

Microbiota de las raíces de los árboles

¿Construyamos una casa en el árbol! Pero, ¿qué sostiene al árbol?



Imagen de Jeremy Bishop, vía Pexels.com

Ana V. Lasa

Microbiología de los ecosistemas agroforestales, Departamento de Microbiología del Suelo y de las Plantas, Estación Experimental del Zaidín, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Granada, España.

Microbiota de las raíces de los árboles

Historia

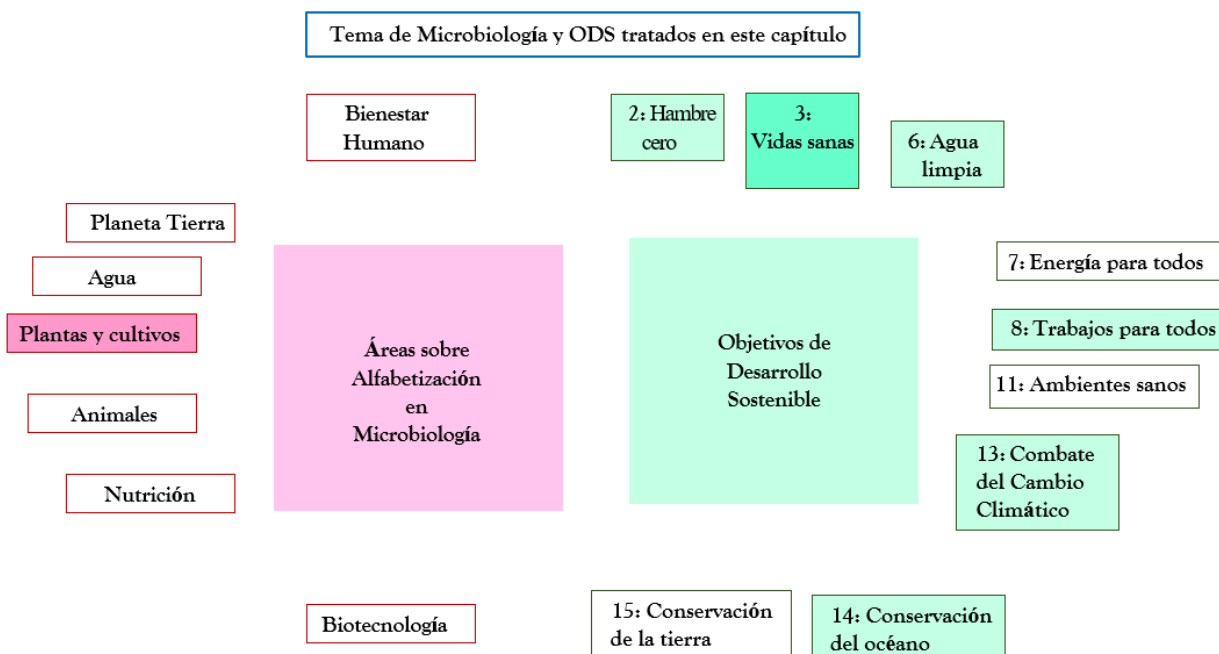
Es imposible saber con exactitud cuántos árboles hay en el mundo, aunque se estima que hay cerca de tres billones. Aunque pueda parecer mucho, no lo es, ya que antes de la civilización humana, la Tierra albergaba alrededor de seis billones de árboles. Y cada año perdemos 15 000 millones de árboles para satisfacer ciertas necesidades humanas, como la producción de papel, madera y alimentos, la expansión de las tierras de cultivo, etc. La pérdida de tantos árboles tiene importantes repercusiones negativas en nuestro planeta y en el bienestar humano, ya que los árboles¹ proporcionan una serie de servicios importantes: son una gran fuente de productos (madera, leña, fibra, alimentos para animales y humanos, como frutos secos, e incluso medicamentos) y proporcionan beneficios no comerciales, como la producción de oxígeno, la protección del suelo, la regulación hidrológica, la fijación de carbono atmosférico y la mejora de los espacios recreativos.

Todos los servicios beneficiosos (también conocidos como “servicios ecosistémicos”) que proporcionan los árboles dependen en gran medida de uno de sus órganos: el sistema radicular y los microorganismos asociados a él. Sin los microorganismos, las raíces no cumplirían sus funciones, los árboles no podrían sobrevivir y, por lo tanto, nosotros tampoco.

La microbiología y el contexto social

Microbiología: microbioma vegetal, interacciones entre plantas y microorganismos, sistema radicular, rizosfera, biotecnología microbiana vegetal, silvicultura.

