



HIDDEN NATURE

Tu espacio para la Divulgación Científica

Número 20 · 1C/2025

Microbiología Ambiental

El mundo invisible que da equilibrio a la vida

Vivimos en un mundo dominado por lo que podemos ver, medir y controlar, pero hay una realidad microscópica que, aunque invisible a simple vista, es la base misma de nuestra existencia y del equilibrio de los ecosistemas. Desde los microorganismos que habitan el suelo y regulan los ciclos de nutrientes, hasta las bacterias y virus que condicionan la vida en los océanos, el papel de estos diminutos organismos es más profundo y determinante de lo que solemos imaginar. En esta edición de nuestra revista, exploramos el papel de la microbiología en la sostenibilidad ambiental, la agricultura, la salud humana y las tecnologías del futuro.

Uno de los temas centrales que abordamos en este número es el impacto de los microorganismos en la agricultura y el medio ambiente. Los suelos, a menudo considerados meros sustratos inertes, son en realidad ecosistemas vivos repletos de bacterias, hongos y nematodos que influyen en la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos. La microbiología del suelo no sólo ayuda a mejorar el rendimiento agrícola, sino que también juega un papel clave en la mitigación del cambio climático, capturando carbono y reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos. Además, organismos como los nematodos y los hongos nematófagos contribuyen a la regulación microbiana del suelo, favoreciendo su equilibrio y su salud. Tampoco podemos olvidarnos de la filosfera, la comunidad de microorganismos que habita en la superficie de las hojas, con funciones clave en la protección de las plantas y la degradación de compuestos orgánicos. Por tanto, los grandes esfuerzos que realiza la comunidad científica para estudiar e integrar de manera holística las interacciones entre los microorganismos, el suelo, las plantas y otros organismos están abriendo nuevas puertas a estrategias innovadoras que nos acercan a una agricultura más sostenible y resiliente.

En la intersección entre la microbiología y la tecnología, la biología sintética se presenta como una herramienta poderosa para diseñar microorganismos capaces de resolver problemas ambientales. Así, la ingeniería genética de microorganismos nos permite desde remediar

suelos contaminados hasta producir alimentos funcionales más saludables. Un ejemplo es el uso de hongos saprobios para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados, una estrategia que podría ayudar a restaurar ecosistemas degradados. Sin embargo, estas soluciones no están exentas de preguntas éticas y regulaciones, lo que nos lleva a reflexionar sobre la importancia de un enfoque equilibrado y responsable en su aplicación.

ÍNDICE

- 1. De viajes, microbios y películas-** pág. 4
- 2. El suelo, un ecosistema a nuestro servicio** - pág. 8
- 3. El papel de virus y bacterias en los ciclos de nutrientes** - pág. 11
- 4. La biología sintética: Diseñando microorganismos para salvar el planeta** - pág. 16
- 5. Prebióticos y bioestimulantes para la salud del suelo** - pág. 20
- 6. Las micorrizas, una solución microbiana para una agricultura y un planeta más sostenibles** - pág. 24
- 7. El microbioma ambiental: Clave para alimentos funcionales más sostenibles y saludables.** - pág. 28
- 8. Nematodos: Actores fundamentales en la microbiología del suelo** - pág. 32
- 9. Hongos nematófagos: depredadores y aliados** - pág. 36
- 10. Hongos saprobios: aliados naturales para recuperar la salud de suelos contaminados por metales pesados** - pág. 40
- 11. Innovaciones tecnológicas para la detección temprana de microorganismos patógenos cultivos** - pág. 43

Al explorar la relación entre los microorganismos y la salud humana, encontramos un gran problema global como es la resistencia a antibióticos, impulsado en gran parte por su uso descontrolado. Ante este problema, se trabaja en la búsqueda de estrategias para reutilizar las aguas residuales en el riego agrícola evitando la dispersión de microorganismos o su resistencia a antibióticos, así como estrategias alternativas innovadoras para combatir infecciones nosocomiales en hospitales como la luz UV-C pulsada, además de, por supuesto, una correcta limpieza y desinfección, y de unas buenas prácticas por parte del personal sanitario. Pero la microbiología también influye en nuestra alimentación: la relación entre el microbioma del suelo y la calidad de los alimentos es clave para el desarrollo de cultivos más nutritivos y sostenibles, con un impacto directo en la salud humana.

Y no podemos ignorar el papel de los microorganismos en la exploración espacial. La posibilidad de que microbios terrestres puedan sobrevivir en el espacio plantea interrogantes sobre la contaminación interplanetaria y el potencial de la panspermia, una hipótesis que sugiere que la vida podría viajar entre planetas a través de meteoritos y polvo cósmico. También, en entornos terrestres extremos como las cuevas, los microorganismos han desarrollado estrategias únicas para sobrevivir en condiciones de oscuridad y escasez de nutrientes, lo que los convierte en modelos ideales para estudiar la vida en otros planetas.

A lo largo de esta edición, queda claro que el mundo microbiano es mucho más que un conjunto de organismos diminutos e invisibles: es una red compleja de interacciones que define el equilibrio de la vida en la Tierra. Desde el suelo que pisamos hasta las estrellas que observamos, los microorganismos están en todas partes, y su estudio no solo nos ayuda a entender mejor nuestro entorno, sino que también nos brinda herramientas para enfrentar las grandes incógnitas del futuro en el contexto actual de cambio climático.

A menudo olvidamos que las formas de vida más pequeñas han sido clave en el origen de la vida y el desarrollo del planeta tal como lo conocemos, y seguirán definiendo su destino. En estos microorganismos se esconden respuestas a los

12. **¿Es el agua regenerada usada para el riego de vegetales un vector de transmisión de determinantes de resistencia a antimicrobianos?** - pág. 47
13. **¿Seres “invisibles” pueden controlar el cambio climático?** - pág. 51
14. **Filosfera: los guardianes microscópicos de las hojas** - pág. 54
15. **Biodiversidad de microorganismos en cuevas visitables** - pág. 58
16. **Xenex, la tecnología ‘no-touch’ de luz UV-C pulsada al servicio de los hospitales en la lucha contra las enfermedades nosocomiales** - pág. 63
17. **Colaboradores** - pág. 70

desafíos ambientales y agrícolas del futuro. Todavía nos queda mucho por descubrir del mundo invisible... Cada nuevo hallazgo en microbiología ambiental nos acerca no sólo a una mejor comprensión de la vida en la Tierra, sino también a soluciones más sostenibles y a tecnologías que definirán el futuro. Por tanto, conocerlos, protegerlos y aprovechar su potencial es una tarea crucial que nos involucra como sociedad. Porque en lo más diminuto puede estar la clave para los mayores retos de nuestra era.

Miguel A. Rosales Villegas

Doctor en Biología. Científico Titular en la Estación Experimental del Zaidín del CSIC (Granada, España).



Francisco Gálvez Prada

Socio fundador del Centro de Investigación y Desarrollo de Recursos Científicos - BioScripts. CEO en IguannaWeb y CTO en Hidden Nature.



Juan de Dios Franco Navarro

Doctor en Biología. Investigador colaborador del IRNAS-CSIC, y técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario de Puerto Real y Hospital de Alta Resolución de La Janda (Cádiz). Colegiado #4159 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.



De viajes, microbios y películas

La sonda Cassini, lanzada por la NASA en 1997, exploró Saturno y sus lunas hasta 2017. Su misión revolucionó nuestra comprensión de Encélado y Titán, revelando océanos subterráneos y atmósferas complejas que podrían albergar vida.

A menudo nos vienen a la mente las palabras de H. G. Wells en *La Guerra de los Mundos* (1898) refiriéndose al papel de los microorganismos en el mundo en el que vivimos, su mundo. Todo será porque nos dedicamos a esto de la microbiología, pero es que, aunque no los veamos, los microbios son omnipresentes. Viven sobre nosotros, los respiramos y, literalmente, nos rellenan. Aunque se trata de los seres más humildes de la naturaleza (nótese esa visión paternalista de seres macroscópicos multicelulares), tienen características que les confieren esa capacidad, la de la ubicuidad. Características que todos los lectores ya conocen, aunque no lo sepan (les invitamos a seguir leyendo).

Mirando al cielo es fácil olvidar que los microorganismos están en la atmósfera, el medio más efectivo para distribuir formas de vida por doquier. Son demasiado pequeños

para caer al suelo, como las grandes empresas, pero al revés, *too small to fall*. Los mismos microbios que, antes de su descubrimiento, aparecían en forma de moho, como por arte de magia, creciendo sobre un plato de comida abandonado y que dieron lugar a la teoría de la generación espontánea de la vida: ¿cómo podía si no aparecer algo desde la nada?! Nos vamos a dar el lujo aquí de citar a Aristóteles como uno de los precursores de la idea de la generación espontánea de la vida.

Un tiempo después, con el invento del microscopio, fuimos conscientes de su existencia y de su ubicuidad: están en todas partes y, quizás, pueden llegar a cualquier punto de nuestro planeta. De hecho, se han detectado microorganismos en los sitios más inverosímiles, desde las mayores profundidades del océano, en ecosistemas casi completamente desconectados del resto de la



La Vía Láctea vista desde la Tierra, un recordatorio de la inmensidad del cosmos y la posibilidad de vida en otros mundos. Estudios sobre la panspermia sugieren que la vida podría viajar entre estrellas a bordo de meteoritos o cometas.



Los tardígrados, pequeños organismos extremófilos, han demostrado una increíble resistencia en el espacio. Experimentos han confirmado que pueden sobrevivir a la radiación cósmica y al vacío, lo que los convierte en candidatos para la supervivencia en condiciones extraterrestres.

Tierra, hasta a 400 kilómetros de altitud, alrededor de la Estación Espacial Internacional. Aunque esto lo sabemos desde hace relativamente poco, ya nos lo habían adelantado geniales autores de ciencia ficción. Si el lector tiene algunos años, recordará un clásico escrito por Michael Crichton y llevado posteriormente al cine (*La Amenaza de Andrómeda*, 1971) donde un satélite espacial militar recolecta microorganismos del espacio exterior, probablemente a una altitud similar. Pese a la coincidencia, y afortunadamente (atención, spoiler), los microbios encontrados en la órbita de la Estación Espacial Internacional no son tan nocivos como los que aparecen en dicha obra, se trata de microbios comunes de la superficie terrestre.

Hay más. Están fuera, pero ¿podrían volver a entrar? La duda surge a partir del conocimiento que todos tenemos del proceso de entrada de objetos espaciales en la atmósfera terrestre, en el cual todo se vuelve llamas. Más aún si la entrada no es perfecta, como le pasó al amigo

Tom Hanks en *Apollo 13* (1995). Pues, incluso en esas ardientes condiciones, hay microbios capaces de sobrevivir y volver a activarse una vez en la superficie. Y aquí tampoco hemos sido nada originales los científicos, tenemos películas y libros a porrillo, que nos enseñan microbios/bichos, generalmente malos, que vienen a visitarnos sobre meteoritos. Por ejemplo: el simbionte de *Spiderman* (que da lugar a *Venon*) o, muchísimo antes, *El color que cayó del cielo* (H. P. Lovecraft, 1927), un relato clásico de terror que tiene también su película de 2020.

Este hecho, esa posible entrada en la Tierra que aparece en las películas y relatos, nos lleva a otra cuestión: si han venido de otra parte, es que pueden sobrevivir a un viaje por el espacio de un tiempo más bien prolongado y en unas condiciones cuanto menos adversas. Esta posibilidad ha sido formulada por científicos en una teoría conocida como Panspermia, concretamente por Svante Arrhenius a principios del siglo XX (Arrhenius, 1908). Pues hoy día sabemos que hay determinados compuestos, como la melanina (sí, la misma que nos pone morenos en verano) que puede ayudar a los microorganismos a sobrevivir a las radiaciones que se dan allá arriba (allá arriba o dentro del reactor nuclear de Chernóbil, ¡que eso también se ha estudiado! Hay otros seres, un poco más complejos, los tardígrados, con unas capacidades dignas de otro mundo para sobrevivir a las más extremas condiciones. Estos ositos (sí, parecen ositos con cierto toque alienígena) diminutos, aunque gigantes en el mundo de los microorganismos, pueden aletargarse hasta un estado conocido como criptobiosis, que les permite resistir la desecación, las temperaturas extremas (desde casi el cero absoluto hasta más de 150 °C), radiaciones intensas, e incluso la exposición directa al vacío del espacio. Revivir organismos tras un letargo prolongado, de miles o millones de años, es, aparte de algo que hemos logrado repetidas veces, una forma estupenda de crear

malos de película. Una de las favoritas es el thriller psicológico *La Cosa*, 1982, basada en el relato ¿Quién anda ahí? (John W. Campbell Jr., 1938). No adelantamos nada para los lectores más jóvenes. Un ejemplo más actual, es la angustiante *Life*, 2017, donde un grupo de científicos reanima y cultiva un microbio marciano... ¿Qué podría salir mal?

Pese a estos augurios cinematográficos, no parece que hayamos recibido o transportado pasajeros inesperados interplanetariamente. Eso no quita que los humanos tengamos esta posibilidad como algo presente. De hecho, existe un Tratado del Espacio Exterior (1967) que obliga a los países a tratar de evitar la contaminación perjudicial de otros cuerpos celestes y de la Tierra. Para ello, por ejemplo, las sondas que van a otros planetas son pormenorizadamente esterilizadas, no vaya a ser que, en un futuro no muy lejano, aparezcamos los humanos en películas de seres de otros planetas sembrando vida cual alienígena primigenio de *Prometheus* (2012).

Un último detalle. Hemos comentado que hemos encontrado microorganismos terrestres a 400 km de altitud, pero no sabemos muy bien cómo han llegado allí. Una posibilidad es que sean contaminaciones de la propia actividad humana en el espacio. Sin embargo, hay formas naturales de poner en órbita material desde la superficie de un cuerpo celeste. Existe una luna en Saturno, Encélado, cubierta por una capa de hielo de hasta decenas de kilómetros de grosor que guarda un océano líquido igualmente profundo. Desde el polo sur de dicha luna, de cuando en cuando, son expulsados chorros de hielo a distancias del orden de cientos de kilómetros. En otras palabras, tenemos un ascensor formidable poniendo en órbita material de forma frecuente. La nave Cassini de la NASA estudió estos chorros en detalle entre 2005 y 2015, para encontrar que había en ellos sustancias orgánicas, señalando a esta luna como uno de los posibles lugares donde

buscar vida fuera del planeta Tierra en el Sistema Solar. Pero no es la única. Otras lunas de Júpiter ya fueron señaladas en la ficción como posibles centros de desarrollo de vida, como Europa en 2010: *Odisea Dos* (novela de Arthur C. Clarke, 1982; película, 1984). Más tarde se ha constatado la presencia real de mares de agua líquida en ésta y otras lunas de Júpiter (Ganímedes y Calisto). Pero el caso más curioso es imaginar la vida en Titán (luna de Saturno), pero una vida muy diferente, en lugar de darse en mares de agua, sería en mares de metano... (Los dragones de Titán, 1944, Arthur C. Clarke).

Quizás, y volviendo a parafrasear a H. G. Wells, los humanos, con infinita complacencia, vamos de un lado a otro por el planeta ocupándonos de nuestros pequeños asuntos, seguros de nuestro dominio sobre la materia. Tal vez los microbios que vemos al microscopio hacen lo mismo, y son realmente ellos los que en estos momentos surcan los límites del Sistema Solar buscando colonizar otros mundos sin esperarnos a nosotros...

Álvaro López García

Científico titular en la Estación Experimental del Zaidín. Perteneció al grupo de Micorrizas. Su investigación se centra en la ecología de las comunidades de microorganismos del suelo y su relación con las plantas. Actualmente, es colP del proyecto COEXCLIM, Ministerio de Ciencia e Innovación de España.



Jesús Mercado Blanco

Investigador Científico del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España), actualmente adscrito a la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC) donde co-lidera el grupo de investigación Microbiología de Ecosistemas Agroforestales.



El suelo, un
ecosistema a
nuestro servicio



Cuando pensamos en el concepto de suelo, quizás nos imaginemos un soporte inerte sobre el que crecen las plantas y se asientan las demás estructuras terrestres. Sin embargo, esta idea está muy lejos de la realidad ya que los suelos funcionan como un sistema vivo, compuesto por una comunidad variada de microorganismos que mantienen la salud del suelo. El microbioma del suelo es el conjunto de microorganismos que lo componen, principalmente hongos y bacterias, aunque también existen en menor cantidad cianobacterias, algas, protozoos y virus.

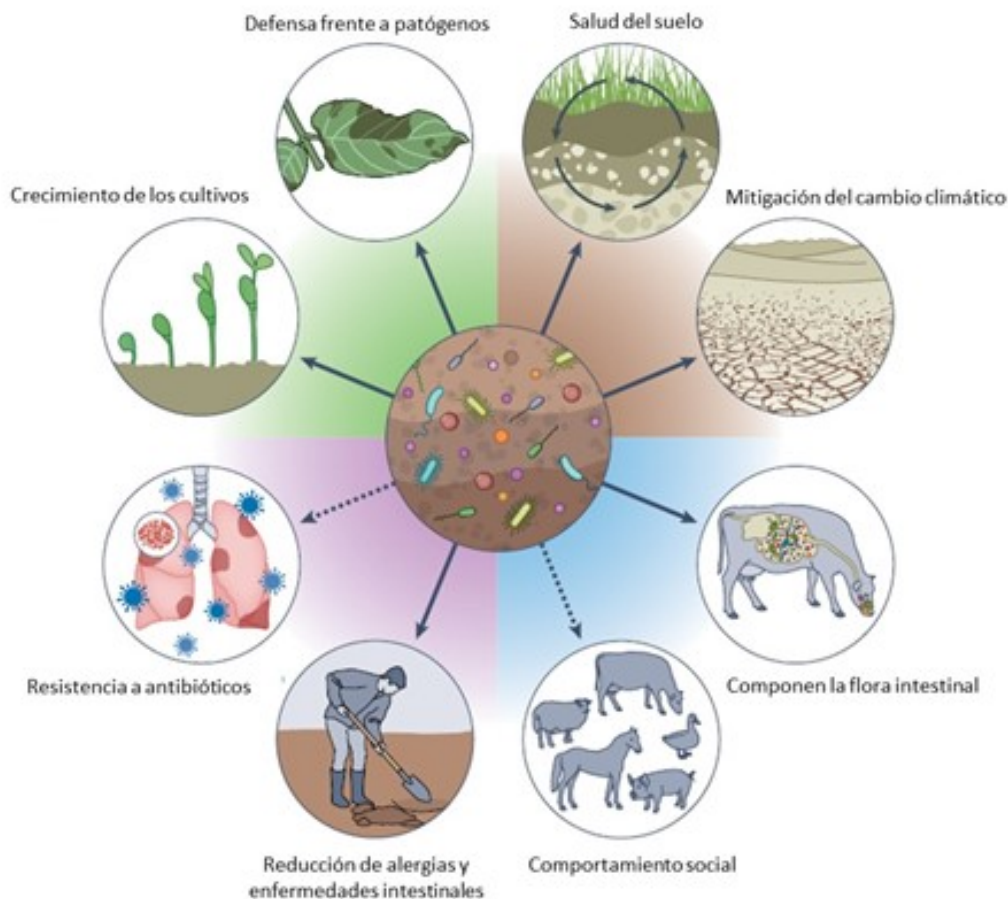
El suelo es el mayor reservorio de microorganismos de la Tierra. Después de las plantas, los microorganismos que viven en el suelo representan la mayor fracción de biomasa terrestre (aproximadamente un 20 % de la biomasa total), mucho mayor que la de los animales que solamente representa el 0,3 %. El microbioma del suelo no sólo es el más abundante, sino el más diverso, albergando más de 50.000 especies en un gramo de suelo. Para hacernos una idea, podemos comparar esta cifra con la cantidad de especies que existen en uno de los ecosistemas más diversos, la amazonia, donde se han encontrado alrededor de 40.000 especies entre plantas y animales.

Las comunidades microbianas varían de unos suelos a otros, dependiendo de las características físicas, químicas y biológicas de éstos. Factores como la erosión, la deforestación, la sequía o la contaminación, alteran enormemente sus propiedades y poblaciones microbianas, causando la pérdida de sus funciones. Un suelo sano es aquel que mantiene una comunidad abundante y variada de organismos. Cada vez está más claro para los científicos que la diversidad microbiana del suelo influye directa o indirectamente en nuestra salud, ya que participan en procesos tan importantes como, por ejemplo, la mitigación del calentamiento global, y el

mantenimiento de la salud de las plantas, tanto silvestres como cultivadas, y los animales.

El papel de los microorganismos del suelo en la mitigación del cambio climático se debe a su participación en la producción y degradación de elementos químicos tan importantes como el carbono. En un suelo sano, la cantidad de carbono que incorporan los microorganismos para su crecimiento es mucho mayor que el que liberan como producto de su metabolismo, actuando como un reservorio de carbono. De esta manera, contribuyen significativamente a la disminución de gases con efecto invernadero como el CO₂. De hecho, estudios recientes han concluido que los microorganismos son el factor que más influye en la retención de carbono en el suelo.

Otro de los beneficios indirectos más importantes que aporta al ser humano los microorganismos del suelo es el mantenimiento de la productividad y la salud de los cultivos agrícolas. Las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo forman asociaciones específicas. Es decir, cada especie de planta interactúa solamente con determinadas especies de microorganismos, aquellos que son esenciales para su crecimiento y desarrollo. Esto podría ser equiparable a nuestra flora intestinal, por ejemplo. Entre las principales ventajas que aporta esta interacción están la de facilitar agua y nutrientes a la planta. Se sabe que entre el 80 y el 90 % del nitrógeno y el fósforo que necesitan las plantas para crecer es proporcionado por los microorganismos asociados a su raíz, que son capaces de solubilizar estos nutrientes de una manera mucho más óptima. Además, como si de una vacuna se tratase, mediante la secreción de sustancias denominadas “promotoras del crecimiento”, los microorganismos activan los sistemas de defensa de las plantas frente a patógenos, y proporcionan una mayor tolerancia a estreses como la sequía o las altas temperaturas.

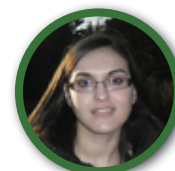


A diferencia de lo que ocurre con las plantas, a día de hoy, conocemos mucho menos sobre la importancia del microbioma del suelo para el ser humano. Sin embargo, estudios recientes han hecho incrementar el interés de la comunidad científica por entender cómo los microorganismos del suelo influyen directamente en nuestra salud. Lo que ya se sabe es que al igual que ocurre en las plantas, los microorganismos que forman parte de nuestra microbiota y de la de los animales dependen del lugar donde vivimos. Aunque sabemos que existen microorganismos patógenos que viven en el suelo, como los causantes de la listeria y el ántrax, la mayoría de los microorganismos del suelo proporcionan ventajas a los animales que viven en él. Preguntémonos, por ejemplo, por qué las personas con una mayor exposición a ambientes naturales son menos propensas a sufrir alergias o enfermedades intestinales.

Aunque todavía se desconoce con exactitud, sabemos que está relacionado con la mayor activación del sistema inmune que estas personas tienen gracias a su exposición continuada a una mayor diversidad de microorganismos. Seguro que ésta y muchas otras preguntas serán resueltas muy pronto y cambiará nuestra concepción sobre cuestiones tan importantes como la salud y su dependencia del ambiente que nos rodea y de cómo cuidamos de él.

Inmaculada Coletto

Investigadora postdoctoral en la
Universidad del País Vasco.



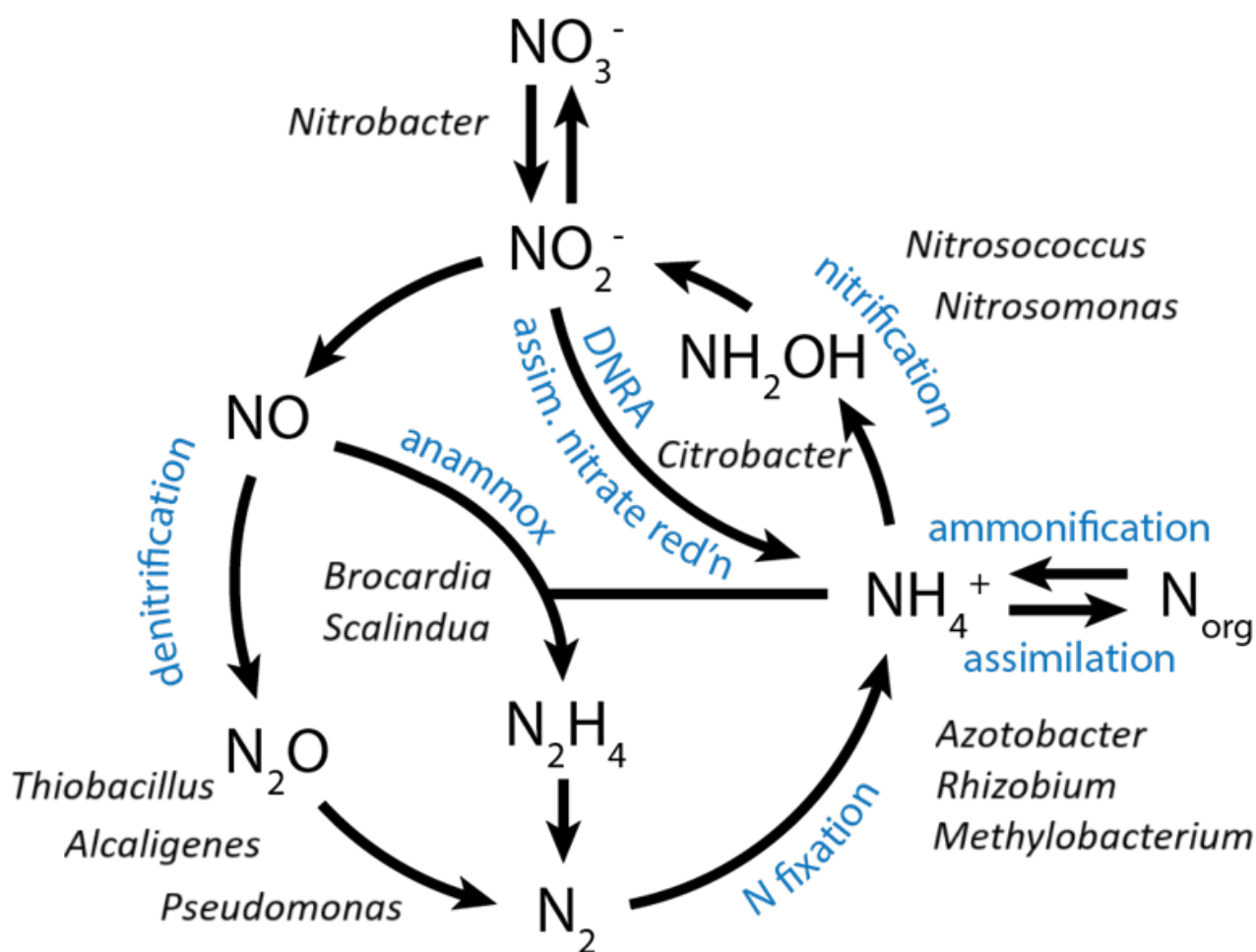
A close-up photograph of a forest floor. The ground is covered with a dense layer of dry, brown, and reddish-brown leaves. Several bright green leaves are scattered among the dead ones, providing a strong color contrast. The lighting is soft, creating a natural and somewhat somber atmosphere.

