar y sentir nuevos mundos. Quizás como ejercicio propongo leer *Los Invisibles en la Agricultura* como se abordaría por primera vez un texto inentendible de Lacan, sin la expectativa de comprenderlo todo, pero con la confianza en que el inconsciente receptivo hará su trabajo. Lenguaje, consorcios, apoyo mutuo, simbiosis. Son las palabras que siguen resonando luego de la lectura en mi caso.

Arturo De Sarratea
Cerca del solsticio de verano
Limache, 2020

PRÓLOGO

La actual pandemia de Covid-19 ha demostrado a todo el mundo la capacidad que tienen los microorganismos de cambiar economías y sociedades. Estos organismos de manera invisible y silenciosa sustentan los ecosistemas del planeta y a los humanos. Sin embargo, presentan las mismas dificultades para enfrentar la destrucción de hábitat y cambio climático que los demás organismos, pero al ser microscópicos y con funciones ecológicas complejas es difícil sensibilizar directamente a las comunidades locales, quienes en primera instancia pudiesen protegerlos y preservarlos. En Latinoamérica, a pesar de contar con ecosistemas únicos que presentan mucha diversidad y endemismo, no existe una real consciencia del potencial para la vida que representan los microorganismos del suelo, lo cual se evidencia en las escasas o nulas políticas que existen para su regulación, protección y conservación.

En este libro podemos adentrarnos en el mundo de los microorganismos y sus importantes funciones ecosistémicas, con un ameno lenguaje y una interesante historia, a través de la amplia experiencia y viajes alrededor del mundo del reconocido investigador Dr. Marco Nuti, quien ha entregado su vida a la microbiología del suelo, logrando muchos aportes de impacto en la ciencia, tecnología, innovación e inclusive en políticas públicas. El cierre dedicado a los derechos microbianos es un interesante y oportuno planteamiento sobre el cambio de paradigma que debemos realizar para avanzar más en el conocimiento y preservación de los

microorganismos del suelo y, al mismo tiempo, beneficiarnos de todas sus funciones ecosistémicas.

Los científicos, al igual que los microorganismos, debiésemos estar interconectados a nivel nacional e internacional, ya que existen muchos estudios, resultados y cambios en las legislaciones, a los que debiésemos mantener un acceso equitativo, dinámico y actualizado. Igualmente, formar sólidas redes de colaboración con las comunidades a nivel local y global, dando a conocer el rol de los microorganismos del suelo en la alimentación y la salud para que las propias comunidades locales exijan cambios a sus gobernantes, lo que es fundamental en el actual escenario ambiental. Este debiese ser un objetivo primordial del futuro de la ecología y la microbiología del suelo: promover redes científicas y con la comunidad a nivel nacional e internacional, quienes organizada-mente generen políticas públicas que describan, protejan y conserven los microorganismos del suelo del Planeta, que es uno de los objetivos que plantea este libro.

Dra. Ana Aguilar Paredes
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Centro Regional de Investigación e Innovación
para la Sostenibilidad de la Agriculuray los Territorios Rurales
Ceres

UN COLOR ROJO BERMELLÓN PARA FADUMA

En Afgoye¹ hacía calor como de costumbre. La estación seca de Jiilaal acababa de terminar, por lo que resultaba necesario darse prisa para sembrar y así obtener el beneficio de las lluvias estacionales de Gu². Esto le permitiría a Faduma terminar los experimentos de su tesis de grado y prepararla para su discusión dentro de ese mismo año. El objetivo era evaluar, en la sabana, si era posible cultivar algunas plantas ricas en proteínas para que el ganado las comiera. Habíamos llevado semillas de leguminosas forrajeras de Australia, junto con sus bacterias simbióticas específicas, y también semillas de una leguminosa local, pero sin los simbiosistas. La tierra estaba lista en la granja situada en la localidad de Folco, de donde nos abastecíamos de verduras y frutas todas las semanas. Confiábamos también en la ayuda del Uebi Scebeli, el río más largo de Somalia, que pudiese proporcionar algo de riego en caso que fuese necesario.

1 Estamos en Somalia en 1975, a 13 km al norte de Mogadiscio, en el campus de la Facultad de Agricultura de la Universidad Nacional de Somalia, donde los maestros de varias universidades italianas llevaron a cabo sus tareas de enseñanza e investigación en el campo, siguiendo un plan de acuerdos de cooperación bilateral.

2 En Somalia, hay dos estaciones lluviosas: una de abril a junio, llamada Gu, con lluvias largas y monzónicas, y otra presente desde octubre a diciembre, con lluvias cortas, conocida como la temporada de Deyr.

Las bacterias para la inoculación de las semillas^{*3} se propagaron en el laboratorio como cultivos líquidos en medios estériles. La tapa del autoclave, necesaria para la esterilización, la encontramos en la sede del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en un almacén a treinta kilómetros de Afgoye, a las afueras de la ciudad, en medio del monte. El esquema experimental de la tesis era simple: la mitad de las semillas de forraje introducidas -*Stylosanthes guianensis* y *Psophocarpus tetragonolobus*- fueron inoculadas con las bacterias simbióticas y sembradas en parcelas aleatorias. El amplio espacio era lo único que no faltaba. Las semillas de una variedad local de poroto -*Lablab purpureus*- se sembraron tal como estaban, sin inocularse. A Faduma se le explicó que la inoculación era solo necesaria para las especies recién introducidas y no para los porotos locales, pues se suponía que las bacterias simbióticas estaban presentes en ese suelo. Todos los experimentos fueron exitosos y también fue posible recolectar las semillas, excepto en dos de las cinco parcelas de poroto local, las más cercanas al río, debido a que los hipopótamos se habían comido todas las hileras de las plántulas.

Las plántulas introducidas de *Stylosanthes* y *Psophocarpus* habían crecido bien solo en presencia de bacterias simbióticas. Los nódulos presentes en todo el sistema de raíces eran de un color rojo bermellón en el interior, un signo de la presencia de leghemoglobina* y de una actividad de fijación del nitrógeno atmosférico. El poroto local, por otro lado, había crecido menos y tenía algunos nódulos dispersos en las raíces secundarias. El contenido interno de los nódulos era blanco, sin leghemoglobina, un signo seguro de falta de fijación de nitrógeno. Faduma estaba motivado, y con una hoja de cuchillo flameado*, ante esta simple prueba de laboratorio, exclamó: «Los microbios son invisibles, pero muy útiles». Había obtenido evidencia experimental de que las bacterias simbióticas, que forman nódulos radicales fijadores de nitrógeno, eran indispensables para que la leguminosa del huésped arraigara

3 N. del T. Se usa el signo * para señalar la presencia de un concepto en el glosario de la página 91.

y creciera, sin tener que recurrir a fertilizantes nitrogenados. La tesis fue discutida con éxito y Faduma Husein se convirtió en el segundo graduado en Ciencias Agrícolas de Somalia(1). Desafortunadamente, no pudo continuar su beca porque poco después el laboratorio de microbiología fue destruido por la explosión de un obús de mortero, producto de una guerra tribal que estalló en el país entre el clan de Ali Mahdi Mohamed y el de Mohamed Siad Barre.

Años más tarde, el mismo diseño experimental utilizado por Faduma, fue desarrollado en la granja La Perla, al sur de Maracaibo, en Venezuela, con el objeto de mejorar la producción de forraje necesaria para la alimentación de las diez mil cabezas de ganado que pastaban allí.

Se obtuvieron los mismos resultados que en Afgoye; de hecho, hubo una mejora en que el poroto sembrado con semillas sin tratar creció muy bien, proporcionando un excelente forraje.

Hoy sabemos que las plantas de leguminosas, gracias a la actividad fijadora de nitrógeno en los nódulos de la raíz, han podido sobrevivir millones de años, incluso en suelos pobres en nitrógeno, forjando un vínculo estrecho de colaboración con seres vivos que no son visibles a simple vista. La relación mutualista que sostiene la planta que recibe los compuestos de nitrógeno que necesita para crecer, y las bacterias simbióticas presentes en la rizósfera, configura un nicho ecológico en el cual poder proliferar y recibir todos los nutrientes que ambos necesitan. De esta forma, escapan a los fenómenos de la competencia trófica, siempre posible en ambientes rizosféricos* poblados por muchos otros microorganismos. También escapan a la presión de factores ambientales a veces muy severos.

Tan pronto como la llamada temporada de fuertes lluvias de Gu terminaron, aportando entre 100 y 150 milímetros de agua durante todo el año, se realizaron dos expediciones al norte de Galcayo, en la frontera entre Somalia y Etiopía, para detectar

la situación de una rara planta leguminosa llamada localmente «yicib» o «yihib», la *Cordeauxia edulis* (2). Esta legumbre arbustiva se considera en peligro de extinción por la FAO⁴ y se conoce desde la época del Imperio Romano por sus características: capaz de sobrevivir en las sabanas del desierto, donde la lluvia en promedio es inferior a 100 mm por año (la primera expedición tuvo lugar después de tres años que no llovió en esa área), y la extrema alcalinidad del suelo forma vainas que contienen solo una semilla. A veces el «yicib» es el único recurso vegetal comestible tanto para los nómadas, que asan las vainas debajo de la ceniza en las pequeñas estufas de sepiolita, como para sus delgados dromedarios y también para sus muy flacas cabras que anhelan las hojas carnosas de esta leguminosa. Ya en la época de la Reina de Saba se extraía de las raíces un pigmento rojo intenso típico, que se usaba en la industria del tinte para colorear las capas. Los árabes, consumidores habituales de carne de camello y cabrito de Oga-den, para reconocer su origen rompen un hueso del animal para la venta, y si es rojo lo compran a buen precio. El sistema de raíces de la planta leguminosa puede alcanzar 14 metros de profundidad y solo después de la temporada de lluvias se forman unos pocos nódulos fijadores de nitrógeno en la raíz principal, lo que permite que la planta sobreviva en la sabana del desierto del Cuerno de África, donde solo leones hambrientos o temerosos pastores se atreven a aventurarse.

Marco Nuti
Pisa

Primavera europea 2020

4 N. del T. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

(1) Faduma, H., Nuti, M., Kuneman, K. y Lepidi, A. (1978). Uso e selezione di rizobi per la batterizzazione di leguminose di nuova introduzione in Somalia. *Agricoltura Subtropicale e Tropicale*, 72, 291-299.

(2) Lepidi, A., Capretti, P. y Nuti, M. (1979). Poorly known nitrogen-fixing symbioses. *Cordeauxia edulis* in the Horn of Africa. *L'Agricoltura Italiana*, 108, 341-348.



CAPITULO I

**LA SOCIEDAD
DE LOS MICROBIOS**

CAPÍTULO I

LA SOCIEDAD DE LOS MICROBIOS

Durante tres siglos después de la primera descripción de los morfotipos* de bacterias, realizada en 1673 mediante un microscopio elemental por el comerciante de telas y juez popular, Antonie van Leeuwenhoek, los microorganismos, invisibles a simple vista, fueron considerados miembros de un mundo de sordomudos, seres peligrosos y solitarios. Solo a partir de los años 70 del siglo pasado, quedó muy claro que esto es exactamente lo contrario. De hecho, desde un punto de vista evolutivo, ya con la aparición de los procariotas* como los primeros habitantes vivos de la Tierra⁵, mucho antes que las plantas y animales, los microbios han venido desarrollando medios sofisticados de comunicación.

Estos diferentes tipos de comunicación se basan principalmente en «palabras» químicas. Entre los casos más conocidos hasta ahora, encontramos el sistema de detección de *quórum* y *antiquórum* de las bacterias; los factores Myc⁶ (micorrización) en la simbiosis* casi universal entre las raíces de las plantas y los hongos micorrízicos; los factores Nod⁷ de la simbiosis entre las legumbres y los

5 Los primeros restos fósiles de organismos filamentosos datan de hace 3.7 a 4.2 mil millones de años en los sedimentos de las corrientes hidrotermales en Quebec (1).

6 N. del T. Factores emitidos por los hongos micorrízicos que activan genes en las plantas.

7 N. del T. Otros factores emitidos por las bacterias para comunicarse entre sí y con las plantas para lograr la nodulación simbiótica.

rizobios⁸ del suelo. Estos sistemas permiten que las bacterias y los microhongos se comuniquen entre sí, con las plantas y con los animales.

Comencemos con la detección de *quórum*. Como lo ha señalado ingeniosamente Valerio Giaccone, de la Universidad de Padua, las bacterias realizan periódicamente un censo de su población y prueban el terreno para verificar las condiciones del entorno circundante en tiempo real. Para ello liberan mensajes que otras bacterias de la misma población recogen, interpretan y, según el tipo de mensaje, reaccionan respondiendo con otros mensajes. Mientras la población se mantenga en niveles bajos de densidad los mensajes se diluyen en el ambiente, pero si la densidad aumenta y excede un cierto nivel (el *quórum*), los mensajes que se acumulan conducen a reacciones metabólicas en cascada: nuevos comportamientos en todas las células de la población, migración hacia hábitats más acogedores, eliminación de poblaciones amenazadoras o formación de biopelículas*. La naturaleza de estos mensajes varía según la especie o el género. La detección de *quórum* hasta la década de 1990 era considerado un mecanismo confinado a unas pocas bacterias simbióticas de peces, sin embargo, es percibido hoy como un lenguaje general, indispensable para la colonización de la planta por bacterias simbióticas y fitopatógenas* o agentes de biocontrol (es decir, aquellos que ayudan a la planta a combatir los fitopatógenos). Este sistema comunicativo regula una amplia gama de fenotipos que incluyen la virulencia, la capacidad de adherirse a las raíces, la secreción de enzimas hidrolíticas, la movilidad en enjambre de células, la posibilidad de transferir información genética a otras bacterias a través de mecanismos de pseudosexualidad, producción de metabolitos antimicrobianos secundarios, enzimas extracelulares, membranas vesiculares, sideróforos* e inductores de esporulación (2).

