

Jaizme-Vega, M.C. (2012). 5. La vida en el suelo. Papel de los microorganismos en la agroecología. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Agricultura en Canarias: conciliando tradición y ciencia*. pp. 145-172. Actas VII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz, Tenerife. ISBN: 978-84-616-0641-2.

5. La vida en el suelo. Papel de los microorganismos en la agroecología

María C. Jaizme-Vega

*Departamento de Protección Vegetal,
Instituto Canario de Investigaciones Agrarias
(ICIA)*

El principal objetivo de la agricultura es producir alimentos para la población. Durante las pasadas décadas, el continuo crecimiento poblacional, tanto humano como animal, convirtió en insuficientes las producciones de la agricultura tradicional y degradó los agrosistemas. Como consecuencia, se produjo una intensificación de la agricultura y una industrialización incontrolada que ha supuesto una sobrecarga de los ecosistemas naturales. Esta circunstancia hace que volvamos la vista hacia soluciones sostenibles y posibilita el nacimiento de nuevos conceptos en agricultura, tales como la agricultura ecológica, la agricultura natural, la biodinámica, etc., con una clara vocación de retorno hacia la naturaleza.

Estas nuevas tendencias cuentan con el problema adicional de la paulatina reducción de las tierras de labor debido a la degradación del suelo y al deterioro de la calidad del agua, consecuencias que aun no han sido valoradas de modo global. Ante estas perspectivas, la agricultura sostenible es la única propuesta que acompasa el suelo y la productividad mediante la integración de biotecnologías y el mantenimiento e incremento del rendimiento agrícola y la calidad del medio ambiente. Las producciones de los cultivos más importantes para la humanidad, tales como el trigo, el arroz, y los cereales comestibles en general, se han visto estancadas o reducidas durante la revolución verde.

Introducción

El suelo es un medio dinámico que alberga y nutre diferentes comunidades microbianas tales como bacterias, actinomicetes, hongos, algas, protozoos, nematodos, etc., los cuales juegan un papel significativo en el ciclado de nutrientes, conversiones biológicas, formación de *humus*, mantenimiento de ecosistema y otras acciones encaminadas a garantizar la vida y la productividad de las plantas.

Las interacciones de los microorganismos de las plantas con el suelo, contribuyen a mantener la agricultura sostenible. Los microorganismos benéficos habitantes de la zona rizosférica, entre los que se incluyen fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, incrementadores del crecimiento, agentes de biocontrol, transportadores de nutrientes y estabilizadores del suelo, son fundamentales para mantener las producciones. Estos microorganismos tienen mayor capacidad para adaptarse a diferentes ambientes que las propias plantas.

Actualmente, estos factores biológicos del suelo se han convertido en criterios de importancia para valorar la fertilidad del suelo. Hoy en día, el concepto de “calidad del suelo” se relaciona directamente con la productividad, la salud y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Desde el punto de vista agronómico la “calidad del suelo” es expresada como “fertilidad” y define la capacidad de un suelo para soportar sostenidamente plantas sanas y productivas. Las interacciones de las propiedades físicas, químicas, biológicas y climáticas del sistema son las que identifican la fertilidad de los suelos, y los hongos micorrícicos se consideran como componentes clave de dicha fertilidad del suelo, bien sea a través de la propia simbiosis o por su interacción con otros microorganismos de la rizosfera.

Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (MA) se consideran como componentes clave de la fertilidad del suelo, bien sea a través de la propia simbiosis o por su interacción con otros microorganismos de la rizosfera, y su significado agroecológico merece una atención específica. Estos hongos, mediante una asociación mutualística con las raíces de la mayoría de las especies de plantas forman las conocidas micorrizas. Dicha simbiosis se caracteriza por un movimiento bidireccional de nutrientes, constituido por un flujo de carbono desde la planta hacia el hongo y nutrientes inorgánicos a través de una red de hifas de la micorriza hacia la planta. Las micorrizas pueden encontrarse en todos los ecosistemas terrestres bien sean bosques, selvas, desiertos, lagos, etc., y se sabe que su presencia garantiza la salud de la planta y la calidad del suelo. La universalidad de esta simbiosis implica a una gran diversidad taxonómica tanto de hongos como de plantas.

Esta visión global del sistema suelo-planta y las leyes y mecanismos mediante los cuales los microorganismos interactúan con las plantas garantizando, la nutrición salud y por lo tanto la continuidad y evolución de los ecosistemas, se interpreta de manera natural través de la Agroecología, que como ciencia aplicada utiliza conceptos y principios ecológicos para el diseño de agrosistemas sostenibles, donde los insumos externos se sustituyen por procesos naturales como la fertilidad natural del suelo y el control biológico (Altieri, 1995). La Agroecología saca el mayor provecho de los procesos naturales y de las interacciones positivas en los sistemas agrícolas con el fin de reducir el uso de insumos externos y crear sistemas agrícolas más eficientes.

La Agroecología como enfoque científico

Durante el siglo XX, la Agronomía y la Ecología han avanzado por caminos paralelos, sin relación entre ellas. Los límites concebidos *a priori* para cada una, la naturaleza de teórica para una y práctica para la otra las había mantenido relativamente separadas. Tras algunos intentos con dudoso éxito, es a inicios de la década de los 80, ante los graves problemas medioambientales y sociales generados por los modelos de producción intensiva, cuando emerge, para dar respuesta a la crisis ecológica, una disciplina diferente que integra a ambas, la Agroecología. El conocimiento y entendimiento de la agricultura tradicional en países en vías de desarrollo tuvo gran influencia durante este periodo (Gliessman, 2002). Así la Agroecología aparece como una ciencia necesaria para interpretar el grave deterioro de aquellos agrosistemas que requerían cada vez más la utilización de grandes cantidades de insumos y energía para mantener sus capacidades productivas.

Las actuales formas de producción se caracterizan básicamente porque requieren una extracción continua de energía proveniente de la naturaleza. Esta gran cantidad de energía que hay que aportar para el funcionamiento de los sistemas agrarios provoca por una parte, una simplificación de los elementos del mismo (entomofauna, microfauna, variabilidad genética...) y por otra, a su vez, una descarga residual al aire, al agua y a la tierra... que genera grandes cambios y problemas tal vez mayores que los que se pretendía solventar (Porcuna, 2012).

Para muchos científicos, la velocidad de estos cambios ya ha superado la capacidad de adaptación de la propia naturaleza. El efecto invernadero, la lluvia y deposiciones secas ácidas, la disminución de la capa de ozono estratosférica, el incremento de las concentraciones de ozono troposféricas, la deforestación, la desertización, la contaminación del agua, la erosión genética en especies de animales y vegetales, el incremento de plagas y

enfermedades en las plantas cultivadas..., son las señales palpables de la situación de crisis ambiental profunda a la que nos enfrentamos.

En este marco, la Agroecología puede ser definida como *“la disciplina científica que enfoca el estudio de la agricultura desde una perspectiva ecológica, pretendiendo construir un espacio teórico cuyo fin es analizar los procesos agrícolas con un amplio enfoque”*. Es decir, incluyendo las relaciones de todos los elementos que participan en la configuración de un agrosistema, desde el punto de vista del espacio y del tiempo, junto con la perspectiva que incluye los problemas sociales, económicos y políticos, como participantes activos y pasivos en la configuración y desarrollo de los sistemas agrarios (Porcuna, 2010).

Según Gliessmann (1998), los principios agroecológicos descritos en la Tabla 1 y usados en el diseño y en el manejo de los agrosistemas mejoran la biodiversidad funcional de los sistemas agrícolas que es esencial para el mantenimiento de los procesos inmunes, metabólicos y reguladores, claves para la función del agrosistema.

Tabla 1. Principios agroecológicos para el diseño de sistemas agrícolas biodiversos, flexibles, eficientes en el uso de la energía y conservadores de recursos (Altieri & Nicholls, 2012).

Aumentar el reciclaje de biomasa, con miras a optimizar la descomposición de materia orgánica y el ciclo de nutrientes a través del tiempo.
Proveer las condiciones de suelo más favorables para el crecimiento vegetal, en particular mediante el manejo de la materia orgánica y el mejoramiento de la actividad biológica del suelo.
Fortalecer el "sistema inmunológico" de los sistemas agrícolas, mejorando la biodiversidad funcional (los enemigos naturales, antagonistas, etc.)
Minimizar las pérdidas de energía, agua, nutrientes y recursos genéticos mejorando la conservación y regeneración de suelos, recursos hídricos y la diversidad biológica agrícola.
Diversificar las especies y los recursos genéticos en el agroecosistema en el tiempo y el espacio a nivel de campo y del paisaje.
Aumentar las interacciones biológicas y las sinergias entre los componentes de la biodiversidad agrícola, promoviendo procesos y servicios ecológicos claves.