*El papel de
virus y bacterias
en los ciclos de
nutrientes*

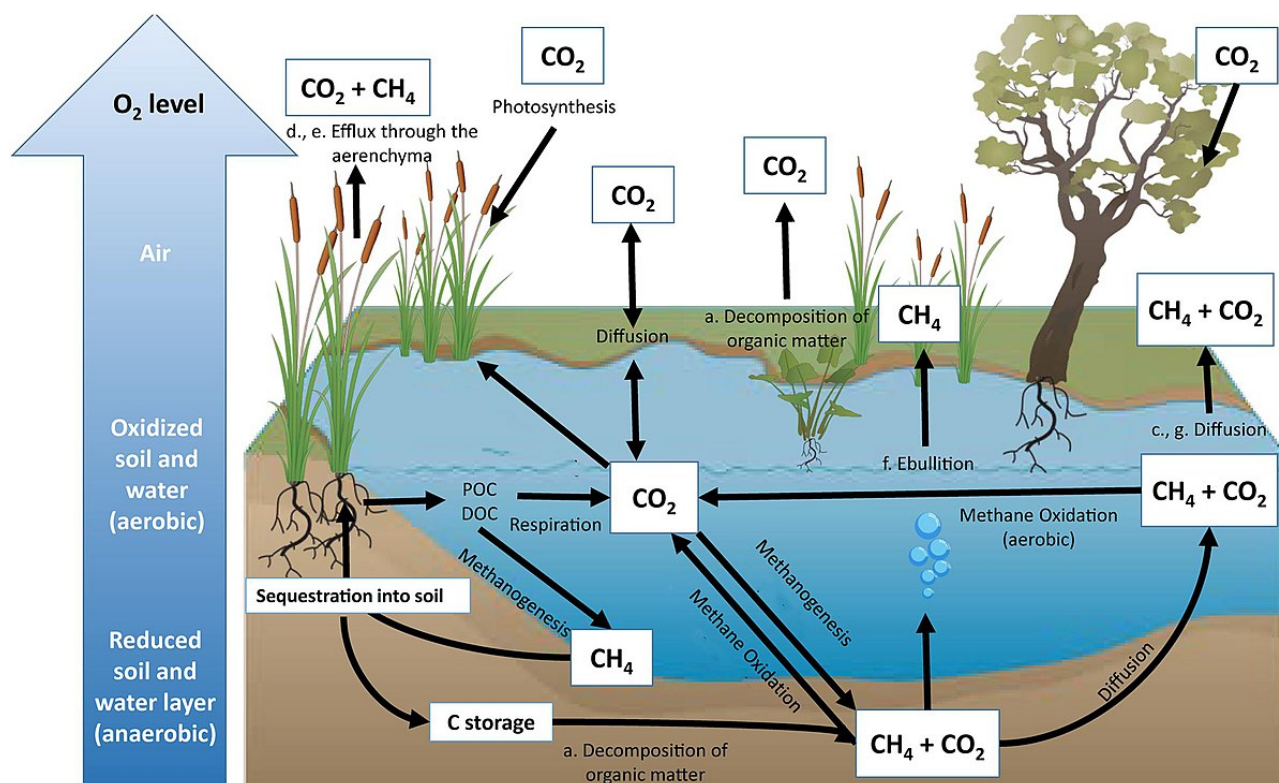
« CICLOS DE NUTRIENTES »

Lo más habitual a la hora de pensar en virus, bacterias y demás microorganismos es trasladarnos a su papel como agentes infecciosos, como causantes de algunas de las enfermedades más insidiosas, peligrosas o, por lo menos, molestas que sufrimos los seres humanos. Sin embargo, de las más de 45.000 especies conocidas de bacterias, apenas el 1% de éstas son patógenas – si bien las que nos enferman pueden causar problemas muy graves y costarnos la vida. Además, es importante señalar que somos desconocedores de la mayoría de especies o linajes bacterianos que realmente habitan en la Tierra. La comunidad científica estima que puede haber más de dos millones de especies bacterianas distintas, pero no las conocemos porque no interactúan con el ser humano de ninguna manera directa, o no sabemos cómo cultivarlas

en los laboratorios para su estudio. Es decir, que la mayoría de bacterias que existen no solo son beneficiosas o inocuas para el ser humano, sino que además apenas las conocemos. Un sólo gramo de tierra puede contener unos 40 millones de bacterias, y en nuestros intestinos la cifra sube hasta 1.100 millones por gramo. Eso quiere decir que en nuestros cuerpos tenemos más bacterias que estrellas en la Vía Láctea, formando diferentes ecosistemas con su propia microbiota, sus propias dinámicas y sus propias dolencias derivadas de los desajustes (o también conocido como disbiosis) entre estas comunidades bacterianas. Este es el caso de la caries por sobrecrecimiento de las biopelículas dentales o de la pérdida de la estructura de las microvellosidades intestinales por pérdida de la microbiota intestinal debido al abuso de antibióticos o por la quimioterapia.



Ciclo del C en ecosistemas de agua dulce como una ciénaga. Destaca la formación y emisión de metano. Los procesos de metanogénesis y descomposición de materia orgánica, así como la respiración y oxidación del metano en el seno del cuerpo de agua, corre a cargo de las bacterias y arqueas que habitan en ella. **Fuente:** Katy E. Limpert, Paul E. Carnell, Stacey M. Trevathan-Tackett and Peter I. Macreadie



Fases del ciclo del N. Se indican algunos de los principales géneros que realizan cada función. Las bacterias del género *Azotobacter* o *Rhizobium* son comunes fijadoras de N del aire, convirtiéndolo en N orgánico asimilable por las plantas y los animales. La descomposición de este N y del amonio derivado de los desechos orgánicos puede rendir nitritos (por bacterias como *Nitrosococcus*) y, posteriormente, nitratos por la acción de *Nitrobacter*. Estos iones son usados comúnmente como fertilizantes de las plantas debido a que son fácilmente asimilables por su reconversión a amonio, pero pueden ser retirados del suelo por acción de bacterias desnitrificantes (*Thiobacillus*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*) y anammox (*Brocardia*, *Scalindua*), devolviéndolo a su forma gaseosa no asimilable por los vegetales.

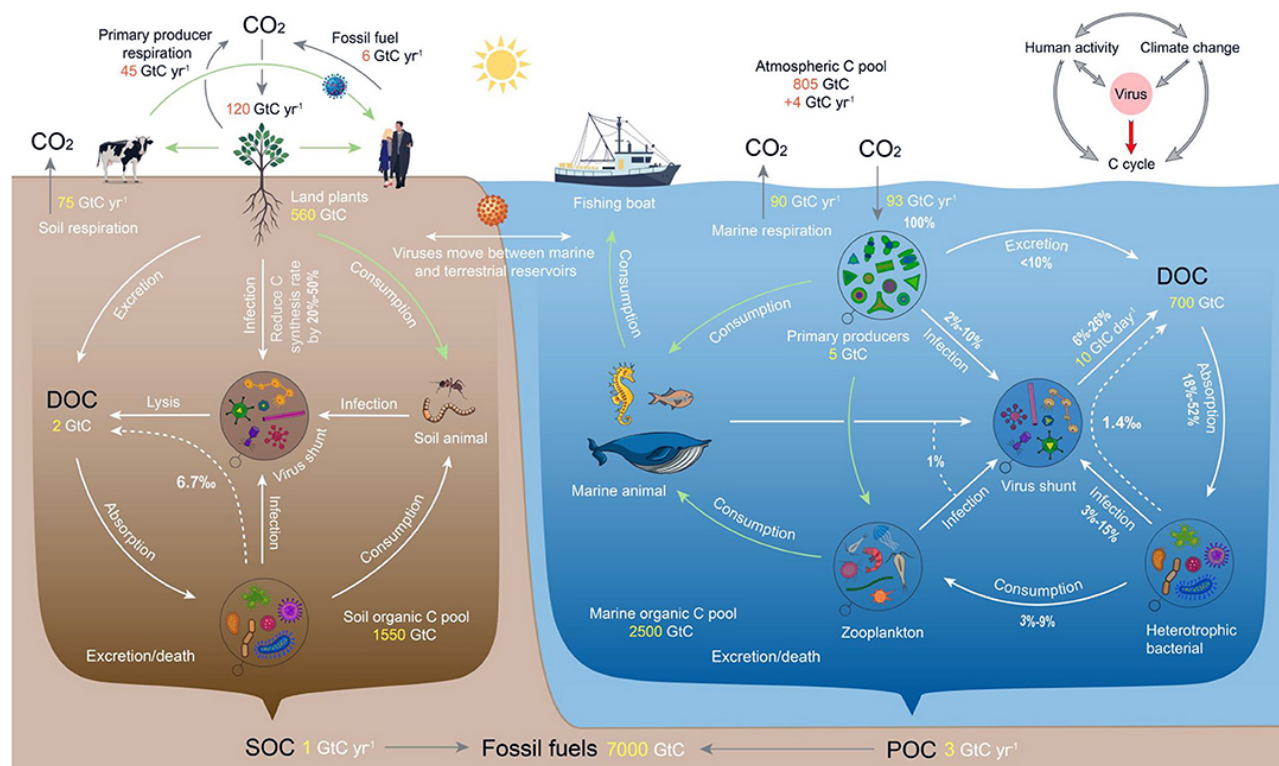
Actualmente hay unas 30.000 especies de virus descritas, de las cuales unas 219 son capaces de infectar al ser humano. Igual que sucede con las bacterias, se sospecha que no conocemos ni la décima parte de virus que hay (de hecho, se considera que nuestro conocimiento no abarca ni el 0,1% del total de virus que debe existir). En cuanto a cantidades, se estima que hay un quintillón (un uno seguido de treinta ceros) de partículas víricas en nuestro planeta, del mismo orden en que se estima la cantidad de estrellas en el universo. Solo un litro de agua de mar alberga hasta un millón de partículas víricas.

En definitiva, el mundo, nuestros cuerpos y nuestra vida diaria están cuajados de virus y bacterias (entre otras muchas formas de vida), pero apenas nos apercebimos de ello. Los números en los que nos movemos son muy superiores a los que nuestro cerebro es capaz de manejar, pero sí podemos deducir que es, cuando menos, ingenuo considerar que el

efecto de estos microorganismos sobre los ecosistemas y los ciclos globales es insignificante. A pesar de su pequeño tamaño, las enormes cantidades en que se encuentran, y la exasperante diversidad que exhiben, dan pie a fenómenos globales que condicionan aspectos tan dramáticamente importantes como la circulación de los nutrientes entre las masas de agua, el suelo y la atmósfera, lo que se conoce como ciclos biogeoquímicos.

Cada elemento químico que constituye parte de los organismos vivos sigue unos ciertos recorridos entre sus reservorios orgánicos (la biomasa) y sus reservorios inorgánicos (formas minerales, gases, etc.). Los más comunes de abordar son el C (C) y el nitrógeno (N), pero también el azufre, el fósforo, el hierro y hasta el mercurio presentan ciclos biogeoquímicos dignos de estudio. Y aunque en el ciclo del C y el N (los constituyentes más básicos de las biomoléculas orgánicas como los carbohidratos

« CICLOS DE NUTRIENTES »



Bucle microbiano e impacto de los virus en el ciclo del C. Se pone énfasis en el reservorio de C orgánico en el suelo (SOC) y marino (POC) por la lisis bacteriana tras la acción vírica. **Fuente:** Gao Y, Lu Y, Dungait JAJ, Liu JB, Lin SH, Jia JJ y Yu GR. doi:10.3389/fpubh.2022.858615

o las proteínas) se tiende a poner el foco en el papel de las plantas, los hongos y los animales. Lo cierto es que hay tramos de estos ciclos, como la fijación del N atmosférico a formas orgánicas o la desnitrificación de los suelos, que sólo pueden ser movilizados por la actividad bacteriana y que conviene conocer. No en vano, es un gasto inútil el uso de abonos en un suelo de cultivo donde hay actividad de bacterias desnitrificantes, de manera que ignorar el papel de la microbiota de los suelos escogidos para el cultivo puede incluso tener impactos económicos negativos en nuestros bolsillos. Por otro lado, hay ciclos, como el del azufre, cuyos pasos clave solamente pueden ser eficientemente promovidos por la actividad bacteriana.

Si consideramos el ciclo del C, la idea básica es que este elemento pasa de su forma gaseosa (el CO_2) a su forma orgánica a través de la fotosíntesis de las plantas y las algas, momento a partir del cual se usa para constituir el esqueleto de todas las moléculas biológicas (proteínas, azúcares, ADN, etc.). Asimismo, este C se transforma de nuevo en CO_2 por el

metabolismo celular y la quema de restos orgánicos (como combustibles fósiles). Este gas se puede disolver en el agua y convertirse en ácido carbónico y carbonatos, capaces de cristalizar y formar minerales como los que conforman las rocas calizas (quedando el C secuestrado en una forma geológica hasta la disolución de la roca). Sin embargo, el C tiene un ciclo mucho más rico que esto. Sin ir más lejos, en los ecosistemas donde no llega la luz para que la fotosíntesis suceda, como las cuevas o el fondo abisal, son las bacterias quimiosintéticas las que cumplen el papel de productoras, y sustentan las comunidades de animales que se instalan en estos lugares. También hay un ciclo alternativo que sólo pertenece a los microorganismos: el metano (CH_4), otra forma gaseosa del C, que se forma biológicamente por la acción de arqueas metanógenas, algunas de las cuales viven de forma simbiótica en los estómagos de los rumiantes, en el interior de amebas o en las aguas encharcadas de los arrozales. Dichas bacterias se plantean como alternativa para la producción de combustibles. En el suelo, el CH_4

« CICLOS DE NUTRIENTES »

puede ser fuente de alimento para bacterias metilótrofas, como *Methylococcus capsulatus* o las arqueas del género *Methanosarcina*. Actualmente, se exploran estos microorganismos para la eliminación de CH₄ de la atmósfera (también procedente en cantidades masivas por la quema de combustibles fósiles).

Los virus también juegan un papel muy importante en el ciclo del C, aunque rara vez se consideran. A partir de los estudios realizados tras la expedición Malaspina, sabemos hoy que en los ecosistemas marinos, muchos virus atacan bacterias y arqueas, destruyéndolas y liberando sus compuestos de C al agua. Estas formas de C orgánico quedan diluidas en el océano, alcanzando unas concentraciones tan pequeñas (de apenas unas pocas moléculas por litro) que ningún microorganismo se molesta en absorberlas y utilizarlas. Así, los virus marinos bombean grandes cantidades de C al agua en formas inocuas que pueden pasar millones de años sin participar en el ciclo, algo que tiene un impacto directo en la temperatura global de la Tierra y el cambio climático. Es interesante plantear que esta voracidad de los virus por las bacterias también juega un rol importante en nuestra microbiota, y muy recientemente se ha comenzado a estudiar su impacto para nuestra salud, ya sea por su efecto destructor en las bacterias de nuestro intestino como en su papel como vectores de genes entre bacterias o su potencial para luchar contra bacterias infecciosas resistentes a antibióticos.

Hemos empezado a dilucidar tímidamente el papel de los microorganismos y a dejar poco a poco de verlos como criaturas molestas acorraladas en los márgenes de la existencia por nuestra disposición de antibióticos – los cuales, de hecho, les debemos también. La enorme diversidad tanto en formas como en capacidades que presentan y la compleja red de interacciones que establecen son las que en último término sostienen los ecosistemas que tanto creemos conocer. Y sólo aproximándonos a ellos con humildad, respeto y curiosidad científica podremos llegar a plantear mejores

soluciones a problemas globales tan actuales como el cambio climático o la aparición de patógenos resistentes a nuestros fármacos.

Juan Encina Santiso

Profesor de ciencias, graduado en Biología por la Universidad de Coruña y Máster en Profesorado de Educación Secundaria por la Universidad Pablo de Olavide. Colabora en proyectos de divulgación científica desde 2013 como redactor, editor, animador de talleres para estudiantes y ponente. Actualmente, estudia Psicología por la UNED.





La biología sintética: Diseñando microorganismos para salvar el planeta

« BIOLOGÍA SINTÉTICA »

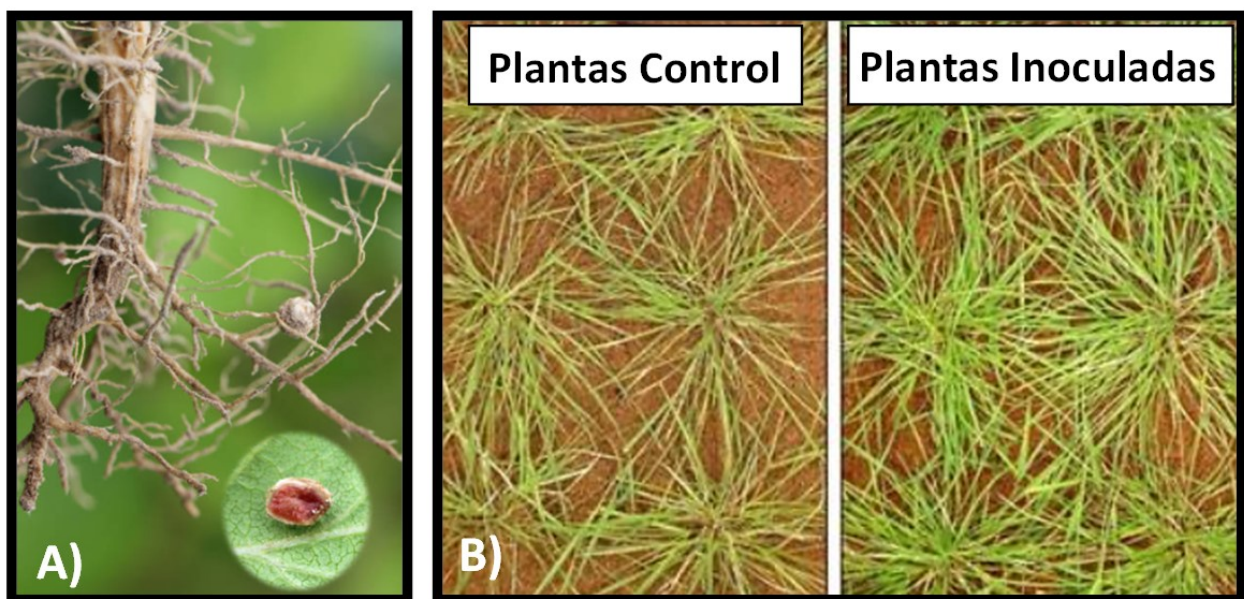
En un mundo cada vez más afectado por el cambio climático, el impacto sobre el medio ambiente supone cambios drásticos en los diferentes ecosistemas que engloban el planeta Tierra. La pérdida de biodiversidad, las alteraciones meteorológicas, la escasez de recursos o la contaminación han incitado el desarrollo de tecnologías innovadoras para, a corto o largo plazo, resolver los desafíos que se presentan en la actualidad.

Una de las áreas más prometedoras es la conocida como biología sintética, una disciplina que permite diseñar y modificar microorganismos con intenciones muy diversas, adquiriendo funciones que pueden resolver cuestiones ambientales.

La **biología sintética** es un campo de investigación que combina la biología, ingeniería y tecnología para diseñar y crear nuevos organismos o modificar los ya existentes. La idea es simple: se pretende utilizar microorganismos como levaduras y bacterias para cumplir funciones de interés, a menudo implicadas con las necesidades humanas, como la elaboración de fármacos eficaces contra patologías, la optimización de la producción de alimentos o como una

herramienta para mejorar la calidad de los suelos en el sector agrícola, entre otros objetivos.

En la agricultura, una de las interacciones más caracterizadas es la simbiosis (asociación de dos organismos de diferentes especies en la que, al menos, uno de ellos se beneficia) de las bacterias del género *Rhizobium* con especies de plantas de la familia de las leguminosas. Esta interacción planta-microorganismo-suelo mediada por estas bacterias, promueve la generación de nódulos en las raíces donde se da lugar la simbiosis con la planta, facilitando la asimilación de nitrógeno atmosférico, y nutriendo a la planta a cambio de azúcares y refugio. Su implementación como biofertilizante ha permitido reducir tanto el uso de fertilizantes sintéticos ricos en nitrógeno como otras prácticas agrícolas tradicionales, abaratando los costes y minimizando el impacto medioambiental, ya que el abuso de estos fertilizantes contamina los acuíferos. Es importante destacar que solamente el 30% del nitrógeno aportado a nivel agrícola es asimilado por las plantas. El 70% restante es lixiviado, contaminando acuíferos, ríos, y otros cuerpos de agua. En este



Efecto de la inoculación de *Rhizobium* en plantas superiores. (A) Formación de inóculos en soja. (B) Comparación de plantas control y plantas inoculadas con *Rhizobium* en la especie vegetal *Agrostis stolonifera*. Fuente: <https://www.istockphoto.com/> y <https://research.rutgers.edu/>.

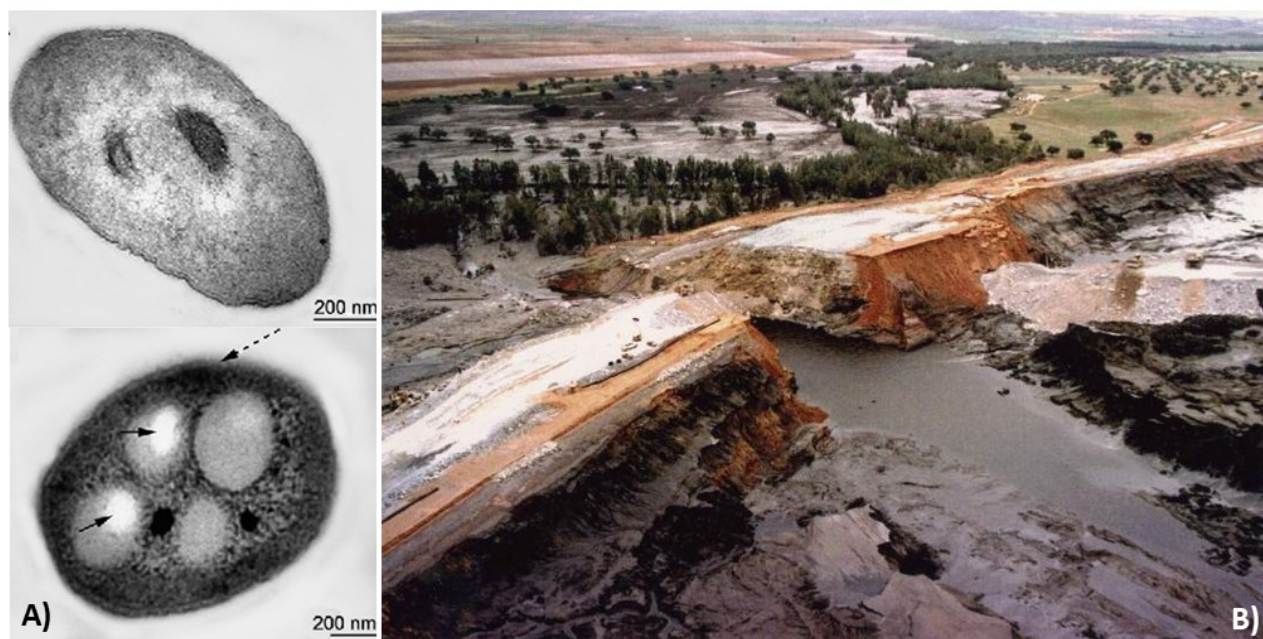
« BIOLOGÍA SINTÉTICA »

contexto, esta interacción simbiótica es específica de un caso particular, las leguminosas, y su estudio en la biología sintética ha permitido que este grupo de microorganismos sea capaz de poder interactuar tanto con especies vegetales de interés agronómico (como el maíz, el arroz o el trigo) como con especies relevantes en el sector ganadero, como *Agrostis stolonifera* que se utiliza para el ganado de forraje. Aunque por su tamaño una bacteria pueda parecer insignificante, a grandes escalas *Rhizobium* se podría convertir en una herramienta con mucho potencial en la optimización de recursos y en la mejora en el rendimiento de los cultivos.

En 1998, una balsa de residuos tóxicos de una mina de pirita (cobre y zinc, y otros elementos) se rompió en la región de Aznalcóllar (Sevilla), provocando el vertido de millones de metros cúbicos de lodos y agua ácidas en el Corredor Verde del Río Guadiamar, afectando desde su nacimiento en la provincia de Sevilla, hasta su prolongación con el río Guadalquivir y su desembocadura entre la provincia de Huelva y

Cádiz. Este accidente afectó gravemente a la fauna y la flora de los ecosistemas de esta amplia zona.

Desde aquel año se han llevado a cabo numerosas tareas de limpieza y recuperación de suelos, y se aplicaron enmiendas orgánicas que tuvieron un efecto positivo limitando la acumulación de tales elementos en las plantas herbáceas. Durante estos años, varios grupos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de la provincia de Sevilla (Estación Biológica de Doñana, EBD; y el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS) se han centrado en las relaciones de las plantas con el suelo estudiando la acumulación de elementos traza y metales pesados en plantas superiores: herbáceas de la zona, y árboles y arbustos empleados durante la reforestación. Se han observado valores significativos de acumulación de cadmio (Cd) y zinc (Zn) en árboles adultos como el álamo blanco (*Populus alba* L. subsp. *alba*) y el sauce (*Salix alba* L. y *Salix atrocinerea* Brot.). Respecto a las herbáceas, se ha observado que las plantas de



Aplicación de la biología sintética en la contaminación ocasionada por un accidente medioambiental. (A) Manipulación genética de la bacteria gram negativa *Cupriavidus necator* para acumular metales pesados (abajo) en comparación con su control. **Fuente:** Ferreira *et al.* (2018); (B) Fotografía de la rotura de la balsa de lodos de la mina de Aznalcóllar (1998). **Fuente:** Franco-Navarro (2020).

la familia Brassicáceas (conocidas como rábano, rabanillo, o jaramagos) acumulan talio (Tl) en las estructuras reproductoras a unos niveles muy altos, aunque depende de la humedad del suelo; y en plantas de la familia Plantagináceas se acumulan altas concentraciones de arsénico (As), plomo (Pb) y talio (Tl) en las hojas y espigas florales.