8 N. de T. Los rizobios son bacterias del suelo que forman nódulos en las raíces de plantas leguminosas, en auténtica simbiosis pues fijan el nitrógeno del aire con el que las plantas pueden lograr la síntesis de proteínas, mientras las plantas les brindan un ambiente que las protege y las nutre con la energía que han fotosintetizado del sol.

Estas emergentes «palabras» químicas bacterianas se componen de varios tipos de acil-homoserina-lactona, y la planta a la que están destinadas reprograma su expresión génica. Si la cadena de acilo es corta, la bacteria que la utiliza favorece el crecimiento de la planta, induciendo un cambio en el equilibrio hormonal entre el ácido indolacético* y las citoquininas*; mientras que si utiliza una cadena de acilo más larga, tiende a modular el crecimiento de la raíz y la formación de pelos radicales. La planta puede interferir con la detección de *quórum* y la conversación molecular alcanza una complejidad aún mayor, considerando que otras clases de señales bacterianas, como p-cumaroil-homoserina-lactona, requieren un precursor (p-cumarato) que no es producido por la bacteria, pero sí liberado por la planta alrededor de sus raíces. Cuando la bacteria percibe la señal, puede expresar su respuesta.

El siguiente modo de comunicación que revisaremos es el *anti-quórum*, también llamado extinción de *quórum*. Este es un mecanismo microbiano de interferencia contra microorganismos que usan la detección de quórum para producir protecciones como biopelículas, estructuras organizadas resistentes a la penetración de antibióticos y antimicrobianos. No es casualidad que en la superficie de las hojas, las bacterias filoféricas⁹ *Chromobacterium violaceum* produzcan una enzima (lactonasa) capaz de hidrolizar las acil-homoserina lactonas y destruir las biopelículas formadas por fitopatógenos.

Miremos ahora en el caso del factor Nod de los rizobios, uno de los componentes básicos de la pared celular de la bacteria, la acetilglucosamina. La secuencia de señales emitidas entre las bacterias y la planta leguminosa se genera bajo un riguroso control genético en ambos simbioses. Esta interacción, vista en una clave antropomórfica, pudiese compararse a una historia de amor fascinante, comenzando por una solicitud de amistad, que da paso luego a un período de cortejo, seguido de un compromiso y, finalmente, concluyendo en una relación de convivencia estable (3).

9 Las bacterias filoféricas son aquellas que aprovechan los exudados de las hojas.

Pero para arribar a este último estado, mucha agua pasó bajo el puente. El rizobio es inicialmente alejado, como si fuera una bacteria cualquiera, mediante la emisión de flavonoides* que inhiben el crecimiento microbiano desde la raíz. Pero el astuto rizobio usa esta palabra a su favor para activar sus genes de Nod e inmediatamente envía otra palabra a la planta para inducir un crecimiento anormal de pelos radiculares, también modificando su propia pared celular. La planta resiste, pero se ablanda y le dice a la bacteria: «...bueno, veamos si eres realmente el amigo que dices ser». La bacteria responde enviando señales para la división de las células de la corteza, se insinúa en el pelo radicular y viaja luego hasta su base, siguiendo al núcleo de la misma. Aquí, la planta le permite ramificar la línea de infección entre célula y célula, aun teniendo algunas dudas por resolver: «¿es una gran ventaja unirse con este tipo?» La bacteria responde: «mira cómo me transformo por ti...», y, vertiéndose en las células rodeadas por una especie de bolsa, se convierte en un bacteroide*. La planta, ahora entregada por tanta constancia amorosa, fabrica la mitad de una molécula (la globina) dejando la tarea de fabricar la otra mitad (el grupo hemo) al rizobio. El resultado es la aparición en la membrana peribacteriana de la leghemoglobina, un pigmento rojo de neosíntesis único en el mundo vegetal, que permite el transporte de oxígeno en cantidades suficientes para mantener activo el metabolismo de la bacteria, pero en una concentración no demasiado alta porque destruiría la nitrogenasa, el complejo enzimático bacteriano, que con sus dos subunidades se une al nitrógeno y lo reduce a iones de amonio, con un gasto energético significativo.

Este fascinante proceso interactivo y comunicacional sucede a temperatura ambiente y presión atmosférica. Muy distante de lo que ocurre cuando nosotros los humanos intentamos replicar esta síntesis, pues se gastan entre 16 y 17 toneladas de petróleo por cada tonelada de nitrógeno reducido a amoníaco¹⁰. El proceso de

10 N. del T. La síntesis de urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ se logró industrialmente por medio de la reacción de dióxido de carbono con amoníaco, a altas presiones (200 atm) y temperaturas mayores a 180°C.

fijación de nitrógeno industrial es realmente muy costoso porque funciona a altas temperaturas, altas presiones y especialmente solo si hay un flujo de hidrógeno para reducir el nitrógeno del aire. Al vivir juntos de manera estable, la planta y la bacteria cooperan rítmica y armoniosamente: el rizobio elimina el amoníaco potencialmente tóxico dentro del nódulo de fijación de nitrógeno, con lo cual la planta está feliz de poner en funcionamiento todas las enzimas necesarias para transmitir ese nitrógeno fijado, en la síntesis de aminoácidos y de proteínas que se acumulan en las hojas y en las semillas.

Alineado con esta asociación simbiótica, el agricultor no gasta un centavo en este proceso natural y sostenible. Claro que la historia cambia y ya no es sostenible si el agricultor quiere producir a toda costa 5 o 6 toneladas de semillas de soja, porque entonces debe administrar nitrógeno químico de síntesis (generalmente nitrato), que es asimilado por la planta en un 40-50% en el mejor de los casos. El resto es desnitrificado por esos mismos rizobios que, en cambio, deberían fijar el nitrógeno y no liberarlo a la atmósfera junto con otros óxidos volátiles. Pido disculpas al lector por esta historia romantizada de la simbiosis entre los rizobios y las plantas leguminosas, pero esto es lo que ha permitido a la gran mayoría de las legumbres sobrevivir hasta el día de hoy y, por consecuencia, es lo que ha posibilitado al género humano y a otros animales disponer en su dieta de este alimento altamente proteico, en todos los climas y estaciones.

Más allá de las palabras químicas, los microbios también usan otros sistemas de comunicación, tales como sonidos, colores y vibraciones, con el objetivo de modular el comportamiento de otros individuos y colectivos. La producción de bioluminiscencia bacteriana en verde, azul, rojo, rosado y naranja se conoce desde hace mucho tiempo. Solo por poner algunos ejemplos, piense en la simbiosis entre las bacterias luminiscentes *Photobacterium* y *Vibrio* con calamares, medusas, peces linterna, almejas y anguilas. O en medios terrestres, considere el caso del vínculo que establecen las *Photorhabdus* con algunos insectos y nematodos.

Para comprender mejor la bioluminiscencia debemos trasladarnos a Manoa, en Hawái. Allí, un grupo de investigadores de la universidad local descubrió que la bacteria *Vibrio fischeri*, que vive armoniosamente en simbiosis con el calamar, dentro del llamado órgano de luz, es capaz de modular la expresión génica en otros órganos del calamar(4), sugiriendo que la conversación entre bacterias y animales es aún más íntima y compleja. El calamar es muy activo en la búsqueda de alimento durante la noche en las aguas poco profundas del archipiélago hawaiano. Su cuerpo emite luz producida por el simbiote para imitar la luz de las estrellas o la luna, permitiéndole así una exitosa caza. Durante el descenso en busca de alimento la población de *Vibrio* aumenta, y cuando alcanza una alta densidad (usando la detección de *quórum* con las palabras acil-homoserina lactona) emite luminiscencia. Y si eso no es suficiente, el calamar puede modular la bioluminiscencia de su colaborador, dependiendo de si hay menos luz por estar nublado, a través de una conexión entre el ojo y el órgano de luz. Después de cazar para alimentarse el calamar sube a la superficie y el *Vibrio* se vuelve «inútil» (de hecho, consumirían la energía del calamar), por tanto, son expulsados del órgano de luz y queda una pequeña representación disponible, pendiente del próximo ciclo en el que se requiera de un nuevo aumento poblacional. Durante siglos los marineros han descrito un misterioso mar «lechoso» que se extiende por cientos de kilómetros. Utilizando técnicas de detección modernas se ha descubierto que este fenómeno también es una manifestación de bioluminiscencia producida por *Vibrio harveyi*, que se encuentra asociada con un alga que vive en la superficie del mar.

Una expresión comunicativa distinta es la capacidad de algunas bacterias de percibir la presencia de otros organismos, lo cual incluye la posibilidad de «sentir» e identificar células objetivo en el huésped animal, como en el caso de *Enterococcus faecalis*. Esto es posible de observar en la simbiosis intestinal entre bacterias y termitas, uno de los comportamientos colectivos más avanzados entre microorganismos. Al recorrer las sabanas australianas y africanas es fácil encontrar grandes pináculos de tierra que se alzan en

forma de cono, como si se tratase de verdaderas casas reales, cada una habitada por decenas de miles de alguna de las 2400 especies de termitas tropicales presentes en esos territorios. Estas enormes colonias están organizadas en un sistema social con tareas bien diferenciadas y específicas. Las termitas, tal como nosotros los humanos, no pueden digerir la lignina ni la lignocelulosa, una tarea que, en cambio, es realizada muy bien por las actinobacterias (*Streptomyces*, *Micromonospora*, *Nocardia* y otras) que viven simbióticamente en la cavidad gastrointestinal de estos insectos del orden de los isópteros (5).

Algunas cepas o especies de actinobacterias pueden romper los enlaces entre los núcleos aromáticos y las cadenas lineales características de la estructura tridimensional de las ligninas, otras saben cómo eliminar los «adornos» de los anillos de benceno*, como los grupos metilo* y metoxílico*, lo que hace posible que otras cepas y especies puedan activar los grupos aromáticos introduciendo primero uno, y luego un segundo grupo hidroxilo. La estructura tridimensional de las ligninas, después de abrir el anillo de benceno, colapsa y los compuestos lineales o linealizados ingresan al metabolismo microbiano normal.

Este maravilloso ejemplo de integración funcional permite la producción de energía y «ladrillos» para construir la casa común, alimento para las termitas y para la reina (o reinas) de la colonia, además de una ayuda esencial para mantener a todos saludables, considerando la capacidad de la bacteria para sintetizar antibióticos activos contra posibles agentes infecciosos. Pero hay más. Sobre la base en el interior del nido de termitas está el «jardín de hongos» donde los hongos *Termitomyces*, en cooperación funcional con las actinobacterias, proliferan con su red de hifas hasta que encuentran en la superficie del nido de termitas las condiciones adecuadas para producir el cuerpo fructífero o esporocarpo. Sobre esta plataforma basal yace la reina que es alimentada por las termitas obreras. El cuerpo fructífero del hongo es una comida muy bienvenida y codiciada por los lugareños, especialmente si se come junto con las reinas, cocinadas en un asador como *hot*

dogs. Ha sido necesario intervenir con campañas de información sólidas para evitar la destrucción de las colonias de termitas en el centro-este de África (si la reina muere, todos los termiteros mueren), tan esencial para mantener el ciclo del carbono activo en la naturaleza en esos climas.

Otra simbiosis muy extendida en la naturaleza es la existente entre los hongos y las raíces de las plantas, tan antigua como 400 millones de años. Se estima que más del 90% de las plantas terrestres establecen una relación mutua con hongos micorrícicos, aunque con diferencias morfofisiológicas entre grupos de plantas y grupos de hongos (existen ecto y endomicorrizas, arbustoides y monotropoides). A las endomicorrizas pertenecen los arbusculares (78%), las orquídeas (10%) y las ericoides (1,4%). Las de mayor interés en la agricultura son los arbusculares, generalizados en áreas tropicales(6) y presentes también en los pastos y cultivos de climas mediterráneos¹¹(7). Estos hongos forman arbustos dentro de las raíces, mientras que el micelio extraradical se extiende fuera de ellas. Las estructuras de la neogénesis, es decir, los arbusculos, asimilan los nutrientes de la planta y, al mismo tiempo, favorecen la asimilación de agua, fósforo, nitrógeno, hierro y zinc, dándole una mayor resistencia al estrés. Un estudio reciente en la Universidad de Copenhague (8) postula que hasta el 40% de las plantas, hasta ahora consideradas totalmente autosuficientes para la producción de carbono a través del proceso de fotosíntesis (autótrofas), podrían estar siendo abastecidas de este elemento en parte importante desde los hongos simbióticos, que lo obtienen de la materia orgánica muerta.

El hongo, también a través de esta red de hifas extraradicales, permite que las raíces de una planta intercambien nutrientes con las raíces de otras plantas. Antes de que se establezca la simbiosis propiamente tal, entre el hongo y la planta hay un intenso intercam-

11 Un ejemplo de esto es el caso de las islas Galápagos, donde los arbustos *Ricinus communis* y *Psidium guajava* dependen de las micorrizas. En zonas mediterráneas un caso típico es el del olivo.

bio de palabras. Por parte del vegetal, al inicio aparecen estrigolactonas defensivas, que se encuentran con los factores Myc, que constituyen la oferta de colaboración del hongo. A esto se suman muchas proteínas enzimáticas que conducen a la formación del apresorio, estructuras de adhesión en la raíz y del aparato de prepenetración, que concluye finalmente con la entrada del hongo en las células de la raíz y la formación del arbusculo. Esta última estructura es la expresión típica de la simbiosis exitosa.

Para tener una idea del tamaño de los microorganismos a los que hacemos referencia, consideremos que en un solo gramo de suelo la extensión de las hifas fúngicas puede alcanzar fácilmente los treinta metros y el micelio extraradical de los hongos micorrízicos bordea un promedio de tres toneladas de biomasa microbiana por hectárea (tomando en cuenta una profundidad de 25 centímetros de la capa cultivable).