En consecuencia, y tal y como lo describe Porcuna (2012), al agroecólogo le interesa, no solo la maximización de la producción de un

componente particular, sino más bien la optimización del agrosistema como un todo. Se plantea la investigación como interacciones complejas entre personas, cultivos, suelo, animales, etc., por lo tanto, su herramienta de trabajo ha de ser las estrategias que permitan aprovechar las sinergias existentes entre los distintos componentes del agrosistema. Integrar todos estos elementos constituye, sin lugar a dudas, un esfuerzo muy importante para los investigadores que intentan su construcción, ya que trasciende la actuación de los propios grupos interdisciplinarios, en el sentido que, más que requerir una suma de conocimientos, requiere que desde distintas áreas se piense en común, construyendo pensamientos globales que sirvan para diseñar un nuevo y compartido espacio teórico.

La dificultad de la Agroecología con respecto a otras ciencias estriba, en que mientras en las demás, la suma de conocimientos sirve para caminar de lo desconocido a lo conocido, en esta, la globalización o la síntesis desde distintos espacios del conocimiento hacen avanzar desde lo conocido en dirección a lo desconocido. Mientras que en las otras ciencias, el análisis y la reducción sirven para aclarar y separar los elementos de definir un determinado comportamiento, en esta, la globalización de cada una de las parcelas en que se divide y subdivide la ciencia ortodoxa anula los propios presupuestos de partida creándose un espacio para la reflexión en vez de un espacio para la conclusión.

A medida que la Agroecología se desarrollaba y su influencia crecía, esta disciplina contribuyó al desarrollo del concepto de **sostenibilidad** en la agricultura. Según Gliessmann (2002), la palabra sostenibilidad deriva del concepto rendimiento sostenido, es decir la condición de cosechar a perpetuidad cierta biomasa de un sistema que tiene la capacidad de renovarse por sí mismo. La propia definición nos aleja del presente y nos hace entender que la prueba de sostenibilidad recae siempre en el futuro, fuera de nuestro alcance. Por lo tanto, solo podremos demostrar cuando una práctica se está alejando de la sostenibilidad. Por otra parte, hay que aclarar que cualquier definición de sostenibilidad ha de tener en cuenta necesariamente las dimensiones ambiental, económica y social (Labrador y Porcuna, 2006).

El interés de estos planteamientos formulados desde la Agroecología, aumenta cada día dentro del sector agrario convencional, especialmente en temas como el manejo del suelo. Los requerimientos de los mercados de productos ecológicos, sin residuos o con niveles muy por debajo de los que autoriza la legislación de LMRs (Límites Máximos de Residuos) comunitarios, ha provocado, que desde todos los sectores se vuelva la mirada hacia planteamientos agroecológicos con el fin de recabar información de las técnicas y los enfoques que pudieran ser útiles para conseguir estos objetivos. En la actualidad, la Agroecología como enfoque

científico forma parte en la actualidad, de los programas de formación de numerosas Universidades y Centros de Investigación en todo el mundo.

El suelo, reserva de vida

El suelo es un complejo, viviente, cambiante y dinámico componente del ecosistema donde se refugia la gran parte de la biosfera terrestre. Está sujeto a la alteración y puede ser degradado si no se maneja responsablemente. Durante mucho tiempo se consideró como soporte inerte que daba sostén a las plantas y a las actividades humanas como la agricultura, construcción, transporte e industria, entre otras. Dentro de esta concepción se estudiaron ampliamente sus características físicas y químicas, sin desconocer su función de asentamiento, de por sí importante. Por fortuna, hoy en día estamos comprendiendo que el suelo es un sistema vivo, donde los organismos que lo habitan no son temporales, sino parte inherente con profunda influencia en las propiedades del suelo y sus atributos de fertilidad, calidad, salud, sostenibilidad y resiliencia, esenciales para la producción continua de cultivos, conservación del medio ambiente y el bienestar humano. Hoy entendemos mejor por qué toda la vida sobre la tierra firme se inicia en el suelo.

El suelo es un sistema

En primera instancia, y según Sánchez de Prager (2007), el cuerpo llamado suelo es un sistema conformado por varias partes: la fracción mineral, la materia orgánica y los organismos, que constituyen lo que se ha denominado **fase sólida**, el agua, **fase líquida**, y el aire, **fase gaseosa**. Dichas fases trabajan integradamente para conformar ese todo o conjunto que conocemos como suelo.

En la **fase sólida** los materiales inorgánicos o fracción mineral conforman la mayoría del volumen del suelo en términos de masa y superficie. Consiste de minerales primarios o formados a partir de la cristalización de soluciones concentradas de determinados elementos. El intemperismo (proceso de degradación y descomposición que sufren las rocas y los minerales debido a la corrosión atmosférica) de esos materiales origina minerales secundarios: arenas, limos y arcillas y productos solubles, macro y microelementos. De estos minerales secundarios, las arcillas tienen alta influencia en el funcionamiento del suelo.

Dentro de la **fase sólida** está también la materia orgánica, que puede estar viva o muerta, ambas esenciales en los procesos de alteración de los minerales primarios y formación de los secundarios. Esta última proviene de los residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, de los restos de otras especies como hifas, esporas,

bacterias, heces y construcciones de organismos (termitarios, pellets fecales, nidos, esporocarpos, entre otros), de sustancias que sintetizan las plantas, como por ejemplo los exudados radicales y los organismos del suelo como las excreciones y secreciones de macro y microbiota, o que se forman por síntesis química. Lo que más comúnmente observamos de ella, a simple vista, es la capa de materiales orgánicos que se forma sobre los suelos y que se denomina mantillo.

Estos restos de materiales orgánicos varían considerablemente en la complejidad de su estructura química. Así, algunos de ellos pueden reciclarse en términos de horas o días (azúcares, ácidos orgánicos), mientras que otros (polímeros con alto peso molecular y gran complejidad) son muy resistentes a la degradación y pueden durar decenas o cientos de años sin sufrir grandes alteraciones.

Con relación a la materia orgánica viva están las raíces de las plantas que constituyen una expresión macroscópica de la vida en el suelo, y los organismos del suelo, desde los grandes mamíferos y el hombre hasta los microorganismos, cada uno de los cuales, ya sea que vivan en la superficie de la Tierra o en el suelo, afecta el desarrollo de este cuerpo natural, en una forma o en otra, como se verá más adelante.

Los minerales del suelo, la materia orgánica y los organismos forman agregados que determinan microambientes, en los cuales transcurre la trama del suelo vivo. Dentro de los agregados, o entre ellos, quedan espacios (poros) que son ocupados por el agua y/o los gases, que constituyen la atmósfera del suelo.

El agua como integrante de la **fase líquida** es componente fundamental del clima, circula una y otra vez entre los organismos vivos y el ambiente abiótico, condiciona la evolución y funcionamiento de los suelos, pues es el principal agente de formación y cambio en ellos, además de ser esencial para la supervivencia y crecimiento de las plantas y los organismos del suelo.

La característica del agua de fluir en el suelo mediante las raíces, tallos, hojas y desde ahí pasar al aire la amplía Odum (1995), así: “Se evapora de la vegetación, los lagos y otras superficies, se filtra en el suelo y se convierte en agua subterránea, y corre por ríos y arroyos hacia el mar. No importa cómo salga el agua del ecosistema, finalmente debe ser repuesta por la lluvia (o lluvia prehistórica almacenada como agua subterránea) para que el comercio, la agricultura, la recreación o cualquier parte de la vida humana continúe como antes”. El suelo se puede entender también como bioacumulador de agua y regulador de los efectos climáticos, cuando manifiesta que “en los suelos se almacena el 40% de toda el agua dulce del planeta”.

Es de tener en cuenta que el agua contenida en el espacio poroso o que se mueve a través del suelo contiene amplia diversidad de materiales

disueltos y suspendidos en ella: orgánicos, inorgánicos y órgano-minerales, es decir, constituye la solución del suelo encargada de proveer agua a la planta y los nutrientes disueltos en ella.

Si hablamos de la **fase gaseosa**, diremos que los gases presentes en el suelo son los mismos que se encuentran en la atmósfera superficial (O_2 , N_2 , CO_2) y otros que provienen del metabolismo de raíces y organismos del suelo (como CH_4 y SH_2). Pueden estar presentes como parte de la atmósfera del suelo, disueltos parcialmente en la solución del suelo o adsorbidos por algunos componentes del suelo (Lavelle & Spain, 2001). La circulación de estos gases está estrechamente ligada a la estructura del suelo.

Las **fases sólida, líquida y gaseosa** sólo se consolidan como sistema suelo cuando conforman un todo que se expresa en propiedades **físicas, químicas y biológicas**, de cuya interacción aparecen propiedades emergentes, fruto de la sinergia y acción integrada de las tres fases y sólo posibles en los sistemas vivientes: fertilidad, productividad, salud, calidad de suelo, sostenibilidad y resiliencia, tal y como se esquematiza en la Figura 1.