El empleo de microorganismos y de la biología sintética en las enmiendas sobre desastres naturales es otra de las alternativas que se están llevando a cabo, no solamente en este caso del Guadiamar sino en otros conocidos desastres ambientales, como las excesivas emisiones de gases contaminantes, la eliminación o absorción de residuos como los metales pesados para su posterior eliminación del medio, o la reparación en vertidos petrolíferos.

Aunque la biología sintética ha avanzado exponencialmente en las últimas décadas, y existan tanto especies vegetales como microorganismos modificados genéticamente para poder paliar con gran eficacia con el daño generado por los vertidos, su uso en biorremediación no se acepta como una práctica estándar en Europa, además de que en esas fechas (hace casi 30 años) las tecnologías no estaban tan desarrolladas y no se presentaban como una solución efectiva. A día de hoy, se conocen microorganismos capaces de acumular y metabolizar compuestos como los que componen los lodos en el caso mencionado como es *Cupriavidus necator*, una bacteria gram negativa presente en los suelos capaz de crecer en entornos aerobios y anaerobios. Pese a que puede vivir utilizando hidrógeno o compuestos orgánicos como fuente de energía, se ha manipulado genéticamente para poder ser capaz de acumular en su interior grandes cantidades de Cd, Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Zn, metales pesados cuya eliminación de los suelos no es tarea fácil y requiere de décadas de trabajo en la recuperación de las zonas afectadas. Curiosamente, esta bacteria, al igual que otras, tiene la capacidad de integrar en su interior

vesículas con compuestos orgánicos presentes en el entorno, y al utilizarla cuando hay presencia de metales pesados, es capaz de acumularlos eficientemente en su interior.

Por lo tanto, el conocimiento de familias de microorganismos y su naturaleza pueden dar a conocer funciones o bases moleculares que pueden ser la base de futuras estrategias para combatir desafíos medioambientales de diferente índole, siendo estos organismos “no visibles” piezas clave que pueden hacer posible un mundo más sostenible.

Procopio Peinado-Torrubia

Estudiante de doctorado de la US en el IRNAS-CSIC.



Juan de Dios Franco Navarro

Doctor en Biología, Investigador colaborador del IRNAS-CSIC, y técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario de Puerto Real y Hospital de Alta Resolución de La Janda (Cádiz). Colegiado #4159 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.



A brown cow is grazing in a green field. In the foreground, there is a large haystack. The text "Prebióticos y bioestimulantes para la salud del suelo" is overlaid on the image.

Prebióticos y bioestimulantes para la salud del suelo

¿Imaginas fertilizar un suelo de cultivo sin aumentar notablemente sus concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio? A primera vista, podría no tener sentido, pero déjame explicártelo mejor.

Cuando hablamos de fertilización, solemos pensar en aumentar las concentraciones de nutrientes clave para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, existen materiales y productos que se pueden añadir al suelo que van más allá de este enfoque tradicional, como las enmiendas orgánicas.

Una enmienda orgánica es cualquier material de origen natural, derivado de organismos vivos (como plantas, animales o microorganismos), que se aplica al suelo con el propósito de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Aunque muchas de estas enmiendas también pueden actuar como un fertilizante clásico aportando nutrientes y micronutrientes esenciales, su objetivo principal no es suplirlos directamente, sino mejorar la calidad integral del suelo. Entre ellas encontramos el estiércol, el compost, los biocarbones y los residuos agroindustriales.

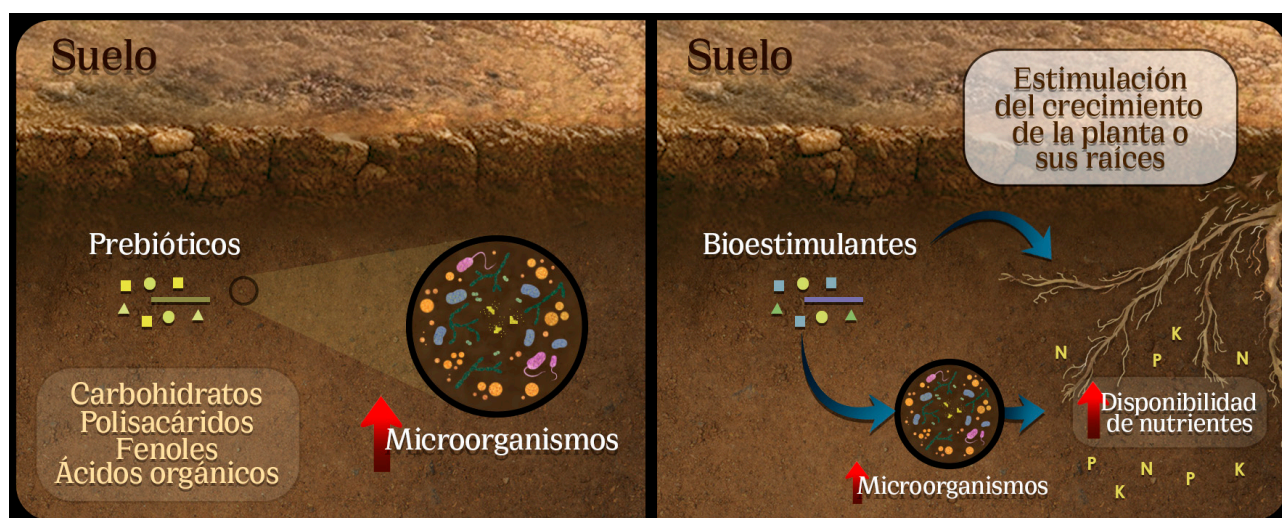
Por sus propiedades físicas y químicas, algunas pueden mejorar la estructura del suelo promoviendo la formación de agregados estables, lo que favorece la aireación y la infiltración de agua. Otras, en cambio, incrementan la capacidad del suelo de retener agua y nutrientes, actuando como una esponja que los almacena y libera de forma gradual.

Además, y aquí es donde retomamos la pregunta inicial: muchas de estas enmiendas contienen moléculas y compuestos que actúan como prebióticos y bioestimulantes del suelo, alimentando a los microorganismos. Éstos, a su vez, transforman y hacen más accesibles los nutrientes para las plantas, o incluso mejoran su capacidad para absorberlos del suelo. En otras palabras, fertilizar con enmiendas orgánicas no tiene por qué significar solo 'nutrir' a las plantas directamente, sino 'activar' la vida en el suelo. Es el propio suelo, con ayuda de los microorganismos, quien se fertiliza.

La siguiente pregunta que podría surgir es: ¿cómo actúan las enmiendas orgánicas para generar estas respuestas en el suelo y en las plantas? Existen estudios que han demostrado que, durante su descomposición, muchas enmiendas orgánicas liberan compuestos activos como monosacáridos, polisacáridos (celulosa y hemicelulosa), compuestos fenólicos, ácidos orgánicos y, de forma destacada, sustancias húmicas. Estas últimas son un grupo complejo y heterogéneo de compuestos orgánicos formados a partir de la descomposición de residuos vegetales, animales y microbianos. Representan una fracción estable de la materia orgánica del suelo y están presentes en enmiendas como el estiércol, el compost y los biocarbones. La combinación de estas sustancias junto con otras formas de carbono mencionadas puede servir como fuente de alimento directo para microorganismos beneficiosos, o mejorar el ambiente en el que éstos prosperan. Estos



Ejemplos de enmiendas orgánicas. Izquierda, estiércol de caballo. Centro, compost. Derecha, biocarbón (biochar). **Fuente:** Wikimedia Commons.



Sustancias con acción prebiótica y bioestimulante en el suelo. Izquierda, efecto de una sustancia prebiótica sobre los microorganismos del suelo. Derecha, efecto de una sustancia bioestimulante sobre los microorganismos, las plantas y el propio suelo. Fuente: Elaboración propia (Francisco Moreno Racero).

microorganismos podrían degradar otros compuestos del suelo para liberar nutrientes previamente no disponibles para las plantas, o modificar el suelo física y químicamente (mediante cambios en la acidez o su estructura), facilitando su acceso. A su vez, estas moléculas bioactivas pueden actuar incluso como señalizadores moleculares que, tras su reconocimiento, desencadenan rutas metabólicas beneficiosas tanto en microorganismos como plantas. Por ejemplo, la aplicación de ácidos fúlvicos (un tipo de sustancia húmica) al suelo, ha demostrado modificar las comunidades microbianas, aumentar la actividad enzimática y estimular el crecimiento de las raíces, mejorando así la accesibilidad a los nutrientes. Sin embargo, es necesario destacar que un incremento en la cantidad de microorganismos en el suelo no siempre beneficia a las plantas. En algunos casos, un exceso de microorganismos puede generar competencia con las plantas por el nitrógeno disponible en el suelo. Por eso, en este contexto, la calidad de las comunidades microbianas es más relevante que su cantidad.

Es importante entender que el suelo no es simplemente un soporte inerte que contiene nutrientes para las plantas. Es una matriz viva y dinámica, donde interactúan componentes

minerales, materia orgánica, agua, aire, vida vegetal y una inmensa diversidad de microorganismos. En este sistema, se llevan a cabo innumerables reacciones químicas (o más precisamente, biogeoquímicas) que regulan el ciclo de nutrientes esenciales como el carbono, el nitrógeno y el fósforo.

Te invito a reflexionar sobre las grandes ventajas que el uso de este tipo de enmiendas podría ofrecer a nivel socioeconómico y ambiental. Una enmienda orgánica se puede producir mediante la revalorización de residuos agrícolas o industriales, reduciendo la generación de basura y, al aplicarse al suelo, puede recuperar o mejorar sus propiedades. Además, puede fomentar la salud y biodiversidad de la vida que alberga, al tiempo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos o minerales convencionales. Es importante recordar que los fertilizantes químicos convencionales están formulados con nutrientes de alta solubilidad, lo que facilita su absorción por las plantas. Sin embargo, esta misma característica también incrementa el riesgo de lixiviación, provocando que los nutrientes se pierdan con el agua de riego hacia capas más profundas o masas de agua subterráneas, con un considerable impacto ambiental. Estas pérdidas no solo generan una

fertilización ineficiente, sino que también pueden llevar a la sobrefertilización, cuyos efectos negativos están ampliamente documentados: salinización y degradación del suelo, reducción de la biodiversidad microbiana, toxicidad en las plantas y una mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades.

En ciertos escenarios, el suelo por sí mismo ya dispone de los nutrientes necesarios para que crezcan las plantas. Sin embargo, debido a condiciones específicas como baja disponibilidad de agua, altas temperaturas, elevada salinidad o un uso ineficiente de nutrientes por parte de las plantas, éstos no logran promover un aumento en su crecimiento. En tales casos, el uso de enmiendas orgánicas merece especial atención. Tal vez sea el momento de plantear y desarrollar alternativas de fertilización sostenibles y viables como solución a estos problemas.

Francisco Jesús Moreno Racero

Biólogo. Apasionado de la ciencia y la ilustración científica digital. Sin la divulgación, la investigación pierde su significado social.



Escanea el código QR y lee ciencia desde tu dispositivo preferido.



*Las micorrizas,
una solución
microbiana
para una
agricultura y un
planeta más
sostenibles*



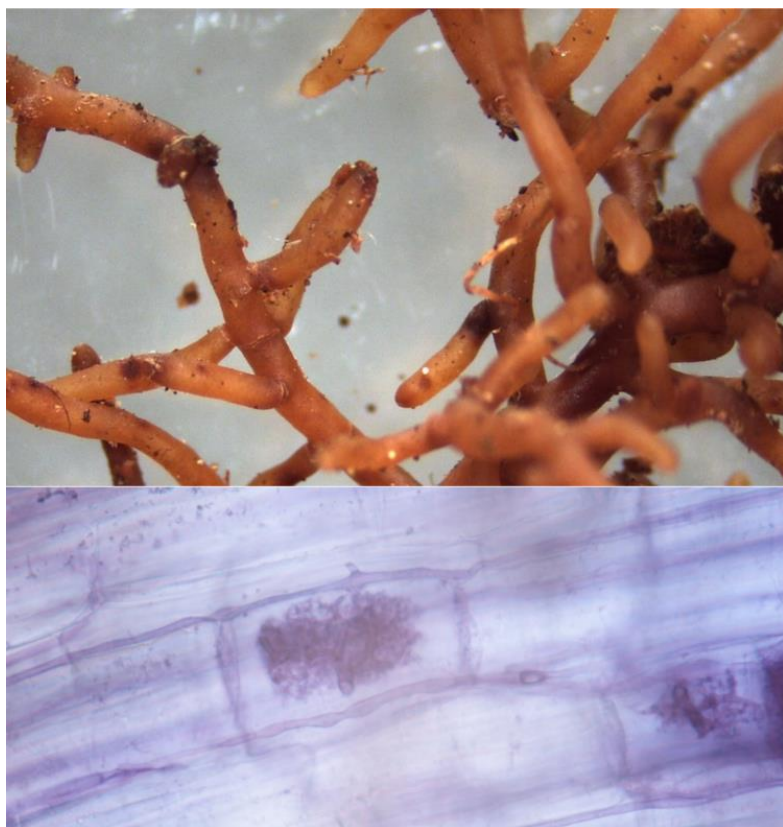
Cultivo con sistemas de fertilización mediante drones. Fuente: Liu Xiaozhong (Pixabay).

En la actualidad, varios son los problemas medioambientales y de salud humana desencadenados por las malas prácticas agrícolas, entre ellas, el excesivo uso de fertilizantes nitrogenados en los cultivos. La emisión de gases de efecto invernadero, la acumulación de nitratos en el ecosistema, las intoxicaciones por la ingestión de altos niveles de nitratos en el agua y en los alimentos y la muerte masiva de animales marinos ante la elevada eutrofización del agua donde habitan, llevan poniendo en alerta desde hace varios años a las diferentes entidades encargadas de la conservación medioambiental y de la salud humana. Desde hace un tiempo, se han puesto en marcha diferentes investigaciones para mitigar problemas como éstos, y una de las opciones más ecológicas y que nos trae hoy hasta aquí son las micorrizas.

El término micorriza proviene del griego *mýkēs* (en castellano hongo) y *ríza* (en castellano raíz), y se define según la RAE como asociación generalmente simbiótica entre la raíz de una planta y ciertos hongos. Es decir, una relación que se basa en el intercambio (en este caso de nutrientes y agua) entre una planta y un hongo. El hongo le aporta a la planta nitrógeno y fósforo y ésta, a cambio, le aporta al hongo carbohidratos y lípidos derivados de la

fotosíntesis. Este intercambio de sustancias entre ambas partes es crucial para el desarrollo y supervivencia de las plantas, especialmente en su fase inicial de crecimiento o en suelos pobres en nutrientes, proporcionando los nutrientes necesarios para su crecimiento al igual que lo haría un fertilizante comercial. También mejoran la resistencia de las plantas frente a condiciones ambientales adversas como la sequía, el exceso de agua o la acidez del suelo, o la presencia de posibles patógenos (bacterias y hongos), haciéndolas más resilientes, lo que genera múltiples beneficios para una agricultura sostenible.

El mundo de las micorrizas es muy amplio, existiendo actualmente varios tipos de micorrizas, que se clasifican según la estructura de la relación y el tipo de hongo involucrado. Las más comunes e importantes son las micorrizas arbusculares, en las que los hongos pertenecientes al género *Glomeromycota* forman una estructura con forma arbuscular en el interior de la célula vegetal. También encontramos las micorrizas ectotróficas, donde los hongos pertenecientes a los géneros *Basidiomycota* y *Ascomycota* forman una capa externa en la raíz. Además, podemos encontrar micorrizas ectoendomicorrízicas que son una



Raíces colonizadas por hongos ectomicorrícicos (arriba) y micorrícicos arbusculares (abajo). **Fuente:** Katrin Schulz (Pixabay) y Álvaro López-García.

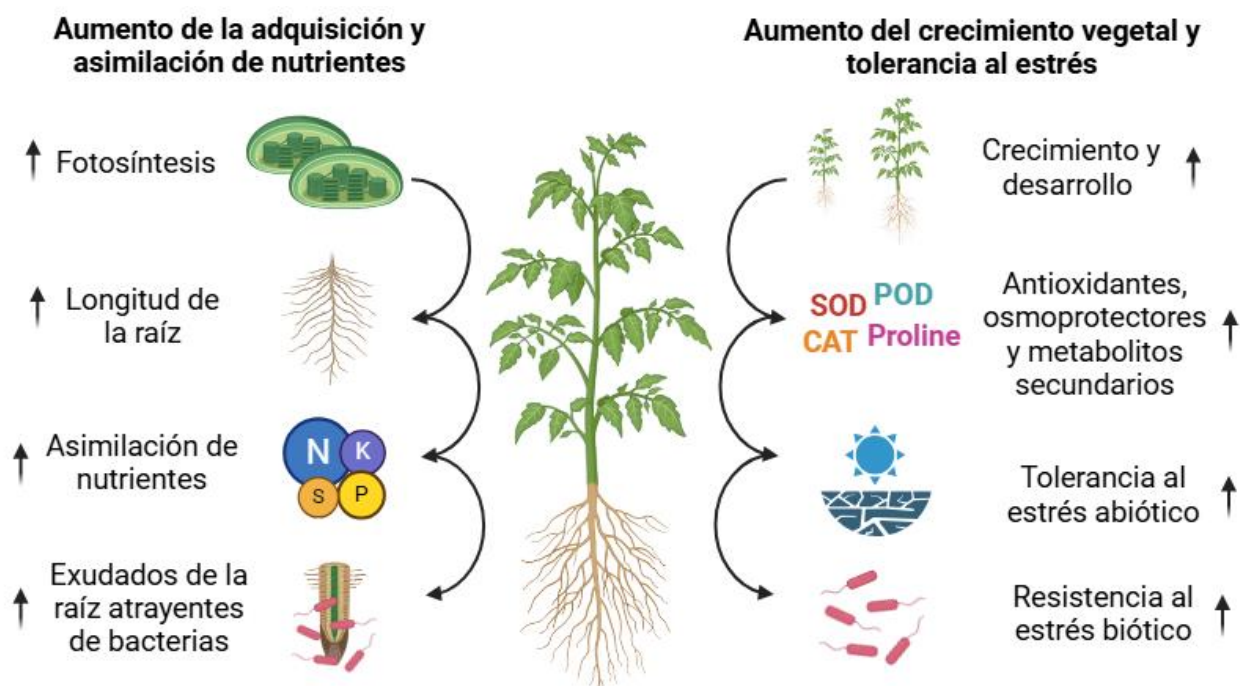
combinación de las dos anteriores, y otras menos extendidas como las micorrizas ericoides, las arbutoides y monotropas, que son específicas de diferentes especies vegetales.

A nivel medioambiental, las micorrizas suponen un gran impacto en los ecosistemas, ya que estimulan a los microorganismos y la biodiversidad general del suelo. Estas asociaciones mejoran la estructura y fertilidad del suelo, formando agregados que previenen la erosión y que permiten una mayor aireación y retención de agua. Las micorrizas participan en el ciclo de los nutrientes ayudando a descomponer la materia orgánica y mejorando la fertilidad del suelo. Además, gracias a la secreción de exudados que actúan como fuente de energía para otros microorganismos, estimulan la actividad microbiana, particularmente de bacterias fijadoras de nitrógeno y degradadoras de la materia orgánica del suelo. Por otra parte, las micorrizas propician un aumento de la

biodiversidad tanto microbiana como vegetal, creando un entorno más favorable para una amplia gama de microorganismos (bacterias, hongos saprófitos y protozoos) y facilitando la colonización de plantas en suelos pobres en nutrientes. Así, en el ámbito de la agricultura, el uso de inoculantes micorrícicos puede mejorar la productividad de los cultivos, reducir la dependencia de fertilizantes y aumentar la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades. Se ha podido comprobar que el uso de estos hongos también contribuye en la mitigación del cambio climático ya que estos ayudan a secuestrar carbono en el suelo, lo que reduce la cantidad de CO₂ en la atmósfera.

El establecimiento de las micorrizas arbusculares en las plantas es un proceso complejo en el que intervienen diversas señales

químicas y estructuras vegetales y fúngicas. Para comenzar la formación de una micorriza se deben dar unas condiciones idóneas de pH, humedad y temperatura. En un primer momento, las esporas del hongo son capaces de germinar sin la presencia de una planta hospedadora pero sólo prosperan si encuentran una accesible en su entorno. La planta, cuando se encuentra bajo condiciones de estrés ambiental, secreta al medio sustancias quimioatrayentes para los hongos formadores de micorrizas como son las estrigolactonas y los flavonoides. Ambas señales favorecen la germinación y el crecimiento de las hifas del hongo hacia la raíz. El hongo como respuesta secreta factores micorrícicos, los cuales activan las rutas de señalización implicadas en la simbiosis. Cuando las hifas del hongo entran en contacto con la raíz de la planta se adhiere a su superficie formando una estructura llamada apresorio. A partir de esta estructura la hifa comienza a penetrar en la raíz de la planta hasta formar en el interior de las células una estructura en



Esquema representativo de las principales funciones que inducen las micorrizas en las plantas. **Fuente:** Creación propia inspirada en Ahammed, G.J., & Hajiboland, R. (2024)

forma de árbol, conocida como arbuscúlos. En estos es donde se va a realizar el intercambio de sustancias entre la planta y el hongo. Pocos días después, estos arbuscúlos colapsan y se forman nuevos arbuscúlos en células no colonizadas.

En conclusión, las micorrizas son mucho más que simples asociaciones entre hongos y plantas. Son claves en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, mejoran la nutrición vegetal, la salud del suelo y la resistencia de las plantas frente a estreses bióticos y abióticos. Proteger las micorrizas actualmente sería una estrategia importante para conservar la biodiversidad del planeta. También es vital el uso de estos microorganismos en la agricultura como herramienta para evitar el impacto en los ecosistemas de la fertilización excesiva con fertilizantes inorgánicos, como los nitratos. Como dijo Mahatma Gandhi, “el futuro depende de lo que hagamos en el presente”. Por tanto, las micorrizas nos ofrecen una oportunidad para cambiar el rumbo de nuestras prácticas agrícolas abusivas por el uso desproporcionado de los recursos que nos proporciona la naturaleza. Si reducimos hoy el uso de fertilizantes químicos, restauraremos la salud de los suelos y la vitalidad de los

ecosistemas, y estaremos asegurando un futuro más sostenible para las próximas generaciones.

Victoria M. Quintero Muñiz

Estudiante de Doctorado en la Estación Experimental del Zaidín del CSIC (Granada, España)



Miguel A. Rosales Villegas

Doctor en Biología. Científico Titular en la Estación Experimental del Zaidín del CSIC (Granada, España).



A scanning electron micrograph (SEM) showing numerous rod-shaped bacteria, likely Bacillus or similar genera, in a soil environment. The bacteria are light green, elongated, and some show distinct transverse ridges or segments. They are scattered across a dark, granular background representing soil particles.

El microbioma ambiental: Clave para alimentos funcionales más sostenibles y saludables

¿Sabías que un solo gramo de suelo puede contener más microorganismos que la población humana de la Tierra? Este interesante “mundo invisible” o conjunto de microorganismos es conocido como microbioma ambiental. Su impacto en la agricultura ha sido extensamente estudiado, dado que este conjunto de microorganismos es fundamental para la salud de los ecosistemas, el rendimiento y calidad de los cultivos. Sin embargo, esto también tiene un impacto en la calidad de los alimentos que consumimos, con lo que la relación del microbioma ambiental con la calidad de nuestra dieta es, del mismo modo, crucial. En este artículo, vamos a explorar cómo estos pequeños organismos “invisibles” trabajan silenciosamente para mejorar nuestra alimentación y salud.

El microbioma ambiental, compuesto por bacterias, hongos y virus que habitan en el suelo, el agua y las plantas, es esencial para el equilibrio de los ecosistemas y la calidad de nuestra alimentación. Estos microorganismos facilitan la absorción de nutrientes por parte de las plantas y potencian la producción de compuestos bioactivos, elementos clave para nuestra dieta. Cultivos como el altramuza y los garbanzos, cuando crecen en suelos ricos en microorganismos beneficiosos, desarrollan niveles más altos de proteínas, antioxidantes y otros nutrientes esenciales. Estos compuestos no sólo mejoran el sabor y el valor nutricional de los alimentos, sino que también tienen un impacto directo en la prevención de enfermedades.