En la naturaleza hay docenas de sucesiones, ciclos de vida integrados, simbiosis y comensalismos* que se consideran virtuosos y, por lo tanto, representan una preciosa fuente de conocimiento, hoy más que nunca, en lo que respecta a la agricultura sostenible. Es cierto, sin embargo, que no faltan otros comportamientos mucho menos edificantes, que hacen que Caín y Abel o Rómulo y Remo sean tristes épicas al lado de lo que sucede entre ciertos microorganismos. Por ejemplo, hay algunos miembros de una población genéticamente homogénea, que pueden matar a otros miembros de la misma población, como en el caso del canibalismo en *Bacillus subtilis* y la autólisis en *Streptococcus pneumoniae*. Esta última es la lisis de una parte de una población de la bacteria, inducida por un grupo de células de la misma especie, que se diferencian genéticamente por la presencia de factores ambientales que alteran la expresión del ADN* sin modificar su secuencia.

Sin embargo, la actitud hacia la cooperación en los ciclos biogeoquímicos en la naturaleza es ciertamente un comportamiento microbiano frecuente y es en este espíritu cooperativo que nos detendremos. Para profundizar en esta noción es central señalar otras dos características distintivas de los microbios: nunca están

solos y llevan una vida de relación intensa (9). Estos seres siempre viven en comunidades (grandes o pequeñas, según como se mire), con una división de tareas proporcional a sus capacidades metabólicas. Basta pensar en las biopelículas formadas en la superficie de las hojas de las plantas, por poblaciones de 10^4 a 10^5 células por mm cuadrado o hasta 10^8 células por gramo de material foliar; conforman pequeñas pero poderosas «ciudades» de microbios. O solo considere las poblaciones microbianas en la rizósfera, un sitio habitado por miles de especies diferentes. Cuando las primeras poblaciones se quedan sin oxígeno disponible entran en un estado de reposo (células viables pero que no se multiplican), dando paso a microaerófilos* que necesitan concentraciones gradualmente más bajas de oxígeno, hasta que ellos alcancen la quiebrencia y sean reemplazadas por otras anoxigénicas (que no podrían crecer en presencia de oxígeno atmosférico). Hay que señalar que estas no son poblaciones taxonómicamente homogéneas, por el contrario, están compuestas de diferentes géneros y especies, incluso filogenéticamente* distantes. Las tres poblaciones que utilizan diferentes aceptores terminales de electrones, desde oxígeno para formar agua, hasta nitrato para producir formas de nitrógeno volátil (incluido el gas nitrógeno), obtienen la energía que necesitan de los exudados de las raíces y de los nutrientes que encuentran en el suelo. Al mismo tiempo, a partir de este recambio microbiano la planta puede asimilar los elementos que necesita y seguir liberando carbono, ahora en forma orgánica, a través de los exudados y exfoliantes radiculares.

También existen algunos microbios de gran persistencia y voluntad, que pueden revertir las palabras químicas de alejamiento que emite la planta por considerarlos potencialmente peligrosos. Quizás por estar demasiado entrenados en palabras de amistad y ofrecimiento de colaboración, finalmente logran entablar una conversación con la planta que les permite ingresar en la raíz hasta la corteza y los vasos del xilema. También hay bacterias que pueden transformar genéticamente las plantas y crear nichos ecológicos altamente refinados. Los casos más conocidos de modificación genética natural de plantas son CaMV, el virus del

mosaico de la coliflor y varias especies de la bacteria *Agrobacterium*. Esta última también puede transformar hongos ascomicetos y basidiomicetos (incluidas las levaduras), y se ha informado que es capaz de transferir ADN a células humanas. La *Agrobacterium*, al igual que otras bacterias filogenéticamente cercanas, como los rizobios de las leguminosas, son capaces de escuchar las palabras de gimnospermas y angiospermas mono y dicotiledóneas, palabras compuestas por sustancias fenólicas, para luego convertirlas en señales de activación del instrumental genético, para inducir la transferencia de partes del genoma de ellas a la planta. Posteriormente, este ADN transferido, incluso de proporciones considerables (hasta 200 mil pares de bases), se integra en el núcleo de la planta, que se vuelve capaz de sintetizar compuestos de aminoácidos que solo la bacteria es capaz de utilizar. A partir de este descubrimiento, que tuvo lugar en la década de 1970, varios grupos de investigadores en Bélgica, los Países Bajos y el estado de Washington pudieron realizar, a través de una impresionante actividad de investigación interdisciplinaria, métodos rutinarios de mejora genética de plantas de amplio uso alimentario y plantas de uso industrial por características cualitativas y de resistencia a plagas o fitopatógenos que causan enormes daños a la agricultura. La primera comercialización de estas plantas mejoradas con el método utilizado en la naturaleza por *Agrobacterium* se remonta a 1996 y, después de más de veinte años de cultivo extensivo, actualmente se encuentran en más de 180 millones de hectáreas alrededor del mundo. El impacto en la salud humana y el medio ambiente no difiere del de las plantas no mejoradas, excepto por el uso mucho menor de insecticidas y la menor concentración de micotoxinas nocivas, ambos factores a favor de las plantas mejoradas genéticamente (10).

En el suelo, alejado de las raíces de las plantas, los microbios viven reunidos en microcolonias dentro de los microagregados, incluso aquellos ocluidos, es decir, las partículas con dimensiones entre 50 y 250 micrómetros, para formar lo que se llama el microbioma del suelo. Según el significado de Schlaeppi y Bulgarelli (11), por «microbiota» nos referimos al número total de microorganismos

(bacterias, archea, levaduras, hongos, virus) en un ambiente dado, por lo que este término se refiere a la clasificación sistemática (taxonómica) y abundancia de los miembros de la comunidad. En cambio, por «microbioma» nos referimos al número total de genomas de una microbiota, por lo que este concepto se usa para describir la extensión de los caracteres microbianos, es decir, las funciones que están codificadas en una microbiota. Este último contribuye junto con los otros componentes de la biota (micro y mesofauna) a mantener el suelo vivo, sano y activo, ya sea este forestal, no cultivado o agrícola, en todos los climas y latitudes. La microbiota del suelo tiene una increíble biodiversidad taxonómica y funcional, estando estos dos factores en relación directa. Esto pues, de acuerdo con las condiciones pedoclimáticas* o las intervenciones antropogénicas, las funciones de un grupo pueden ser prestadas por otros, incluso taxonómicamente diferentes, como si se hubiera formado una sociedad de ayuda mutua. En este sentido, cuanto mayor es la biodiversidad microbiana, mayor es la funcionalidad de ese suelo y, al mismo tiempo, mayor es su resistencia al estrés.

Los rasgos de carácter en la sociedad de los microbios tienen un enorme impacto no solo en el suelo, ya sea cultivado o no, sino también en todos los procesos de biotransformación y en la cadena alimentaria animal y humana. Solo piense en la producción de forraje ensilado, leche fermentada¹², bebidas fermentadas tradicionales, quesos y pan, entre otros muchos productos de uso milenario. Pero también consideremos la producción de biogás, el compostaje y todos aquellos procesos en los que los consorcios microbianos son la fuerza impulsora de la transformación. Los microbios no se limitan a ser agentes de transformación de materias primas, sino que tienen un impacto decisivo en la salud del suelo, plantas, animales y humanos. Esta radical influencia benéfica se debe tanto a su densidad (es decir, al número de células por unidad

12 En un gránulo de kéfir funciona un consorcio microbiano que consiste en más de una docena de cepas bacterianas y de levadura, perfectamente integradas desde un punto de vista funcional.

de peso o volumen), como a su biodiversidad. Hoy sabemos que existen 10^{13} células microbianas por mililitro de fluido gástrico en el intestino humano y en la rizósfera de las plantas hay 10^9 - 10^{10} por gramo de medio rizosférico. Estos dos hábitats representan las densidades celulares máximas de microorganismos en la biósfera, y ciertamente existe una razón para esta relación. Considere, por ejemplo, las alteraciones del microbioma intestinal (disbiosis) que pueden ser causadas por el estrés o una nutrición poco saludable. La disbiosis* se ha demostrado en una conexión causal con una serie de enfermedades graves (12), como diabetes tipo 2, alteraciones del sistema cognitivo, obesidad, algunos tipos de cáncer, alteraciones del colesterol y disfunciones del sistema inmunitario. Estos estados patológicos pueden ocurrir en las diversas etapas del desarrollo, desde la infancia a la vejez, con consecuencias muy graves también en la salud mental de los afectados (13). Frente a estos estados de alteración de la microbiota intestinal podemos ingerir probióticos, como *Lactobacillus rhamnosus* o *Bifidobacterium longum* o glucooligosacáridos u oligosacáridos de frutas, con el objetivo de restablecer el equilibrio del microbioma y ayudarnos de este modo a una reducción de la sintomatología concomitante. En este tratamiento, según el grupo etario, variarán las cepas y especies de microorganismos a los cuales recurrir.

No muy diferente en los principios básicos ya señalados es la situación de las plantas. Estas pueden también entrar en disbiosis por un estado nutricional alterado, producto de la intervención de microbios fitopatógenos, que aparecen en ciertas condiciones pedoclimáticas y ambientales, generalmente asociadas a intervenciones de origen antropogénico, siendo la principal causa de esta enfermedad el manejo agronómico convencional. Cuando esta situación ocurre, el motor de su nutrición y resistencia, el microbioma rizosférico y el de los endófitos*, se destemplan profundamente. En palabras coloquiales, los microbios que se encuentran dentro de las diversas partes de la planta se vuelven locos. El perfil del microbioma cambia, los miembros de la sociedad ya no pueden hablar entre ellos o con las plantas circundantes tal como lo habían hecho hasta que aparecieron las causas del estrés. Para

restablecer el equilibrio dinámico del sistema rizosférico resulta necesario remover con cuidado las causas del estrés, asegurando una nutrición adecuada para las plantas a través de acciones restauradoras, como el fortalecimiento del suelo con presencia adecuada de materia orgánica y la eliminación de contaminantes, mitigando en la medida de lo posible los efectos de eventos con origen antropogénico.

Es claro ya a partir de estas primeras evidencias, que debemos continuar explorando este desconocido mundo para tener un mayor entendimiento de la sociedad de los microbios, que con sus mecanismos de cooperación y sus relaciones interactivas tan extendidas en la biósfera utilizan un vocabulario amplio y diverso para comunicarse entre sí, con plantas y animales. Después de todo, la sociedad microbiana llegó mucho antes que la nuestra en esta tierra y nosotros somos los estudiantes.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Dodd, M., Papineau, D., Grenee, T., Slack, J., Rittner, M., Piratno, F., et al. (2017). Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature*, 543, 60–64.
- (2) Krzyzek, P. (2019). Challenges and Limitations of Anti-quorum Sensing Therapies. *Frontiers in Microbiology*. doi: 10.3389/fmicb.2019.02473.
- (3) Nuti, M. y Squartini, A. (1987). Linguaggio molecolare fra batteri e piante. *Biotec*, 2 (3), 30-37.
- (4) Moriano-Gutierrez, S., Koch, E., Bussan, H., Romano, K., Belcaid, M., Rey, M., Ruby, E. y MacFall-Ngai, M. (2019). Critical symbiont signals drive both local and systemic changes in diet and developmental host gene expression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(16). doi: 10.1073/pnas.1819897116.
- (5) Pasti, M., Pometto, A., Nuti, M. y Crawford, D. (1990). Lignin-solubilizing ability of actinomycetes isolated from termite (*Termitidae*) gut. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 2213–2218.
- (6) Schmidt, S. y Scow, K. (1986). Mycorrhizal Fungi on the Galapagos Islands. *Biotropica*, 18(3), 236-240. doi:10.2307/2388491.
- (7) Briccoli Bati, C., Santilli, E., Dichio, B., Tatarani, G., Lombardo, L., Xiloyannis, C., et al. (2016). Le micorrize. En: Tiziano

Caruso (comp.) *Manuale per la produzione, gestione e difesa dell'olivo in vivaio*. (pp.48-59). Bari: Università degli Studi di Bari "Aldo Moro".

(8) Giesemann, P., Rasmussen, H., Liebel, H. y Gebauer, G. (2020). Discreet heterotrophs: green plants that receive fungal carbon through Paris-type arbuscular mycorrhiza. *New Phytologist*, 226, 960–966.

(9) Selosse, M. (2017). *Jamais seuls. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*. Paris: Ed. Actes Sud.

(10) Pellegrino, E., Piazza, G., Nuti, M. y Ercoli, L. (2018). Impact of genetically engineered maize on agronomic, environmental and toxicological traits: a meta-analysis of 21 years of field data. *Nature Scientific Reports*. doi: 10.1038/s41598-018-21284-2.

(11) Schlaeppli, C. y Bulgarelli, D. (2015). The Plant Microbiome at Work. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28, 212-217.

(12) Dinan, T. y Cryan, J. (2017). Gut instincts: microbiota as a key regulator of brain development, ageing and neurodegeneration. *The Journal of Physiology*, 595, 489-503.

(13) McVey, N., Luczynski, P., Oriach, C., Dinan, T. y Cryan, J. (2015). What's bugging your teen? The microbiota and adolescent mental health. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 70, 300-312.



CAPITULO II

**DEL PROTO-LENGUAJE AL
COMPORTAMIENTO COLECTIVO**

CAPÍTULO II

DEL PROTOLENGUAJE

AL COMPORTAMIENTO COLECTIVO

En cualquier sociedad o comunidad, la base de una buena convivencia es el uso de un lenguaje común. Dado que la sociedad microbiana está compuesta por muchas especies (pueden coexistir hasta 4.000 diferentes en un gramo de suelo), podemos esperar la presencia de varios idiomas o dialectos. Este dilema todavía no tiene una solución definitiva, aunque ya es posible identificar algunos rasgos comunes de un idioma con diferentes matices dialectales: detección de *quórum*¹³, emisión de compuestos volátiles¹⁴, emisión de vibraciones (sonidos), emisión de colores y emisión de sustancias químicas¹⁵.