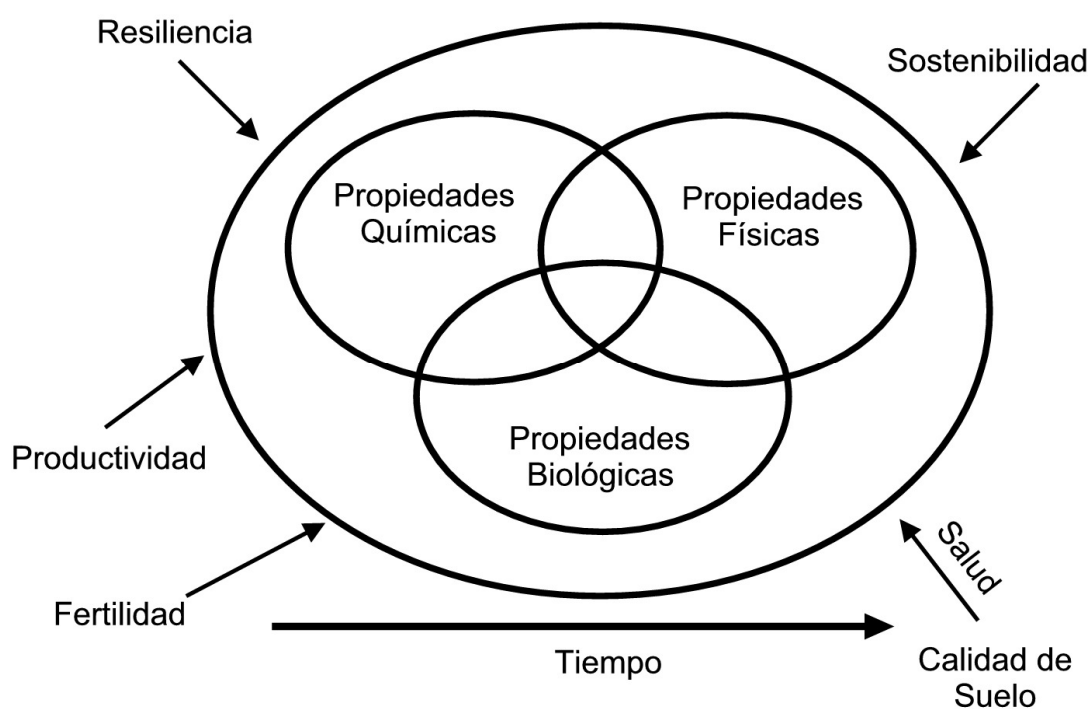


Fig. 1. El suelo como sistema exhibe propiedades físicas, químicas y biológicas que funcionan como un todo. La fertilidad, calidad, salud, sostenibilidad y resiliencia del suelo son propiedades emergentes (según Sánchez de Prager, 2007).

El suelo es un sistema vivo

Dentro del concepto de suelo como sistema vivo es importante precisar que *nace*, sufre una génesis que lleva a su formación; *tiene una estructura*, que la confieren los coloides minerales, orgánicos y los organismos; *posee metabolismo propio*, aspira oxígeno (O₂) y libera gas carbónico (CO₂) mediante procesos de mineralización y síntesis; *forma materiales de reserva*, humus, y como cualquier ser vivo también puede *envejecer y morir*.

a) El suelo nace...

Como se afirmó con anterioridad, la génesis de un suelo se inicia en cualquier parte del mundo, en condiciones climatológicas y topográficas específicas, en un proceso evolutivo gradual. Se forma a medida que los materiales parentales se desintegran por procesos **físicos** (acción del agua, la temperatura, el viento, el relieve, etc.), **químicos** (oxidación, reducción, hidrólisis, hidratación, carbonatación, solubilización y posterior precipitación de productos del intemperismo), y **biológicos**, como la perturbación causada por las raíces de las plantas, hormigas, termitas, lombrices y otros organismos que crean canales, poros, agregados, que van a influir en el transporte de agua y gases en el suelo y, por tanto, en el metabolismo del suelo y en la formación de hábitats para los microorganismos, además de las transformaciones físicas y químicas causadas directamente por los organismos vivos y/o sus productos metabólicos.

Diversas sustancias como ácidos orgánicos, CO₂ y enzimas producidos por la biota del suelo, y en especial por los microorganismos, descomponen los minerales, hacen posible la disponibilidad de nutrientes para las plantas y crean biomasa, es decir, un potencial de energía química en forma de carbono que permite el establecimiento de cadenas tróficas o alimenticias (Lavelle & Spain, 2001).

El nacimiento del suelo supone, por lo tanto, la formación de minerales secundarios (arenas, limos y arcillas), la acumulación de materia orgánica (biota y restos orgánicos), disponibilidad de nutrientes, capacidad de almacenamiento de agua y un ambiente atmosférico que permitan su colonización y establecimiento de la trama de la vida.

Los agregados pueden formarse por la fragmentación de partículas grandes como terrones o a través de la aglomeración de las pequeñas, ser resultado de la acción de las raíces de las plantas, fauna y microbiota del suelo o contruidos naturalmente. Entre los agregados se generan espacios (poros), a través de los cuales se moviliza el agua en el perfil del suelo. De la presencia, distribución del tamaño de poros y la interconexión entre ellos depende la infiltración del agua, su movimiento lateral y vertical, almacenamiento y su disponibilidad para las plantas.

b) *El suelo se estructura...*

Como se dijo con anterioridad, por la acción integrada de procesos físicos, químicos y biológicos, el material mineral da origen a coloides minerales (arcillas) y condiciones para que se acumule materia orgánica viviente y en forma de residuos. Todos estos materiales, en conjunto con las arenas y limos, dan estructura al sistema suelo que se expresa en agregación, espacio poroso y efectos sobre su funcionamiento. Se puede apreciar esta estructura cuando se desmenuza el suelo ligeramente y se observa el tamaño y la forma de los fragmentos en los que se desintegra (Sánchez de Prager, 2007).

c) *El suelo tiene metabolismo propio...*

Las plantas verdes y algunos microorganismos realizan el proceso llamado fotosíntesis, para lo cual requieren: fuentes de energía y de carbono (C), nutrientes, agua y un sistema enzimático en el cual la clorofila cumple un papel fundamental. La energía la obtienen aprovechando la luz del sol, fotólisis; el carbono, columna vertebral de todas las moléculas orgánicas, lo toman del dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra en la atmósfera; el agua (H_2O) y el resto de nutrientes [nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), cobalto (Co), cloro (Cl), cinc (Zn), entre otros] los obtienen del suelo, y con todos ellos producen biomasa alimenticia (glucosa, fructosa, sacarosa, almidón, celulosa, etc.), y al mismo tiempo originan una molécula fundamental para la vida: el oxígeno (O_2), básico para los procesos de óxido-reducción involucrados en la respiración de la biomasa, el cual circula sobre el suelo y dentro de él, haciendo posible la respiración del resto de seres vivos aeróbicos, dominantes en el planeta Tierra.

Durante la fotosíntesis, como molécula inicial, se forma glucosa, que sirve de punto de partida para la síntesis de todos los tipos de alimentos: carbohidratos, proteínas y grasas, como metabolitos primarios. Esta glucosa se puede utilizar en la propia célula donde se fabrica o exportarse a otras. Puede ser usada inmediatamente para la respiración, como combustible, o como material de construcción de nuevas células y tejidos. Puede también ser utilizada por el organismo para producir metabolitos que le ayuden en su defensa y comunicación con otras especies, metabolismo secundario. También puede ser transportada a cualquier punto de la planta, almacenada en forma de almidón y quedar en reserva en ciertas áreas del vegetal, para usos futuros. Una fracción importante de esta glucosa, en forma original o convertida en otras moléculas más grandes, es trasladada a las raíces, y parte de ella, al suelo, a través de los exudados radicales en la rizosfera.

En esta forma, la mayoría de los organismos que viven en el suelo obtienen su ATP utilizando como fuente la energía química proveniente de

la solar almacenada como biomasa en las plantas verdes, trasladada al suelo por la misma planta como exudados radicales y/o como necromasa.

Actualmente conocemos que la descomposición de los residuos orgánicos (biomasa y necromasa) son procesos mayoritariamente biológicos. Entre el 80-100% del CO₂ liberado en el suelo proviene de oxidaciones metabólicas llevadas a cabo por los organismos del suelo, especialmente los microorganismos, tales como bacterias, hongos y protozoos. Su actividad está mediada por la fauna del suelo (macro, meso y microbiota), como lombrices, hormigas, ácaros, milpiés, termitas y otros (Fig. 2).