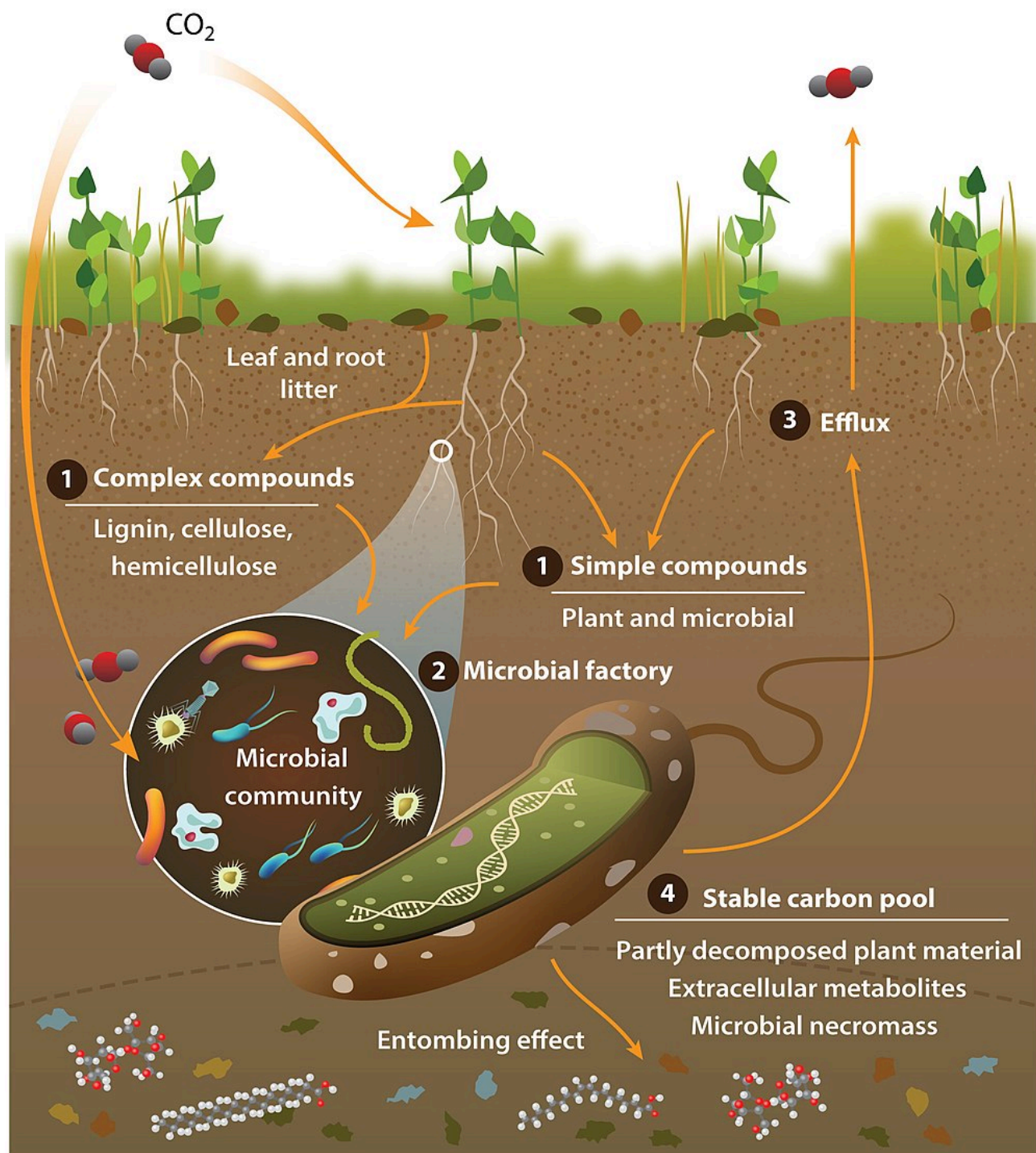
Por ejemplo, bacterias del género *Rhizobium* y hongos micorrízicos contribuyen significativamente a la producción de metabolitos secundarios como polifenoles y flavonoides. Estos compuestos, con reconocidas propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, pueden reducir el riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer en humanos. Al enriquecer el suelo y facilitar estas interacciones simbióticas, el microbioma no sólo mejora el rendimiento agrícola, sino también la calidad de los alimentos que llegan a

nuestras mesas, estableciendo una conexión directa entre la salud del suelo y la nuestra.

Los alimentos funcionales, definidos por su capacidad para aportar beneficios adicionales a la salud más allá de su valor nutricional básico, son un claro ejemplo del impacto positivo del microbioma en nuestra dieta. Frutas, verduras y legumbres cultivadas en suelos equilibrados presentan concentraciones elevadas de nutrientes como ácidos grasos omega-3, vitaminas esenciales y compuestos bioactivos, y, como ya hemos comentado en el apartado anterior, legumbres conocidas como garbanzo o altramuza se están postulando en los últimos años como alimentos funcionales de alto valor nutracéutico. Esto significa que estos alimentos no sólo son saludables en términos generales, sino que pueden fortalecer el sistema inmunológico e incluso reducir el riesgo de aparición de enfermedades crónicas.

Por ejemplo, los polifenoles presentes en frutas y verduras tienen un papel crucial en la protección contra el estrés oxidativo, que está relacionado con el envejecimiento celular y diversas enfermedades. Las proteínas bioactivas de las legumbres, por su parte, favorecen la regulación metabólica y la salud cardiovascular, convirtiéndolas en aliadas imprescindibles de una dieta equilibrada. Estudios recientes incluso sugieren que una dieta rica en estos alimentos funcionales puede mejorar la eficacia de los tratamientos oncológicos, ayudando a mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Es importante destacar que la degradación de la biodiversidad microbiana del suelo, causada por el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, representa un desafío tanto para la sostenibilidad agrícola como para la calidad de nuestra alimentación. Sin embargo, prácticas sostenibles como la rotación de cultivos, el uso de biofertilizantes y la incorporación de cultivos de cobertura están demostrando ser soluciones efectivas para regenerar el microbioma del suelo y garantizar alimentos más nutritivos y sostenibles.



Interacciones microbianas en el suelo: clave para la sostenibilidad agrícola. **Fuente:** Wikimedia Commons: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-082720>.

Los biofertilizantes, que contienen microorganismos vivos seleccionados, no solo mejoran la fertilidad del suelo, sino que también promueven la producción de compuestos bioactivos en los cultivos. Además, estas prácticas reducen la dependencia de fertilizantes químicos, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y

mejorando la eficiencia del uso de nutrientes, y aumentan la capacidad del suelo para capturar carbono. Esto, de nuevo, no sólo beneficia al medio ambiente, sino que también asegura un suministro de alimentos saludables y resilientes para las generaciones futuras.



Legumbres: una fuente natural de proteínas bioactivas y antioxidantes. **Fuente:** Pixabay.

El desarrollo de herramientas avanzadas en bioinformática, como la metagenómica, está revolucionando nuestra comprensión del microbioma ambiental. Estas tecnologías permiten identificar especies microbianas clave que pueden optimizar la producción agrícola y, en consecuencia, mejorar la calidad nutricional de los alimentos de forma muy específica. Por ejemplo, los bioinoculantes desarrollados a partir de microorganismos seleccionados mediante estas técnicas ya están reemplazando fertilizantes sintéticos y pesticidas tradicionales, favoreciendo de este modo una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, que también mejore la calidad de los alimentos que consumimos diariamente.

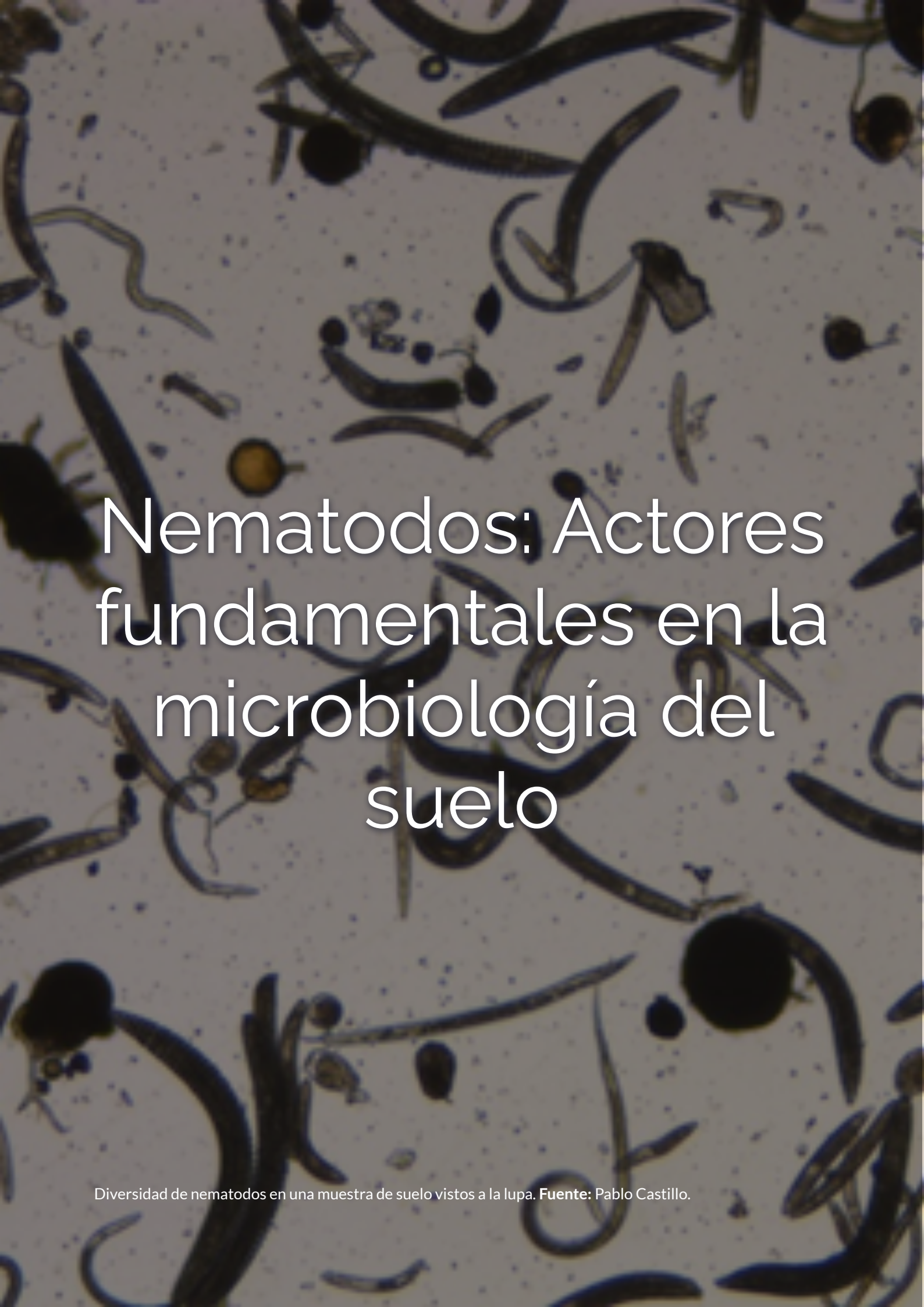
Como conclusión, comprender cómo el microbioma influye en la calidad de los alimentos es esencial para diseñar estrategias que promuevan una dieta más saludable y equilibrada. Por ello, invertir en prácticas agrícolas más centradas en el microbioma no

sólo puede mejorar la sostenibilidad del planeta, sino que también transforma nuestra alimentación, permitiéndonos consumir alimentos funcionales que nos ayuden a prevenir ciertas enfermedades y a mejorar nuestra calidad de vida gracias a sus compuestos bioactivos. Esta conexión entre la salud del suelo y nuestra dieta subraya la importancia de proteger y promover la diversidad microbiana para garantizar un futuro más saludable para todos.

Julia Escudero Felíu

Doctora en Medicina Clínica y Salud Pública. Investigadora postdoctoral en la Estación Experimental del Zaidín (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Granada, España). Mi trabajo se centra en la nutraceutica y los mecanismos moleculares de enfermedades inflamatorias, explorando el potencial de proteínas de leguminosas como agentes terapéuticos en cáncer y diabetes, entre otras.



A microscopic view of soil showing a high density of nematodes. The nematodes are elongated, thread-like organisms, some appearing as thin, curved lines and others as more distinct, thicker structures. They are scattered throughout the field of view, which has a light, grainy background. The text is overlaid in the center in a large, white, sans-serif font.

Nematodos: Actores fundamentales en la microbiología del suelo

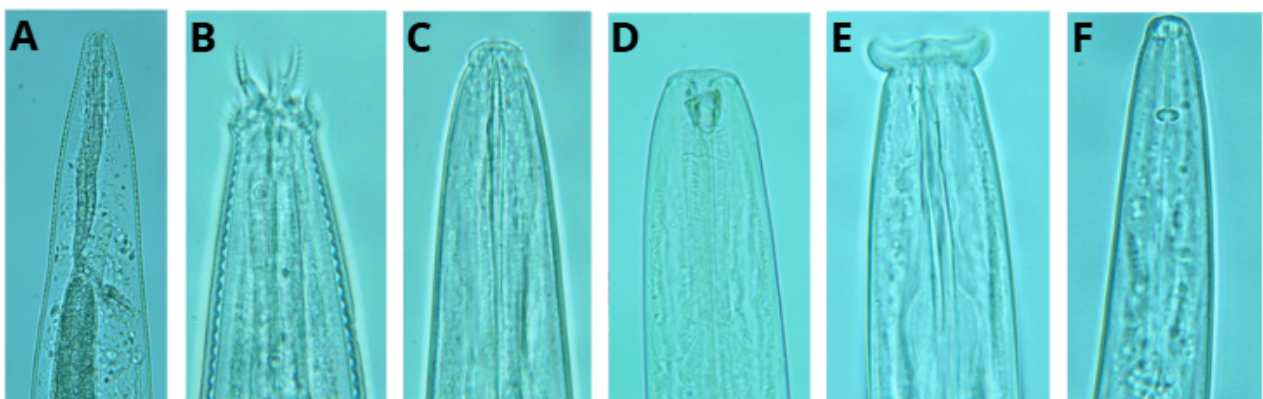
Diversidad de nematodos en una muestra de suelo vistos a la lupa. **Fuente:** Pablo Castillo.

Los nematodos son organismos eucarióticos pluricelulares de origen acuático, mayoritariamente vermiformes, con simetría bilateral y de cuerpo no segmentado. Estos organismos son los animales invertebrados más abundantes de todo el planeta, encontrándose en todos los ecosistemas, incluso en la Antártida. Concretamente, los nematodos del suelo habitan en la fina película de agua que rodea a las partículas y agregados del suelo. Todos ellos constituyen el cuarto filo más grande del reino animal, con más de 25 mil especies registradas, aunque se estima un número muy superior de especies, ya que muchos de ellos son todavía desconocidos. Principalmente se alimentan de hongos y bacterias, pero, algunos de ellos pueden ser depredadores de otros nematodos y parásitos de plantas (fitoparásitos) y animales (zooparásitos).

La superficie exterior de estos organismos recibe el nombre de cutícula (elástica y formada por varias capas). En su interior se encuentra el sistema nervioso, aparato reproductor y digestivo, siendo este último muy variable en función del tipo de alimentación del mismo. A pesar de presentar una estructura que podría parecer bastante simple, algunos de ellos muestran complejas estrategias de supervivencia y de interacción con el medio ambiente y sus fuentes de alimentación.

Con respecto a su morfología y tamaño, los nematodos que habitan el suelo son muy variables, pudiendo destacar la morfología vermiforme, globular o piriforme, así como tamaños que generalmente oscilan alrededor de 1 mm, pero pueden variar desde las 200 micras a poco más de 1 cm. En algunas especies los machos y las hembras son similares, mientras que en otras presentan grandes diferencias morfológicas y de tamaño. Un ejemplo de ello es el caso de *Meloidogyne spp.*, donde el macho es vermiforme y la hembra globular.

Estos pequeños organismos ocupan funciones claves en la ecología del suelo, siendo esenciales en la red trófica del mismo. Las funciones que desempeñan se ven representadas de forma clara a través de la cavidad bucal que muestra cada uno de ellos. Los bacterívoros (se alimentan de bacterias) exhiben una pequeña apertura más o menos tubular con o sin apéndices, mientras que los depredadores muestran una especie de dientes (diferentes a los que conocemos de otros animales) o un desarrollado estilete, estructura que comparten con los nematodos fungívoros (se alimentan de hongos), omnívoros y fitoparásitos. El estilete se trata de una estructura similar a una aguja hipodérmica que permite perforar y absorber el contenido citoplasmático de las células o tejidos de los



La cavidad bucal influye en la función de los nematodos del suelo: Bacterívoros "A y B" (sin estilete); Fungívoro "C" (estilete débil); Depredador "D" (diente); Omnívoro "E" (estilete); Fitoparásito "F" (estilete).
Fuente: Pablo Castillo.

que se alimenta. En algunos casos, estas estructuras bucales pueden reducirse o verse modificadas como en el caso de los machos de algunas especies o en los estadios de supervivencia.

Algunas de las funciones que ejercen los nematodos en la cadena trófica del suelo son, por ejemplo, las siguientes: mantenimiento del ciclo de los nutrientes; redistribución de los nutrientes; efectos de control de poblaciones de otros microorganismos del suelo (hongos y bacterias); flujo de microorganismos en el horizonte del suelo como hongos o bacterias (a través de su adhesión a la cutícula del nematodo); y fuente de carbono, entre otras. Estas funciones, conllevan a una mejora de la salud del suelo, y un aumento y conservación de la biodiversidad del mismo.

Durante su proceso de alimentación, los nematodos también liberan nutrientes presentes en sus fuentes de alimento, ya sean microorganismos del suelo o plantas. Este hecho favorece la transformación de los nutrientes obtenidos en formas inorgánicas, como nitratos, fosfatos o amonios, los cuales pueden ser a su vez, fácilmente asimilados por otros organismos integrantes del suelo. Asimismo, su papel como consumidores de hongos y bacterias, favorece el mantenimiento del equilibrio de las comunidades microbianas del suelo, regulando la diversidad de los microorganismos.

Los nematodos fitoparásitos perforan la pared vegetal de las células, insertando en ellas, enzimas y otros compuestos que ayudan a penetrar y pre-digerir el contenido celular, el cual es absorbido por el estilete a través del lumen. Estos nematodos canalizan la energía y los nutrientes de los productores primarios (plantas) hacia el suelo. Sin embargo, frente a un aumento en el número de estos, o, si se dan en el medio condiciones que generen estrés para la planta, los nematodos pueden llegar a ralentizar el crecimiento de la misma.

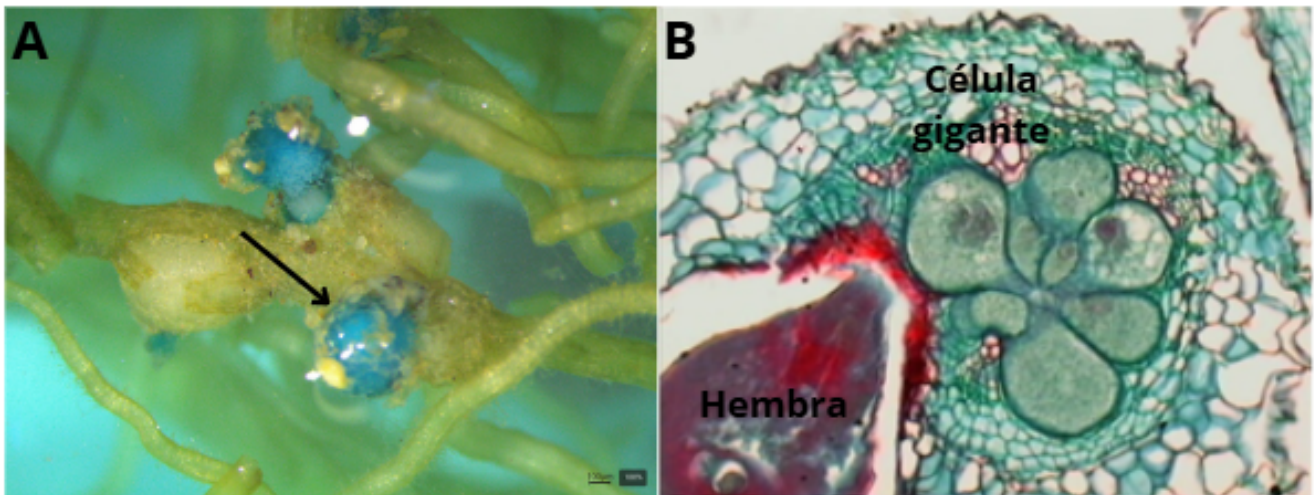
De esta forma, determinadas especies de nematodos son capaces de generar daño directo e indirecto a las plantas en respuesta a

su parasitismo. Directo, debido a la extracción de nutrientes de las células vegetales y los daños ocasionados en los tejidos de la raíz o de partes aéreas de la planta. Indirecto por actuar como vector para otros patógenos oportunistas del suelo o virus vegetales que incrementan el deterioro ya provocado. Este efecto perjudicial se encuentra generalmente asociado al número de individuos de esas especies que se encuentren en el suelo.

Esto se traduce en pérdidas en el sector agrícola, pudiendo derivar hasta en un 60% en algunas cosechas de invernadero como es el caso del pepino. En el caso de extensiones en parcelas, estas son de al menos un 10% de la cosecha potencial, generalmente, mediante rodales en los que se observa un menor crecimiento y producción de las plantas afectadas.

A nivel mundial, es posible destacar tres grupos de fitoparásitos fundamentales: los formadores de nódulos en la raíz (*Meloidogyne spp.*); los formadores de quistes (*Heterodera spp.*); y los lesionadores de la raíz (*Pratylenchus spp.*). En el caso de los formadores de nódulos y quistes, se observa un parasitismo muy especializado y evolucionado en el que se remodelan las estructuras celulares vegetales para la alimentación del nematodo. Formación de células gigantes para los noduladores y sincitio para los formadores de quistes de donde se alimentan las hembras sedentarias. Por otra parte, los lesionadores de la raíz destruyen el tejido vegetal internamente mediante el estilete, ocasionando necrosis en la raíz.

Actualmente, existen diversas herramientas para combatir a estas especies. La obtención de suelos ecológicamente vivos y equilibrados en la parcela, las rotaciones de cultivos, el uso de plantas con resistencias para determinadas especies, nematicidas (baja disponibilidad debido a su efecto negativo en el medio ambiente) y los agentes de biocontrol son algunas de estas herramientas usadas para paliar el efecto negativo de los nematodos fitoparásitos.



Nódulos inducidos en la raíz por especies de *Meloidogyne* (nematodos fitoparásitos): A) Nódulos de *M. incognita* en raíces de judía teñidos con sal sódica de erioglaucina en la que se observan las masas de huevos en azul dentro de una masa proteica generada por la hembra. B) Corte histológico de un nódulo inducido por *M. artiellia* en garbanzo donde se observa la hembra (en rojo) y las células gigantes. **Fuente:** Pablo Castillo

De este modo, es posible afirmar que la relación entre los nematodos del suelo y la microbiología resulta crucial para garantizar el equilibrio y la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres. Estos organismos contribuyen al ciclo de nutrientes, controlan las poblaciones microbianas, sirven como indicadores de la calidad del suelo y participan activamente en las cadenas alimenticias subterráneas. Entender estas interacciones es clave para implementar prácticas de manejo del suelo más efectivas en entornos agrícolas, mejorando su productividad a largo plazo.



¿Eres profesor y quieres apoyar el proyecto DodoCiencia?

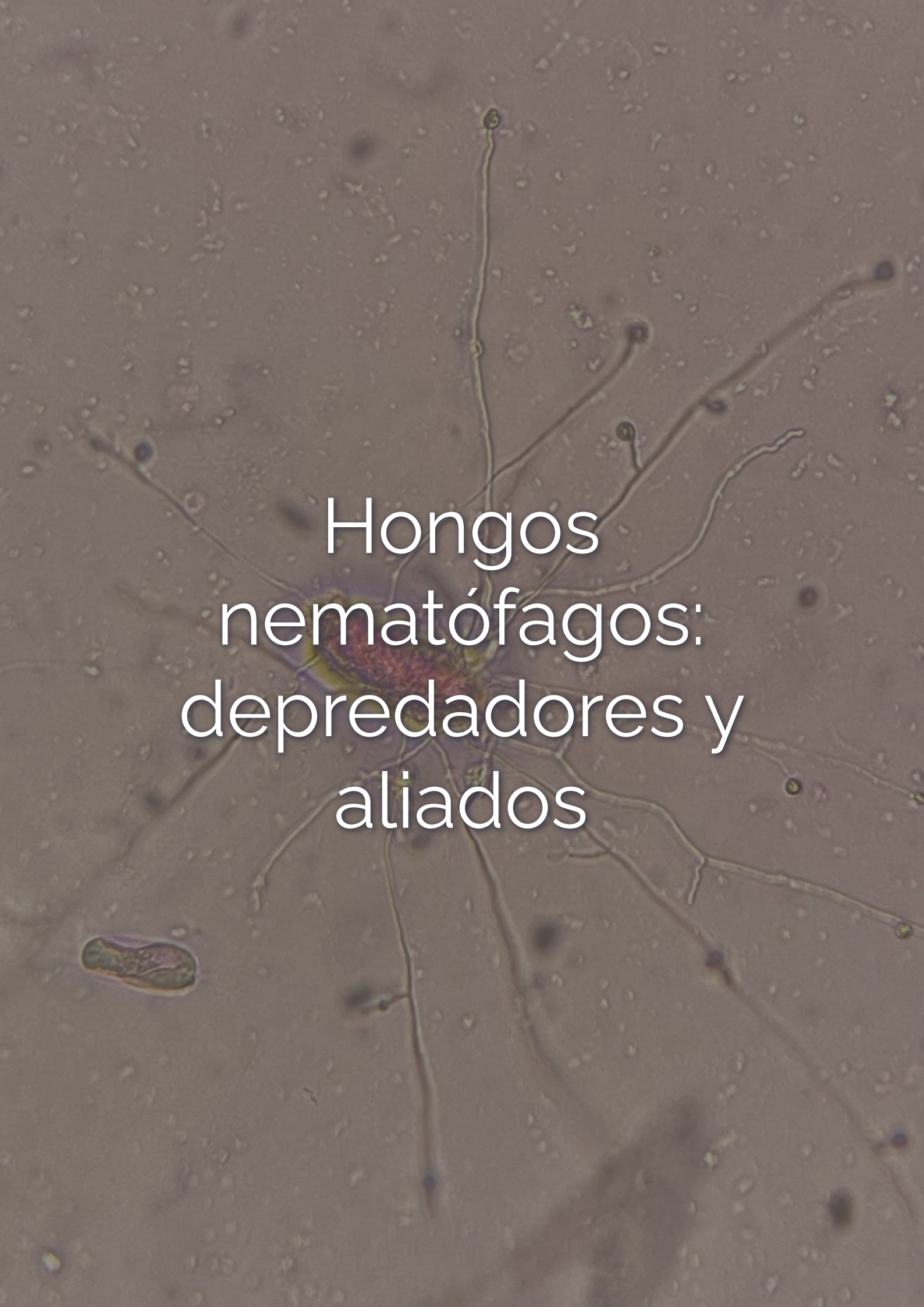
Tenemos divulgación científica, pero también tenemos una sección con contenidos educativos de los diferentes cursos.

Si eres profe y nos quieres ayudar, por favor, escríbenos a contacto@hidden-nature.com

Ana García Velázquez

Graduada en Bioquímica e investigadora predoctoral en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC), en Córdoba.



A microscopic image showing a nematode being consumed by a fungus. The nematode is a small, elongated, segmented worm-like creature, colored in shades of green and yellow. It is positioned in the lower-left quadrant of the frame. The fungus is a large, central, multi-colored mass (red, yellow, and green) with numerous long, thin, branching hyphae extending outwards in all directions. The background is a light brown, granular surface.