En la actualidad existe acuerdo en la consideración de que estas formas de lenguaje utilizadas por los microbios (es decir, tanto la emisión como la percepción de señales, incluso a distancia) están bajo un estricto control genético. Para algunas bacterias ha sido posible demostrar que la producción, liberación y percepción de las moléculas de señal (definidas como elementos de un «vocabulario» químico) son utilizadas para medir la densidad de

13 Por ejemplo N-acil-homoserina-delta-lactona, alfa-pironas, dialquil-resorcinoles.

14 En microhongos estos activan la expresión de genes de defensa y la acumulación de fitoalexinas*. En rizobacterias inhiben el crecimiento micelial de *Sclerotinia sclerotiorum*.

15 Antibióticos, ácido hidrocianico, sideróforos, citoquininas, kinetinas*, ácido indolacético, sustancias de biocontrol de fitopatógenos y biocidas.

la población en crecimiento y controlar su comportamiento, en respuesta a cambios en el número de individuos y cambios en los estímulos ambientales. Asimismo, hay varios casos demostrados en los que se usa el lenguaje para determinar el comportamiento de los individuos dentro y fuera de una población. El intercambio de información entre células no se limita a promover, por ejemplo, la formación de esporas (*Bacillus subtilis*) o mantener las células vecinas (*Escherichia coli*) inhibidas del crecimiento y a una distancia segura, sino que llega hasta determinar el comportamiento colectivo de una comunidad. Esto es observable en la producción de polisacáridos en el proceso de formación de biopelículas y en la generación de péptidos en poblaciones de actinobacterias (*Streptomyces coelicolor* y *Streptomyces tendae*), las cuales se acumulan extracelularmente durante la formación del micelio aéreo, lo que sirve como tensoactivos para facilitar la liberación de hifas aéreas, que surgen del sustrato de micelios.

¿¡Sociedades sordas y tontas!?! En ningún caso. El mundo microbiano es, por el contrario, un caos de moléculas señales pequeñas y grandes, de inductores y represores de actividades bioquímicas, de activadores y represores de la expresión génica en su propio tipo. Los organismos procariotas y eucariotas* pueblan el denso mundo de microbios en los suelos de la Tierra, siendo casi todos útiles e indispensables para la continuación de la vida en este planeta, para la producción de alimentos y para la salud del medio ambiente. Sin olvidar, por otra parte, que una minoría de la microbiota en su deseo de sobrevivir y proliferar, tan pronto como se presente una buena oportunidad y haya condiciones adecuadas, pueden ser dañinas para la salud de la humanidad, los animales y las plantas.

Todo lo que hemos dicho hasta ahora, para la sociedad microbiana se lleva a cabo en un amplio rango de condiciones climáticas, que van desde los climas templados y tropicales, hasta los polares. Pero la memoria de los microbios es mucho más antigua que las actuales «condiciones de vida relajadas y permisivas», por decirlo de algún modo. De hecho, su existencia se remonta al tiempo

a cuando las condiciones climáticas en la Tierra eran sumamente extremas: los volcanes en las profundidades del mar estaban en continua actividad, y las rocas en erupción no estaban listas para hacer la transición hasta convertirse en suelo. Estos ambientes saturados de gases se caracterizaban por la ausencia de oxígeno y la predominancia de hidrógeno, metano y monóxido de carbono, mientras que las aguas eran más ricas en oxígeno. Probablemente la interfase acuosa/gaseosa, las altas temperaturas y la acidez o alcalinidad extrema, fueron las variables que promovieron la aparición de los microbios más antiguos, las arqueas, que utilizan diferentes reacciones químicas en lugar de luz como fuente de energía(1). Es una verdadera fortuna que estas condiciones todavía estén presentes en la gran caldera del parque de Yellowstone¹⁶, lo que ha permitido aislar y cultivar algunos de estos microbios, verdaderos «fósiles» vivos, para estudiar sus actividades y las características propias de su entorno. Tal es el caso del *Thermus aquaticus*, aislado de la cuenca del géiser Norris, el cual crece a 80 ° C y se ha usado para extraer la polimerasa Taq, una enzima resistente al calor utilizada en la técnica PCR (reacción en cadena de la polimerasa) para la amplificación del ADN, una reacción clave en biología molecular. Y junto con *Thermus*, muchos otros de estos microbios que crecen a altas temperaturas (hasta 90° C) cuentan con características únicas: la bacteria celulosolítica* *Caldicellulosiruptor obsidiansis* utilizada en la biodegradación termofílica de celulosa para la producción de etanol; las coloridas cianobacterias fotosintéticas, que hace 3 mil millones de años ayudó a producir el oxígeno que caracteriza la atmósfera actual; o la bacteria termofílica *Sulfolobus acidocaldarius*, que crece a expensas del sulfuro de hidrógeno emitido por los volcanes, convirtiéndolo en ácido sulfúrico que, a su vez, degrada la roca volcánica comenzando el proceso de pedogénesis*.

Los ejemplos señalados más arriba han sido todos procariotas: microorganismos con organización metabólica, fisiológica y genética

16 Los géiseres abundantes en este Parque Nacional, son la fuente de microbios extremos-termófilos, extremos-acidófilos y extremos-osmófilos, que tienen alto interés para usos industriales.

condensada en una sola célula. En cuanto a los eucariotas se hipotetiza un origen muchísimo más arcaico, pues se cree que el primer organismo ancestral vivió durante la era Mesoproterozoica, es decir, hace 1 a 1,6 miles de millones de años (2). Se han encontrado capas de cianobacterias fotosintéticas en las rocas sedimentarias del centro de la India, junto con organismos filamentosos y lobulados con las características de las modernas algas rojas eucariotas, mientras que recientemente se ha descrito el hallazgo de una red micelial de microhongos en rocas dolomíticas que datan de hace 715-810 millones de años en Mbuji-Mayi, en la República Democrática del Congo (3).

Pero volvamos a la actualidad. Cuando Serguéi Nikoláievich Vinogradski recibió en 1919 una carta de invitación de Émile Roux, sucesor de Louis Pasteur, preguntándole si era posible mudarse de San Petersburgo a París, él ya había descubierto y descrito bacterias quimiolitotróficas de nitrificación (es decir, aquellas que usan dióxido de carbono como fuente de carbono, y reacciones de oxidación-reducción como fuente de energía). Vinogradski estaba feliz de poder escapar, junto con su hija Elena, de la revolución bolchevique en curso, la cual le había impedido seguir desarrollando sus estudios. Fue así como en 1921 se convirtió en jefe de departamento para la investigación de la microbiología del suelo, en el Instituto Pasteur de Brie-Comte-Robert, en Sena y Marne. Este período inicial de la disciplina trajo otros descubrimientos centrales: sulfobacterias, ferrobacterias y algunas bacterias fijadoras de nitrógeno.

Este comienzo de la microbiología del suelo fue enriqueciéndose con los años y aparecieron nuevos seguidores en Francia, entre los que se destacan Jules Pochon (en la década de 1950) (4) e Yvon Dommergues (en la de 1970) (5), quienes definieron metodologías, contenidos científicos y aplicaciones específicas para la agronomía. El principal mérito de esta escuela francesa es que atesoraba los descubrimientos de la «edad de oro» de los pioneros de la microbiología (que aislaron y describieron nuevos microbios en cultivos puros), vinculando este conocimiento a las funciones

ecológicas de los diversos microorganismos. En este sentido, cada especie comienza a ser considerada no tanto individualmente, sino como miembro de grupos «fisiológicos», que son agrupaciones de géneros y especies de microbios taxonómicamente diferentes, unidos por su función ecológica prevalente.

Lo anterior es relevante, pues de esta forma los comportamientos de los microorganismos, considerados ahora colectivos, nos permiten definir tanto su papel en los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza, como su gestión en la agricultura y los bosques. Así comprendidos, pueden convertirse en la base de una agricultura «ecológica». Las técnicas de evaluación de los grupos fisiológicos presentes en el suelo, desarrolladas en la década de 1960, aunque siguen siendo válidas para las poblaciones cultivables, deben integrarse con los enfoques metagenómicos* más modernos para lograr una identificación más certera de las funciones de la población para aquellos casos donde no es posible el cultivo. A través del uso de estas técnicas será más fácil, de aquí en adelante, dirigir la gestión agronómica hacia objetivos más sostenibles. De hecho, el estudio del microbioma del suelo ha dado pasos decisivos al indicar los efectos de las prácticas de cultivo en todas las poblaciones microbianas que pueden cultivarse o no (6), en la ubicación de bacterias y microhongos en los agregados (7) y, en general, en la dinámica de la biota del suelo (8).

Detengámonos ahora en algunos aspectos de los ciclos biogeoquímicos en la agricultura, que conciernen a los elementos biogénicos carbono, nitrógeno, fósforo y azufre¹⁷.

En el caso del ciclo del carbono, la microbiota de los suelos, al comienzo de las actividades agrícolas, estaba en una relación de equilibrio entre la capacidad fotosintética y la degradación de los residuos de las plantas cultivadas y los residuos carbonosos de origen animal. Por lo tanto, el trabajo coordinado de microbios

17 Sin olvidar que otros elementos como el hierro y el manganeso, sufren reacciones de solubilización-insolubilización, oxidación-reducción, por parte de los grupos fisiológicos de ferrobacterias y las manganobacterias.

ligninolíticos*, celulosolíticos, hemicelulosolíticos*, pectinolíticos* y queratinolíticos* se desarrolló de manera constante, perturbado solo por eventos climáticos o naturales de otro tipo, como incendios, erupciones volcánicas y glaciaciones. Las mayores perturbaciones a este ciclo han sido de origen antropogénicas, con una historia más bien reciente. Es desde el comienzo del uso industrial de fuentes no renovables de energía y la introducción de compuestos de carbono no degradables que el escenario ha cambiado y que el trabajo de los microbios se ha vuelto difícil, esto es, durante poco más de un siglo. Por un lado, el aumento de la productividad de las plantas cultivadas (intensificación, uso de fuertes aportes de energía) y de sus residuos de cultivos ha aumentado dramáticamente la actividad microbiana respiratoria-degradativa, con el consecuente consumo de las reservas energéticas del suelo (las sustancias orgánicas que hoy continúan disminuyendo en los suelos cultivados). Por otra parte, esta agricultura industrial ha hecho imposible el trabajo de descontaminación microbiana, porque las enzimas de la microbiota no reconocen las estructuras de síntesis química diseñadas específicamente para no degradarse.

Aquí, con gran y creciente insistencia, hablamos de las «reservas de carbono» en el suelo, es decir, esos depósitos de carbono con los que el género humano nunca tuvo que lidiar, simplemente porque el ciclo del carbono en la naturaleza y en la agricultura estaba en equilibrio. Un balance dinámico que por miles de años transitaba entre pérdidas (emisiones de dióxido de carbono) y ganancias (fotosíntesis de plantas y microbios en materia orgánica rica en carbono, que se degradan lentamente). Frente a este desequilibrio, actualmente, se ha comenzado a hablar mucho sobre «biorremediación» como una forma de intentar detener el creciente estado de contaminación de la tierra, utilizando plantas y microorganismos. ¿Pero no sería más simple, además de lógico, evitar introducir en el medio ambiente y en la agricultura sustancias que las plantas, la biota y microbiota de los cuerpos de agua y de la tierra no pueden degradar? ¿La prevención no es la mejor cura?

En el ciclo del nitrógeno los comportamientos colectivos de los microbios también se integran en un *continuum*, tal como en el ciclo del carbono. Es importante tener en cuenta que la mayor reserva de nitrógeno se encuentra en estado gaseoso en la atmósfera, que contiene casi el 80% de este elemento. En el ciclo de transformación del nitrógeno hay una fase operada exclusivamente por bacterias, donde el nitrógeno atmosférico es fijado por bacterias aerobias y anaerobias* (*Azotobacter*, *Clostridium*), cianobacterias, bacterias simbióticas de las raíces de las legumbres (rizobio) y de las no leguminosas (actinobacteria *Frankia*), conformando varios tipos de nitrógeno orgánico, que se acumula en microbios, plantas y animales, los que van fluyendo luego hacia residuos, estiércoles y cadáveres. En sus primeras formas el nitrógeno es amonificado por bacterias y hongos. Como amoníaco estas moléculas solo pueden ser parcialmente asimilables por las plantas. Solo luego de ser nitrificado, primero en nitrógeno nitroso por bacterias quimiolitotróficas (*Nitrosomonas*, *Nitrospira*) y luego oxidado por bacterias *Nitrobacter* en nitrógeno nítrico, se transforma en un compuesto fácilmente asimilable por las plantas. También es posible observar el proceso en el sentido inverso; por ejemplo, donde existen condiciones de ausencia de oxígeno, el nitrógeno nítrico puede reducirse, es decir, desnitrificarse en formas volátiles hasta transformarse en nitrógeno gaseoso mediante la desnitrificación de bacterias. También existen bacterias que pueden fijar el nitrógeno atmosférico o desnitrificarse, dependiendo de las condiciones ambientales presentes, como lo hacen los rizobios en la rizósfera cuando el oxígeno es escaso o está ausente. La extrema flexibilidad metabólica colectiva de los diversos grupos fisiológicos permite una alta capacidad adaptativa a las cambiantes condiciones pedoclimáticas, incluso a distancias de pocos milímetros. Así, el enorme potencial microbiano siempre se puede expresar.