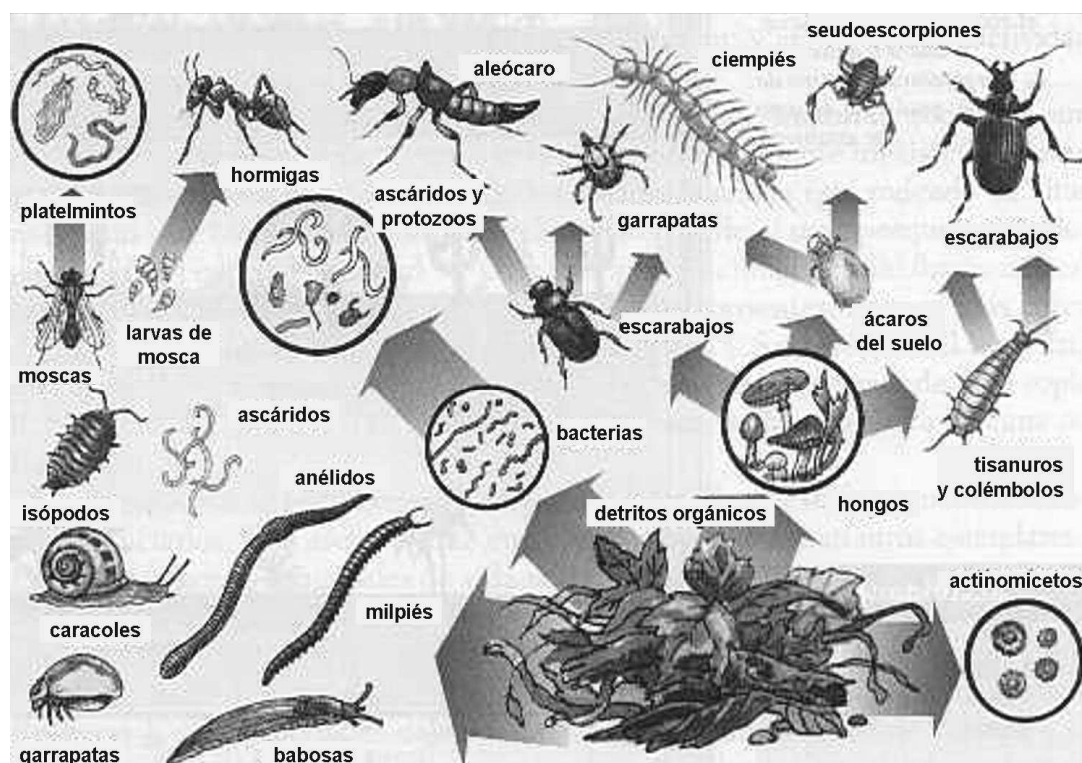


Fig. 2. Protagonistas de la vida en el suelo (tomado de www.esi.unav.es).

La macro y mesobiota parten los residuos orgánicos, mediante su labor de “ingenieros del ecosistema”; al remover el suelo permiten mayor circulación del aire y del agua a través de las perturbaciones que causan; enriquecen la materia orgánica con sus propios metabolitos y, a la vez, dispersan los propágulos microbianos. Todos ellos (macro, meso y microbiota) son llamados descompositores o saprófagos (Labrador, 2001). El número y las especies de organismos que pueblan el suelo son determinados en su mayor parte, por la alimentación disponible. Cuanto más alto sea el contenido de materia orgánica (en condiciones de humedad y temperatura adecuadas) habrá más organismos saprófagos que se alimentan de ella. Los saprófagos también gustan de las bacterias y hongos,

que les proporcionan proteínas fácilmente digeribles. A las bacterias, a su vez, les gustan los excrementos animales, ya que en ellos están los alimentos predigeridos.

Las bacterias, hongos, amebas y actinomicetos, por ser muy pequeños, están obligados a digerir o predigerir el alimento fuera de sus organismos, es decir, en el suelo. Para ello secretan enzimas con las cuales descomponen la materia orgánica; en esta forma un suelo activo se caracteriza por la cantidad de enzimas existentes en él. Por lo tanto, las redes tróficas que observamos en la troposfera son una continuación de las que se desarrollan en el interior del suelo y se caracterizan por flujos de energía, de nutrientes y pérdidas asociadas.

Así, se comprende que los flujos de energía química que se originan en el suelo circulan a través del ecosistema y son resultado de complejas interacciones tróficas que conllevan la movilidad de los elementos (ciclos de nutrientes). Los organismos del suelo y su actividad metabólica son fundamentales en el movimiento de los nutrientes, distribución con pérdidas mínimas, al igual que en la velocidad con que son reciclados (Labrador, 2001).

d) El suelo almacena materiales de reserva humus...

En el suelo se encuentran tres tipos genéricos de materia orgánica:

- i) los organismos vivos, denominada por Labrador (2001), **materia orgánica “viva”**;
- ii) la materia orgánica activa o fresca, residuos sin descomponer o ligeramente descompuestos, se la llama **lábil**; y
- iii) la materia orgánica descompuesta, material humificado, relativamente estable.

Labrador llama a estas dos últimas fracciones **materia orgánica “no viva”**. Cada una de ellas es importante para la conservación y desempeño del suelo (Fig. 3). La materia orgánica viva en el suelo (macrobiota, microbiota y raíces de las plantas) mediante su metabolismo hace posible la presencia y acumulación de las otras dos fracciones, dependiendo del tipo de vegetación y las condiciones climáticas predominantes.

Los materiales orgánicos lábiles o frescos son la parte más activa de la materia orgánica no viva, se descomponen con relativa facilidad y no están ligados fuertemente con minerales inorgánicos. Tienen tasas de descomposición del 60 a 80% durante el primer año, y en esta forma aseguran el suministro continuo de nutrientes a las plantas.

La fracción de la materia orgánica transformada, relativamente estable, recibe el nombre de **humus**. No sólo están representados en él productos originados por la descomposición de moléculas de alto y bajo peso molecular, procedentes de los tejidos de las plantas, de los animales y los

microorganismos, sino también diferentes reacciones de oxidación, condensación, polimerización y procesos y productos de síntesis microbiana, que dan lugar a compuestos de alto y bajo peso molecular que no se forman en las células vivas y son constituyentes del suelo (Labrador, 2001).

El humus abarca entonces “un conjunto de sustancias muy polimerizadas, de peso molecular relativamente alto, de color oscuro, con propiedades coloidales e hidrofílicas marcadas”, cuya transformación se acompaña de alta resistencia a la biodegradación por su mayor complejidad y porque se asocia comúnmente con los minerales del suelo formando complejos órgano-minerales. El humus posee características importantes para el suelo.

El material húmico contiene la mayor parte de la capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica (cargas negativas que permiten la retención de nutrientes como calcio, magnesio y potasio, entre otros). Las cualidades que posee hacen que el humus se convierta en *material de reserva* en el suelo. El humus podría considerarse como la “cuenta de ahorros” del suelo, dada la forma como se guardan los nutrimentos para que no se gasten de una vez, sino que se vayan liberando lentamente y la planta pueda tener disponibilidad de ellos a largo plazo y en situaciones de agotamiento o estrés.

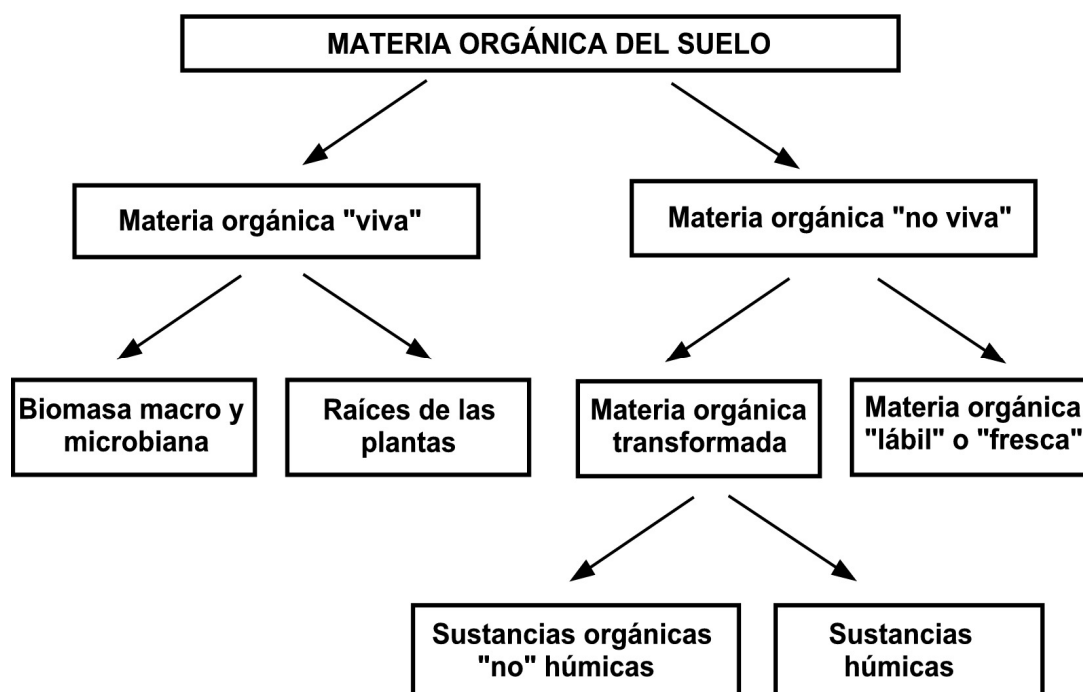


Fig. 3. Fracciones de la materia orgánica del suelo (según Labrador, 2001).

e) *El suelo puede envejecer y morir...*

Así como se han descrito los procesos que dan origen a la formación, desarrollo y funcionamiento del suelo, éste, para permanecer en el tiempo, requiere que se mantengan condiciones de autorregulación que aseguren que las entradas y salidas del ecosistema se compensen. El equilibrio es dinámico y sistémico, como una red formada por múltiples hilos, donde si se rompe uno de ellos afecta a otro y así sucesivamente, hasta que todo el ecosistema se desequilibra, si los hilos no son compensados. Cuando surgen los desequilibrios, el suelo también puede *envejecer y morir*. Este envejecimiento y muerte puede ser ocasionado por procesos como la erosión, la degradación física, química o biológica y el agotamiento o disminución de la fertilidad, que producen el desgaste de la superficie terrestre por las fuerzas del agua, del viento y/o por acciones del hombre. Estos procesos actúan a través de agentes como la deforestación y sequía, donde ocurre la pérdida de la cubierta vegetal del suelo a través de la tala de árboles y bosques que mantienen la vida en el suelo y el agua de los barrancos y los ríos, las quemas, que destruyen en segundos lo que la naturaleza ha tardado en construir cientos de años, el uso equivocado de suelos e inadecuado de maquinaria agrícola, malas prácticas de riego, y la contaminación, que puede ser orgánica a través de basuras, biológica por invasión de plagas y enfermedades, u ocasionada por la aplicación de agroquímicos.