Cuestiones de sostenibilidad: cultivos vegetales, seguridad y calidad alimentaria, mejor uso de las tierras agrícolas, prácticas forestales sostenibles, salud, suministro de alimentos, economía, empleo, cambio climático.



¹ Existen diferentes tipos de árboles: los que forman parte de bosques templados, tropicales y boreales (pinos, robles, etc.), árboles de cultivo como olivos o frutales, y árboles ornamentales, que se pueden encontrar en ciudades o parques (árboles urbanos).

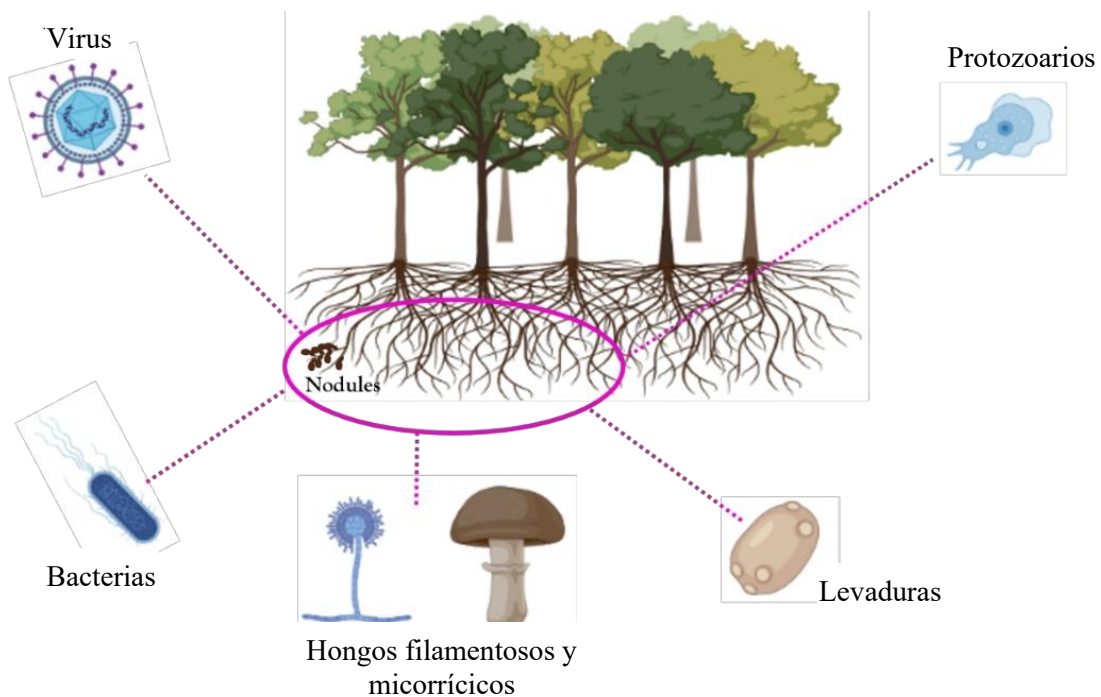
Microbiota de las raíces de los árboles: la microbiología

1. El sistema radicular sostiene toda la planta. El sistema radicular se considera un órgano vegetal, ya que es física y funcionalmente distinto de las demás partes y desempeña funciones esenciales. Actúa como una *aspiradora*: absorbe agua y nutrientes directamente del suelo y los canaliza hacia el tallo para distribuirlos a todos los demás órganos del árbol: hojas, flores, frutos, etc. Algunos de los nutrientes recogidos se acumulan en las raíces durante los meses más fríos del año, por lo que las raíces también son almacenes de alimentos.

Además, las raíces ayudan a mantener todo el árbol en pie porque lo anclan al suelo: esto reduce la probabilidad de que los árboles se desarraiguen en condiciones climáticas extremas, como vientos fuertes, lluvias torrenciales, nieve, etc. Para imaginárselo, piense en la excelente función de soporte de las raíces de una secuoya gigante: sin un magnífico sistema radicular, el peso de un tronco que puede alcanzar un diámetro de hasta 10 m no podría soportarse.