En el ciclo del fósforo a veces podemos ver que las plantas enfrentan verdaderas desventuras sin la ayuda de los microbios. Este es el caso del cultivo de trufas. En 1990, después de muchas dudas, pero alentado por un par de visitas a las plantaciones de trufa en Piamonte y Marche, tuve la idea de cultivarlas. Para esto, es-

cogí un anfiteatro natural en medio de las colinas de Vinci, un área de un par de hectáreas, cercanas a San Miniato, una zona que históricamente ha sido adecuada para las trufas *Tuber magnatum* y *Tuber melanosporum*. La presencia de una hermosa laguna, también habitada por algunas garzas grises, al pie del anfiteatro, me pareció un buen seguro para el riego de emergencia en caso de sequía. Lo primero fue la preparación del terreno, dibujando líneas de semicírculo donde se plantaría la siguiente primavera roble, cedro del Líbano, roble inglés y cistus en la parte superior, y más abajo, hacia el estanque, sauce y álamo negro. En el vivero las novecientas plántulas habían sido micorrizadas con hongos simbióticos. Una vez plantados era necesario rodear cada árbol con redes de alambre para evitar que las liebres y otros animales hicieran comidas lujosas con las hojas recién nacidas. En la primavera del año siguiente observamos que algunas especies, en las cuales las micorrizas no habían echado raíces, no evidenciaban crecimiento. Algo importante de considerar fue que este suelo era rico en cal activa, con la consiguiente probable insolubilización del fósforo. Se realizó una prueba adicional y se trataron veinte árboles alrededor del pie con carbonato de calcio, para insolubilizar completamente el fósforo del suelo en forma de fosfato tricálcico. Después de algunas semanas, las plántulas tratadas mostraron signos claros de retraso en el crecimiento. Pero después de algún tiempo prevalecieron las micorrizas y las plantas comenzaron a prosperar nuevamente. Para evitar perder tanto el primer grupo de árboles, como también los veinte en que se insolubilizó el fósforo del suelo, se procedió a una segunda micorrización utilizando suspensiones de esporas para la inoculación cerca de las raíces. La primavera siguiente volvieron a brotar muy bien, una señal evidente de que la micorrización logra superar el problema de la asimilación del fósforo insoluble. La producción de trufa blanca comenzó en el tercer año después de la siembra, al año siguiente de la negra. Finalmente, había prevalecido la cooperación total entre plantas y hongos, y las trufas también estaban llenas de bacterias¹⁸, como siempre.

18 En su mayoría *Pseudomonas fluorescens*, a una densidad de hasta 100 millones de células cultivables por gramo de trufa.

En el caso del azufre, este se encuentra disponible en el suelo en forma orgánica e inorgánica, pero la deficiencia de este elemento se está convirtiendo en un problema grave en algunos territorios. Un ejemplo de esto es lo que sucede en el Cerrado brasileño, donde debido a las prácticas agronómicas (aumento de productos fertilizantes con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, pero sin azufre) y a las altas exportaciones de biomasa vegetal (como resultado del aumento de los rendimientos por hectárea), la reducción de las emisiones de azufre a la atmósfera en forma de dióxido de azufre está siendo alarmante.

Generalmente, el 95% del azufre en el suelo está presente en forma orgánica en los horizontes superficiales. Sin embargo, esta forma no puede ser fácilmente asimilada por las plantas, contrario a lo que ocurre con su forma inorgánica, el sulfato. El azufre orgánico es una fuente potencial importante de este elemento, pero necesita ser mineralizado*.

Se conocen diversas formas de azufre orgánico, por sus diferentes estados de oxidación, vinculados a la sustancia orgánica más o menos humificada. Las formas más pequeñas incluyen mono, di y polisulfuros, tioles y tiofenos; aquellos con un estado de oxidación promedio incluyen sulfóxidos y sulfonatos; finalmente, los altamente oxidados son representados por los ésteres de sulfato. Esta variedad de formas de azufre en el suelo requiere una alta biodiversidad de la microbiota, que sea capaz de inmovilizarlo, mineralizarlo, oxidarlo y reducirlo, a través de un notable espíritu de colaboración de actividades enzimáticas. Fue el propio Vinogradski, en 1887, quien descubrió que las bacterias del género *Beggiatoa* pueden usar el sulfuro de hidrógeno como fuente de energía y al dióxido de carbono como fuente de carbono. Martinus Willem Beijerinck, unos años más tarde, aisló dos bacterias, *Thiobacillus denitrificans* y *Thiobacillus thioparus*, que son poderosos oxidantes de azufre.

Cuando la sustancia orgánica tiene una relación carbono/azufre superior a 400, prevalece la inmovilización, aunque sea temporal

del sulfato fácilmente asimilable por las plantas. Cuando, en cambio, los residuos orgánicos (animales y plantas, la biomasa microbiana con sus metabolitos y las sustancias humificadas) tienen una relación carbono/azufre inferior a 200, prevalecen los microbios que mineralizan. Cuando la proporción está entre 200 y 400, no hay cambios sustanciales del sulfato mineral en la solución circulante en la rizósfera, en cuanto las actividades microbianas de organización y las de mineralización, están en equilibrio.

Y también hay sulfobacterias con múltiples actividades sobre azufre y hierro, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, capaces de oxidar hierro y tiosulfato. Se han aislado varias especies de *Paracoccus* capaces de oxidar tiosulfatos, tetracionatos, tiocianatos, sulfuros y azufre elemental de la rizósfera de plantas leguminosas. Este último también puede ser oxidado por algunas especies rizosféricas de leguminosas y cereales de *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Azospirillum* y *Pseudoxanthomonas*. Una vez más la biodiversidad funciona, es decir, la interacción del comportamiento colectivo de los microbios ayuda a la nutrición de las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Colman, D., Lindsay, M. y Boyd, E. (2019). Mixing of meteoric and geothermal fluids supports hyperdiverse chemosynthetic hydrothermal communities. *Nature Communications*, 10 (1). doi: 10.1038/s41467-019-08499-1.
- (2) Bengtson, S., Sallstedt, T., Belivanova, V. y Whitehouse, M. (2017). Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae. *PLoS Biology*, 15(3). doi: 10.1371/journal.pbio.200735
- (3) Bonneville, S., Delpomdor, F., Chevalier, C., Araki, T., Kazemian, M., Steele, A. et al. (2020). Molecular identification of fungi microfossils in a Neoproterozoic shale rock. *Sciences Advances*, 6. doi: 10.1126/sciadv.aax7599
- (4) Pochon, J. (1954). *Manuel technique d'analyse microbiologique du sol*. Paris: Ed Masson.
- (5) Dommergues, Y. y Mangenot, F. (1970). *Écologie microbienne du sol*. Paris: Ed Masson.
- (6) Piazza, G., Ercoli, L., Nuti, M. y Pellegrino E. (2019). Interaction between conservation tillage and nitrogen fertilization shapes prokaryotic and fungal diversity at different soil depths: evidence from a 23-year field experiment in the mediterranean area. *Frontiers of Microbiology*, 10. doi: 10.3389/fmicb.2019.02047.

(7) Piazza, G., Pellegrino, E., Moscatelli, M. y Ercoli, E. (2020). Long-term conservation tillage and nitrogen fertilization effects on soil aggregate distribution, nutrient stocks and enzymatic activities in bulk soil and occluded microaggregates. *Soil and Tillage Research*, 196. doi: 10.1016/j.still.2019.104482.

(8) Piazza, G., Ercoli, L., Helgason T. y Pellegrino, E. (en proceso de publicación). Soil biota metabarcoding reveals how communities are structured in occluded microaggregates under long-term conservation and conventional agriculture.



CAPITULO III

**LOS INVISIBLES Y LA
AGRICULTURA SOSTENIBLE**

CAPÍTULO III

LOS INVISIBLES

Y LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

La sociedad microbiana en la agricultura es altamente organizada. Cuando se aplica al suelo un fertilizante o abono para mejorar la nutrición de la planta, una serie de reacciones bioquímicas se ponen en marcha inadvertidamente, llevadas a cabo por microorganismos procariotas y eucariotas, fuertemente integrados entre sí, para que las plantas dispongan de elementos minerales en forma asimilable. Incluso con el uso directo de microbios en la agricultura, es posible promover la nutrición de las plantas cultivadas, defenderlas de los fitopatógenos, y ayudarlas a superar el estrés ambiental. De hecho, con miras a una agricultura productiva y sostenible, se han venido utilizando microorganismos beneficiosos desde hace bastantes años. En 1896 aparecieron en el mercado los primeros inoculantes basados en rizobio. Más adelante, en 1937, comienza el uso de bacterias para la defensa de las plantas (*Bacillus thuringiensis*) y, durante la segunda mitad del siglo pasado, se incorporan los hongos AMF (hongos micorrícicos arbusculares) con el objetivo de aumentar los rendimientos de producción.

En un estudio de metaanálisis(1) se examinaron los efectos de la micorrización del trigo desde 1975 a 2013. Basado en 333 observaciones, se aumentó hasta en un 20% el fósforo y el nitrógeno en el grano, como también el contenido y concentración del fósforo y nitrógeno de la capa superior del suelo aumentaron en un 20% y, al momento de la cosecha, la paja aumentó en un 50% el contenido de fósforo. En otro estudio(2) sobre los efectos de la inoculación de las semillas de arroz con rizobio, en consideración a su potencial como promotores del crecimiento de las plantas, la inoculación aumentó significativamente los rendimientos en el

Delta del Nilo. Se observó una mejora entre un 9.2% y 22.5% en comparación con los promedios de producción de agricultores en el área, utilizando las mismas variedades en los campos adyacentes. Esto se tradujo en un aumento de 4.8 a 7.1 toneladas por hectárea, en cinco temporadas diferentes desde el 2003 al 2008.

Hoy, en el arduo camino hacia una mejor agricultura, tenemos a disposición otras categorías de productos, como es el caso de consorcios microbianos (biofertilizantes) mejoradores del compostaje y los bioestimulantes formados por especies individuales o grupos microbianos. En Brasil están siendo utilizados los biofertilizantes que contienen fosfatos minerales, azufre elemental y *Acidithiobacillus thiooxidans* para la fertilización fosfatada de la caña de azúcar, la vid, el melón y el poroto caupí (*Vigna unguiculata*). Repetidos ensayos de campo han demostrado que el uso de consorcios microbianos, que contienen bacterias rizosféricas, saprófitos*, endófitos y hongos micorrícicos, aumentan el crecimiento de las plantas, su fructificación, la eficiencia en el uso de nutrientes, los rendimientos por hectárea y la tolerancia a un amplio espectro de estrés o tensiones abióticas¹⁹(3). Los mecanismos que permiten a las bacterias rizosféricas ejercer su acción beneficiosa incluyen la síntesis de sustancias que estimulan el crecimiento (auxinas*, giberelinas*, citoquininas), la disminución de la producción de etileno mediante la intervención de la enzima amino-ciclopropano-carboxilato desaminasa, la mayor síntesis de sustancias antioxidantes y la activación de enzimas específicas. Esto último es posible observar en el caso de la mayor absorción de zinc y cobre en el trébol de flores amarillas *Medicago lupulina* coinoculado con *Sinorhizobium meliloti* y *Agrobacterium tumefaciens*, un hallazgo que abre nuevos horizontes para la descontaminación de suelos con presencia de metales pesados.

También es posible usar virus, bacterias, actinobacterias y microhongos como agentes de control biológico de las enfermedades de las plantas. Hay 91 cepas de microorganismos registradas en

19 Los factores estresantes incluyen una amplia gama de fenómenos: temperaturas extremas, inundaciones, sequías, radiación, daños por heridas, salinidad, presencia de metales pesados y contaminantes orgánicos, entre otros.

la Unión Europea para la protección de las plantas, y al menos tres veces más productos formulados con sustancias orgánicas registrados en los distintos países de la UE. Todos los productos basados en microorganismos para la protección de plantas tienen un impacto ambiental menor que los productos sintéticos convencionales destinados al mismo fin. Esta lenta progresión desde la agricultura tradicional, pasando por la convencional, hasta llegar a una consciente²⁰ (que incluye las diversas formas de agricultura orgánica, biodinámica, simbiótica y sintrópica, entre otras) se basa, por un lado, en la observación de que los medios de producción convencionales ya no son suficientes para garantizar la compatibilidad ecológica de la gestión agronómica y, por otro lado, en el hecho que la innovación biotecnológica permite, cada vez más, conciliar los objetivos de mantener los rendimientos de producción, al mismo tiempo que generar un menor impacto en la salud humana, animal y ambiental.

Esta evolución en la forma de hacer agricultura ha pasado recientemente por importantes etapas intermedias. La agricultura conservativa de los años 90 se fijó el objetivo de mantener la biodiversidad y la materia orgánica en el suelo mediante la diversificación de cultivos, la reducción de la labranza o, incluso, la adopción de la no labranza (como en el caso de las praderas en la crianza extensiva de animales). La agricultura regenerativa de la última década ya no tiene como objetivo el mantenimiento, sino más bien busca el aumento de la materia orgánica y la microbiota en el suelo, teniendo en cuenta las características nutraceuticas* de los alimentos producidos. Este impulso regenerativo va en sintonía con la creciente y contundente evidencia científica que da cuenta

20 N del T. Nos parece importante puntualizar que la agricultura tradicional se entiende en este contexto como aquella práctica arcaica, rastreando su origen en miles años, hasta la llegada de la denominada «revolución verde», que daría inicio a la agricultura convencional, caracterizada entre otras cosas por los monocultivos y el uso intensivo de agroquímicos. El término «agricultura consciente» es una modificación nuestra, pues el autor utiliza en el texto original la palabra en inglés *smart*, cuya traducción literal sería inteligente. La palabra consciente integra las nociones de pensar, observar lo visible o imaginar lo invisible, y percibir, manteniéndose abierta y atenta a la consideración de otras formas de existir, lo cual es una de las temáticas centrales del presente texto.

de la disminución generalizada de la materia orgánica en los suelos en la zona ecolimática mediterránea. Informes de agencias internacionales (como la FAO y la Agencia Europea del Medio Ambiente) reportan un contenido menor al 2%. A estas alturas, sabemos que el mantenimiento de la biodiversidad funcional en el suelo se puede lograr cuando el contenido de carbono orgánico es mayor al 1.75%, es decir, cuando la materia orgánica es mayor al 3.5%(4). Por debajo de este umbral, los grupos fisiológicos que apoyan los ciclos biogeoquímicos ya no funcionan con el sistema de «ayuda mutua» y, en consecuencia, se deben aumentar los aportes de energía, principalmente la aplicación de fertilizantes. Esto contrasta con la sustentabilidad del sistema productivo, que se basa precisamente en la biodiversidad funcional de los suelos. De ahí que la materia orgánica no solo debe mantenerse, sino incrementarse junto con la biodiversidad de la biota del suelo.