Ligada a la pérdida o disminución de la fertilidad, se encuentra la degradación no erosiva que comprende fenómenos de compactación, pérdida de materia orgánica, acidificación, alcalinización, laterización, encostramiento, formación de compuestos tóxicos, encharcamientos y problemas de drenaje, que se van a reflejar en la pérdida de fertilidad de los suelos, estrechamente vinculados al manejo cultural del suelo (Sánchez de Prager, 2007).

Los microorganismos, responsables de la fertilidad y de la salud del suelo

Durante el pasado siglo, la producción agrícola mundial presentó una gran evolución y un incremento en los rendimientos con la aplicación de fertilizantes minerales y productos químicos. El mantenimiento a través de los años de dichos rendimientos requirió de dosis masivas de diversos insumos de este tipo, generando una serie de factores negativos en los agroecosistemas, tales como acumulaciones de nitratos, nitritos, pesticidas y otras sustancias perjudiciales desde el punto de vista ecológico. Entre las consecuencias negativas de estos manejos agrícolas están los efectos

adversos sobre los habitantes microscópicos del suelo y sobre los procesos biológicos que condicionan la fertilidad de los mismos.

Actualmente, estos factores biológicos del suelo se han convertido en criterios de importancia para valorar la fertilidad del suelo, creando la necesidad de orientar los sistemas de producción agrícola hacia nuevas tecnologías basadas en un manejo agroecológico sostenible. Hoy en día, el concepto de “calidad del suelo” se relaciona directamente con la productividad, la salud y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Desde el punto de vista agronómico la “calidad del suelo” es expresado como “fertilidad” y define la capacidad de un suelo para soportar sostenidamente plantas sanas y productivas. Las interacciones de las propiedades físicas, químicas, biológicas y climáticas del sistema son las que identifican la fertilidad de los suelos. Entre estos factores, son quizás los componentes biológicos los últimos que se han tomado en cuenta en investigación y producción de cultivos, a pesar de su papel clave no solo en la fertilidad del suelo, sino en la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas naturales.

Como ya se ha comentado, las partículas minerales y orgánicas del suelo se asocian para formar agregados, constituyendo un entramado que alberga a la fase gaseosa o atmósfera del suelo y a la fase líquida o solución acuosa del suelo. El hábitat resultante es muy favorable para los microorganismos del suelo que se acomodan tanto en el exterior como en el interior de los agregados, y se asocian a las raíces de las plantas creando una zona en torno al sistema radical de gran actividad conocida como “**rizosfera**”. A pesar de la gran diversidad de tipos de microorganismos que co-habitan en la zona rizosférica (bacterias, hongos, algas, protozoos, nematodos, virus, etc.) la mayoría de los estudios están dirigidos a las bacterias y a los hongos. Estos microorganismos se relacionan de bien manera saprofítica o simbiótica con las plantas ocasionándoles en muchos casos beneficios y en otros enfermedades (Barea *et al.*, 2002). Algunos microbios establecen con la planta las llamadas simbiosis mutualistas (dos microorganismos íntimamente asociados que se benefician mutuamente). Hay tres tipos de microorganismos dentro de este grupo:

- a) bacterias promotoras del crecimiento vegetal (conocidas como PGPBs por sus siglas en inglés),
- b) hongos formadores de micorrizas arbusculares (MA), y
- c) bacterias fijadoras de N_2 atmosférico.

Las bacterias promotoras del crecimiento son capaces de mejorar el desarrollo de las plantas a través de un mejor aprovechamiento de los nutrientes y protegiéndolas frente a enfermedades. Las bacterias fijadoras de N_2 , proporcionan a las plantas N_2 atmosférico. Los hongos MA mejoran el crecimiento, la nutrición, las relaciones hídricas y la salud de las plantas, además de la calidad del suelo (Fig. 4).

Por todo ello, los hongos MA se consideran como componentes clave de la fertilidad del suelo, bien sea a través de la propia simbiosis o por su interacción con otros microorganismos de la rizosfera, y en significado agronómico merece una atención específica.

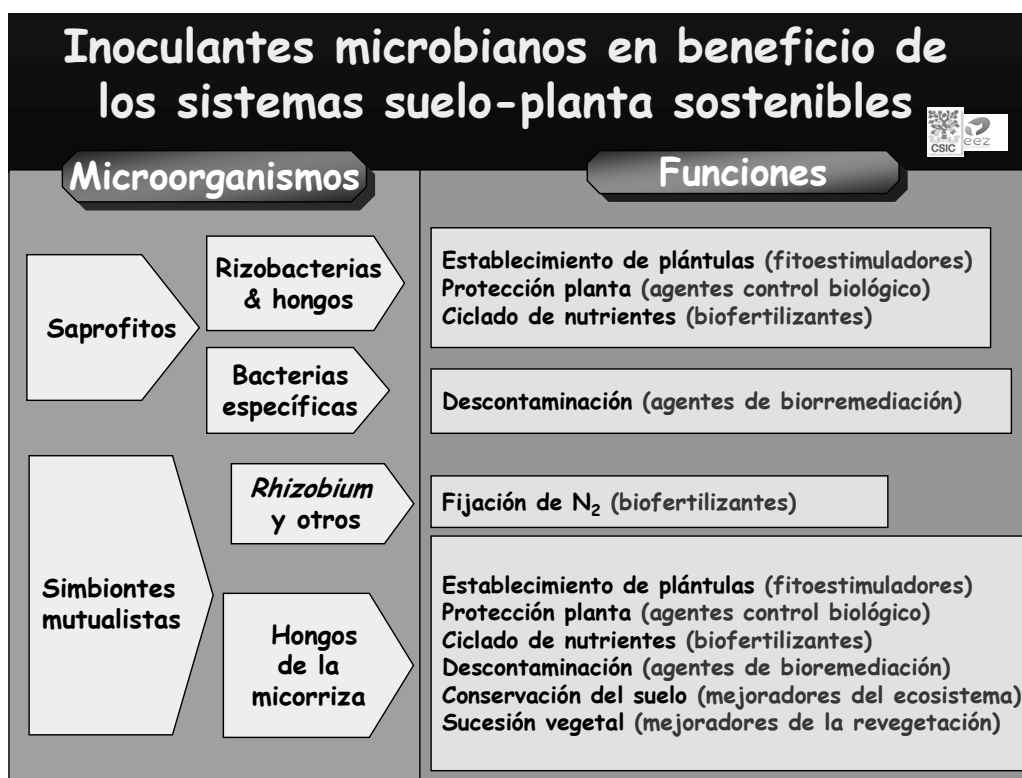


Fig. 4. Papel de los diferentes microorganismos del suelo en el sistema suelo-planta (según BAREA, 2009).

Las micorrizas arbusculares

Este tipo de simbiosis, de carácter universal, se establece en más de un 80% de las especies de plantas que cubren la corteza terrestre. La forman muchas especies de interés agronómico (leguminosas, gramíneas, compuestas, rosáceas, labiadas, etc.) pertenecientes a las diferentes zonas agroclimáticas del planeta (áridas, tropicales, templadas, frías, etc.).

El origen de las micorrizas arbusculares está ligado al origen de las plantas y el primer indicio de ello lo presenta un fósil vegetal del Devónico cuyas raíces forman una asociación micorrícica. Esta y otras evidencias similares nos indican que estos hongos estaban presentes desde los primeros estadios de la evolución de las plantas.

Esta asociación simbiótica garantizaba desde los primeros momentos un sistema biológico capaz de facilitar a las plantas la adquisición del P, de manera similar al desarrollado por las cianobacterias especializadas en la fijación de C y N atmosféricos. Esta habilidad de las hifas es la principal razón que justifica el beneficio de esta simbiosis en suelos deficientes en fósforo. Además de este macro-nutriente la simbiosis micorrícica aporta a la planta amonio, nitrato, cobre y cinc y otros microelementos (Fig. 5).

Otros reconocidos beneficios de estos hongos es su capacidad para mejorar la salud de la planta, incrementando su protección frente a estreses de tipo biótico (patógenos de raíz) o abiótico (salinidad, sequía, metales pesados y contaminantes orgánicos), además de mejorar la estructura del suelo mediante la formación de agregados. Las plantas y sus hongos micorrícicos han co-evolucionado hasta nuestros días constituyendo la asociación simbiótica hongo-planta más extendida.