2. Las raíces y el suelo adherido a ellas: ¿quién está ahí? No solo las raíces son importantes, sino también el suelo que está estrechamente adherido a ellas, lo que se denomina rizosfera. Aunque pueda parecer que la rizosfera es un entorno hostil o sin vida, alberga una gran diversidad de microorganismos (microbioma o microbiota): de hecho, es uno de los entornos terrestres que alberga el mayor número de microbios diferentes. Entre ellos, podemos encontrar muchos tipos de bacterias, por ejemplo, algunas que establecen relaciones simbióticas con los árboles (tanto el árbol como las bacterias dependen y se benefician mutuamente) y forman nódulos o protuberancias en cuyo interior viven y proporcionan compuestos beneficiosos al árbol huésped (recuadro 1).

Figura 1. Microorganismos habitando la rizosfera del suelo de árboles.



Otros microorganismos simbióticos son los hongos micorrízicos, que penetran o viven en la superficie de las raíces y forman un manto de raíces y hongos que puede extenderse por una gran superficie del suelo, aumentando el área de absorción de nutrientes del árbol. Probablemente hayas visto alguna vez una seta cerca de un árbol en un bosque: probablemente se trate de un tipo de hongo micorrízico.



El hongo *Amanita muscaria* creciendo en un bosque de pinos estableciendo una asociación simbiótica con los pinos. Foto: Ana V Lasa.

Las levaduras (hongos unicelulares) también habitan en el suelo de la rizosfera, al igual que los nematodos o gusanos microscópicos, que también pueden tener efectos beneficiosos para los árboles. Sin embargo, algunos de ellos son enemigos de los árboles. Tampoco hay que ignorar los virus del suelo: son las entidades de vida más abundantes en la Tierra y son depredadores de otros microorganismos que viven en el mismo entorno, por ejemplo, las bacterias.

3. Microbiota de la rizosfera: ¿qué hacen allí?

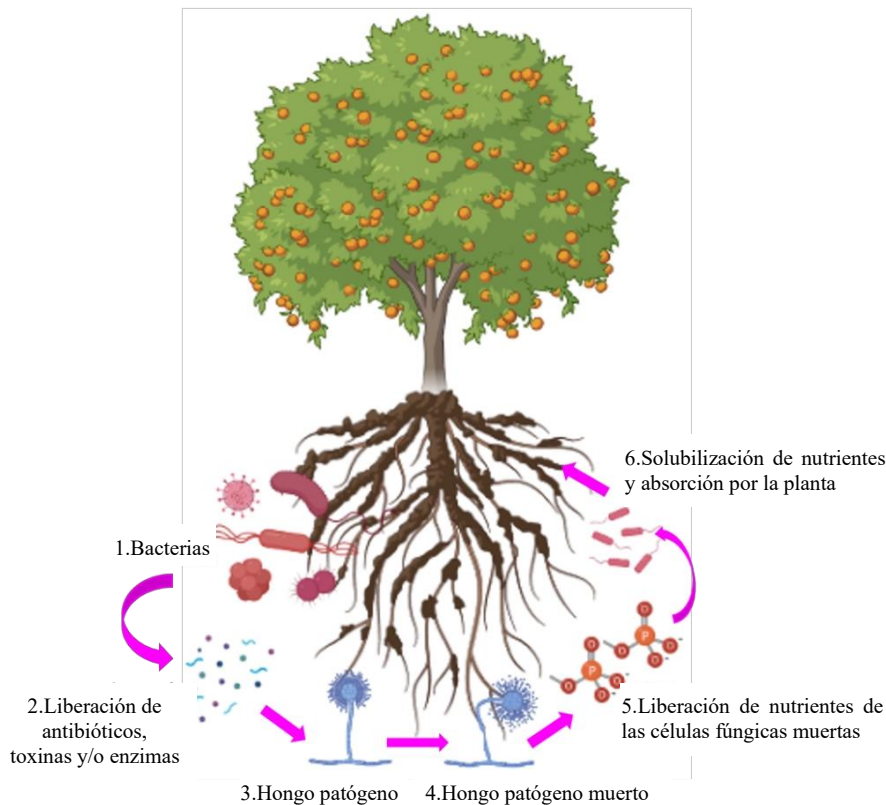
a. Los microorganismos pueden causar graves enfermedades en los árboles. Los árboles pueden enfermarse, al igual que los seres humanos y los animales. En muchos casos, la vía de entrada del patógeno en el árbol son las raíces. La microbiota radicular está compuesta principalmente por microorganismos beneficiosos, aunque las raíces también pueden albergar patógenos, entre los que se incluyen ciertas bacterias, hongos, virus, nematodos, etc.