Hongos nematófagos: depredadores y aliados

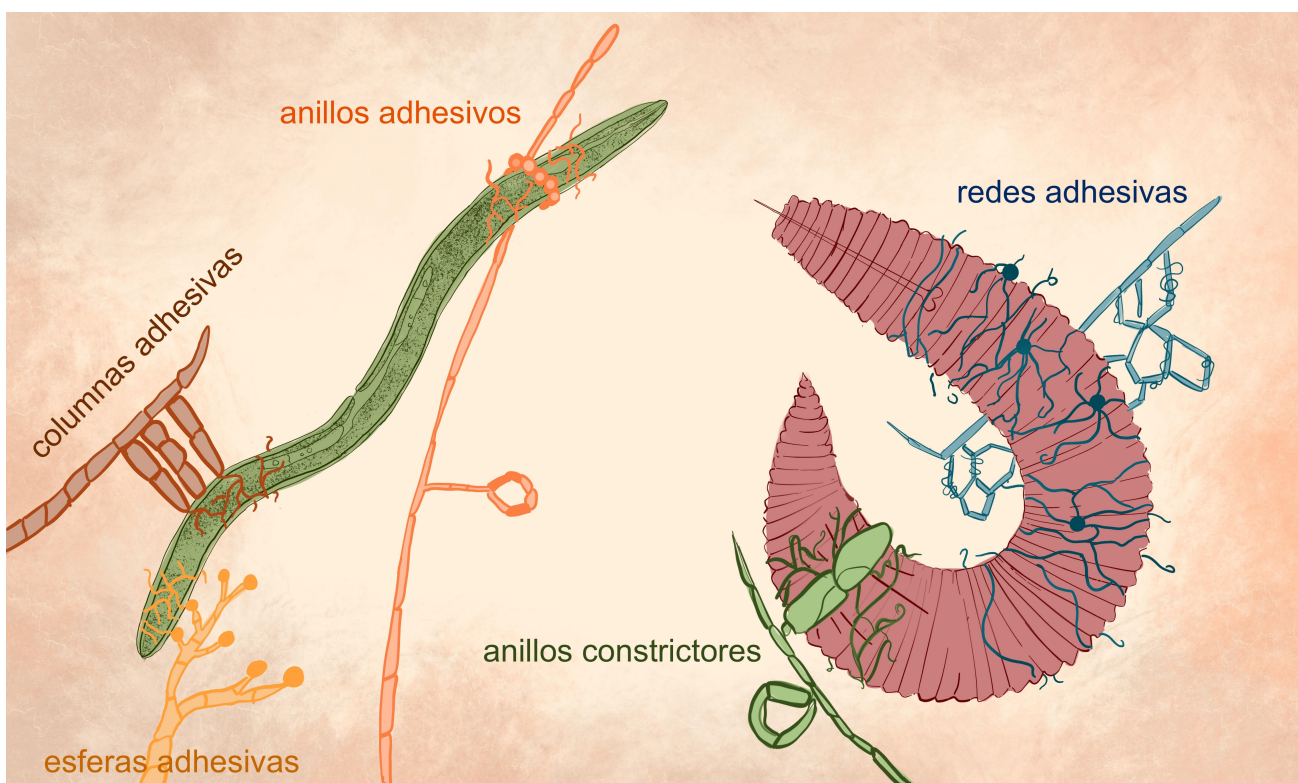
El suelo es una estructura compleja que está compuesta por minerales, materia orgánica, organismos vivos, agua y aire. Estos componentes interactúan entre sí y, en el caso de los suelos sanos, proporcionan servicios y funciones ecosistémicas esenciales para la sociedad, como el ciclo de agua y nutrientes y la producción agrícola. Muchos de los organismos que habitan el suelo dependen exclusivamente de la fracción acuosa del mismo, lo que los cataloga como organismos acuáticos. Entre estos destacamos a los nematodos del suelo.

Los nematodos son animales pluricelulares de cuerpo filiforme y no segmentado. A pesar de su aparente simplicidad, son organismos muy complejos y completos, ya que poseen un sistema digestivo, un sistema reproductor y órganos sensoriales que les permiten interactuar con su entorno. Estos animales han colonizado prácticamente todos los hábitats del planeta, aunque en este texto nos centraremos exclusivamente en los que viven en el suelo.

Entre los nematodos que habitan en el suelo se encuentran representantes de todos los

hábitos alimenticios: bacterívoros, fungívoros, herbívoros, omnívoros y depredadores. En concreto, dentro de los nematodos herbívoros existen especies fitoparásitas, como *Meloidogyne*, capaces de causar daños significativos a los cultivos cuando sus poblaciones alcanzan un número elevado. El control de estas especies patógenas representa un gran desafío para la agricultura, ya que, una vez introducidas en el sistema agrícola, resulta muy difícil reducir su número. Además, los productos químicos disponibles para su manejo son muy limitados debido al alto riesgo ambiental y humano asociado a su uso. No obstante, estos nematodos cuentan con enemigos naturales, como otros nematodos, ácaros y hongos especializados. Estos últimos, conocidos como hongos nematófagos, se alimentan de nematodos y pueden desempeñar un papel importante en el manejo biológico de sus poblaciones.

Los hongos nematófagos pueden alimentarse exclusivamente de nematodos o tener modos de vida alternativos como endófitos de plantas o saprófitos y ser solo depredadores de



Distintos tipos de trampas que pueden formar los hongos nematófagos. Creación de la autora.

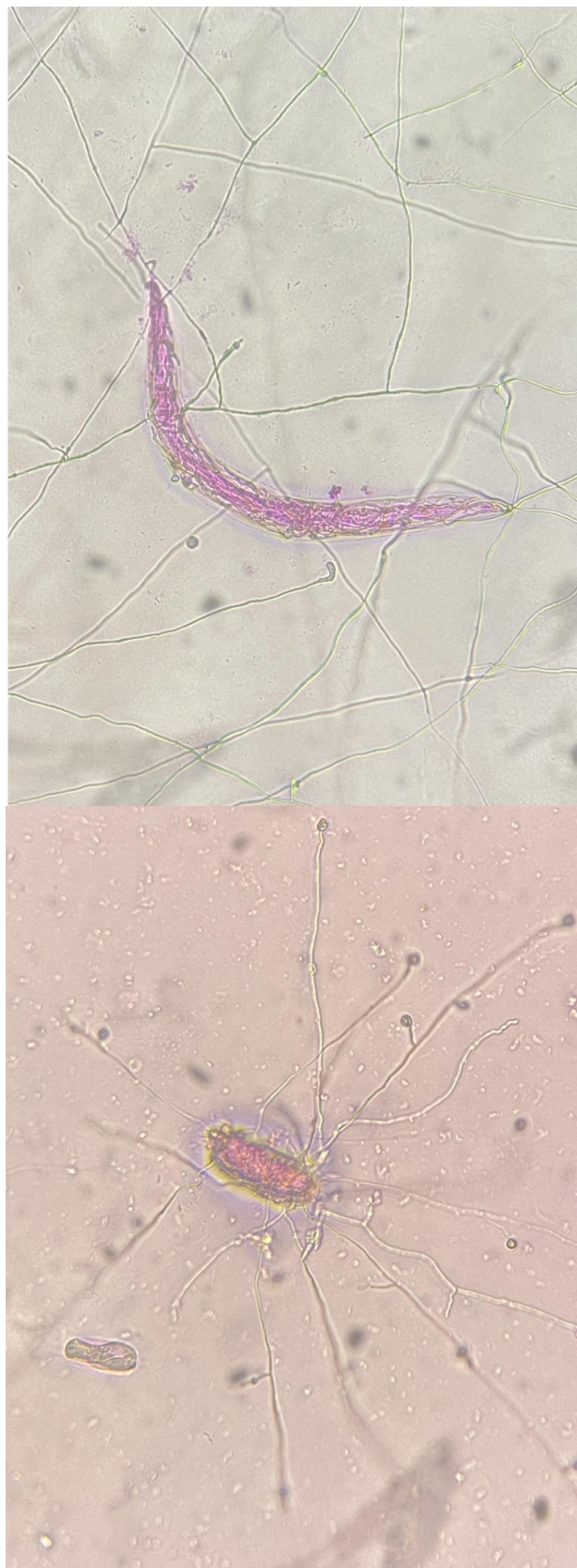
« HONGOS NEMATÓFAGOS »

nematodos en casos puntuales. Según su modo de acción clasificamos a los hongos nematófagos en los siguientes grupos:

- **Formadores de trampas:** modifican su micelio para formar estructuras específicas para la captura de nematodos. Estas trampas atrapan al nematodo, después el hongo crece y penetra la cutícula de su presa. La formación o no de estas trampas está mediada por varios factores bióticos y abióticos como la cantidad de materia orgánica, la cantidad de nematodos en el suelo o los niveles de humedad. Algunos ejemplos son: *Arthrobotrys oligospora*, *Dactylellina haptotyla*.
- **Endoparásitos:** estos hongos no forman estructuras especializadas, sino que parasitan a los nematodos mediante la formación de esporas. Estas esporas son ingeridas por el nematodo o se adhieren a su cutícula. A partir de este momento, las hifas del hongo crecen y este se alimenta del nematodo. La mayoría de hongos de este grupo son parásitos obligados de nematodos. Por ejemplo: *Drechmeria coniospora*, *Harposporium anguillulae*.
- **Parásitos de huevos:** son hongos endoparásitos que se especializan en la infección de huevos. Las hifas crecen y forman una estructura adhesiva o apresorio capaz de penetrar la gruesa cutícula del huevo y de alimentarse de este. Algunos ejemplos son: *Trichoderma harzianum*, *Purpureocillium lilacinum*, *Pochonia chlamydosporia*.

Para hacer más fácil la captura de presas, algunos hongos nematófagos también producen sustancias tóxicas que paralizan a los nematodos. Además, los hongos endoparásitos y los formadores de trampas producen sustancias que imitan feromonas y atraen a los nematodos.

Los hongos nematófagos están presentes en suelos de todo el mundo, aunque su abundancia, diversidad y actividad varían



Arriba y derecha. Tipos de hongos nematófagos cultivados en placas de petri y fotografiados en un microscopio invertido. Se observan: dos nematodos atrapados en unos anillos, un huevo infectado y un nematodo consumido por un hongo endoparásito. **Fuente:** Fotos del microscopio invertido de Ana García Velázquez con permisos para usarlas.



considerablemente según las condiciones del suelo. Algunas especies, como *Trichoderma harzianum* y *Purpureocillium lilacinum*, son comúnmente comercializadas como agentes de biocontrol en muchos cultivos. Sin embargo, la presencia y efectividad de estos hongos están influenciadas por el estado del suelo. Como ocurre con todos los hongos productores de hifas, los hongos nematófagos requieren agua y la menor alteración posible del suelo para prosperar. Por ejemplo, suelos ricos en materia orgánica, con prácticas de bajo laboreo y altas densidades de nematodos favorecen tanto la eficiencia como la abundancia de estos hongos.

Ampliar nuestro conocimiento sobre la ecología de los hongos nematófagos es clave para controlar de manera sostenible las enfermedades agrícolas. Este es, de hecho, el principal desafío actual: desentrañar su

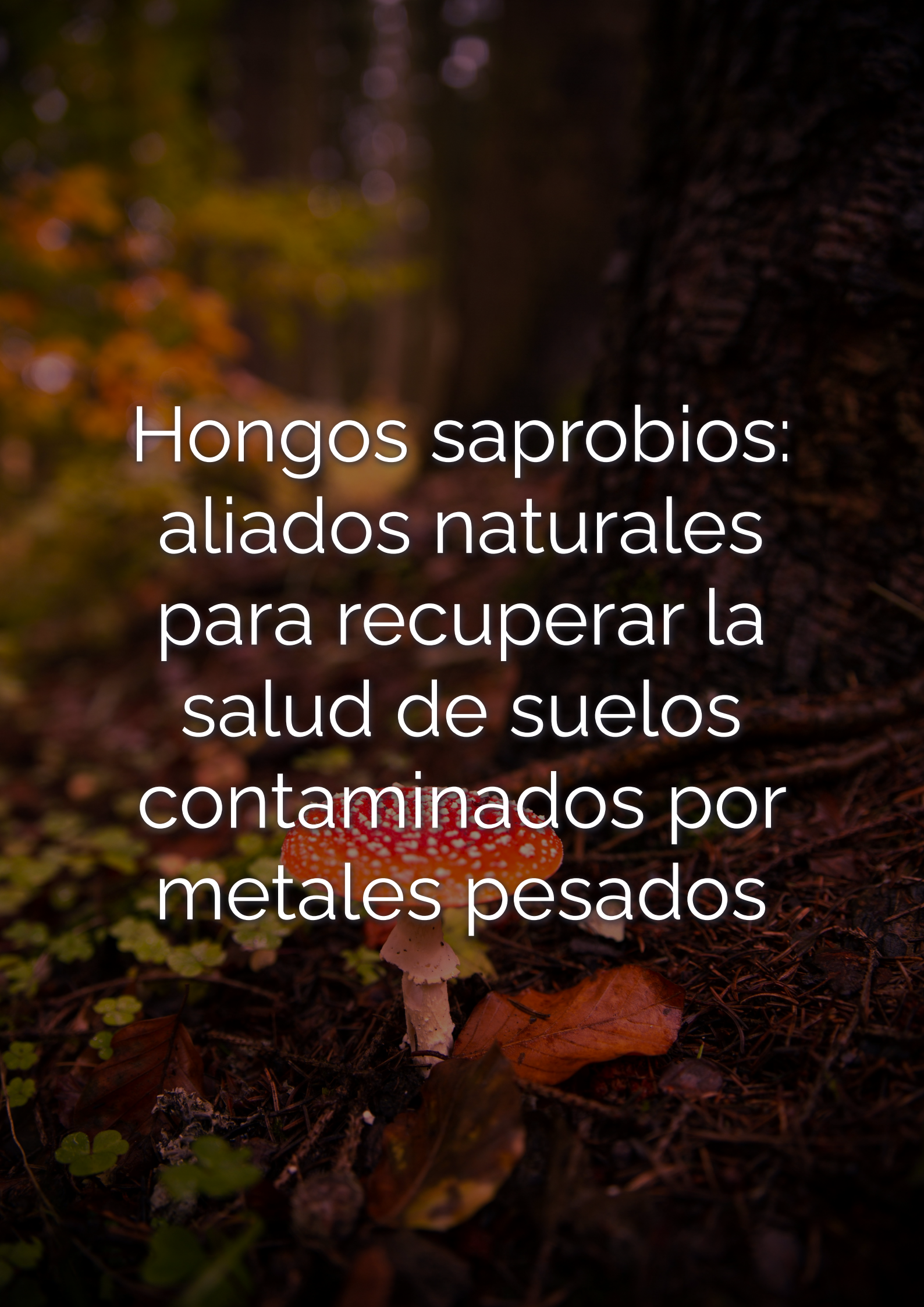
ecología y aplicar este conocimiento en estrategias de manejo de enfermedades que sean efectivas y respetuosas con el medioambiente.

Rosa Ana Salazar García

Bióloga e investigadora predoctoral en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC).



Hongos saprobios:
aliados naturales
para recuperar la
salud de suelos
contaminados por
metales pesados

A close-up photograph of a vibrant red mushroom with white spots, likely a fly agaric, growing from a forest floor. The ground is covered with a layer of dark brown pine needles and some dry, brown leaves. In the lower-left corner, there are small, green, clover-like plants. The background is softly blurred, showing more of the forest floor and some green foliage in the distance. The overall lighting is natural, suggesting a forest environment.



Estado actual de los suelos residualmente contaminados afectados por el vertido minero de Aznalcóllar.

Las comunidades microbianas del suelo muestran una alta sensibilidad a los cambios ambientales, lo que las lleva a adoptar estrategias de supervivencia eficaces para facilitar la proliferación de microorganismos resistentes en escenarios de estrés ambiental. Estos microorganismos, además, son excelentes bioindicadores del estado de salud de un ecosistema, ofreciendo una herramienta útil para evaluar y restaurar suelos degradados.

Entre estos microorganismos destacan los hongos saprobios, que están naturalmente presentes en el suelo y poseen una habilidad única para degradar compuestos ricos en carbono provenientes de material vegetal en descomposición. Sin embargo, no solo contribuyen a la descomposición de materia orgánica, sino que también pueden desempeñar un papel esencial en la restauración de ecosistemas degradados y la mitigación de la contaminación por metales pesados. Gracias a su estructura celular y capacidad de inmovilización de elementos tóxicos, estos hongos presentan una alta capacidad para tolerar altas concentraciones de estos elementos, pudiendo así sobrevivir en ambientes contaminados y actuar como “ingenieros naturales”, transformando suelos contaminados en ambientes más fértiles y saludables.

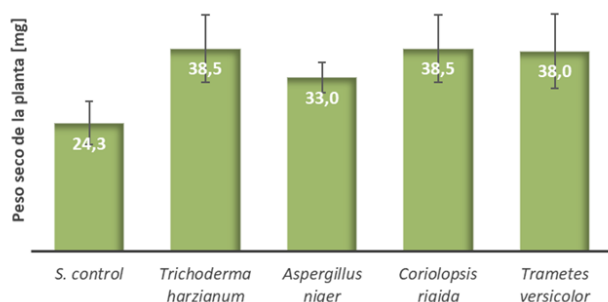
El caso de Aznalcóllar: un ejemplo de aplicación necesaria

El desastre ecológico de Aznalcóllar (Sevilla), ocurrido en 1998, es un caso emblemático de contaminación por metales pesados en España. Este accidente provocado por un vertido minero a gran escala dejó un legado de suelos ácidos, con bajo contenido en materia orgánica y altas concentraciones de elementos tóxicos como arsénico (As), cobre (Cu) y plomo (Pb). Aunque parte del área afectada se ha recuperado tras las medidas de restauración ecológica llevadas a cabo tras el accidente, estudios posteriores han identificado sectores aún contaminados y con riesgos de toxicidad significativos para el ecosistema. Estos suelos desprovistos de vegetación, dispersos a lo largo de las cuencas de los ríos Agrio y Guadiamar, representan una amenaza ambiental que requiere soluciones innovadoras y sostenibles.

Estrategias de biorremediación con hongos saprobios

Una de las estrategias más prometedoras para abordar esta problemática es la aplicación de hongos saprobios, como *Trichoderma harzianum*, *Aspergillus niger*, y *Corioloropsis rigida*, en combinación con plantas resistentes. Estos hongos pueden inmovilizar metales pesados,

« HONGOS SAPROBIOS »



Crecimiento de las plantas a las 6 semanas de estudio bajo la influencia de cada una de las especies de hongos saprobios evaluadas.

reducir su toxicidad y mejorar la fertilidad del suelo mediante la liberación de compuestos beneficiosos. Además, fomentan el crecimiento vegetal bajo condiciones adversas al mejorar la nutrición y la actividad biológica del suelo.

En un estudio reciente, suelos residualmente contaminados de las cuencas afectadas por el vertido minero de Aznalcóllar fueron recolectados y tratados con hongos saprobios en un ensayo controlado. Tanto las condiciones del suelo estudiado como de las plantas modelo (trigo) mostraron una mejora general tras la aplicación de los hongos saprobios, con los siguientes resultados destacados:

1. **Actividad biológica del suelo:** La inoculación con *T. harzianum* y *C. rigida* destacó por su capacidad para aumentar significativamente actividades enzimáticas del suelo como la deshidrogenasa y la glucosidasa en comparación con el suelo control, siendo esto un indicador clave de la recuperación biológica del suelo.
2. **Reducción de metales pesados:** Se observó una disminución cercana al 10% en la concentración de Pb y As en suelos tratados con *T. harzianum*, mientras que *A. niger* mostró eficacia en la reducción del As.
3. **Bioprotección de las plantas:** Los hongos saprobios ofrecieron un significativo papel bioprotector para las plantas, estimulando su crecimiento bajo las condiciones de estrés ambiental a través de su capacidad para estabilizar metales

pesados y mejorar las condiciones generales del suelo.

Conclusiones y perspectivas

Los resultados obtenidos subrayan el potencial de los hongos saprobios como herramienta microbiológica en la restauración de suelos contaminados por metales pesados. Específicamente, *T. harzianum* y *C. rigida* se perfilan como aliados clave para mejorar la salud del suelo y reducir el impacto ambiental de los elementos tóxicos. Sin embargo, la efectividad de estas estrategias podría ampliarse con la adición de enmiendas que mejoren las propiedades fisicoquímicas del suelo, potenciando el efecto protector de estos hongos.

La combinación de técnicas de biorremediación basadas en hongos saprobios con enfoques sostenibles como la revalorización de residuos como enmiendas de suelo representa una solución viable y prometedora para la recuperación de áreas degradadas como Aznalcóllar. El camino hacia una restauración completa requiere continuar explorando y optimizando estas estrategias, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y el equilibrio ecológico en regiones afectadas por actividades industriales.

Inmaculada García Romera

Investigadora del grupo de "Biofertilización y Biorremediación por Hongos Rizosféricos" de la Estación Experimental del Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZ-CSIC).



Mario Paniagua López

Investigador del grupo de "Biofertilización y Biorremediación por Hongos Rizosféricos" de la Estación Experimental del Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZ-CSIC).





Innovaciones tecnológicas para la detección temprana de microorganismos patógenos en cultivos

« DETECCIÓN TEMPRANA »

En la actualidad, la producción agroindustrial enfrenta desafíos cada vez mayores debido a la propagación de enfermedades que afectan a la calidad y el rendimiento de los cultivos. Los patógenos como hongos, bacterias y virus pueden causar pérdidas significativas, lo que resalta la importancia de desarrollar y aplicar métodos de detección temprana. La identificación precisa, el tratamiento temprano y preciso y la eliminación de las enfermedades de las plantas son esenciales para la protección de los cultivos y el crecimiento saludable de los mismos. La identificación rápida de estos agentes patógenos permite una respuesta rápida, reduciendo el uso indiscriminado de pesticidas y minimizando el impacto ambiental, así como evitando en muchos casos pérdidas económicas muy cuantiosas en el sector agrícola.

La detección y la identificación de patógenos responsables de infecciones en cultivos agroindustriales se realizan actualmente con métodos que, a menudo, no son eficaces para detectar infecciones en las etapas tempranas de las plantas. Estos métodos se clasifican generalmente en enfoques indirectos y directos, los cuales se presentan a continuación.

En los métodos tradicionales o convencionales, la identificación y la clasificación se realizaban mediante pruebas en laboratorios o mediante inspección visual por parte de los agricultores. Ahora, realizar las pruebas en laboratorios requiere mucho tiempo, mientras que la inspección visual requiere suficiente experiencia y conocimiento. Dentro de estos métodos tradicionales, los métodos indirectos, incluyen la detección visual de infecciones en plantas, semillas o frutos. Aunque estos métodos pueden identificar patógenos latentes y asintomáticos, son lentos con tiempos de incubación que a menudo alcanzan los 10-15 días, así como un coste elevado en recursos. Además, a menudo carecen de sensibilidad adecuada, especialmente cuando se detectan patógenos presentes en bajas frecuencias (es decir, menos del 1% de la muestra), y son aplicables principalmente sólo en etapas

posteriores de la infección, cuando ya son visibles los síntomas. Estos métodos también son limitados cuando los patógenos no se expresan fenotípicamente en la planta, lo que significa que no son eficaces para detectar infecciones en etapas tempranas del crecimiento y desarrollo de la planta. Además, la dependencia de los síntomas visuales a menudo lleva a errores en las identificaciones, ya que los síntomas pueden superponerse entre varios patógenos.

Los métodos directos para la detección de patógenos incluyen principalmente técnicas serológicas (basadas en anticuerpos) y moleculares (basadas en ácidos nucleicos), aunque también se están desarrollando técnicas ópticas.

1) Las técnicas serológicas, como los ensayos de inmunoabsorción ligados a enzimas (ELISA), son caras porque requieren el desarrollo de anticuerpos específicos para cada patógeno, lo que resulta en algunos casos muy complicado y costoso. Además, estos anticuerpos suelen tener una alta tasa de falsos positivos y negativos debido a reacciones cruzadas y su unión a proteínas no específicas, o simplemente, dependiendo de la etapa de la infección, la proteína objetivo puede no expresarse, lo que lleva a falsos negativos. Estos métodos también son limitados por su incapacidad para detectar patógenos en etapas tempranas de infección y son menos eficaces para patógenos fúngicos, para los cuales los anticuerpos específicos de la especie a menudo no están disponibles. Actualmente también se están desarrollando biosensores que utilizan sustratos ligados a enzimas o nanopartículas que responden a la presencia de metabolitos específicos o productos secundarios producidos durante la infección.

2) Las técnicas moleculares, incluidas las basadas en la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), también enfrentan desafíos. Requieren el desarrollo de cebadores específicos que apunten a genes únicos del patógeno. Sin embargo, dependiendo de la etapa de infección, al



Planta de tomate con síntomas de enfermedad (tizón tardío del tomate) producida por el hongo patógeno *Phytophthora infestans*. Fuente: Pexels.

igual que los métodos serológicos, los genes a detectar pueden no expresarse, lo que lleva a falsos negativos. Por otro lado, muchos métodos moleculares requieren un conocimiento detallado del genoma y/o transcriptoma de referencia del patógeno, lo que a menudo no está disponible para especies fúngicas poco estudiadas. La expresión génica del patógeno puede variar dependiendo de la etapa de infección, lo que provoca detecciones erróneas si el gen objetivo no está activo. Por otro lado, la

relativamente nueva PCR Digital tiene un rango dinámico de detección limitado. En general, estas técnicas tienen también la limitación del diseño de cebadores y sondas para PCR, lo que es particularmente complicado para especies fúngicas estrechamente relacionadas, donde las secuencias de genes objetivo pueden ser muy conservadas. Además, estas técnicas suelen requerir personal especializado y suelen estar limitadas a un pequeño número de patógenos.

« DETECCIÓN TEMPRANA »

3) En tercer lugar, las técnicas ópticas recientes y alternativas incluyen sistemas láser de biospeckle y sistemas de visión multispectral. Estas técnicas se basan en la detección de cambios en la interferencia de la luz o las propiedades de la superficie de las plantas infectadas, pero ambas requieren una masa crítica de infección, lo que las hace menos efectivas para la detección temprana. El Sistema Luminex xMAP, basado en inmunoensayos con esferas magnéticas, también comparte desventajas similares a las técnicas serológicas convencionales, como falsos positivos/negativos y la necesidad de una carga patógena significativa. Métodos como la Hibridación in situ con fluorescencia (FISH) y la inmunofluorescencia (IF) están limitados por problemas como la autofluorescencia y la fotodegradación en muestras de plantas, lo que degrada la fiabilidad de los resultados. Además, las tecnologías de bioimagen, como la espectrometría de masas por imagen (MSI) y la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS), podrían tener un cierto potencial para detectar compuestos específicos de la interacción planta-patógeno, aunque con frecuentes casos de resultados falsos negativos y positivos.