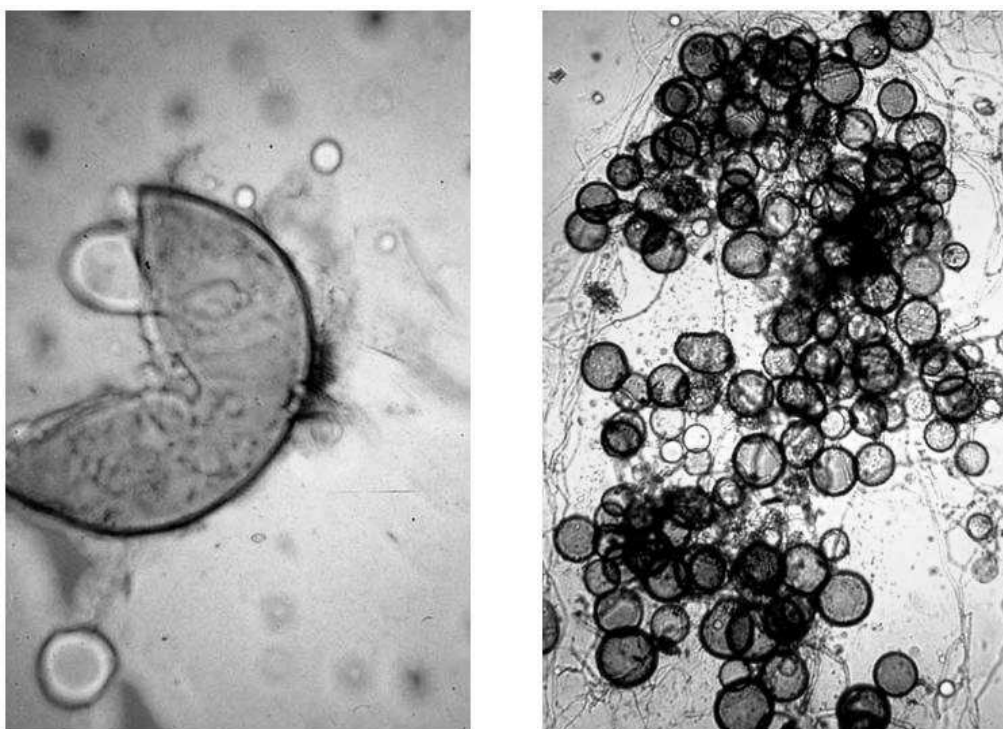


Fig. 5. Espora de *Glomus mosseae* aislado local (izquierda) y esporas de *Glomus aggregatum* aislado local (derecha), dos especies de hongos formadores de micorrizas arbusculares (MA), observadas con el microscopio óptico.

a) Las micorrizas y la agricultura sostenible

Las micorrizas cumplen una función clave en la agricultura sostenible. Bethlenfalvay y Linderman concluyen en un trabajo del 1992 que si “el objetivo es reducir los insumos químicos por razones ambientales y de

salud, entonces se necesita restablecer los hongos micorrícicos y otros microorganismos benéficos a un alto nivel de efectividad para compensar la reducción de insumos”. Esta estrategia coincide con el punto de vista que defiende que el grado de empobrecimiento o desaparición de la microflora micorrícica es un indicador del descenso en estabilidad del sistema planta-suelo, de la misma forma que el nivel de estrés causado por las prácticas culturales es una medida de sostenibilidad de la agricultura (Bethlenfalvay, 1992).

De acuerdo con esta visión, la agricultura sostenible solo es posible mediante un aprovechamiento óptimo y responsable de los microorganismos y otros pobladores del suelo (Fig. 6). La importancia de los hongos micorrícicos no estriba solo en que pueden representar la fracción mayor de la biomasa del suelo, alcanzando hasta 20% del total de masa seca de la micorriza. Su función clave radica en que su abundante micelio intra y extraradical, constituye un enlace o puente entre las plantas y el suelo. Así como se habla de plantas hospedadoras, Bethlenfalvay & Linderman (1992) propusieron el concepto de suelo hospedador para enfatizar el hecho de que, como las plantas, el suelo es un medio viviente. En este sentido, la micorriza influye y conecta los componentes bióticos del suelo entre sí y con los abióticos.

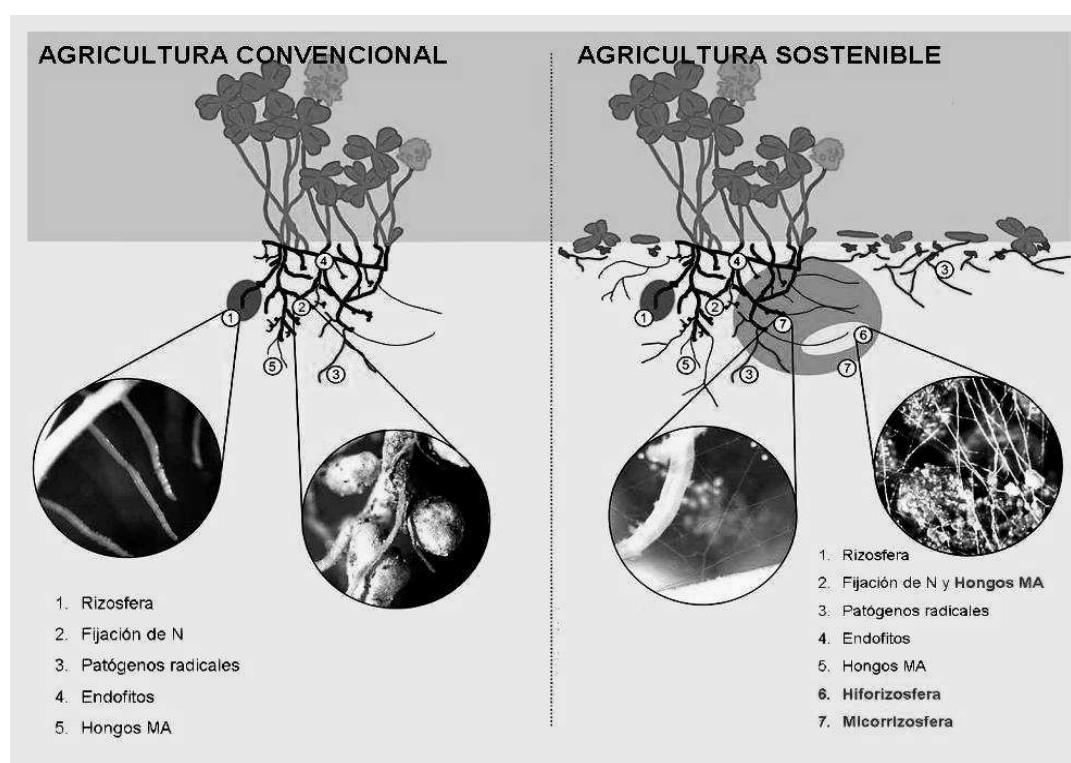


Fig. 6. Vista esquemática de los microorganismos del entorno rizosférico en un suelo manejado según los criterios de agricultura convencional o agricultura sostenible (según Johansson *et al.*, 2004).

Los objetivos que se persiguen con el uso práctico de las micorrizas arbusculares (MA) en los sistemas de producción vegetal (Sieverding & Barea, 1991) son los siguientes:

- Hacer un uso más eficiente del P del suelo y de los fertilizantes fosforados.
- Optimizar la productividad de los suelos y cultivos con niveles bajos de insumos.
- Hacer posible y rentable la producción vegetal en determinadas condiciones adversas.
- Ayudar a restablecer cultivos en suelos erosionados o degradados.

b) Las micorrizas, la nutrición de las plantas y las relaciones hídricas

Una parte importante de la biomasa que compone muchos ecosistemas está influenciada por la asociación micorrícica. Tanto los hongos micorrícicos como las raíces, se regeneran rápidamente y son las micorrizas quienes marcan los ritmos y los patrones de los ciclados de nutrientes, mediatizando la adquisición de recursos y la producción vegetal. Son realmente el enlace entre la parte biótica y geoquímica del suelo. Su papel en los agrosistemas sostenibles es muy importante, por lo que es necesario reconocerlas como herramientas potenciales para la salud y la sostenibilidad de las cosechas.

Esta capacidad es especialmente útil en agrosistemas estresados. Las hifas externas del hongo aumentan la capacidad de absorción de la raíz, al extenderse más allá de la zona rizosférica y explorar un mayor volumen de suelo. Esto posibilita una mejor transferencia de agua y nutrientes tales como fósforo, nitrógeno, azufre, potasio, calcio, zinc, hierro y cobre. Esta actividad benéfica se complementa además con una mejora en el movimiento de nutrientes, tales como el carbono entre plantas de igual o diferente especie.

La capacidad de interconexión de los sistemas radicales, posibilita que aquellas plantas que se desarrollan bajo condiciones adversas pueden ser “auxiliadas” por aquellas otras con mejor actividad fotosintética mejor captadas para la producción de nutrientes.