Cuando los árboles enferman, desarrollan síntomas que a veces pueden observarse en las raíces o en otras partes del árbol. Este es el caso de la podrición de la raíz causada por diferentes hongos, una enfermedad que puede identificarse por el escaso crecimiento del árbol, las hojas marchitas y las ramas débiles.

En la mayoría de las enfermedades de las raíces, estas no pueden cumplir su función, por lo que se debilitan y el árbol puede incluso morir. Las enfermedades de las raíces de los árboles no deben pasarse por alto, ya que la enfermedad infecciosa puede transmitirse de un árbol a otro y propagarse por un gran bosque o una zona cultivada, como un huerto de manzanos o melocotoneros.

b. Los microorganismos también pueden prevenir las enfermedades de los árboles. La rizosfera también contiene microorganismos capaces de prevenir infecciones por patógenos. Algunas bacterias han desarrollado la capacidad de producir compuestos que limitan el crecimiento de los patógenos, como antibióticos (similares a los que tomamos cuando estamos enfermos), toxinas que matan directamente a los patógenos o enzimas (proteínas que realizan muchas funciones esenciales para las células) que disuelven la pared celular o la «piel» de las células fúngicas y, por lo tanto, las matan (recuadro 2). Además, los microorganismos pueden estimular el sistema inmunitario de las plantas, lo que las prepara para hacer frente al ataque de otros patógenos. Por lo tanto, los microorganismos pueden aplicarse a las raíces de los árboles para prevenir las enfermedades infecciosas de los árboles.

Figura 3. Ejemplo del fenómeno de antibiosis y ciclo de nutrientes en la rizósfera



c. La supervivencia de los árboles depende de la microbiota de la rizosfera. Además de prevenir enfermedades, los microorganismos que habitan en la rizosfera desempeñan otras funciones importantes relacionadas con la salud de los árboles. Pueden disolver nutrientes que no están disponibles para la planta y, de ese modo, mejorar la nutrición de los árboles al hacer que los nutrientes sean más solubles en el suelo. Algunos microorganismos producen hormonas vegetales llamadas fitohormonas, que son necesarias para el crecimiento de los árboles y para varios procesos, como la floración o la producción de frutos. También contribuyen a la supervivencia en el campo al promover la tolerancia de los árboles a las tensiones ambientales, como las causadas por las altas temperaturas o los patrones de baja precipitación. Todas estas propiedades hacen que los microorganismos sean excelentes candidatos para añadirlos a los árboles como si fueran fertilizantes (biofertilizantes).

d. La estructura de las raíces de los árboles y la calidad del suelo circundante dependen de la microbiota asociada a ellas. Debido a la actividad microbiana (especialmente la actividad de los hongos micorrízicos), las raíces pueden variar su morfología. Cuando establecen interacciones simbióticas con hongos micorrízicos, la superficie del suelo cubierta por las raíces aumenta. Otros microorganismos pueden descomponer la hojarasca y la madera muerta, lo que favorece la incorporación de nuevos nutrientes, agua y oxígeno al suelo, mejorando así su calidad.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los grandes retos

La utilización de productos arbóreos, los biofertilizantes microbianos y la importancia del sistema radicular están relacionados con varios ODS, entre ellos:

- **Objetivo 2: Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.** Los árboles sanos que producen cultivos alimentarios, como manzanas, cerezas, aceitunas y nueces, tienen mejores rendimientos y calidad que los árboles enfermos y los infectados por microorganismos patógenos. Esto, a su vez, mejorará la seguridad alimentaria. En

Además, un buen equilibrio de nutrientes en la rizosfera (que suele lograrse mediante un microbioma saludable) es sinónimo de frutos con un mayor valor nutricional.