En la última década, el desarrollo de medios de investigación más potentes, especialmente molecular, ha permitido aclarar el fundamental rol de la microbiota del suelo. Actualmente, sabemos que el manejo agronómico influye en el perfil numérico y funcional de la microbiota. Las comunidades bacterianas están estructuralmente influenciadas por la labranza, a diferencia de las fúngicas y la rizósfera, que están mayoritariamente influenciadas por el manejo agronómico y, en un grado menor, por la labranza. También recientemente sabemos que de igual manera que existe un microbioma núcleo de la rizósfera, existe un microbioma núcleo de cada suelo, es decir, una fracción de biomasa más conservada, y que solo se modifica con los cambios pedoclimáticos y los manejos agrícolas.

Los suelos boscosos tienen dinámicas muy diferentes de las cultivadas. Por ejemplo, cuando la materia orgánica se acumula en la superficie, los microhongos tienden a dominar y generalmente a acidificarse, gracias a la producción de ácido cítrico y de ácido oxálico que alcaliniza el calcio. Al mismo tiempo que las redes miceliales prevalecen, las sustancias húmicas permanecen en las capas superficiales y el microbioma procarota reduce su biodiversidad a favor del bioma eucariota: oligoquetos, isópodos, colémbolos,

protozoos, rotíferos, nematodos²¹ y también los depredadores de estos. La deforestación causa fallas ecológicas inmediatas con la estimulación de bacterias desnitrificantes y la consiguiente pérdida de nitrógeno en forma de compuestos volátiles. Los depósitos de carbono se agotan y la reconstitución de la materia orgánica suficiente para mantener la biodiversidad funcional puede llevar incluso siglos. La deforestada isla de Rapa Nui²² puede considerarse, en este sentido, como un claro ejemplo representativo de lo que sucede en nuestro planeta, demostrándonos en menor escala el dramático final al que toda la civilización podría llegar si continuamos ignorando esta compleja red de relaciones que configuran el todo.

El logro de la sostenibilidad en la agricultura, solo será posible de la mano de la investigación y la innovación. Seguramente nos tomará aún algo de tiempo antes de alcanzarla plenamente. Surgirán siempre nuevas dificultades que superar y viejos errores que enmendar. En una dirección complementaria, afortunadamente hoy hemos comenzado a aprender de la observación de formas de vida de pueblos y culturas que han evolucionado mediante prácticas distintas a nuestra agricultura moderna. Ejemplos de modos de vida sostenibles hay muchos y presentes en diversos territorios, como es el caso del del grupo étnico de los bosquimanos (cazadores-recolectores) entre la antigua capital Tsumeb, en Namibia, y el delta del Okavango, en Botswana; o los arbóreos (cazadores-pastores) de Ogadén, en el Cuerno de África; de los aborígenes de Kakadu (cazadores-recolectores), en el noreste de Australia; y de los Waorani (cazadores) de la región de Yasuní, en

21 Los nematodos reciben el nombre de micófagos, ficófagos y fitófagos, según se alimenten de hongos, algas u hojas.

22 La deforestación en Rapa Nui marcó en el año 1570 d.C. la transición desde la primera civilización, la de los Mohai, hasta la segunda, la del hombre pájaro. Las laderas del volcán Rano Kao, del que se derivaron los Mohai y los valles de toda la isla antes del siglo XIII, estaban cubiertos por la palma de Rapa Nui *Paschalococcus* dispersa y bosquecillos de arbustos *Sophora toromiro*, *Trema sp.*, *Acalypha sp.*, *Macaranga sp.*, *Metrosideros sp.* Pero una vez que la palma y numerosas especies de arbustos desaparecieron por causas antropogénicas, estallaron guerras de clanes con episodios de canibalismo. Incluso hoy la isla no tiene un patrimonio forestal real.

la selva amazónica ecuatoriana atravesada por el río Napo.

Todos estos pueblos tienen en común un increíble y vasto conocimiento de los recursos naturales, en particular de las hierbas medicinales y su territorio. Desafortunadamente, un gran número de estos pueblos se encuentran al borde de la extinción, confinados muchas veces, producto de la influencia de nuestra civilización, a hábitats hostiles y cada vez más reducidos. Existen ejemplos sorprendentes de tradiciones culturales de gestión sostenible de la agricultura en áreas consideradas erróneamente atrasadas, bajo una óptica eurocéntrica y cientificista.

Entre los clanes del pueblo Wachagga, entre Kenia y Tanzania, en las laderas del Kilimanjaro, la agricultura sostenible siempre se ha practicado, tanto que hoy merece menciones oficiales de la FAO y otras agencias internacionales. Durante una misión a este territorio tuve la suerte de encontrar una plantación de banano, en el que la fertilización se realizó con residuos de cultivos compostados. Normalmente en África central y oriental, en los bordes de las plantaciones de banano, se ven hojas y tallos abandonados a la combustión, literalmente incineradas por el sol. En cambio, en los jardines Kihamba de Wachagga toda esta materia orgánica, producida sin pesticidas, pero haciendo el mejor uso de la biodiversidad de los cultivos, se recolecta, se fragmenta y coloca en montones que se voltean regularmente para la maduración de un compost, que luego se reutiliza como un acondicionador del suelo. Sin conocer los microorganismos lignocelulosolíticos, la sabiduría ancestral de esos clanes les permite practicar una agricultura perfectamente sostenible.

La agricultura moderna surge del ejercicio milenario de domesticación de plantas, que ha implicado, entre otras cosas, el traslado desde sus centros de origen biológico, como ocurrió con el maíz, la papa, el tomate, las legumbres, los cereales, los pseudocereales y muchos cultivos más. Desafortunadamente, en este camino histórico hemos perdido la estrecha relación que habían sostenido las plantas con su microbioma simbiótico (5). En esta misma línea, el mejoramiento genético de las plantas, especialmente durante el siglo pasado, ha perdido la oportunidad de orientar las selec-

ciones no solo a la parte superior, sino también y conjuntamente a la parte rizosférica. De hecho, muchas plantas cultivadas interactúan de manera diferente con sus socios microbianos beneficiosos, en comparación a sus progenitores. La alteración de los rasgos genético-fisiológicos que regulan la simbiosis puede deberse a la acumulación de mutaciones perjudiciales en la planta, o ser favorecidas directa o indirectamente por la selección realizada por el hombre, o ser selectivamente neutras en las condiciones de cultivo. La reducción de los rasgos simbióticos ocurridos durante la domesticación o debido a un ajuste incorrecto de la selección genética, genera una falta o un pobre reconocimiento de los socios microbianos de las raíces, como si ya no pudieran entablar la conversación que los ha llevado a la simbiosis a lo largo de milenios. Urge hoy avanzar cambiando los paradigmas de la selección genética, sobre todo teniendo en cuenta los rasgos genéticos que conducen a la formación de simbiosis. A la espera de que estas nuevas semillas o plantas estén disponibles, podemos comenzar seleccionando las combinaciones naturales más efectivas entre el genotipo de la planta cultivada y el genotipo de microorganismos, para ser utilizados como un inóculo en el campo.

La extrema flexibilidad metabólica colectiva y la adaptabilidad de los microbios pueden sucumbir cuando el manejo agronómico se vuelve agresivo (fuertes aportes de fertilizantes y pesticidas, laboreo profundo, intensificación de cultivos herbáceos y arbóreos en presencia de pequeñas cantidades de materia orgánica con lenta degradación). Cuando esto sucede, el microbioma del suelo entra en estrés y disbiosis, y la biodiversidad funcional se ve profundamente afectada. Puede suceder entonces que incluso debemos recurrir a la fertilización nitrogenada de las legumbres, ¡una verdadera contradicción ecológica, teniendo en cuenta que en los últimos 12000 años esto nunca fue necesario! Por otra parte, los ciclos biogeoquímicos en los suelos no perturbados son mayores que los que se manejan con la agricultura convencional, y en la relación carbono/nitrógeno/azufre después de repetidos ciclos de cultivo, el azufre se vuelve menos mineralizable. Por otro lado, con un manejo agronómico conservacionista, de mínimo o sin laboreo del suelo y con rotaciones de cultivos, hay un aumento en la materia orgánica, menores pérdidas de nutrientes y mayor

mineralización de azufre por la acción de las sulfatasas que aportan las *Pseudomonas* (omnipresentes bacterias heterotróficas) y las *Paracoccus* (bacterias mixotróficas).

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Pellegrino, E., Opik, M., Bonari, E. y Ercoli, L. (2015). Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of field studies from 1975 to 2013. *Soil Biology and Biochemistry*, 84, 210-217.
- (2) Yanni, Y., Dazzo, F., Squartini, A., Zanardo, M., Zidan, M. y Elsadany, A. (2016). Assessment of the natural endophytic association between Rhizobium and wheat and its ability to increase wheat production in the Nile delta. *Plant and Soil*, 407, 367-383.
- (3) Rouphael Y. y Colla, G. (2020) Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2020.00040.
- (4) Lynch, J., Benedetti, A., Insam, H., Nuti, M., Smalla, K., Torsvik, V. y Nannipieri, (2004). Microbial diversity in soil: ecological theories, the contribution of molecular techniques and the impact of transgenic plants and transgenic microorganisms. *Biology and Fertility of Soils*, 40, 363-385.
- (5) Porter, S. y Sachs, J. (2020). Agriculture and the disruption of plant–microbial symbiosis. *Trends in Ecology and Evolution*, 2648, 1-14. doi: 10.1016/j.tree.2020.01.006.



The background of the page is a black field filled with numerous white, thin, wavy lines and small white dots. These elements represent a microscopic view of soil, likely showing the intricate root systems of plants and the presence of various soil microorganisms such as bacteria and fungi. The overall effect is a dense, textured pattern that suggests a complex and active biological environment.

CAPITULO IV

**SALUD DEL SUELO, PLANTAS,
ANIMALES Y HUMANOS**

CAPÍTULO IV

SALUD DEL SUELO, PLANTAS, ANIMALES Y HUMANOS

Si bien es intuitivo considerar que los alimentos saludables son buenos para nuestra salud, quizás sea un poco menos intuitiva la idea de que solo un suelo saludable puede producir alimentos saludables. Un suelo contaminado, cansado, enfermo y no resistente, difícilmente puede producir alimentos saludables, libres de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) y bien dotados de principios nutraceuticos. La salud del suelo fue definida en 2019 por el Servicio Nacional de Conservación de Recursos del Departamento de Agricultura de los EE. UU. como «la capacidad continua del suelo, para funcionar como un ecosistema vivo que sustenta plantas, animales y humanos» (1). Bajo esta definición, los parámetros para describir el estado de salud de una tierra agrícola, siempre en relación con una zona pedoclimática y un manejo agronómico específico son: características fisicoquímicas (pH*, contenido de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, microelementos y materia orgánica); mecánicas (textura y contenido en arena, limo y arcilla, macro y microagregados); bioquímicas (actividades enzimáticas); y biológicas (bioma y microbioma). La novedad con respecto a las definiciones anteriores se observa en la inclusión de actividades enzimáticas, la identificación de macroagregados y microagregados²³ pero, sobre todo, a la presencia de un ecosistema vivo que sustenta plantas y animales, es decir, un bioma y un microbioma del suelo. En otras palabras, se reconoce igual dignidad e importancia a los seres vivos del suelo con respecto a todos los demás parámetros

23 En el caso de los microagregados, se consideran incluso aquellos ocluidos, que representan el asiento de la “vida” de un suelo.

físicos, químicos y mecánicos.

El bioma se describe en todos sus componentes: densidad, composición, estructura, (sub)poblaciones cultivables tanto en densidad como biodiversidad de la meso y microbiota. Al medir la cantidad de ADN extraído del suelo se estima la biomasa microbiana, y con la amplificación cuantitativa del ADN ribosómico* se pondera la densidad de bacterias y hongos, obteniéndose así los datos de abundancia y densidad del bioma. La estructura genética se estima a través de la genotipización. Finalmente, el inventario taxonómico y el índice de biodiversidad se describen a través de una secuenciación masiva, logrando así los datos generales de la composición y diversidad del bioma. De esta manera, es posible construir mapas de salud del suelo, integrando la información sobre la microbiota, la meso y la microbiota, con información de la composición física, química y mecánica del suelo. En un futuro no muy lejano, estos mapas se integrarán a su vez con otros datos: climáticos, de depósitos de carbono, informes de los manejos agronómicos y datos sobre el estado de la contaminación.

Si un suelo se perturba y se altera uno o más de sus caracteres, pueden surgir graves disfunciones, que en el caso de la microbiota se denominan disbiosis. La investigación hasta hoy se ha ocupado más de lo que sucede sobre el suelo que de lo que sucede en el suelo, lo cual puede constituir una de las razones por las que sabíamos y nos preocupábamos poco sobre esto. Como una excepción frente a este desinterés, encontramos el caso de Leonardo da Vinci, quien con su mente iluminada como pocas, en el siglo XVI afirmaba que «sabemos más sobre el movimiento de los cuerpos celestes que sobre el mundo bajo nuestros pies». En la misma línea, pero de un modo más sistemático, se encuentra el desarrollo realizado por la Academia de Georgofili²⁴, nacida

24 Como señala Zeffiro Ciuffoletti (2), esta academia entre los siglos XVIII y XIX comienza a reconocer la importancia central del suelo, considerando que «con los nuevos cambios de cultivos que redujeron la tierra de barbecho* y favorecieron la introducción de plantas forrajeras (como alfalfa, trébol o nabo) no solo mejoraron las propiedades químicas del suelo, sino que se potenció la cría de ganado, favoreciendo la mayor disponibilidad de energía para el trabajo rural; con mayor disponibilidad de fertilizantes naturales».

en Florencia en el año 1753 por iniciativa de Ubaldo Montelatici, canónigo Lateranense. Los miembros de esta academia afirmaron la necesidad de cuidar el suelo y se plantearon el objetivo de «hacer experimentos y observaciones continuas y bien reguladas, para llevar a la perfección el muy benéfico arte del cultivo toscano».