Los hongos micorrícicos juegan un papel importante en la economía del agua en las plantas. Mediante una serie de modificaciones directas de la morfología y la anatomía radical o indirectamente a través de cambios hormonales y estructurales, los hongos MA pueden mejorar la conductividad hidráulica insaturada, optimizando la toma de agua por las plantas. Esto posibilita que las plantas micorrizadas muestren una mejor capacidad de supervivencia que las no micorrizadas en condiciones extremas de sequía. La mayoría de los beneficios de los hongos

micorrícicos se producen gracias a la red micelial extramatricial tridimensional que puede explorar más exhaustivamente el suelo en busca de agua y nutrientes más allá de la zona de influencia de la raíz. En ocasiones, los cultivos están expuestos a condiciones adversas del suelo y del ambiente, tales como sequía y salinidad, temperaturas extremas, pH muy bajo, etc. Los hongos MA promueven en las plantas que los hospedan un mejor balance nutricional que conduce a una mayor tolerancia. Esta circunstancia, junto con una toma de agua más eficiente por parte de las hifas del hongo MA y un mejor ajuste osmótico de las plantas micorrizadas, así como otros mecanismos relacionados con el intercambio gaseoso y la activación de **aguaporinas** (canales proteínicos que facilitan el flujo de agua en la planta) (Barea, 2009), hacen posible una mayor resistencia de las plantas micorrizadas a estos tipos de estrés. Por otra parte, la contaminación del suelo con metales pesados es un problema difícil de resolver en agricultura. El establecimiento de los hongos MA puede ayudar a mejorar los efectos de las plantas empleadas para recuperar suelos contaminados, mediante el incremento de su resistencia frente a estos metales nocivos.

c) Los hongos micorrícicos y los estreses en agricultura

Las producciones agrícolas están muchas veces expuestas a factores estresantes de naturaleza biótica o abiótica, que pueden llegar a afectar los rendimientos. Los microorganismos patógenos de raíz, la sequía y/o salinidad ya comentadas en el apartado anterior y los diferentes contaminantes del suelo (biocidas, metales pesados) son los principales responsables de tales estreses (Jaizme-Vega & Rodríguez-Romero, 2010).

De forma general, se acepta que la micorrización mejora la condición sanitaria de las plantas, aunque no se ha demostrado ningún mecanismo de control biológico directo asociado al hongo MA y se intuye que la micorrización está implicada en dicho control (Linderman, 1994). Los hongos formadores de MA pueden contribuir a aliviar los daños producidos por hongos patógenos

Diversos autores han puesto de manifiesto la capacidad de las MA para disminuir la severidad de enfermedades causadas por patógenos de distinta naturaleza: hongos patógenos tales como *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia* y *Verticillium* o por nematodos agalladores (*Meloidogyne* spp.) o lesionadores (*Pratylenchus* sp.) (Jaizme-Vega & Rodríguez-Romero, 2008), constatándose que tal efecto existe y que depende del aislado micorrícico, sustrato y planta hospedadora (Azcón-Aguilar & Barea, 1996; Barea *et al.*, 2005). Los mecanismos propuestos para explicar ese fenómeno se fundamentan en:

- Mejora en el balance nutricional. La planta micorrizada al optimizar la absorción de nutrientes se halla más sana y es más tolerante/resistente. En

cualquier caso, para que esto ocurra, es necesario el establecimiento de la MA previo a la infección del patógeno.

- Competición por los productos fotosintéticos y nicho ecológico. Tanto el simbiote como el patógeno dependen de los mismos productos fotosintetizados por el hospedador. Los tejidos colonizados por la MA son los mismos sobre los que actúa el patógeno, por eso si ese espacio ya está ocupado por las estructuras del hongo MA, la posibilidad de que el agente infeccioso se extienda queda limitada (Cordier *et al.*, 1996).

- Cambios anatómicos y morfológicos del sistema radical. El establecimiento de la micorrización produce un mayor número de raíces laterales y adventicias, que contribuye a la bioprotección y a la fortificación de la pared celular al aumentar la producción de polisacáridos para la lignificación (Jalali & Jalali, 1991), hecho que dificulta la penetración del patógeno (Linderman, 1994; Fusconi *et al.*, 1999).

- Cambios microbianos en la rizosfera. Se originan cambios en la composición y distribución de exudados radicales, al tiempo que el desarrollo en el suelo del micelio de la MA provoca modificaciones físicas en el entorno adyacente a las raíces, ya que representa una fuente de carbono para las comunidades microbianas de la zona, lo que lo convierte en un elemento fundamental en las interacciones con aquellos componentes de la microbiota, implicados en la mejora de la salud y desarrollo vegetales y la calidad del suelo (Bethlenfalvay & Schüepp, 1994).

- Resistencia sistémica inducida (RSI). Muchos de los compuestos que están implicados en actividades de defensa tales como fitoalexinas, quitinasas, arginina, isoflavonoides, enzimas glucanólíticas, etc., son potenciados por la micorrización (Pozo *et al.*, 1999; Slezack *et al.*, 2000).

d) Las micorrizas, como mejoradoras de la calidad del suelo

El suelo es responsable de la salud y la productividad de los cultivos. La calidad del suelo depende de la viabilidad y diversidad de la vida que contenga, ya que dicha biota es la base para la estabilidad y salud del agrosistema. Este nuevo concepto altera la antigua concepción del suelo como una fuente básica de recursos para la agricultura, concibiéndolo como un sistema complejo, frágil y dinámico que debe ser protegido y manejado para asegurar su estabilidad y productividad. Este objetivo de sostenibilidad, en agricultura debe ser visualizado como “un máximo de producción con un mínimo de pérdida de suelo”. Ante esta situación es evidente la importancia de los hongos MA como vínculos excepcionales entre la planta y el suelo.

En los últimos años, se ha revelado el importante papel de las micorrizas para la estructura y conservación del suelo, mediante el efecto aglutinante de las hifas externas. Estas hifas crecen a través de la matriz de

suelo, constituyendo una estructura que a modo de red, sostiene las partículas, favoreciendo la forma de los agregados. Además, se sabe que las hifas de los hongos MA pueden producir grandes cantidades de **glomalina**, una glicoproteína no soluble en agua, que actúa a modo de pegamento natural, como estabilizante de los agregados. La glomalina incrementa la productividad del agrosistema, mejora la aireación del suelo, facilita el drenaje y la actividad microbiana.

La afinidad de las hifas de los hongos de las micorrizas hacia los agregados de suelo, es función de las características de la raíz, de la intensidad de la colonización del hongo y de la cantidad de micelio asociado al sistema radical. La abundancia de estos agregados posibilita, entre otras cosas, una serie de micro-hábitats para otros microorganismos benéficos de la rizosfera y unas estructuras capaces de acelerar el almacenaje de nutrientes y carbono.

e) Las micorrizas y la restauración de ecosistemas degradados

Los diversos procesos degradadores que afectan a los ecosistemas terrestres expresan como primer síntoma visible el deterioro de la cubierta vegetal. Este efecto es concomitante con el empobrecimiento de la calidad del suelo, que se manifiesta en la pérdida de la estructura, incremento de la erosión, pérdida de nutrientes asimilables y materia orgánica, etc., así como con el descenso en la cantidad, diversidad y actividad de los hongos MA (Barea *et al.*, 2005). Consecuentemente, es preciso reintroducir los hongos MA para que las plantas puedan formar la simbiosis en etapas clave de su vida (enraizamiento y establecimiento).

Posiblemente el efecto primordial de la micorrizas, tras ayudar a la planta a enraizar, sea el reinicio o aceleración de los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes minerales, particularmente fósforo y nitrógeno (Barea, 1991; Fitter, 2006), evaluable por técnicas isotópicas. Otro efecto importante de la MA es que facilitan la captación de agua (Sánchez-Díaz & Aguirreolea, 2002).

Otro efecto destacable de las MA en la restauración de hábitats degradados se basa en la importante contribución de las micorrizas en los procesos de formación de agregados estables, lo cual contribuye directamente en la mejora de la calidad del suelo (Miller & Jastrow, 2000; Barea *et al.*, 2005). Son de destacar las investigaciones que han definido la participación en el proceso de la ya nombrada glomalina, una glicoproteína producida por el micelio externo del hongo MA que desempeña un importante papel en el proceso de agregación.

Otra contribución importante del micelio externo es ser la base de una red de hifas y propágulos que se extiende por el suelo, fundamental para que se establezcan nuevas plántulas e incrementa la diversidad de especies. Así mismo el micelio es crítico para interconectar plantas de distintas

especies en la comunidad, lo que facilitaría intercambio de nutrientes minerales y carbono entre ellas.

Teniendo en cuenta las premisas referidas anteriormente, no es de extrañar que en los últimos años se hayan desarrollado diversos experimentos basados en la prospección y aplicación de la MA en programas de restauración de ecosistemas degradados. Como resultado de diversos ensayos, se ha comprobado que la inoculación con hongos MA autóctonos beneficia el desarrollo de las plantas y produce una mejora en las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, tales como el estado de agregación, contenido en nitrógeno y materia orgánica, número de propágulos micorrícicos, actividades enzimáticas, etc., lo que indica una restauración integral, clave para la estabilidad y sostenibilidad de estos ecosistemas (Barea *et al.*, 2005).

f) Influencia de las prácticas agrícolas sobre las micorrizas

• Prácticas que estimulan a los hongos micorrícicos

- *Selección de plantas y cultivares micótrofos.* Es obvio que una de las mejores formas de favorecer el desarrollo de hongos arbusculares en el suelo será implantar cultivos de alta compatibilidad o susceptibilidad. Dentro de una especie vegetal puede haber cultivares más susceptibles que otros. Generalmente, las plantas con alta demanda de fosfato (leguminosas) o pobre sistema radical (cebolla, papa) responden mejor a la micorrización.