Para dar solución y superar muchos de estas problemáticas con innovaciones tecnológicas se está desarrollando el proyecto AGROGENDETEC. En dicho proyecto se contempla el desarrollo de un nuevo método basado en el uso de pequeñas RNAs no codificantes (sncRNAs), como un enfoque más sensible y específico para detectar infecciones en etapas tempranas. En dicho enfoque se contemplan los sncRNAs y su papel en la regulación de las interacciones planta-patógeno, mostrando patrones de expresión diferencial dependiendo tanto de la especie de planta como del patógeno específico. Esta “huella molecular” podría aprovecharse para la detección temprana e identificación de patógenos fúngicos mucho antes que los métodos actuales. En dicho proyecto se incluyen avances en secuenciación de nueva generación (NGS) y bioinformática avanzada,

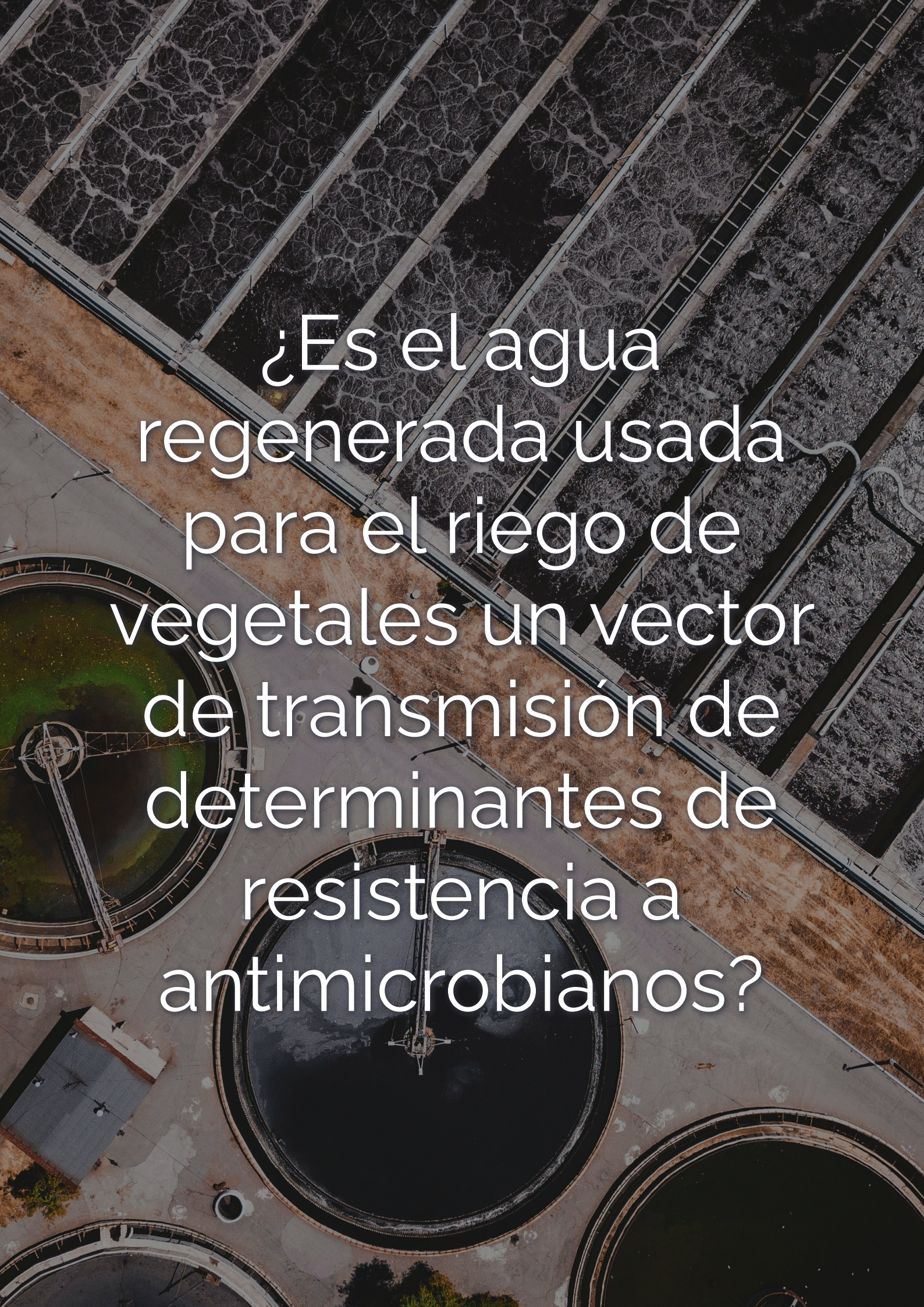
con el potencial de proporcionar métodos más precisos y de alto rendimiento para la detección de patógenos de forma temprana, de forma que, al analizar el material genético tanto de la planta como del patógeno, y que regula el proceso de interacción entre ambos, es posible identificar al patógeno incluso antes de que aparezcan los síntomas.

En conclusión, la detección temprana de patógenos vegetales es fundamental para prevenir brotes de enfermedades y minimizar las pérdidas de cultivos. Los métodos actuales para la detección e identificación de patógenos fúngicos en cultivos agroindustriales enfrentan múltiples desafíos, especialmente en lo que respecta a la detección temprana. Mientras que los métodos indirectos, como la inspección visual y la incubación, son lentos y propensos a errores de identificación, los métodos directos como las técnicas serológicas y moleculares también presentan desventajas significativas, como la necesidad de anticuerpos altamente específicos o datos genómicos que a menudo no están disponibles. Sin embargo, la investigación continua en herramientas moleculares, como los sncRNAs, los marcadores bioquímicos y las tecnologías de biosensores de nueva generación, promete proporcionar métodos más eficientes y confiables para la detección temprana de patógenos, lo que podría reducir significativamente las pérdidas económicas en la agricultura. Adicionalmente, las metodologías basadas en inteligencia artificial en las que actualmente se está trabajando, también van a tener un impacto importante en el análisis y detección de patógenos.

Jose C. Jimenez-Lopez

Científico Titular en el Departamento de Estrés, Desarrollo y Señalización en Plantas, Estación Experimental del Zaidín (EEZ), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en Granada.





¿Es el agua
regenerada usada
para el riego de
vegetales un vector
de transmisión de
determinantes de
resistencia a
antimicrobianos?



La escasez de agua es uno de los desafíos más urgentes de nuestra sociedad. Factores como el crecimiento de la población, el cambio climático y la sobreexplotación de los recursos hídricos están agravando esta crisis, afectando a más del 38% de la población y al 29% del territorio europeo, con un impacto económico anual de unos 9.000 millones de euros. Para hacer frente a esta situación, una de las soluciones más viables es la reutilización del agua, ya que permite reducir la presión sobre las fuentes tradicionales. El agua regenerada es aquella que ha sido tratada y purificada a partir de aguas residuales para su reutilización en actividades como la agricultura, la industria o el riego de parques y jardines. Aunque no es apta para el consumo humano, los tratamientos avanzados de desinfección eliminan la mayoría de los contaminantes químicos y microbiológicos, convirtiéndola en una alternativa sostenible, especialmente en regiones con escasez de agua.

Ante esta problemática, la Unión Europea está promoviendo el uso de agua regenerada. Esto significa reutilizar agua tratada para el riego de cultivos, una estrategia clave para conservar los recursos hídricos. Sin embargo, su uso ha generado preocupaciones sobre su seguridad microbiológica, ya que, si no se trata adecuadamente, podría contener microorganismos que lleguen a los cultivos y, en última instancia, a los alimentos que consumimos. Para minimizar estos riesgos, España ha desarrollado normativas alineadas con las regulaciones de la Unión Europea, como el Real Decreto 1085/2024, que establece requisitos de calidad para el agua regenerada utilizada en la agricultura. Esta normativa exige que el agua regenerada cumpla con estándares de calidad según el tipo de cultivo al que se destine. Con ello, se busca proteger tanto la salud de las personas como el equilibrio del medio ambiente.

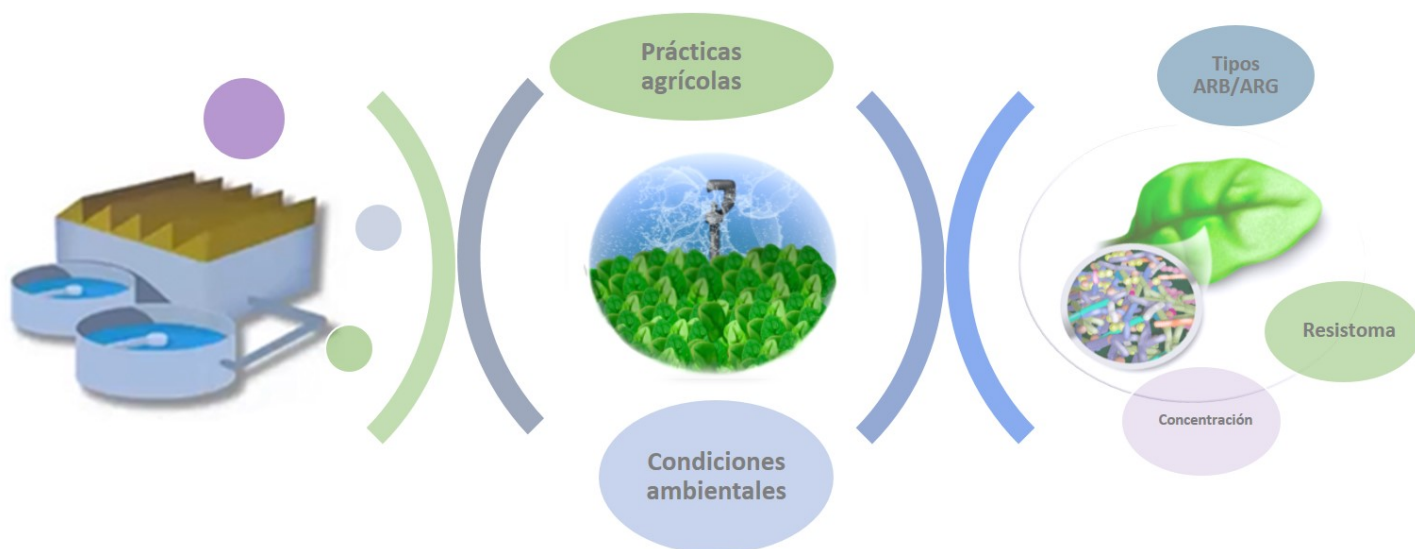
Uno de los mayores desafíos del uso de agua regenerada es el papel que juegan las estaciones depuradoras de aguas residuales en la propagación de bacterias y genes resistentes a los antibióticos. Estas instalaciones reciben aguas contaminadas con restos de antibióticos procedentes de hogares, hospitales, industrias y explotaciones ganaderas. Como consecuencia, pueden convertirse en focos de dispersión de bacterias resistentes y de los genes que les confieren esta resistencia, liberándolos al medio ambiente. En las estaciones depuradoras, los antibióticos están presentes en concentraciones muy bajas, lo que crea un entorno ideal para que sobrevivan las bacterias más resistentes y transmitan su resistencia a otras especies. Aunque estos sistemas de tratamiento eliminan una gran cantidad de microorganismos, no consiguen erradicar por completo los genes de resistencia a los antibióticos. Esto podría suponer un riesgo cuando el agua regenerada se emplea para el riego agrícola, ya que estos genes pueden acabar en los cultivos, ingresar en la cadena alimentaria y representar un peligro para la salud humana.

Ante estos nuevos riesgos, la comunidad científica ha intensificado sus estudios para entender mejor cómo el uso de agua regenerada en la agricultura puede influir en la propagación de bacterias resistentes a los antibióticos. Actualmente, las investigaciones no solo analizan la presencia de estas bacterias

en el agua, sino también el resistoma, es decir, el conjunto de genes de resistencia a los antibióticos, y otros elementos genéticos, como los plásmidos, que facilitan la transferencia de estos genes entre distintas especies de microorganismos. El objetivo es comprender cómo estas bacterias y sus genes se propagan en el agua regenerada y cuál es su impacto en los cultivos, ya que esto es clave para garantizar una agricultura segura y sostenible.

En este contexto, diversos estudios científicos han analizado cómo el riego con agua regenerada puede influir en la transferencia de genes de resistencia a los cultivos. Experimentos realizados en cámaras de cultivo bajo condiciones controladas regaron plántulas de lechuga durante todo su ciclo de crecimiento con agua regenerada que contenía diferentes niveles de estos genes. Los resultados mostraron que la calidad del agua tiene un impacto directo: cuando el agua tenía una mayor cantidad de genes de resistencia, las plantas los absorbían y retenían; en cambio, con agua mejor tratada, la presencia de estos genes era mínima o indetectable. A pesar de estos hallazgos, aún quedan muchas incógnitas. Por ejemplo, no se sabe con certeza hasta qué punto factores como el clima o las prácticas agrícolas pueden influir en la propagación de estos genes en los cultivos.

Para que el agua regenerada sea segura para el riego, es clave aplicar tratamientos de



« AGUA REGENERADA »

desinfección eficaces. Métodos como la cloración, la luz ultravioleta, el ácido peracético y el ozono ayudan a eliminar microorganismos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, estos procesos no logran eliminar por completo los genes de resistencia. Por eso, es fundamental seguir investigando y desarrollar tecnologías más avanzadas que reduzcan de manera efectiva la presencia de estos genes en el agua regenerada, garantizando así su uso seguro en la agricultura.

A medida que avanzan las investigaciones, queda claro que la reutilización del agua debe abordarse de forma integral. Para garantizar su seguridad y sostenibilidad, es fundamental combinar tecnologías avanzadas de tratamiento, una monitorización constante de su calidad y buenas prácticas agrícolas. Además, adoptar el enfoque "One Health" es clave, ya que este concepto reconoce la estrecha conexión entre la salud humana, animal y ambiental. Solo a través de una gestión responsable del agua regenerada se podrán minimizar los riesgos y aprovechar al máximo sus beneficios, asegurando su uso seguro en la agricultura y otros sectores.

Aunque el desafío es grande, también lo es la oportunidad. Si se invierte en el desarrollo de nuevas tecnologías y en una regulación adecuada, la reutilización del agua puede convertirse en una herramienta esencial para hacer frente a la crisis hídrica y garantizar un acceso más sostenible a este recurso. Apostar por soluciones seguras y eficientes no solo beneficiará al medio ambiente, sino que también ayudará a proteger la seguridad alimentaria y la salud pública. Para lograrlo, será fundamental la colaboración entre científicos, agricultores, industrias y organismos reguladores. Solo con un trabajo conjunto y una gestión adecuada podremos aprovechar todo el potencial del agua regenerada sin comprometer el bienestar de la sociedad. El reto es enorme, pero el futuro del agua regenerada es esperanzado.

Pilar Truchado

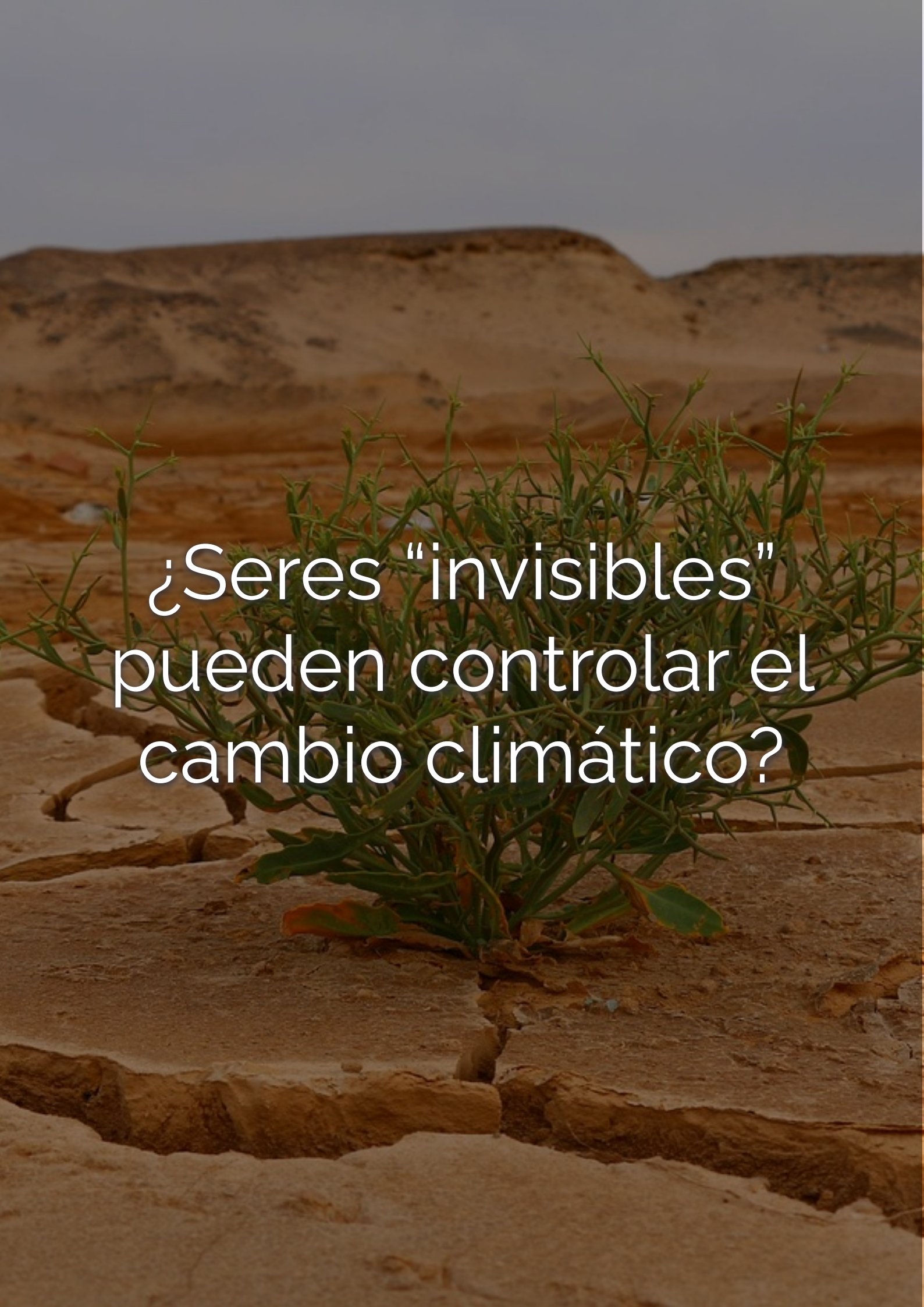
Doctora en Tecnología de los Alimentos por la Universidad de Murcia. Actualmente Científico Titular en el Grupo de Microbiología y Calidad de Frutas y hortalizas de CEBAS-CSIC.



Ana Allende

Doctora en Tecnología de los Alimentos por la Universidad de León. Actualmente Profesor de Investigación en el Grupo de Microbiología y Calidad de Frutas y hortalizas de CEBAS-CSIC.



A photograph of a desert landscape. In the foreground, a small, green, spiky plant grows out of a crack in the light-colored, sandy soil. The background shows rolling sand dunes under a clear, pale sky. The text is overlaid on the plant.

¿Seres “invisibles”
pueden controlar el
cambio climático?

« SERES “INVISIBLES” »

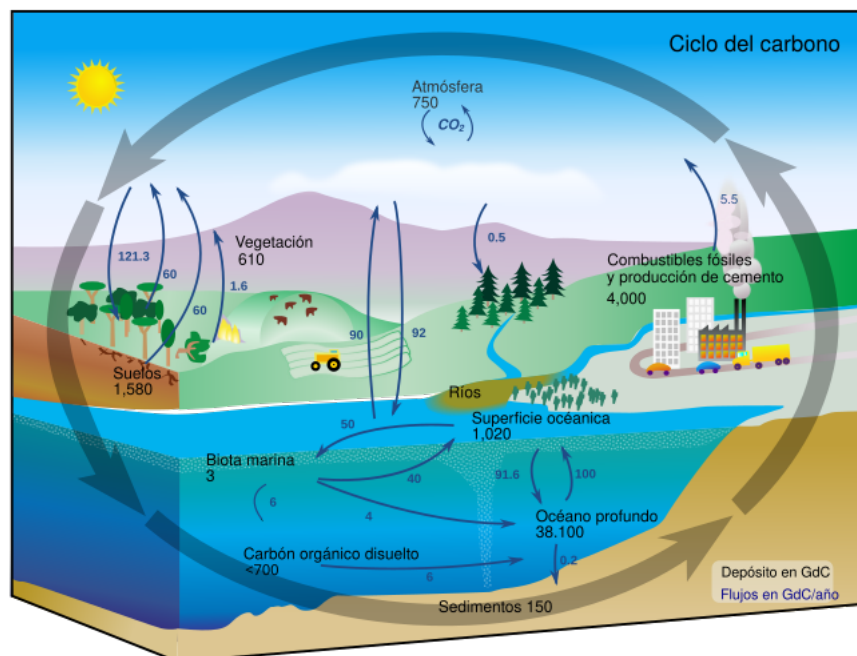
En la actualidad, el cambio climático es ya considerado por gran parte de la sociedad como el desafío más serio al que nos enfrentamos. Sus efectos a escala global, entre los que destacan eventos meteorológicos extremos como olas de calor o sequías, son cada vez más frecuentes e intensos. Éstos afectan tanto a los sistemas naturales como a los sistemas humanos, repercutiendo en la economía, la salud humana y la seguridad alimentaria e hídrica. Este fenómeno es de carácter antropogénico, es decir, que las actividades humanas son las responsables del mismo, especialmente la emisión de los denominados gases de efecto invernadero (GEI), que son aquellos que atrapan el calor emitido por la superficie terrestre aumentando la temperatura de la atmósfera.

Entre los principales GEI encontramos el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) (ambos son formas de carbono) y el óxido nitroso (N_2O), siendo los responsables del 98% del aumento de temperatura que se ha producido recientemente. Aunque *a priori* parezcan perjudiciales, son esenciales para la vida, ya que mantienen una temperatura media global de unos 15°C , muy superior a los -18°C estimados que habría si no formasen parte de nuestra atmósfera. Todos ellos se producen de forma natural, por ejemplo, cada vez que los animales respiramos tomamos O_2 y emitimos CO_2 , el cual es utilizado por las plantas y otros organismos como fuente de alimento. El problema ocurre cuando se pierde el equilibrio entre las fuentes (procesos o actividades que producen y liberan estos gases a la atmósfera) y los sumideros (procesos o actividades que los absorben y retiran de la atmósfera), lo que actualmente está

sucediendo con la quema de combustibles fósiles, la deforestación y los patrones de desarrollo insostenibles de la agricultura y la ganadería, entre otros.

Entonces, ¿qué medidas podemos tomar para combatir el cambio climático? ¿Cómo te quedas si te digo que los mejores aliados que tenemos en esta batalla son seres que ni siquiera vemos a simple vista?

¡Pues así es! Los microorganismos como bacterias, arqueas, hongos y algas microscópicas desempeñan un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático, aunque a menudo se pasa por alto. Su importancia radica en que impulsan los ciclos biogeoquímicos de nutrientes como el carbono (C), el nitrógeno (N) y el fósforo (P), son responsables de la emisión, captura y transformación de GEI y controlan el destino del carbono en los ecosistemas. Los microorganismos están presentes en todos los ambientes en los que hay organismos macroscópicos y son la única forma de vida en ambientes extremos con temperaturas que van desde los -20°C hasta los 121°C .



Este diagrama del ciclo de carbono muestra el depósito e intercambio anual de carbono entre la atmósfera, la hidrósfera y la geosfera en gigatonnes (miles de millones de toneladas) de carbono (GtC). La quema de combustibles fósiles añade alrededor de 5.5 GtC de carbono anual a la atmósfera. **Fuente:** Wikimedia Commons.



Comunidad mixta de fitoplancton observada bajo microscopio. Se aprecia una gran diversidad de organismos con diferentes morfologías, incluyendo diatomeas y otros microorganismos clave en el ciclo del carbono oceánico, responsables de la producción primaria y el secuestro de carbono en los ecosistemas marinos. **Fuente:** Wikimedia Commons.

Gracias al mundo microbiano, los océanos son el mayor reservorio activo de C de nuestro planeta dado que en la columna de agua se producen formas de C estables que se acumulan gracias a la denominada bomba microbiana de carbono. De la misma forma, los microorganismos del suelo además de regular la cantidad de C orgánico almacenado en el suelo y liberado a la atmósfera, influyen indirectamente en el C almacenado en las plantas, ya que le proporcionan los nutrientes necesarios para que realicen la fotosíntesis usando el CO_2 de la atmósfera para crecer.

Entre la comunidad científica se ha consensuado que no basta solo con reducir las emisiones para limitar el calentamiento global, sino que es necesario adoptar enfoques o tecnologías a gran escala, basadas en la actividad microbiana, para eliminar cantidades significativas de estos gases.

Entre los ejemplos de medidas ya adoptadas o en desarrollo, destaca el caso del CH_4 , cuya principal fuente antropogénica la constituyen los rumiantes (vacas, ovejas, cabras, etc.). Esto es debido a los microorganismos denominados metanógenos, que producen este gas en ambientes anaeróbicos (es decir, ausencia de oxígeno), como es el sistema digestivo. Es por

ello que se está trabajando en el desarrollo de una vacuna para manipular a estos microorganismos, y reducir la producción de este gas sin afectar a la salud y productividad animal. En relación al N_2O , ya se está favoreciendo la presencia de microorganismos con una enzima específica (N_2O reductasa) que transforma el N_2O en N_2 (sin efecto invernadero) en algunos cultivos como la soja, dado que la agricultura es la principal fuente de este gas.

En definitiva, ya se ha comprobado la posibilidad de promover cambios en las actividades microbianas para aumentar su consumo y reducir su producción de GEI. Sin embargo, no debemos olvidar que aún queda mucho trabajo por hacer, y que para seguir desarrollando medidas microbianas de mitigación y control climático, es esencial mejorar nuestra comprensión sobre el funcionamiento de las comunidades microbianas y las interacciones que establecen.

Para ello, es necesario fomentar la investigación y colaboración entre disciplinas, proporcionando a los científicos las herramientas e infraestructuras adecuadas, además de incluir a los microorganismos en las políticas y decisiones de gestión. Dada la interrelación existente entre los microorganismos, el cambio climático y el bienestar humano, aprovechar el potencial del mundo microbiano es más que una oportunidad, es una necesidad para garantizar un desarrollo sostenible y un planeta habitable para las futuras generaciones.