- **Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades:** Los bosques contribuyen a la vida sana de los seres humanos y promueven el bienestar de diferentes maneras, por ejemplo, creando una atmósfera rica en oxígeno o permitiendo dar un paseo por el bosque. Al mantener una microbiota de la rizosfera saludable y, por lo tanto, bosques saludables, nuestra salud física y mental puede mejorar gracias a las actividades que podemos realizar allí, lo que supondría un ahorro para los presupuestos sanitarios y un beneficio para nuestra calidad de vida.
- **Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.** Si se aplican microorganismos de la rizosfera a los cultivos arbóreos en lugar de grandes cantidades de fertilizantes químicos o pesticidas, el agua de riego recibe menos contaminantes y se reduce la contaminación del agua de escorrentía. Por otro lado, la producción a gran escala de microorganismos como agroquímicos es un proceso que consume mucha agua, por lo que puede ser más difícil de lograr.
- **Objetivo 8: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.** El uso de fertilizantes basados en microorganismos beneficiosos (biofertilizantes) podría apoyar el crecimiento económico de varias maneras. En primer lugar, el desarrollo de biofertilizantes implica muchas actividades diferentes (investigación, desarrollo de productos, comercialización, transporte, ventas, etc.), mientras que la aplicación del producto podría apoyar la creación de puestos de trabajo relacionados con la agricultura, la silvicultura o la industria ornamental. Es importante destacar que las tierras agrícolas o forestales anteriormente abandonadas debido a enfermedades de los árboles o a la baja productividad podrían rejuvenecerse, creando nuevas oportunidades de empleo.
- **Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.** Los árboles, como protagonistas de la fotosíntesis planetaria, desempeñan un papel fundamental en la captura y el almacenamiento de carbono, por lo que son elementos clave en el calentamiento global y el cambio climático. El uso de biofertilizantes o microorganismos para prevenir las enfermedades de los árboles reduce el uso de fertilizantes químicos, pesticidas, etc., lo que contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen durante su producción y la liberación de contaminantes y compuestos nocivos al campo. Además, un sistema radicular sano tiene un impacto positivo en la parte aérea (hojas, tronco) de los árboles, lo que favorece una mayor actividad fotosintética y, por lo tanto, mayores niveles de fijación de CO₂ y emisiones de O₂ a la atmósfera.
- **Objetivo 15: Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de forma sostenible los bosques, combatir la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.** La explotación de los árboles y sus productos (madera, resina, frutos, etc.) puede dificultar la consecución de este ODS. Si un árbol infectado no ha sido diagnosticado adecuadamente y se utiliza, la infección puede propagarse a otros árboles (por ejemplo, mediante el uso de herramientas forestales contaminadas, como sierras, etc.), lo que puede provocar importantes pérdidas medioambientales y económicas. Por el contrario, el uso de fertilizantes basados en el microbioma y de productos basados en microorganismos que previenen enfermedades puede ayudar a promover bosques más saludables y a combatir la desertificación. Dado que los bosques son el hogar de muchas otras plantas, animales y microorganismos, su conservación y mejora de la salud tiene un fuerte impacto positivo en el mantenimiento de la biodiversidad mundial.

Participación de los alumnos

1. *Debate en clase sobre la importancia de los árboles y sus órganos (especialmente las raíces) en todo el mundo. Debatir también la relevancia de las interacciones entre los árboles y los microorganismos.*

2. Concienciación de los alumnos como partes interesadas

- a. ¿Por qué debemos preocuparnos por el estado de salud de la rizosfera?
- b. Al garantizar una rizosfera saludable para los árboles, ¿qué ODS crees que no se puede alcanzar?
- c. ¿Se le ocurre algo que podría hacer para garantizar una rizosfera saludable o para proteger nuestros bosques?
- d. En relación con el uso de biofertilizantes microbianos para mejorar la salud de los árboles:
 - i. ¿De qué ecosistemas deberíamos aislar los microorganismos para inocularlos?
 - ii. ¿Podríamos encontrar patógenos humanos en la rizosfera de los árboles forestales? ¿Y en la rizosfera de los árboles de cultivo que han sido tratados con estiércol de vaca u oveja?

3. Ejercicios

- a. Imagina tu árbol favorito (forestal, ornamental o de cultivo, por ejemplo, pinos) y
 - i. Descubre su área de distribución en todo el mundo. ¿Cuáles son los lugares donde se encuentra principalmente esta especie?
 - ii. ¿Cuáles serían las consecuencias de perder esta especie (debido a una infección, talas masivas, etc.)? Puedes empezar desde un punto de vista local (por ejemplo, el huerto de tu abuela) hasta una escala global (todos los huertos del mundo).
 - iii. ¿Se vería afectado nuestro suministro de alimentos?
 - iv. ¿Tendrían suficiente alimento animales como las abejas o las cabras?
 - v. ¿Se vería afectado negativamente el bienestar humano? Piensa en todos los productos derivados de los árboles que puedes utilizar o consumir: madera para construir casas, habas del árbol del cacao necesarias para obtener chocolate, etc.