Las alteraciones en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo dan como resultado una menor infiltración de agua, un aumento de la compactación y de la erosión, y una reducción de la actividad biológica y de la fertilidad. Esto implica que la capacidad de regeneración de un suelo perturbado se reduce considerablemente, en comparación con un suelo no perturbado²⁵. Para los biólogos es sabido desde hace mucho tiempo que la compactación y la perturbación antropogénica provocan una reducción en las poblaciones de organismos benéficos del suelo: poblaciones cultivables viables de bacterias y microhongos²⁶, nematodos, micro y macroartrópodos. Por el contrario, estas perturbaciones generan un aumento de los microorganismos fitopatógenos. A veces debemos pensar más detenidamente en estos datos cuando se desencadenan fenómenos epidémicos, como los que ocurrieron recientemente en la región italiana de Puglia con la propagación de *Xylella fastidiosa* subespecie *pauca* en mono cultivo de olivos.

Recordemos que la regeneración natural de suelos alterados lleva cientos o miles de años, y que la recuperación asistida por humanos resulta muy costoso para devolver el suelo a sus condiciones normales si se trata de grandes superficies. Estudios recientes de metagenómica y metagenética* (3) confirman que las actividades repetidas de perturbación en el suelo provocan una disminución de la biodiversidad funcional y alteran los procesos involucrados en los flujos de nutrientes y energía. Es decir, la resiliencia del suelo está ligada a su fracción viva, bioma y microbioma, al mismo

25 Un 0,3% de la capacidad de recuperación para los parámetros físicos, químicos y mecánicos únicamente.

26 En suelos perturbados la longitud de las hifas por gramo de suelo disminuye en más del 75%.

tiempo que a la biodiversidad, la que más allá de la riqueza de especies juega un papel fundamental en la estabilidad funcional de la comunidad. Las alteraciones de esta tiene importantes consecuencias agronómicas.

En cuanto a la contaminación de origen antropogénico, conviene recordar que no existe ningún compuesto natural en la Tierra, desde rocas hasta depósitos de azufre, ni ninguna sustancia orgánica, por compleja que sea, que no pueda ser transformada con el tiempo mediante la acción de microorganismos. No ocurre lo mismo con los compuestos sintéticos, quizás producidos precisamente para ser persistentes en el medio ambiente. En agricultura, a excepción de la contaminación por derivados del petróleo, la principal fuente de riesgo ambiental y para la salud humana es la estructura química, la aplicación incorrecta y el almacenamiento de plaguicidas químicos. Las principales clases de pesticidas orgánicos incluyen organofosforados, organometálicos, organoclorados, piretroides y carbamatos. Los depósitos de material obsoleto esparcidos por todo el mundo se estiman en alrededor de medio millón de toneladas, y la Organización Mundial de la Salud señala que al año el número de personas intoxicadas por el uso de estos productos alcanzaría los tres millones. Precisamente por estas razones, desde 2005, tanto en la Unión Europea como en otros países del área de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), se ha comenzado a realizar una profunda revisión de los criterios de autorización de comercialización para estos productos, con límites máximos de residuos más estrictos, una evaluación severa de los efectos sobre los organismos no objetivo y el destino ambiental; existiendo actualmente drásticas limitaciones sobre el número y tipo de productos en el mercado.

¿Cómo pueden ayudar los microbios a descontaminar el suelo y las aguas subterráneas? La biodegradación microbiana de los xenobióticos, que van desde las sustancias plásticas²⁷ hasta los pes-

27 A excepción de las no degradables como el poliestireno.

tizadas, se denomina «biorremediación» y es un método consolidado de eliminación de contaminantes del medio ambiente(3). Para este proceso, se han utilizado alfa, beta, gammaproteobacterias, actinobacterias y flavobacterias. Entre las alfaproteobacterias se emplean varias especies de *Sphingomonas*, entre las beta proteobacterias diversas especies de *Burkholderia* y *Neisseria*, entre las gammaproteobacterias se han utilizado especies de *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Acinetobacter* y *Moraxella*.

La biodegradación completa no puede ser operada por un solo microorganismo, sino por consorcios microbianos, como hemos visto para la degradación de las ligninas, y conduce a la producción de dióxido de carbono y agua, al tiempo que proporciona energía a los microbios degradantes.

En el caso de los procesos de oxidación incompletos, a menudo estos conducen a compuestos menos tóxicos que el pesticida inicial. Este fue el caso del endosulfán que, mediante cepas de *Klebsiella*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium* y *Bacillus*, se biodegrada a endosulfán-diol, -lactona y -éter. Para suelos que no tienen suficiente biodiversidad de microbiomas para operar las diversas biodegradaciones, a menudo se recomienda agregar iniciadores de consorcios microbianos, dada la complejidad de los metabolitos intermedios y la recalcitrancia de la molécula inicial.

Con respecto a los suelos contaminados por metales pesados, se recurre de manera frecuente a la «fitorremediación» o descontaminación con plantas capaces de acumular metales en sus tejidos. Pero la alta concentración y toxicidad de los metales pesados puede conducir a una pobre producción de biomasa vegetal y, por lo tanto, a una pobre eficiencia del proceso. Con la ayuda de microorganismos rizosféricos que producen sustancias fitoestimulantes, se puede superar esta limitación, como en el caso de *Bacillus cereus*, que redujo los efectos deletéreos del cromo, permitiendo el crecimiento de lentejas (*Lens culinari*) en suelos contaminados con metales pesados. También se obtuvieron resultados beneficiosos similares con bacterias endofíticas.

El uso de microorganismos beneficiosos o consorcios microbianos se pueden utilizar como tratamientos de suelo, semillas o plantas, y conduce a una mejora en la calidad de los alimentos. El tratamiento del suelo puede realizarse bien con cultivos líquidos a distribuir por aspersión o con riego, o con productos granulados. Aunque es más fácil de implementar, el riesgo de una disminución en la densidad de la población microbiana activa debido al «stress del trasplante» es alto. En otras palabras, los microorganismos introducidos deben adaptarse inmediatamente a las nuevas condiciones tróficas y ambientales, con lo cual el número de células vivas y que se multiplican activamente por gramo de suelo puede disminuir rápidamente.

Para superar este inconveniente, ahora se utilizan mejoradores de suelo compostados, que permiten que las células microbianas adheridas a las partículas de compost (adaptadas y multiplicándose activamente) permanezcan en su sustrato cuando se introducen en el suelo. Por lo tanto, pueden continuar multiplicándose durante el tiempo necesario para colonizar las áreas alrededor del grano o partícula de compost. El «stress del trasplante» es menor y los microorganismos que en ese momento se encuentran viables, no entran en fase de multiplicación, es decir, permanecen en una especie de letargo.

En cuanto al tratamiento de plantas, este puede ser realizado mediante distintos procedimientos: la *inzaffardatura*²⁸ de las plántulas, a través del método habitual de inoculación con hongos micorrízicos, por inoculación de la semilla o pulverizando sobre la parte epigeal de la planta²⁹. La inoculación de semillas es un método tradicional, muy utilizado para rizobios y legumbres, que pone a los microbios en contacto directo con la semilla en el momento de la siembra. Si la densidad de células viables que se pueden culti-

28 N del T. Se conservó la expresión original del texto, que hace referencia a la práctica de sumergir las raíces de las plantas en una pasta de tierra de cultivo, arcilla y guano.

29 El método de pulverización especialmente utilizado con productos para la protección contra fitopatógenos epigeos.

var por semilla es superior a mil (objetivo fácilmente alcanzable con semillas grandes, más difícil de conseguir con semillas muy pequeñas), la probabilidad de adherencia de estos microorganismos en el punto donde emerge la raíz será suficiente para asegurar su penetración como endófitos.

Volvamos a los efectos beneficiosos de los biofertilizantes. En el caso del cultivo del trigo, la biofertilización mejora la síntesis de las dos subunidades proteicas más importantes en el gluten, es decir, la glutenina, con alto y bajo peso molecular (4). En esta gramínea (y también en la cebada), la micorrización conduce a un aumento en la asimilación de los factores nutricionales del hierro y el zinc (5). Por otra parte, se ha observado que la leche de animales criados con maíz tratado con consorcios microbianos ha mejorado las propiedades nutraceuticas (6). Una vez que se ha verificado la interacción genotipo/genotipo entre el microorganismo (o el consorcio microbiano) y el de la planta, se ha comprobado que el uso de biofertilizantes que contienen consorcios microbianos hace aumentar la síntesis de antioxidantes (7) en fresas, lentejas y trigo duro, mientras que en los tomates disminuye el contenido de nitrato. Se ha comprobado también que la biofertilización micorrizica mejora las cualidades nutraceuticas de algunos cultivos, como en el caso del tomate (8). Esto se debe al hecho de que la micorrización provoca cambios metabólicos en las raíces de las plantas, un aumento de la tolerancia al estrés biótico y abiótico, y un aumento de la biomasa (9). Los cambios en la fisiología de la planta huésped son el resultado de cambios transcripcionales (10) y de una regulación diferente de los genes del metabolismo primario y secundario. Por otra parte, la mayor resistencia al estrés biótico de la planta micorrizada está vinculada a la síntesis de especies químicas reactivas al oxígeno y a la mayor producción de sustancias antioxidantes, fenólicas y carotenoides.

La «Nación de las Plantas», excelentemente descrita por Stefano Mancuso (11), encuentra en los invisibles del suelo aliados indispensables para un crecimiento sano y vigoroso, y para la producción de alimentos con mayor valor nutraceutico, tanto en cultivos

herbáceos como arbóreos. Si en el futuro cercano la selección del germoplasma de la planta llegara a implementarse teniendo en cuenta la funcionalidad de la parte subterránea, habrá menos necesidad de llevar a cabo evaluaciones preliminares de la efectividad de los biofertilizantes o bioestimulantes individuales, como está ocurriendo en la actualidad en el caso del maíz.

El vasto mundo de lo invisible reconoce los estímulos y las acciones de las plantas, animales y humanos, y se comporta en consecuencia. Pero nosotros ¿estamos en condiciones de hacer lo mismo con ellos?

BIBLIOGRAFÍA

- (1) <http://www.nrc.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health>
- (2) Ciuffoletti, Z. (2014). Dalla rivoluzione agricola alla «rivoluzione verde» e il caso italiano. En «*Quaderni dei Georgofili*» 14-I, *Dai prodotti agricoli primari ai consumatori. I percorsi della storia*, (pp.7-15). Florencia: Georgofili.
- (3) Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z. y Wassie, M. (2017). The Role of Microorganisms in Bioremediation. A Review. *Open Journal of Environmental Biology*, 2(1), 38-46.
- (4) Dal Cortivo, C., Ferrari, M., Visioli, G., Lauro, M., Fornasier, F., Barion, G. et al. (2020). Effects of Seed-Applied Biofertilizers on Rhizosphere Biodiversity and Growth of Common Wheat (*Triticum aestivum L.*) in the Field. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2020.00072.
- (5) Coccina, T., Cavagnaro, T., Pellegrino, E., Ercoli, L., McLaughlin, M. y Watts-Williams, S. (2019). The mycorrhizal pathway of zinc uptake contributes to zinc accumulation in barley and wheat grain. *BMC Plant Biology*, 19. doi: 10.1186/s12870-019-1741-y.
- (6) Tripaldi, C., Di Giovanni, S., Iacurto, M., Locatelli, S., Rinaldi, S. y Meo, D. (2020). Health, physico-chemical and technological characteristics of milk as affected by including mycorrhized maize grain in the diet of dairy cows. *Journal of Food Safety and Food Qua-*

lity. doi: 10.2376/0003-925x-71-45.

(7) Raiola, A. (2015). Improving of Nutraceutical Features of Many Important Mediterranean Vegetables by Inoculation with a New Commercial Product. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 16 (8), 1-9.

(8) Giovanetti, M., Avio, L., Barale, R., Ceccarelli, N., Iezzi, A., Mignolli, F. et al. (2012). Nutraceutical value and safety of tomato fruits produced by mycorrhizal plants. *British Journal of Nutrition*, 107, 242-251.

(9) Smith, S. y Read, D. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3ra ed.). Londres: Academic Press.

(10) Fiorilli, V., Catoni, M., Miozzi, L., Novero, M., Accotto, G y Lanfranco, L. (2009). Global and Cell-Type Gene Expression Profiles in Tomato Plants Colonized by an Arbuscular Mycorrhizal Fungus. *New Phytologist*, 184, 975-987.

(11) Mancuso, S. (2019). *La nazione delle piante*. Roma.: Gius. Laterza & Figli.





CAPITULO V

**LA CARTA DE DERECHOS
MICROBIANOS**

CAPÍTULO V

LA CARTA DE LOS DERECHOS MICROBIANOS(*)

1. El derecho a existir como seres vivos.

Los microbios son seres vivos y comparten los mismos derechos con otros organismos de mayor tamaño, el primero de los cuales es ser libres de existir.

2. El derecho a la salud de los medios ambientales.

Los microbios tienen derecho, como todos los demás seres vivos, a habitar en un entorno saludable (ya sean estos terrestres, acuáticos o aéreos), sin verse amenazados por la introducción de compuestos no degradables o tóxicos.

3. El derecho a la convivencia pacífica con la biota vegetal.

Los microbios tienen el derecho de poder convivir con todas las plantas, con las cuales han establecido relaciones de cooperación y coexistencia durante miles de millones de años, ayudándose mutuamente en su evolución, alimentación y salud.