María Aránega Cortés

Graduada en Biología por la UGR, actualmente en formación investigadora, gracias al programa JAE Intro ICU, sobre colonización micorrízica del bosque mediterráneo en gradientes altitudinales y su respuesta al cambio climático en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC)



A close-up photograph of a green leaf, showing a dense network of veins. The veins are light green and form a complex, branching pattern across the darker green leaf surface. The text is centered over this background.

Filosfera: los guardianes microscópicos de las hojas

Cuando pensamos en microbiomas, lo primero que viene a la mente suele ser el microbioma humano, un ecosistema invisible pero fundamental para nuestra salud, cuyo estudio ha revolucionado la medicina en las últimas décadas. Posteriormente, la atención se centró en el estudio de los microbiomas de otros organismos, entre ellos las plantas, sobre todo el microbioma del suelo y su relación con las raíces, también conocido como rizosfera, y su impacto en la agricultura y los ecosistemas terrestres. Sin embargo, no fue hasta hace relativamente unos pocos años que no se ha empezado a explorar un gran hábitat microbiano igual de fascinante, pero hasta ahora desconocido, denominado filosfera.

Se conoce como filosfera al ecosistema microbiano que habita en la parte aérea de las plantas, principalmente las hojas, aunque también puede ser muy relevante y extenderse a tallos, flores y frutos. En concreto, se estima que la superficie total que abarcan las hojas es aproximadamente el doble de la superficie terrestre del planeta, llegando a cerca de los 296 millones de kilómetros cuadrados, y se calcula que hay entre 10^4 a 10^6 células bacterianas por cm^2 de hoja. A pesar de su inmensidad, la filosfera ha recibido mucha menos atención en la investigación en comparación con la rizosfera, aunque su importancia para la salud vegetal y los ciclos biogeoquímicos globales ha despertado un creciente interés en los últimos años.

A pesar de la gran superficie que representa, este entorno presenta desafíos extremos: está expuesto directamente a la radiación ultravioleta, sufre variaciones térmicas diarias, condiciones de desecación y una limitada disponibilidad de nutrientes. La cutícula cerosa de las hojas actúa como una barrera que limita la evaporación y la pérdida de metabolitos, creando un ambiente pobre en nutrientes. Sin embargo, la microbiota de la filosfera ha desarrollado estrategias resilientes para sobrevivir en estas condiciones adversas. Las bacterias predominantes pertenecen a los filos *Proteobacteria* (especialmente *Alphaproteobacteria* y *Gammaproteobacteria*),

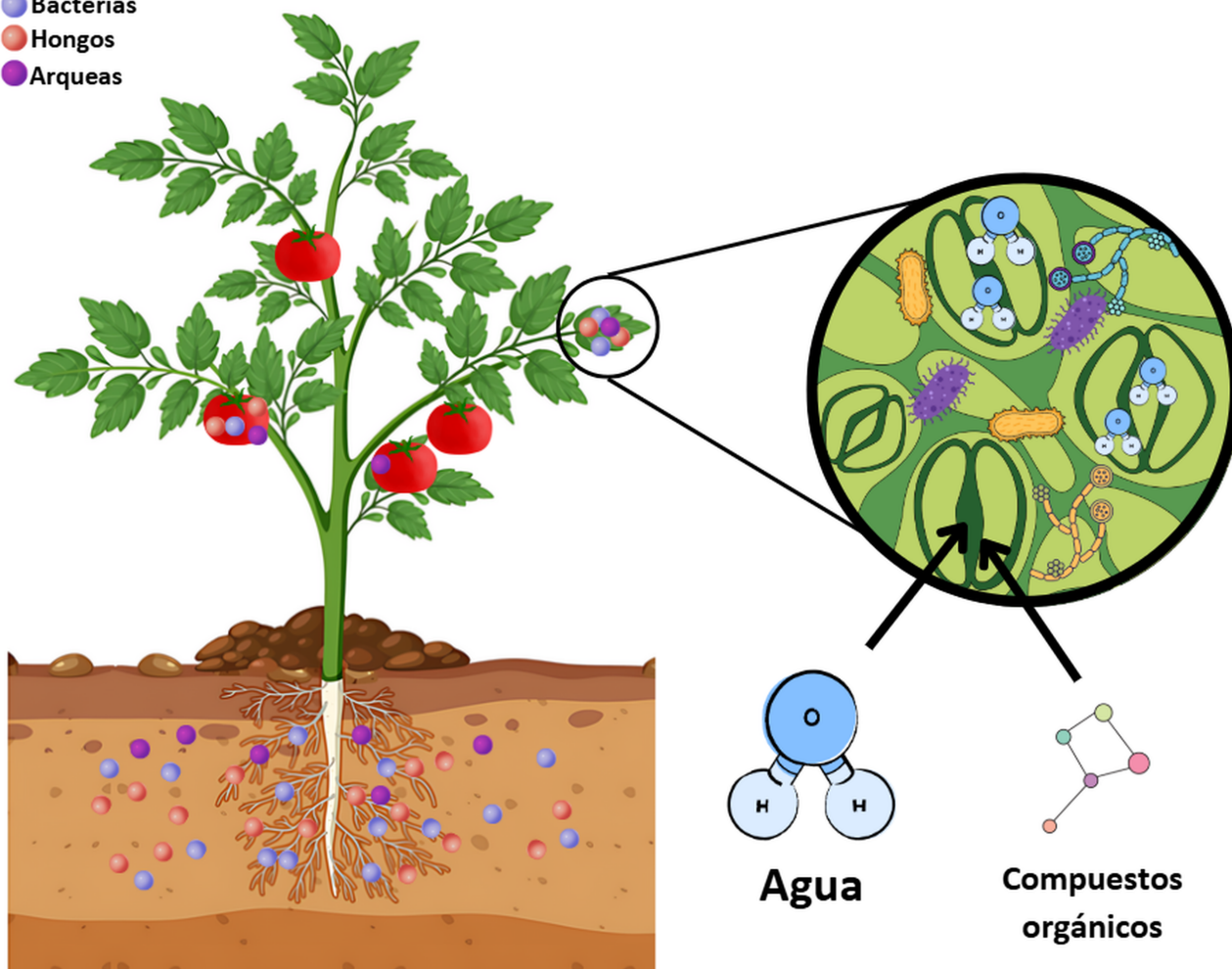
Bacteroidetes y *Actinobacteria*, con géneros destacados como *Methylobacterium*, *Sphingomonas* y *Pseudomonas*. Estos microorganismos suelen formar agregados en microhábitats específicos de la hoja, como estomas, tricomas y uniones celulares, donde encuentran condiciones más favorables de humedad y disponibilidad de nutrientes.

Uno de los factores más limitantes de la filosfera es la baja disponibilidad de agua o baja humedad ambiental. Ésta desempeña un papel crucial como modulador de la actividad metabólica y la dinámica de las comunidades microbianas. Las delgadas películas de agua que se forman tras la lluvia, el rocío o incluso por la transpiración de la planta facilitan la diseminación de microorganismos, el aumento de la disponibilidad de nutrientes y la comunicación química entre especies. No obstante, la frecuente desecación impone una fuerte presión selectiva, beneficiando a microorganismos capaces de resistir la sequía. Para enfrentar este desafío, algunas especies han desarrollado mecanismos como la producción de solutos compatibles, como la trehalosa y la prolina, que ayudan a mantener la integridad celular durante el estrés osmótico.

Entre las funciones ecológicas del microbioma foliar que se han descrito destacan la de protección frente a fitopatógenos formando una barrera biológica a través de varios mecanismos, como la competencia por espacio y recursos o con la producción de compuestos antimicrobianos o la inducción de respuestas inmunes en la planta. Un ejemplo destacado es el papel de bacterias del género *Sphingomonas*, que protegen a *Arabidopsis thaliana* contra *Pseudomonas syringae*. Por otra parte, otras bacterias pueden promover el crecimiento vegetal como es el caso de *Methylobacterium*, que en la filosfera, actúa sinérgicamente utilizando el metanol liberado por las hojas, siendo un subproducto del crecimiento celular y la degradación de pectina, como su principal fuente de carbono y energía, produciendo a cambio fitohormonas como citoquininas y auxinas, que promueven el crecimiento y la germinación de las plantas. Además, regula los

<< FILOSFERA >>

- Bacterias
- Hongos
- Arqueas



Esquema del microbioma de la planta, rizosfera y filosfera. Ilustración del microambiente generado por las estomas, propicio para el desarrollo de comunidades de microorganismos. **Fuente:** Ilustración propia y vectores bajo creative commons.

niveles de etileno, una hormona del estrés vegetal, mediante la producción de la enzima ACC desaminasa, cuya actividad mejora la tolerancia de las plantas a condiciones adversas.

Más allá de sus efectos en la planta, las comunidades microbianas de la *filosfera* pueden desempeñar funciones ecológicas relevantes además de las mencionadas, como la degradación de compuestos orgánicos volátiles, la transformación de nutrientes y la mitigación de ciertos contaminantes.

Diversos estudios han demostrado que algunas bacterias epifíticas, como *Pseudomonas syringae*, influyen en la nucleación de hielo, lo que sugiere una posible conexión con la formación de las nubes, que cobra más fuerza

con diversos estudios que han encontrado este tipo de bacterias en muestras de nieve y granizo recogidas de distintas partes del mundo.

Otras, como *Sphingomonas*, tienen la capacidad de degradar hidrocarburos y contaminantes atmosféricos, aunque su impacto en la biorremediación a gran escala aún requiere mayor investigación.

Los avances en técnicas de metagenómica, metaproteómica y proteogenómica han revolucionado el estudio del microbioma de la filosfera, permitiendo caracterizar su diversidad y funcionalidad con un nivel de detalle sin precedentes. Estas tecnologías han impulsado una nueva era en la microbiología ambiental, facilitando la comprensión de cómo

actúan los microorganismos en la defensa contra patógenos y en la promoción del crecimiento vegetal.

Por otra parte, el cambio climático también está alterando la dinámica de estos ecosistemas microbianos. Los aumentos en la temperatura y la variabilidad en la disponibilidad de agua pueden modificar la composición y función del microbioma foliar, con consecuencias directas sobre la salud de las plantas y su capacidad de resistir enfermedades y estreses abióticos. Además, el cambio en los patrones de precipitación y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos están creando nuevos desafíos para la estabilidad de estas comunidades microbianas.

La comprensión de la ecología de la filosfera no solo es clave para mejorar la salud de las plantas y su resistencia a patógenos, sino que también abre nuevas oportunidades en la mitigación de la contaminación atmosférica y el desarrollo de estrategias agrícolas y urbanas sostenibles. En entornos urbanos, las comunidades microbianas de la *filosfera* pueden actuar como un biofiltro natural, contribuyendo a la degradación de contaminantes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros compuestos orgánicos volátiles presentes en el aire. Estudios recientes han demostrado que la composición de estos microbiomas está influenciada por la infraestructura verde y la contaminación atmosférica, lo que sugiere que su manejo estratégico podría potenciar sus efectos beneficiosos en la calidad del aire. En el ámbito agrícola, la manipulación del microbioma foliar mediante biofertilizantes y biopesticidas basados en microorganismos epifíticos está siendo explorada como una alternativa para mejorar la productividad de los cultivos y reducir el uso de agroquímicos. Dado el papel central que desempeñan estos microorganismos en la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos y agrícolas, su estudio y aplicación representan una herramienta prometedora en la adaptación al cambio climático y la mejora de la resiliencia ambiental.

Juan Nicolás Espinosa

Investigador posdoctoral en el CEBAS-CSIC enfocado en el estudio de las relaciones hídricas en las plantas con especial atención en la caracterización molecular de las aquaporinas.





Biodiversidad de microorganismos en cuevas visitables

En España existe una gran abundancia y variedad de cuevas. Algunas declaradas Patrimonio Mundial por la existencia de arte rupestre: Altamira, Tito Bustillo, y La Garma; o Monumentos Naturales como las Cistañar de Ibor o la Gruta de las Maravillas.

Las cuevas, antes de su descubrimiento, carecen de luz, mantienen una temperatura constante, suelen ser oligotróficas (es decir, con escasa materia orgánica disuelta en las aguas de infiltración), y presentan extensas áreas de superficies minerales. A pesar de estas condiciones extremas, los microorganismos, que colonizan todos los nichos de la biosfera, están abundantemente representados en estos ecosistemas subterráneos, un aspecto generalmente desconocido para el público.

La colonización microbiana de cuevas es un proceso natural, desarrollado desde su formación hace millones de años. Las cuevas, aún por descubrir, ya se encuentran colonizadas por una variedad de micro y macroorganismos. Durante milenios, las cavidades subterráneas han mantenido un delicado equilibrio ecológico entre microorganismos y fauna, el cual se ve alterado tan pronto el hombre las descubre. Al eliminarse la barrera que las aislaba del exterior, las cuevas sufren el impacto de comunidades microbianas y animales exógenos, junto con un aumento de materia orgánica debido a la actividad humana,

especialmente el turismo. En algunos casos, el interés económico suele prevalecer sobre la protección del espacio natural y del arte rupestre.

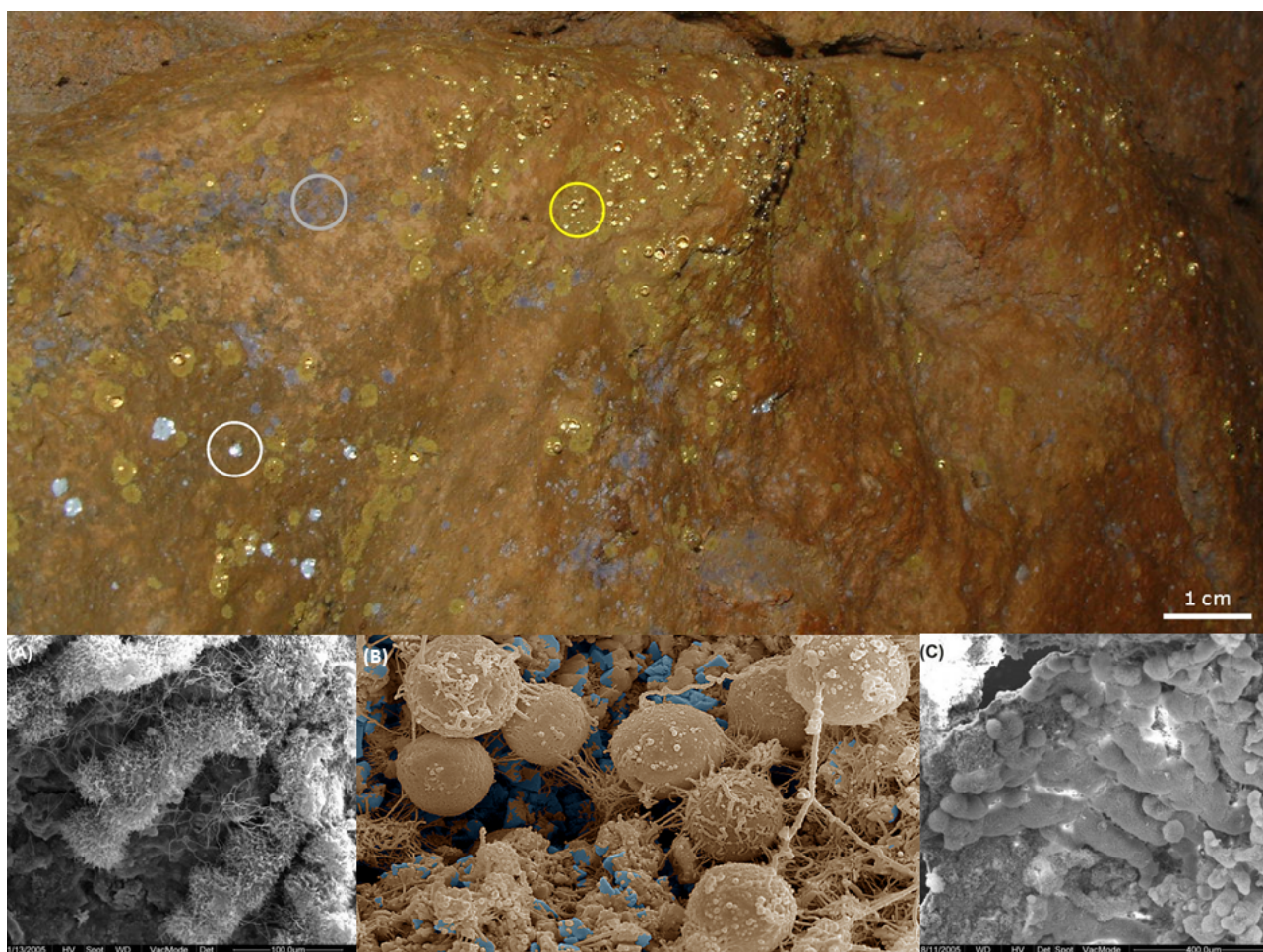
El impacto del turismo de masas originó que cuevas como Altamira (España) y Lascaux (Francia) fueran cerradas al público y las visitas desviadas a réplicas. Las adaptaciones estructurales para facilitar las visitas, la introducción de luz artificial para una mejor observación de las pinturas, y la presencia de cientos de miles de personas anuales originaron cambios drásticos en el microclima de las cuevas y favorecido la proliferación de bacterias, hongos y algas en las superficies rocosas. Este fenómeno afecta a casi todas las cuevas visitables en mayor o menor grado.

Las cuevas, desde el punto de vista de la microbiología ambiental, presentan diversos aspectos. Uno de ellos es la enorme biodiversidad tanto de bacterias, hongos y algas, como de artrópodos y otros organismos. Estudios moleculares recientes han detectado la existencia de grupos de bacterias desconocidas en una gran variedad de ecosistemas, incluyendo las cavidades subterráneas.

Cada año se aíslan y describen nuevas especies de microorganismos, y el grupo de Microbiología Ambiental y Patrimonio Cultural (MAPC), del Instituto de Recursos Naturales y



Sala de Polícromos, Cueva de Altamira (izquierda). Sala de los Toros, Cueva de Lascaux (derecha). **Fuente:** Cesáreo Sáiz Jiménez.



Biofilms bacterianos en la cueva de Altamira. Microscopía electrónica de A: Biofilm blanco. B: Biofilm gris. C: Biofilm amarillo. **Fuente:** C. Saiz-Jimenez. 2022. *Frontiers for Young Minds*, 10, 739199. Cesáreo Sáiz Jiménez.

Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC) ha contribuido significativamente en este campo, describiendo más de 30 nuevas especies de bacterias y hongos en los últimos 20 años. Ejemplos destacados incluyen las bacterias *Aurantimonas* (=Aureimonas) *altamirensis*, *Nocardia altamirensis*, y *Hoyosella altamirensis*, descubiertas en Altamira; los hongos *Ochroconis lascauxensis* y *Ochroconis anomala* en la cueva de Lascaux; *Aspergillus thesauricus* en la cueva del Tesoro; y *Aspergillus baeticus* en la Gruta de las Maravillas.

Algunas de estas bacterias tienen relevancia médica. *Aurantimonas* (=Aureimonas) *altamirensis* y *Nocardia altamirensis* han sido identificadas como patógenos humanos, responsables de enfermedades graves en varios países (España, Italia, Alemania, Países Bajos, EE.UU, Canadá, China, Corea), mientras

que *Hoyosella altamirensis* produce compuestos bioactivos que inhiben el crecimiento de bacterias patógenas. Esta dicotomía entre bacterias patógenas y bacterias productoras de compuestos bioactivos (antibióticos, antifúngicos, y anticancerígenos) en cuevas nos resalta la importancia de la biodiversidad microbiana en ambientes subterráneos y la necesidad de proteger estos ecosistemas de las agresiones antrópicas.

En los últimos años nuestro grupo ha dedicado una especial atención a la exploración de cuevas como recurso biotecnológico, ya que presentan nichos ecológicos que pueden ofrecer nuevas moléculas de interés para la medicina y la farmacología.

Uno de los grupos de bacterias más interesantes en cuevas de todo el mundo

pertenece al género *Crossiella*. Estas están abundantemente representadas en las películas microbianas (*biofilms*) que cubren las paredes de cuevas y constituyen más del 50% en abundancia relativa del total de bacterias en *biofilms* de cuevas españolas, francesas, italianas, americanas, rusas, etc., tanto cuevas calizas, en yeso, como volcánicas. Estos son particularmente abundantes en la cueva de Altamira. Asimismo *Crossiella* está presente en suelos de todos los continentes, incluyendo la Antártida, minas y monumentos. A pesar de su abundancia, estas bacterias son difíciles de cultivar en laboratorio. Hasta la fecha, solo se han descrito dos especies: *Crossiella cryophila*, aislada de suelo, y *Crossiella equi*, identificada en la placenta de un equino.

El grupo MAPC ha conseguido aislar varias cepas de *Crossiella* de las paredes de la cueva de Altamira, que constituyen una nueva especie, aún por describir, y cuyo genoma indica la capacidad de producir una diversidad de

compuestos bioactivos, con actividad antibacteriana y antifúngica. Este fenómeno explica por qué en las paredes de Altamira, donde abundan los *biofilms* bacterianos, no se encuentran hongos. Éstos, sin embargo, se encuentran habitualmente en el aire y suelo de la cueva. Un claro ejemplo de competencia por el nicho ecológico y de antagonismo microbiano.

Mientras que en Altamira proliferan las bacterias en las paredes, en Lascaux las pinturas rupestres están actualmente amenazadas por la colonización de hongos. Lascaux ha sufrido tres grandes fenómenos de contaminación microbiana, el primero en el año 1963 como consecuencia del desarrollo del alga *Bracteococcus minor* inducida por la iluminación artificial, el segundo por la dispersión del hongo *Fusarium solani* en el año 2001, a raíz de trabajos en el interior de la cueva para sustituir el equipo de climatización, y el tercero por la diseminación de manchas



Crecimiento en distintas concentraciones de cloruro de benzalconio de *Ochroconis lascauxensis*, aislado de la cueva de Lascaux. De izquierda a derecha: 0, 50, 100, 250, 500, 750, 1.000, 2.500 y 5.000 mg/l. **Fuente:** Tesis doctoral de Pedro M. Martín Sánchez: Las manchas negras de la cueva de Lascaux. IRNAS, 2012. Cesáreo Sáiz Jiménez.

« CUEVAS »

negras sobre las pinturas, que posteriormente se comprobó que eran producidas por el crecimiento de una nueva especie de hongo: *Ochroconis lascauxensis*. La identificación y descripción de este nuevo hongo fue considerada como una de las 10 nuevas y más importantes especies descubierta en el año 2012, elegida entre más de 140 nominaciones, según el International Institute for Species Exploration de la Universidad de Arizona (EE.UU.).

El uso inadecuado de biocidas, como el cloruro de benzalconio, para erradicar *Fusarium solani*, provocó un incremento de la diversidad fúngica y favoreció el crecimiento de *Ochroconis lascauxensis* y otras levaduras negras, al ser utilizado como fuente de carbono y nitrógeno por las bacterias y hongos de la cueva.

Por último, investigaciones recientes están considerando las cuevas como sumideros de gases de efecto invernadero. Se ha demostrado que las bacterias pueden consumir entre el 65 y el 90% del metano atmosférico en estos ecosistemas. Estos hallazgos han incentivado a los investigadores a estudiar el papel de los microorganismos de las cuevas en los ciclos biogeoquímicos y sus implicaciones en el cambio climático.

En conclusión, desde el punto de vista de la microbiología ambiental y molecular, las cuevas representan un interesante campo de investigación en creciente desarrollo en los últimos años. La diversidad microbiana de estos ecosistemas subterráneos no solo es fundamental para la conservación del patrimonio cultural y natural, sino que también ofrece oportunidades para el descubrimiento de nuevas especies con aplicaciones biotecnológicas y médicas.

Valme Jurado

Doctora en Biología. Científica Titular en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC. ORCID: 0000-0003-0972-9909.



Cesáreo Sáiz Jiménez

Profesor de Investigación emérito en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC. Autor de 550 publicaciones sobre microbiología y patrimonio cultural. ORCID: 0000-0003-0036-670X.





Xenex, la tecnología 'no-touch' de luz UV-C pulsada al servicio de los hospitales en la lucha contra las enfermedades nosocomiales

Fuente: Imagen obtenida por IA Chatgpt

« XENEX »

Un problema global reconocido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en hospitales y centros de atención de salud son las infecciones nosocomiales, también conocidas como infecciones intrahospitalarias (HAIs, del inglés 'healthcare-associated infections'), que son causadas por bacterias, virus y hongos.

Entre los microorganismos responsables se encuentran bacterias como *Acinetobacter baumannii*, *Clostridium difficile* Multirresistente, *Klebsiella pneumoniae* resistente a antibióticos betalactámicos (BLEE) y *Staphylococcus aureus* resistente al antibiótico metilina (SARM), que pueden hospedarse en superficies hospitalarias, equipos médicos, catéteres y manos del personal sanitario. Además, hongos como *Aspergillus* y *Candida spp.*, así como virus como el SARS-CoV-2, responsable de la pandemia de COVID, también pueden persistir en sistemas de ventilación, suelos y dispositivos médicos, contribuyendo a la propagación de las HAIs.

Estas HAIs forman parte de la carga microbiana ambiental de un hospital, de forma permanente o transitoria, se adquieren durante la hospitalización y/o no están presentes (o en periodo de incubación) dentro de las primeras 48-72 h o 3 días después del ingreso del paciente en el hospital. Esto impacta negativamente en la calidad de vida de los pacientes, quienes requieren grandes cantidades de antibióticos y otros medicamentos, aumentando su tiempo de estancia en el hospital, su morbilidad (que es la proporción de personas que enferman en un sitio y tiempo determinado) y la mortalidad (que es la tasa de muertes producidas en una población durante un tiempo dado, en general o por una causa determinada) (Figura 1). Además, el incremento de los costes de los servicios de salud públicos y privados a nivel mundial es otro problema derivado de estas infecciones.