La base empírica, lecturas adicionales y material didáctico

Protección de la biodiversidad del suelo

<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2022.677917>

El microbioma de la rizosfera:

Mendes, R., Garbeva, P. y Raaijmakers, J.M. 2013. El microbioma de la rizosfera: importancia de los microorganismos beneficiosos para las plantas, patógenos para las plantas y patógenos para los seres humanos. FEMS Microbiol Rev 37: 634-663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>

Mercado-Blanco, J., Abrantes, I., Barra Caracciolo A., Bevivino, A., Ciancio, A., Grenni, P., Hryniewicz, K., Kredics, L. y Proença, D. 2018. Microbiota subterránea y salud de los cultivos arbóreos. Front Microbiol 9: 1006. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01006>

Los hongos del suelo:

<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2022.652660>

Glosario

Pared celular: estructura situada en la parte externa de algunas células, que separa una célula de otra. Esta estructura también proporciona protección frente a los patógenos y el entorno circundante, así como soporte físico a las células. Las paredes celulares se encuentran en diferentes organismos, como plantas, hongos, bacterias, algas, etc., aunque su composición varía en función del organismo.

Enzima: proteínas que actúan como máquinas, ya que pueden ejecutar muchas reacciones diferentes que ocurren dentro (e incluso fuera) de las células. Ayudan a que las reacciones biológicas se produzcan más rápido o más fácilmente. Hay muchos tipos diferentes de enzimas dependiendo de su estructura o función, y se pueden encontrar en todos los organismos vivos. Por ejemplo, una de ellas participa en la transformación de la carne que comes en pequeños trozos en tu intestino para que puedas absorber los nutrientes de la carne.

Microbiota o microbioma: grupo de diferentes microorganismos que viven en un ecosistema específico. El microbioma puede estar compuesto por bacterias, hongos, levaduras, virus, protozoos, algas, etc., dependiendo del ecosistema en el que habiten.

Hongos micorrízicos: hongos que forman relaciones mutualistas con las raíces de las plantas. No pueden vivir sin interactuar con una planta, ya que no son capaces de obtener nutrientes y energía del medio ambiente, por lo que las plantas tienen que proporcionárselos, y ellos proporcionan a las plantas otros nutrientes que necesitan. Casi el 80 % de todas las especies vegetales del mundo interactúan con hongos micorrízicos. Se han descrito dos tipos de hongos micorrízicos: endomicorrízicos (que penetran en las células del huésped) y ectomicorrízicos (que no penetran en la pared celular de la planta).

Nematodos: gusanos redondos microscópicos que viven en el suelo, el agua y los tejidos animales y humanos. Algunas especies de nematodos del suelo son beneficiosas para las plantas, mientras que otras son perjudiciales (parásitos) y se alimentan de las raíces, lo que causa graves daños a muchos cultivos alimentarios, como las zanahorias o las chirivías.

Nódulo: tumores beneficiosos que se desarrollan en las raíces de algunas especies vegetales. Se forman como resultado de una relación simbiótica entre algunas plantas y ciertos tipos de bacterias. Dentro de los nódulos, las bacterias son capaces de fijar N_2 del medio ambiente y proporcionar N a la planta, mientras que las plantas proporcionan nutrientes y energía a las bacterias.

Fitohormona: hormona vegetal. Moléculas orgánicas producidas por las plantas y ciertos microorganismos que intervienen en procesos vegetales esenciales, como el desarrollo de las raíces, el alargamiento del tallo, la floración, la producción de frutos, etc.

Rizosfera: suelo muy próximo a las raíces de las plantas y bajo su influencia. Es rica en compuestos de origen vegetal liberados por las raíces (exudados radiculares, compuestos por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, etc.) y en microorganismos.

Pudrición de la raíz: enfermedad común de las raíces de las plantas causada por diferentes patógenos microbianos, como hongos, y por un exceso de agua. Aunque los síntomas comienzan en las raíces, pueden extenderse por encima del suelo y las plantas pueden incluso morir. Los síntomas comunes son: suelo continuamente húmedo incluso sin haber regado la planta, raíces blandas, suelo con olor a podrido, crecimiento lento de la planta, marchitamiento y amarilleamiento de las hojas.

Relación simbiótica (simbiosis): relación mutualista entre diferentes organismos, en la que ambos obtienen beneficios.

Levaduras: las levaduras son hongos unicelulares que viven en muchos entornos diferentes, como suelos, cuerpos humanos, ecosistemas acuáticos, entre otros. Se utilizan comúnmente en diferentes industrias para obtener productos fermentados como pan, cerveza, vino y otras bebidas alcohólicas, biocombustibles e incluso medicamentos. Hay ciertas especies que causan enfermedades en humanos, animales y plantas.