4. El derecho a la convivencia pacífica con la biota animal.

Los microbios tienen el derecho de poder convivir con todos los animales, con los cuales han establecido relaciones de coexistencia y cooperación desde la aparición de estos últimos en nuestro planeta, ayudándoles a alimentarse y a crecer en salud.

5. El derecho a la convivencia pacífica con la biota microbiana.

Los microbios tienen el derecho de poder convivir con todos los demás microorganismos, con los cuales han establecido relaciones de coexistencia y cooperación en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en esta Tierra, en la transformación de rocas en suelo y actuando como promotores de las transformaciones en todas las cadenas alimentarias.

(*) Seres vivos invisibles a simple vista, con dimensiones inferiores a un milímetro (en el orden de micrómetros). Los microorganismos pueden ser eucariotas (protozoos, hongos microscópicos y la mayoría de las algas), procariotas (bacterias y algas azul-verdes o cianobacterias). Convencionalmente, los virus también se incluyen entre los microbios, aunque estos no son capaces de replicación autónoma.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA PARA CONSULTA

- Andrews, M. y Andrews, M. (2017). Specificity in Legume-Rhizobia Symbioses. *International Journal of Molecular Sciences*. 18, 705.
- Bailly, A. y Weisskopf, L. (2012). The modulating effect of bacterial volatiles on plant growth. *Plant Signaling & Behavior*, 7, 1.
- Bassler, B. y Losick, R. (2006). Bacterially Speaking. *Cell*, 125, 237.
- Brameyer, S., Bode, H. y Heermann, R. (2015). Languages and dialects: bacterial communication beyond homoserine lactones. *Trends in Microbiology*, 23, 521.
- Burokas, A., Arboleya, S., Moloney, R., Peterson, V., Murphy, K., Clarke, G., et al. (2017). Targeting the Microbiota-Gut-Brain Axis: Prebiotics Have Anxiolytic and Antidepressant-like Effects and Reverse the Impact of Chronic Stress in Mice. *Biological Psychiatry* 82, 472- 487.
- Faduma, H., Nuti, M., Kuneman, K. y Lepidi, A. (1978). Uso e selezione di rizobi per la batterizzazione di leguminose di nuova introduzione in Somalia. *Agricoltura Subtropicale e Tropicale*, 72, 291.
- FAO, Food and Agriculture Organization. (2020). Global Forest Resources Assessment—Key findings. doi: 104060/ca8753en.
- Garbeva, P., Hordijk, C., Gerards, S. y de Boer, W. (2015). Volatile-mediated interactions between phylogenetically different soil

bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 5, 289.

Hacquard, S., Garrido-Oter, R., González, A., Spaepen, S., Ackermann, G., Lebeis, S., et al. (2015). Microbiota and Host Nutrition across Plant and Animal Kingdoms. *Cell Host & Microbe*, 17, 603.

Hartman, K., van der Heijden, M., Wittwer, R., Banerjee, S., Walsler, J. y Schlaeppi, K. (2018). Cropping practices manipulate abundance patterns of root and soil microbiome members paving the way to smart farming. *Microbiome*, 6,14. doi: 10.1186/s40168-017-0389-9.

Lennon, Á., Buchalla, W., Zimmermann, O., Gross, U. y Attin, T. (2006). The Ability of Selected Oral Microorganisms to Emit Red Fluorescence. *Caries Research*, 40, 2.

Matsushashi, M. (1998). Production of sound waves by bacterial cells and the response of bacterial cells to sound. *The journal of General and Applied Microbiology*, 44, 49.

Miller, M. y Bassler, B. (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55, 165.

Oldroyd, G. (2013). Speak, friend, and enter: signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews. Microbiology*, 11, 252.

Reguera, G. (2011). When microbial conversations get physical. *Trends in Microbiology*, 19, 105.

Sablok, G., Roselli, R., Seeman, T., van Velzen, R., Polone, E., Giacomini, A., et al. (2017). Draft genome sequence of the nitrogen-fixing *Rhizobium sullae* type strain IS123T focusing on the key genes for symbiosis with its host *Hedysarum coronarium* L. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1348.

Schmidt, R., Etalo, D., de Jager, V., Gerards, S., Zweers, H., de Boer, W., et al. (2016.) Microbial Small Talk: Volatiles in Fungal–Bacterial Interactions. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1495.

Schmidt, R., de Jager, V., Zühlke, D., Wolff, C., Bernhardt, J., Cankar, C., et al. (2017). Fungal volatile compounds induce production of the secondary metabolite Sodorifen in *Serratia plymuthica* PRI-2C. *Nature Scientific Reports*, 7, 862.

Sender, R., Fuchs, S. y Milo, R. (2016). Revised Estimates for the Number of Human and Bacterial Cells in the Body. *PLoS Biology*, 14(8). doi:10.1371

Toju, H., Peay, K., Yamamichi, M., Narisawa, K., Hiruma, K., Naito, K., et al. (2018). Core microbiome for sustainable agroecosystems. *Nature Plants* 4, 247.

Trushin, M. (2004). Light-mediated «conversation» among microorganisms. *Microbiological Research*, 159, 1.

Verona, O. (1972). *Opere di Luigi Pasteur. In I Classici della Scienza.* Torino: UTET.

Weisskopf, L., Ryu, C., Raaijmakers, J. y Garbeva, P. (2016). Editorial: Smelly Fumes, Volatile Mediated Communication between Bacteria and Other Organisms. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2031.

Werner, S., Polle, A. y Brinkmann, N. (2016). Belowground communication: impacts of volatile organic compounds (VOCs) from soil fungi on other soil-inhabiting organisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 8651.

www.isqaper-project.eu (2016-2020) Interactive Soil Quality Assessment for Agricultural Productivity and Environmental Resilience.

GLOSARIO

Ácido indolacético: sustancias presentes en las células vegetales (ápices vegetativos, botones florales, hojas tiernas, etc.) o producidas por microorganismos, que estimulan la división celular y determinan el crecimiento de las plantas.

ADN: ácido desoxirribonucleico. Macro molécula formada por desoxirribosa, un carbohidrato de cinco carbonos, ácido ortofosfórico y cuatro bases nitrogenadas: dos purina (adenina (A) y guanina (G)), y dos pirimidina (citosina (C) y timina (T)). Está presente en todos los organismos procariotas y eucariotas, y parcialmente presente en virus. Cada segmento de ADN que contiene la información para sintetizar una molécula de proteína específica constituye un gen.

Anaerobias: bacterias cuyos procesos metabólicos se desarrollan en ausencia de oxígeno.

Auxinas: ver ácido indolacético.

Bacteroides: células con una morfología modificada de bacterias llamadas colectivamente rizobio, presentes dentro de los nódulos de las raíces de las plantas leguminosas; están presentes como células individuales o en pequeños grupos, encerrados dentro de la membrana peribacteroide y son capaces de fijar nitrógeno atmosférico.

Barbecho: práctica agronómica que consiste en dejar reposar un terreno durante un año, sin sembrarlo, pero se continúa traba-

jándolo y fertilizándolo, con el objetivo de recuperar su fertilidad para el cultivo del siguiente año.

Benceno: hidrocarburo aromático cíclico con seis átomos de carbono.

Biopelícula: estructuras extracelulares, secretadas por los propios microorganismos, adhesiva, protectora y resistentes a la penetración de antibióticos y antimicrobianos, formadas por polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos.

Celulosolítico: microorganismos capaces de degradar la celulosa como fuente de carbono y energía.

Citoquinina: sustancias de origen vegetal o microbiano con acción fitohormonal, capaces de promover el crecimiento de las células vegetales; pueden estimular el crecimiento de brotes y raíces y la germinación de semillas; son reguladoras de la división celular, la senescencia foliar y la movilización de nutrientes. Las citoquininas microbianas juegan un papel clave en el biocontrol de bacterias fitopatógenas.

Comensalismo: interacción biológica entre dos especies en las que uno se beneficia, mientras que al otro le es indiferente.

Disbiosis: alteraciones del microbioma que derivan en la incapacidad de sostener procesos metabólicos saludables.

Endófito: microorganismo que coloniza las partes internas de una planta, raíces, tallo u hojas.

Eucariota: organismo formado por una o más células que tienen un núcleo bien diferenciado que contiene la mayor parte del ADN celular, encerrado por una envoltura porosa formada por dos membranas.

Filogenética: relación de parentesco entre los distintos grupos de seres vivos.

Fitoalexina: sustancias con acción microbicida o microbiostática, generalmente de naturaleza fenólica, que se forman en plantas superiores a raíz de infecciones de patógenos o por causas abióticas.

Fitopatógenos: agentes (virus, bacterias, micoplasmas, hongos, protozoos y nematodos) capaces de provocar enfermedades en las plantas.

Flameado: operación de esterilización en laboratorio, operada con la llama de un mechero Bunsen, generalmente repetida cada vez que se abren o cierran recipientes para los que se debe evitar la entrada de microorganismos contaminantes.

Flavonoide: metabolitos secundarios siempre presentes en el mundo vegetal, de naturaleza polifenólica, que derivan de la 2-fenil-bencil- γ -pirona; incluyen auronas, dihidrocalconas, dihidroflavonoles, isoflavonas, flavonas, flavonoles, leucoantocianidinas, antocianinas y proantocianidinas. Contribuyen a la protección de las plantas contra el estrés biótico y abiótico, pero también pueden estimular la colonización de las raíces por microorganismos beneficiosos.

Giberelina: familia de hormonas vegetales diterpénicas, activas en promover la germinación de semillas, el crecimiento de tallos y raíces, y la fructificación.

Hemicelulosolítico: microorganismos capaces de degradar la hemicelulosa (xiloglucanos) como fuente de carbono y energía.

Inoculación de semillas: operación con la que se recubre la semilla con un producto a base de microorganismos, que contiene una o más especies o cepas, un adhesivo y sustancias inertes, antes de la siembra.

Kinetina: citoquinina con diez átomos de carbono, utilizada para estimular el crecimiento de células vegetales.

Ligninolítico: microorganismos capaces de degradar las ligninas como fuente de carbono y energía; a menudo son de crecimen-

to lento y pueden actuar cometabólicamente sobre las ligninas; es decir, las degradan para obtener energía, pero emplean otros compuestos más fáciles de utilizar como fuente de carbono.

Leghemoglobina: proteína producida en nódulos radiculares por las plantas leguminosas, en simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, capaz de unir oxígeno a través de un grupo hemo.

Metagenética: estudio de la secuencia cíclica de las etapas de una especie microbiana eucariota en la que se destacan las fases nucleares y la alteración de generaciones.

Metagenómica: análisis directo del ADN total extraído de una muestra ambiental, con el objetivo de definir los genomas de todos los microorganismos en ese ambiente y sus funciones potenciales en fertilidad, en ciclos biogeoquímicos y en biosanidad. El enfoque metagenómico también es capaz de identificar la presencia de microorganismos difíciles o no cultivables, o en estado de reposo.

Metilo: grupo químico $-CH_3$.

Metoxílico: grupo químico $-CH_2OH$.

Microaerofilia: capacidad de crecimiento de algunos microorganismos en presencia de bajas concentraciones de oxígeno (2-10%).

Mineralización: proceso microbiano de degradación de un compuesto orgánico hasta la producción final de agua y dióxido de carbono.

Morfotipo: clasificación de microorganismos, especialmente bacterias, en función de la forma de las células (coccica, ovoide, limoniforme, coma, bastón, espiral, filamentosa, etc.)

Nutracéutico: producto con beneficios fisiológicos para la salud usado como alternativa a los productos farmacéuticos.

Pectinolítico: microorganismos capaces de degradar las pectinas

como fuente de carbono y energía.

Pedoclimática: hace referencia a las condiciones de los factores ambientales al interior de los suelos.

Pedogénesis: proceso de formación de suelo, que concierne tanto a la alteración de la roca madre como a las transformaciones en el interior del perfil.

pH: escala de medida entre 0 y 14 que indica la acidez y alcalinidad de gases y líquidos.

Procariota: organismo formado por células individuales que no tienen un núcleo bien diferenciado, sino un nucleóide que contiene el único cromosoma; otros elementos extracromosómicos se encuentran dispersos en la célula, junto con polirribosomas y vacuolas con sustancias de reserva.

Queratinolíticos: microorganismos capaces de degradar la queratina como fuente de carbono y energía.

Ribosómico: hace referencia a lo que relaciona al proceso terminal de formación de proteínas en los ribosomas como organelos celulares.

Rizosférica: de la rizósfera como entidad ecológica que identifica las relaciones entre el suelo que rodea las raíces de las plantas, con sus exudados y los microorganismos. Las células microbianas rizosféricas están presentes en la rizósfera a una densidad de dos a tres logaritmos más alta que la del suelo no adyacente.

Saprófito: organismo procariota o eucariota que se alimenta de materia orgánica muerta o en descomposición.

Sideróforos: moléculas presentes en bacterias, con alta afinidad por el hierro; se conocen varios cientos y son específicas.

Simbiosis: interacción biológica de mutuo beneficio entre dos especies durante su desarrollo vital.

ÍNDICE

Nota del editor	9
Prólogo	13
Nota introductoria	15
Capítulo I - La sociedad de los microbios	20
Capítulo II - Del protolenguaje al comportamiento colectivo	40
Capítulo III - Los invisibles y la agricultura sostenible	56
Capítulo IV - Salud del suelo, plantas, animales y humanos	68
Capítulo V - La carta de los derechos microbianos	82
Bibliografía recomendada	87
Glosario	91

Colofón

Realizado en papel ahuesado bond de 80 gramos.
Para la portada y textos interiores se utilizaron las tipografías
Brandon y Baskerville en sus variantes.
Encuadrado hot melt. Con un tiraje de 300 ejemplares.

Impreso en marzo de 2021 en los talleres de GSR,
en la ciudad de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile.