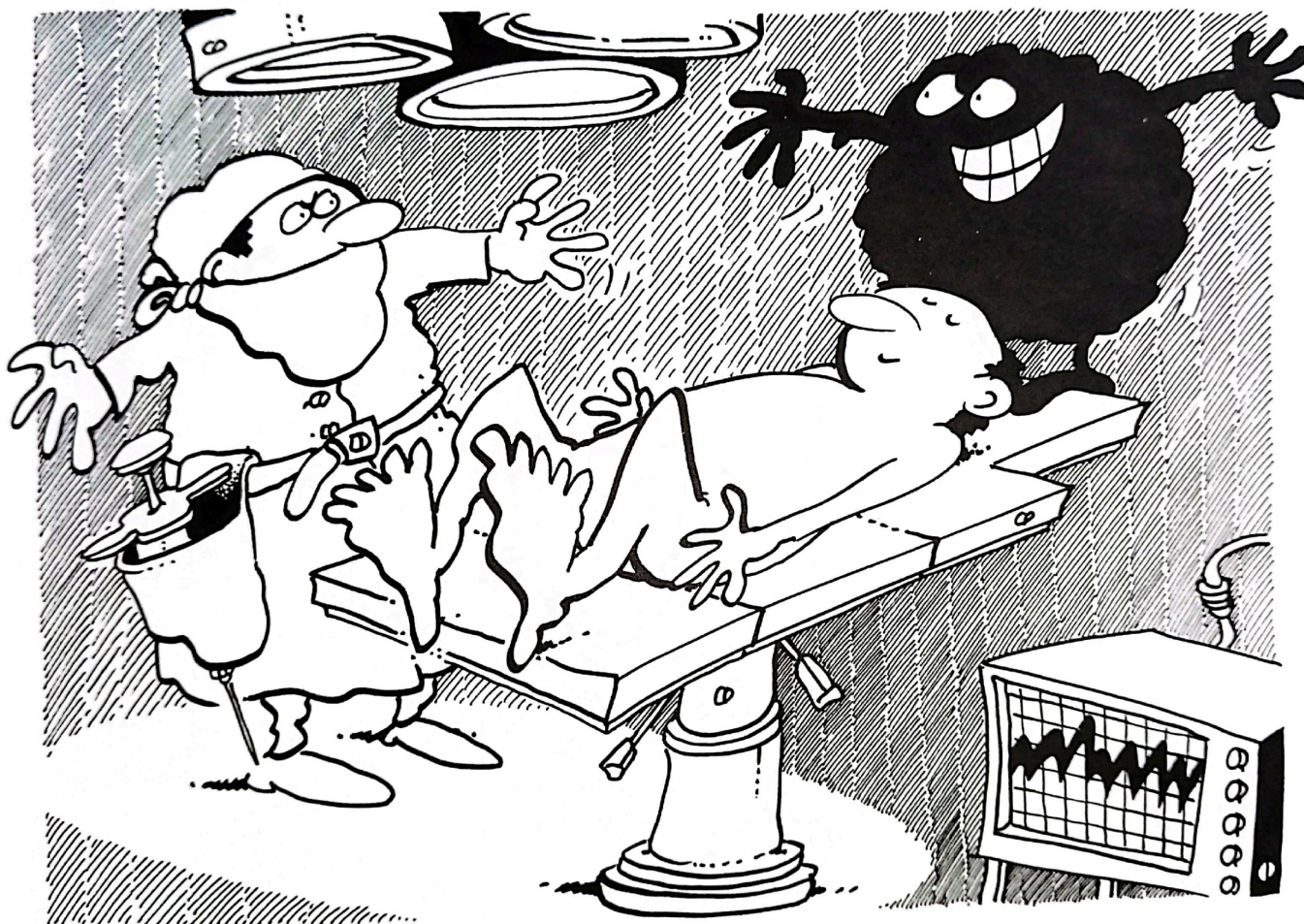
Este problema afecta tanto a países en vías de desarrollo como a países avanzados, pero no de la misma forma. En los países de ingresos bajos y medios, las dificultades son mayores por el deficiente estado de las infraestructuras, y por



Fuente: CLECE

problemas relacionados con la higiene y el saneamiento. La tasa de prevalencia, que se define como la probabilidad de que una enfermedad se desarrolle en un grupo de pacientes expuestos en relación con un grupo de pacientes no expuestos, es hasta un 30% mayor en los países de ingresos bajos y medios que en los países de ingresos más altos. Además, en la actualidad, más del 40% de las hospitalizaciones por HAIs se notifican en América Latina, África y Asia, y en la UCI es 3 veces más probable que un paciente adquiera una HAI.

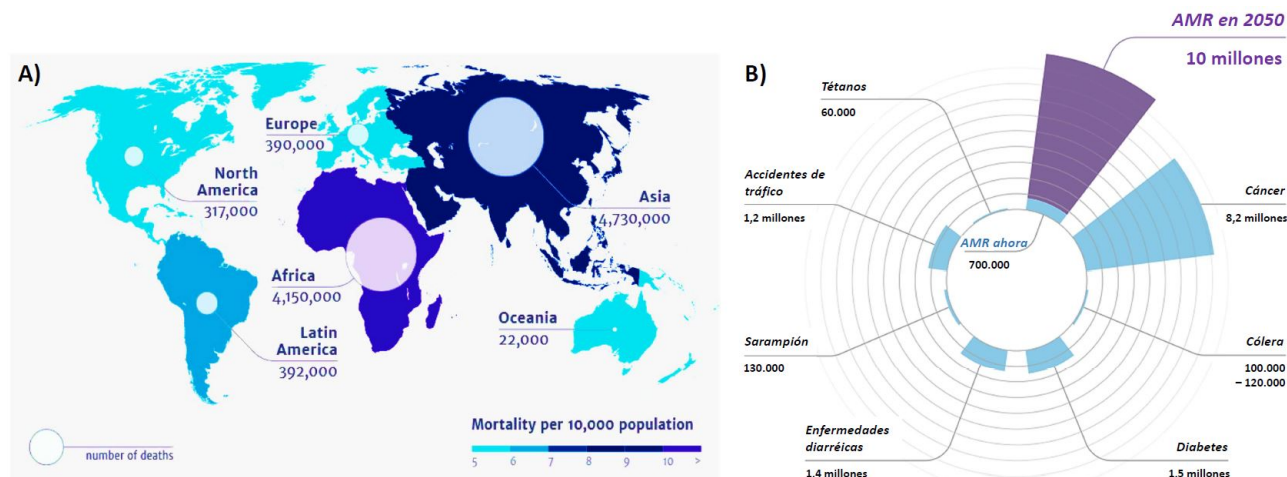
Otro problema que ha aumentado en las últimas décadas, considerándose un problema de salud pública, es la conocida resistencia a los antimicrobianos. El uso excesivo, y muchas veces automedicado, de antibióticos ha



Infecciones intrahospitalarias. Fuente: Geroulanos et al. (1991).

provocado la aparición de bacterias multirresistentes. Esto ocurre porque los microorganismos tienen la capacidad de transferir su inmunidad bioquímica, es decir, que son capaces de transferir a otros microorganismos pequeños fragmentos circulares de ADN, también conocidos como plásmidos, y que confieren a otros microorganismos la resistencia contra medicamentos específicos (es decir, antibióticos, antifúngicos, etc.). Hay publicada una simulación realizada hasta el año 2050 sobre el aumento de la resistencia a los medicamentos para 6 patógenos concretos, prediciendo 10 millones de muertes relacionadas con el incremento de la resistencia frente a los antimicrobianos, y un sobrecoste económico global de 100 billones de dólares.

Las HAI's están clasificadas en 14 tipos, siendo las más comunes las asociadas a contaminaciones cruzadas por dispositivos médicos o por los propios sanitarios, y las Infecciones Quirúrgicas. Estas son infecciones de heridas que se producen dentro de los 30 días tras la cirugía o después de 1 año de la colocación del implante o la prótesis, y la mayoría de ellas se deben a patógenos con resistencia a antimicrobianos. Es por ello que las buenas prácticas de los sanitarios juegan un papel muy importante en reducir la transmisión de patógenos de paciente a paciente, así como reducir al mínimo la suciedad y la contaminación en los hospitales. Una adecuada limpieza y desinfección hospitalaria es fundamental para el correcto funcionamiento de los servicios sanitarios, así como para el control y la prevención de las HAI's.



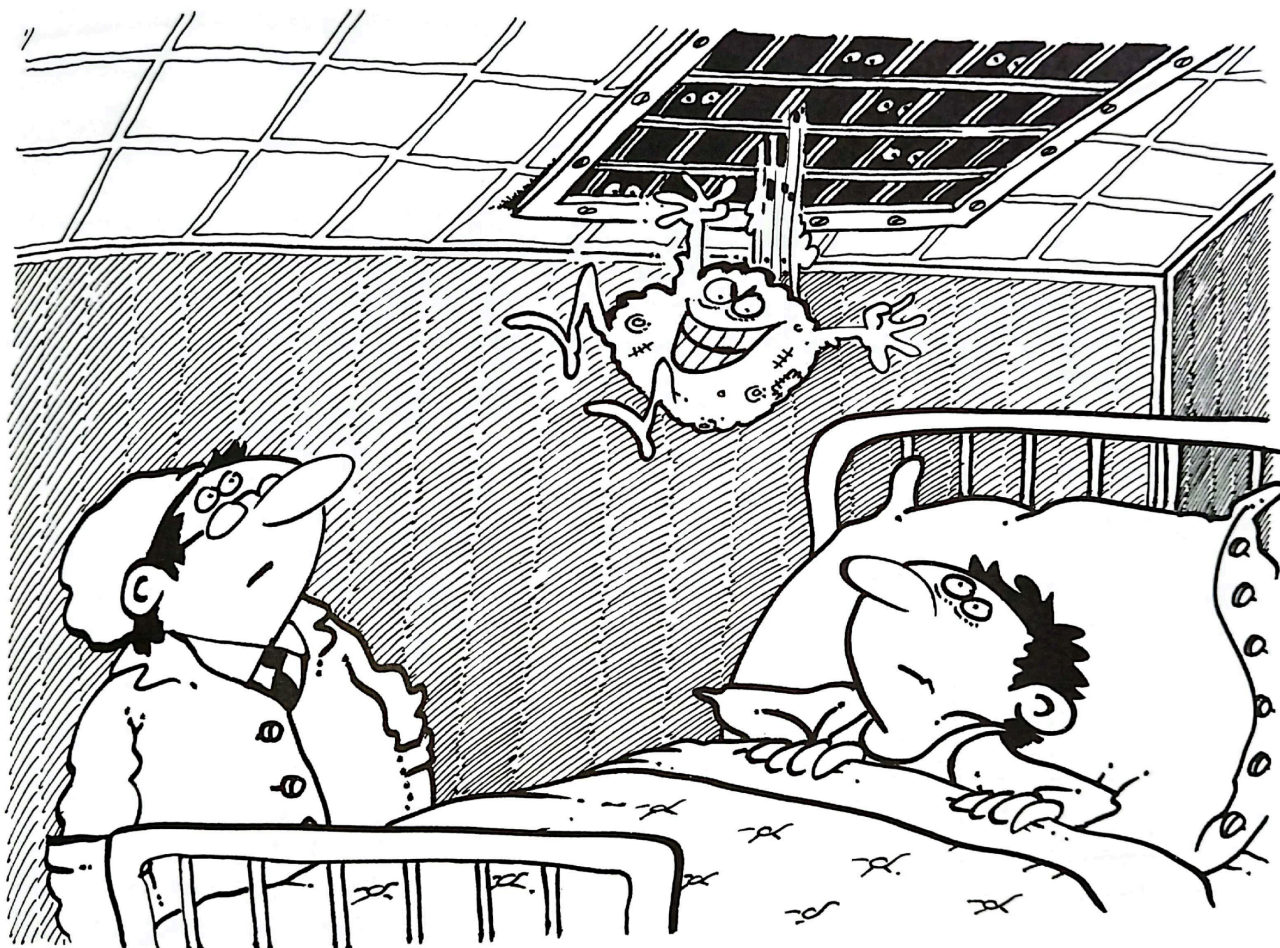
Se estima que en 2050 habrá 10 millones de muertes relacionadas con la resistencia a los antimicrobianos (AMR, del inglés 'Antimicrobial resistance') en todo el mundo (A), en contraste con otras enfermedades y fuentes de mortalidad (B). **Fuente:** O'Neil (2016).

Una constante evaluación y seguimiento de los métodos de limpieza, de las dosis de los desinfectantes, y de los controles microbiológicos de las superficies, son piezas fundamentales para reducir la incidencia de enfermedades nosocomiales. Teniendo en cuenta que los microorganismos patógenos pueden permanecer de forma prolongada (días o meses) en el entorno que rodea a un paciente, es importante añadir a la limpieza métodos alternativos e innovadores de desinfección que refuercen dicha limpieza de superficies, siendo el más rápido y eficiente el de las desinfecciones con luz ultravioleta (UV), una radiación electromagnética con más energía que luz visible pero menos que los rayos X.

Existen 3 tipos de luz UV: desde la más energética (UV-C), hasta las menos energéticas (UV-B y UV-A). La luz UV-A y UV-B atraviesan la atmósfera incidiendo sobre los seres vivos (95% UV-A; 5% UV-B), y la luz UV-C es totalmente absorbida en la ozonósfera, no llegando, por suerte, a la corteza terrestre, pues de otra manera la vida sería imposible en ésta. En exposiciones moderadas la luz UV-A y UV-B tiene relevancia en la capacidad de absorción de Vitamina D, y los melanocitos, unas células que cambian de color al exponernos a luz UV, protegen las células de mayores daños a cambio de ponernos morenitos. En exposiciones mayores la luz UV-

A, UV-B, y sobre todo UV-C (proveniente de lámparas artificiales), se absorbe a nivel del material genético (ARN y ADN), provocando mutaciones irreversibles, dímeros de pirimidinas (bases nitrogenadas que forman parte del material genético), rotura y fotohidratación de los ácidos nucleicos; y a nivel celular, se producen uniones entre proteínas, roturas de paredes celulares y lisis de membranas celulares. En otras palabras, este es un método de desinfección perfecta, dado que una exposición a corta distancia de lámparas UV-A y UV-B se usan en carnicerías, campanas de flujo laminar y en pasillos de hospitales para prevenir la contaminación de gérmenes. Sin embargo, en mayores superficies (Quirófanos y UCI, por ejemplo), es necesario una luz UV con una longitud de onda con mayor capacidad germicida: La UV-C.

La mayoría de los equipos actuales de emisión de Luz UV contienen en sus lámparas gas Mercurio, que por ser neurotóxico está prohibido por la Organización Mundial de la Salud, en desuso Mundial desde que 147 países firmaran el Convenio de Minamata de 2012, y con obsolescencia programada en la Unión Europea para 2025-2027, dado que existe una moratoria Europea desde 2022 para prohibir su venta. Sin embargo, el Sistema de luz UV ofrecido por la empresa norteamericana Xenex Disinfection Services (cuyo Partner en



Importancia de la correcta limpieza de los entornos hospitalarios, incluyendo los sistemas de ventilación.
Fuente: Geroulanos et al. (1991).

exclusividad en España y Portugal es la empresa de limpieza CLECE, S.A.: venta, soporte técnico local y mantenimiento de equipos), emite luz UV-A, UV-B y sobre todo UV-C de altísima intensidad, a través de arcos eléctricos en sus lámparas de gas Xenon. La principal ventaja de Xenex frente a otros sistemas de desinfección luz UV es que sus lámparas no contienen gas Mercurio. Además las lámparas de Mercurio son muy ineficientes porque requieren un calentamiento previo, consumiendo mayor energía y reduciendo el número posible de habitaciones y quirófanos a ser desinfectados.

Xenex ha sido el primer y único robot de desinfección autorizado como equipamiento médico por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (la famosa FDA, del inglés, 'Food and Drugs Administration'), y actualmente se encuentra

en más de 1200 hospitales del mundo, incluyendo la conocida Clínica Mayo o el MD Anderson Cancer Center de Houston; y en España se encuentra en 41 hospitales, incluyendo entre otros el Hospital Universitario de Bellvitge (Barcelona), el Hospital Universitario y Politécnico La Fe (Valencia), o el Hospital Universitario de Puerto Real (Cádiz), donde se están consiguiendo muy buenos resultados.

A través de colaboraciones con los sanitarios de estos centros, más de 40 publicaciones científicas han visto la luz, avalando la efectividad de este equipo en la reducción de patógenos y prevenir las HAIs. Entre los microorganismos patogénicos estudiados se encuentran bacterias multirresistentes (tales como *Klebsiella pneumoniae* y *Escherichia coli* BLEE, *Clostridium difficile* toxigénico, *Pseudomonas aeruginosa* multirresistente,

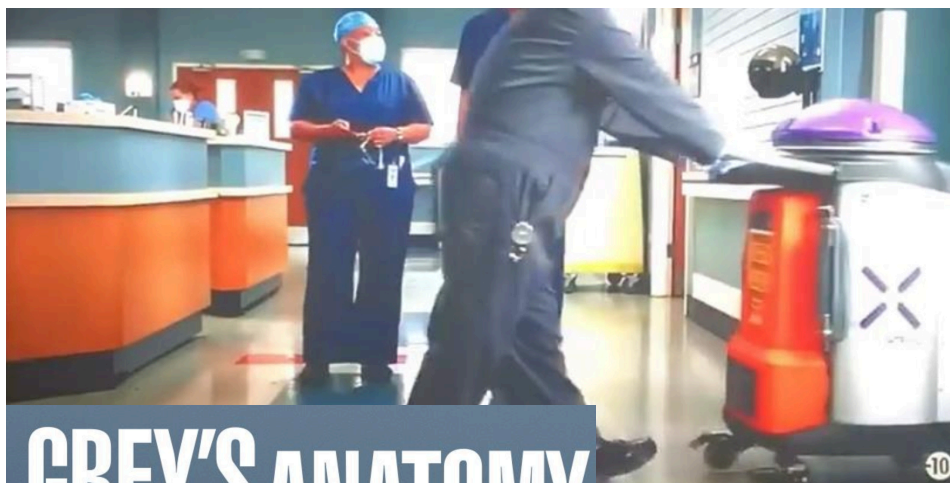


Xenex Light-Strike™ PX-UV. El código QR está vinculado a la página de XENEX creada por CLECE www.xenexbyclece.es. Fuente: CLECE.

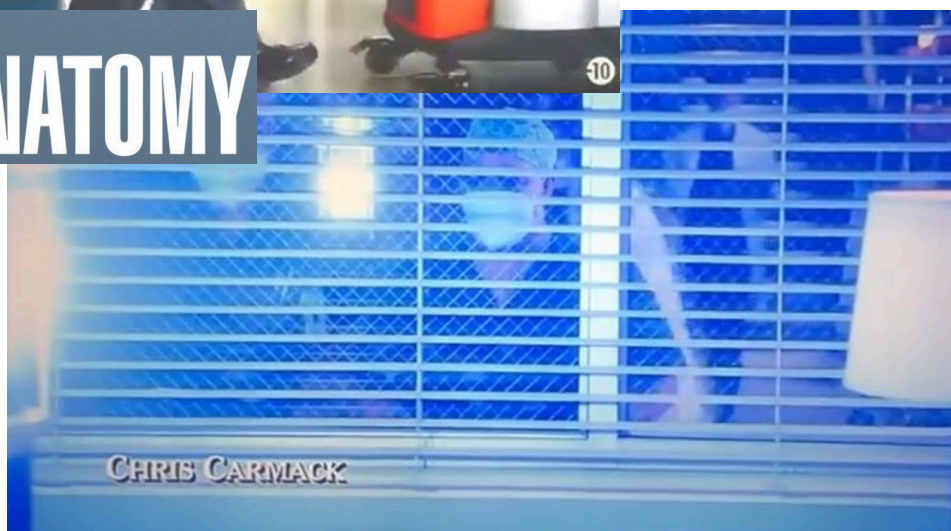
SARM, etc.; hongos y levaduras (*Aspergillus* spp. y *Candida* spp., entre otros); y virus de todo tipo como el coronavirus o el virus ébola. Los efectos derivados de eliminar estos microorganismos patógenos para el ser humano, son: reducir el tiempo medio que el

paciente tiene que estar de estancia en el hospital y con ello, los costes extras asociados a la sanidad, y por supuesto, mejorar la esperanza de vida de los pacientes.

Este equipo no sólo actúa en la realidad, sino también en la ficción hospitalaria como hemos



Xenex Light-Strike™ PX-UV en la temporada 17 de Anatomía de Grey.
Composición de imágenes del capítulo 17x1 de la serie.



visto en la decimosexta y decimoséptima temporada de la serie Anatomía de Grey; temporadas muy delicadas ya que transcurren en plena pandemia en el año 2020/2021, y el Hospital Grey Sloan Memorial no iba a ser menos... también fue azotado por el COVID en plena pandemia. Durante el rodaje, los protocolos de seguridad se cumplieron de forma exhaustiva, realizando RT-PCR tres veces a la semana a todos los actores y actrices, cambiando las lentes de las cámaras, y utilizando los EPIs necesarios. Por suerte los sanitarios y sus pacientes, con el aval de los ficticios doctores Richard Webber y Miranda Bailey, contaron con este innovador aliado en sus instalaciones para luchar contra el COVID, y para verlo en acción ya no es necesario viajar a Seattle, lo podéis ver en muchos hospitales de nuestras ciudades.

Juan de Dios Franco Navarro

Doctor en Biología, Investigador colaborador del IRNAS-CSIC, y técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario de Puerto Real y Hospital de Alta Resolución de La Janda (Cádiz). Colegiado #4159 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.



Celia Sánchez-Hurtado

Bióloga y Técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario Clínico San Cecilio (Granada). Colegiada #4177 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.





Colabora en próximos números

Si quieres colaborar en la revista, escríbenos un correo a revista@hidden-nature.com y te enviaremos las normas de publicación para que puedas participar en futuras revistas.

Colaboradores

Álvaro López García

Científico titular en la Estación Experimental del Zaidín. Perteneció al grupo de Micorrizas. Su investigación se centra en la ecología de las comunidades de microorganismos del suelo y su relación con las plantas. Actualmente, es col del proyecto COEXCLIM, Ministerio de Ciencia e Innovación de España.



Fco Jesús Moreno Racero

Biólogo. Apasionado de la ciencia y la ilustración científica digital. Sin la divulgación, la investigación pierde su significado social.



Jesús Mercado Blanco

Investigador Científico del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España), actualmente adscrito a la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC) donde co-lidera el grupo de investigación Microbiología de Ecosistemas Agroforestales.



Victoria M. Quintero Muñiz

Estudiante de Doctorado en la Estación Experimental del Zaidín del CSIC (Granada, España)



Inmaculada Coletto

Investigadora postdoctoral en la Universidad del País Vasco.



Julia Escudero Feliu

Doctora en Medicina Clínica y Salud Pública. Investigadora postdoctoral en la Estación Experimental del Zaidín (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Granada, España). Mi trabajo se centra en la nutraceutica y los mecanismos moleculares de enfermedades inflamatorias, explorando el potencial de proteínas de leguminosas como agentes terapéuticos en cáncer y diabetes, entre otras.



Juan Encina Santiso

Profesor de ciencias, graduado en Biología por la Universidad de Coruña y Máster en Profesorado de Educación Secundaria por la Universidad Pablo de Olavide. Colabora en proyectos de divulgación científica desde 2013 como redactor, editor, animador de talleres para estudiantes y ponente. Actualmente, estudia Psicología por la UNED.



Mario Paniagua López

Investigador del grupo de "Biofertilización y Biorremediación por Hongos Rizosféricos" de la Estación Experimental del Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZ-CSIC).



Procopio Peinado-Torrubia

Estudiante de doctorado de la US en el IRNAS-CSIC.



Ana García Velázquez

Graduada en Bioquímica e investigadora predoctoral en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC), en Córdoba.



Rosa Ana Salazar García

Bióloga e investigadora predoctoral en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC).



Jose C. Jimenez-Lopez

Científico Titular en el Departamento de Estrés, Desarrollo y Señalización en Plantas, Estación Experimental del Zaidín (EEZ), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en Granada.



Pilar Truchado

Doctora en Tecnología de los Alimentos por la Universidad de Murcia. Actualmente Científico Titular en el Grupo de Microbiología y Calidad de Frutas y hortalizas de CEBAS-CSIC.



Juan Nicolás Espinosa

Investigador posdoctoral en el CEBAS-CSIC enfocado en el estudio de las relaciones hídricas en las plantas con especial atención en la caracterización molecular de las aquaporinas.



Ana Allende

Doctora en Tecnología de los Alimentos por la Universidad de León. Actualmente Profesor de Investigación en el Grupo de Microbiología y Calidad de Frutas y hortalizas de CEBAS-CSIC.



Valme Jurado

Doctora en Biología. Científica Titular en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC. ORCID: 0000-0003-0972-9909.



María Aránega Cortés

Graduada en Biología por la UGR, actualmente en formación investigadora, gracias al programa JAE Intro ICU, sobre colonización micorrízica del bosque mediterráneo en gradientes altitudinales y su respuesta al cambio climático en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC)



Cesáreo Sáiz Jiménez

Profesor de Investigación emérito en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC. Autor de 550 publicaciones sobre microbiología y patrimonio cultural. ORCID: 0000-0003-0036-670X.



Celia Sánchez-Hurtado

Bióloga y Técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario Clínico San Cecilio (Granada). Colegiada #4177 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.



Inmaculada García Romera

Investigadora del grupo de "Biofertilización y Biorremediación por Hongos Rizosféricos" de la Estación Experimental del Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZ-CSIC).



Editores

Francisco Gálvez Prada

Socio fundador del Centro de Investigación y Desarrollo de Recursos Científicos - BioScripts. CEO en IguannaWeb y CTO en Hidden Nature.



Agradecimientos y atribuciones de imágenes

- Las imágenes que necesitan atribución las tienen indicada en su pie de imagen, cada autor del artículo es responsable del uso de las mismas y de que las atribuciones sean correctas.

Miguel A. Rosales Villegas

Doctor en Biología. Científico Titular en la Estación Experimental del Zaidín del CSIC (Granada, España).



Juan de Dios Franco Navarro

Doctor en Biología, Investigador colaborador del IRNAS-CSIC, y técnico de calidad e integración I+D+i en CLECE Hospital Universitario de Puerto Real y Hospital de Alta Resolución de La Janda (Cádiz). Colegiado #4159 en el Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía.



Revista Hidden Nature

Editado por Francisco Gálvez Prada en el Centro de Investigación y Desarrollo de Recursos Científicos **BioScripts** bajo el proyecto Espacio de Divulgación Científica - Hidden Nature en Avda. Reina Mercedes 31 Local Fondo, Sevilla, 41012 (España).

ISSN digital: 2531-0178 ISSN impreso: 2531-0402 Depósito Legal: SE 1592-2017



Número 20• 1C/2025



Libre como el viento...

Bio
Scripts_{net} 