- *Rotación de cultivos.* Esta práctica tiene efectos positivos sobre la colonización y esporulación de hongos arbusculares cuando las secuencias de cultivos incluyen plantas altamente micotróficas. Por el contrario, rotaciones o monocultivos con plantas no hospedadoras empobrecen la densidad de propágulos de estos hongos en un suelo (Abbott & Robson, 1991).

- *Asociación de cultivos.* Combinaciones de leguminosas y gramíneas representan buenos ejemplos de cultivos múltiples o intercalados en los cuales la leguminosa aporta el nitrógeno al sistema, gracias a la intensa actividad de fijación bacteriana de ese elemento que se lleva a cabo en los nódulos de las raíces, en tanto que la gramínea, en base a su alta susceptibilidad a ser colonizada por los hongos arbusculares, favorece a las micorrizas (Fig. 7).

- *Otros tipos de cultivos múltiples, en los que no se incluyan leguminosas,* también pueden resultar de valor en la conservación de poblaciones de hongos MA en los suelos. Es el caso de combinaciones entre plantas de alta micotrofia y aquellas a las cuales se asocian

bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre, las cuales pueden estimular la infectividad y la formación de micorrizas efectivas.

- *Uso de enmiendas orgánicas.* La aplicación de enmiendas orgánicas es bien conocida como práctica estimuladora de la vida del suelo, aparte de su valor fertilizante. Es claro que la materia orgánica sirve de sustrato para el crecimiento de una rica comunidad de microorganismos del suelo favoreciendo los procesos tróficos de transferencia de nutrientes y, por tanto, estimulando el desarrollo de las plantas.

- *Fertilización fosforada controlada.* El uso de roca fosfórica como sustituto de los fertilizantes fosforados solubles resulta de gran interés, ya que es bien conocido que niveles altos de fósforo soluble son perjudiciales para la formación y efectividad de las micorrizas. En general, la aplicación de fuentes poco solubles de este macronutriente resulta coherente con un manejo sostenible del suelo, puesto que garantiza una liberación paulatina y no contaminante del elemento en formas asimilables por las plantas.



Fig. 7. Cultivo asociado de batata y millo en una finca con manejo agroecológico en Niquero (Cuba).

- *Introducción de cepas de hongos seleccionados en el suelo.* Las diferentes especies de hongos e incluso sus cepas muestran distintos grados de efectividad para mejorar el crecimiento de las plantas. También muestran diferentes tolerancias a los fitofármacos (herbicidas, nematocidas, etc.) y prácticas de fertilización propias de la agricultura actual. Cuando en un suelo la población natural de hongos arbusculares

haya sido eliminada o la que exista sea poco efectiva, puede ser aconsejable "importar" un hongo seleccionado.

- *Mantenimiento de temperatura y humedad del suelo en niveles correctos.* Se ha puesto de manifiesto que el porcentaje de infección aumenta al incrementarse la temperatura hasta alcanzar un máximo a los 30°C. A partir de esta temperatura la infección decrece, y por encima de 40°C se produce la inhibición completa de la germinación de esporas de ciertos hongos arbusculares (Harley & Smith, 1983). Con respecto a la humedad, se consideran adecuadas para el desarrollo de las micorrizas las óptimas para las plantas, si bien se sabe que un ligero estrés hídrico aumenta la esporulación del hongo, factor de interés para, por ejemplo, introducir un cultivo como inoculante de suelo.

• ***Prácticas que reprimen o eliminan a los hongos formadores de micorrizas***

Un suelo puede mostrar baja capacidad infectiva como consecuencia del tipo de manejo que haya recibido. Entre estas prácticas represivas tenemos la fumigación o desinfección, quemados de rastrojos o rozas, barbechos desnudos, desmontes, inversión de horizontes edáficos, laboreo agresivo o actividades mineras entre otras (Dodd & Thomson, 1994).

Bibliografía

- ABBOTT, L.K. & A.D. ROBSON (1991). Factors influencing the occurrence of vesicular arbuscular mycorrhizas. *Agriculture Ecosystem Environmental* 35: 121-150.
- ALTIERI, M.A. (1995). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. 2ª Ed. Westview Press: Boulder CO.
- ALTIERI, M.A. & C. NICHOLLS (2012). Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. Una contribución a las discusiones de Río+20 sobre temas en la interfase del hambre la agricultura, y la justicia ambiental y social. Informe de SOCLA (Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología) para la Reunión de Río + 20 (junio 2012). 21 pp.
- <http://rio20.net/propuestas/agroecologia-unica-esperanza-para-la-soberania-alimentaria-y-la-resiliencia-socioecologica>
- AZCÓN-AGUILAR, C. & J.M. BAREA (1996). Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens. An overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6: 457-464.

- BAREA, J.M. (1991). Vesicular-arbuscular mycorrhizae as modifiers of soil fertility. En: B.A. Stewart (Ed.) *Advances in soil science*. Springer Verlag, New York. pp. 1-40.
- BAREA, J.M. (2009). Mycorrhizas and agricultural fertility. En: J. Bonilla (Ed.): *Current Topics in Agriculture*. Editorial Studium Press. USA.
- BAREA, J.M., R. AZCÓN & C. AZCÓN-AGUILAR (2002). Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Anton Van Leeuwenhoek* 81: 343-351.
- BAREA, J.M., R. AZCÓN & C. AZCÓN-AGUILAR (2005). Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. En: Buscot, E. & A. Varma (Eds.) *Micro-organisms in Soil: Roles in Genesis and Functions*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. pp. 195-212
- BETHLENFALVAY G.J. (1992). Mycorrhizae in the agricultural plant-soil system. *Symbiosis* 14: 413-425.
- BETHLENFALVAY G.J. & R. LINDERMAN (1992). Mycorrhiza and crop productivity, en *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. American Society of Agronomy, special publication n° 54, Madison WI. pp. 1-27.
- BETHLENFALVAY G.J. & H. SCHÜEPP (1994). Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability. En: Gianinazzi, S. & H. Schüepp (Eds.) *Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems*. ALS, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland. pp: 117-131.
- CORDIER, C., S. GIANINAZZI & V. GIANINAZZI-PEARSON (1996). Colonization patterns of root tissues by *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* related to reduced disease in mycorrhizal tomato. *Plant and Soil* 185: 223-231.
- DODD, J.C. & B.D. THOMSON (1994). The screening and selection of inoculant arbuscular-mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 159: 149-158.
- FITTER, A.H. (2006). What is the link between carbon and phosphorus fluxes in arbuscular mycorrhizas? A null hypothesis for symbiotic function. *New Phytologist* 172: 3-6.
- FUSCONI, A., E. GNAVI, A. TROTTA & G. BERTA (1999). Apical meristems of tomato roots and their modifications induced by arbuscular mycorrhizal and soilborne pathogenic fungi. *New Phytologist* 142: 505-516.
- GLIESSMANN, S.R. (1998). *Agroecology: ecological process in sustainable agriculture*. Annual Arbor Press, Michigan.
- GLIESSMANN, S.R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. 1ª Ed., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 359 pp.

- HARLEY, J.L. & S.E. SMITH (1983). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press. London. 483 pp.
- JAIZME-VEGA, M.C. & A.S. RODRÍGUEZ-ROMERO (2008). Integración de microorganismos benéficos (hongos micorrícicos y bacterias rizosféricas) en agrosistemas de las islas Canarias. *Agroecología* 3: 33-39.
- JAIZME-VEGA, M.C. & A.S. RODRÍGUEZ-ROMERO (2010). El papel de hongos formadores de micorrizas y las rizobacterias en la salud de los cultivos. Capítulo 10. En: Labrador, J. & J.L. Porcuna (Eds.) *Conocimientos, técnicas y productos para el control de plagas y enfermedades en agricultura ecológica*. SEAE, España.
- JALALI, B.L. & I. JALALI (1991). Mycorrhiza in plant disease control. En: Arora, K., B. Rai, K.G. Mujeri & G.R. Knudsen (Eds.) *Handbook of Applied Mycology*. Dekker, New York, USA. pp. 131-154.
- JOHANSSON, J.F., L.R. PAUL & R.D. FINLAY (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology* 48: 1-13.
- LABRADOR, M. (2001). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 293 pp.
- LABRADOR, J. & J.L. PORCUNA (2006). Aproximación a las bases técnicas de la agricultura ecológica. En: Labrador, J. & J.L. Porcuna (Eds.) *Conocimientos, técnicas y productos para el control de plagas y enfermedades en agricultura ecológica*. SEAE, España. pp. 19-34.
- LAVELLE, P. & A. SPAIN (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 652 pp.
- LINDERMAN, R.G. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. En: Bethlenfalvay, G.J. & R.G. Linderman (Eds.) *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. ASA Spec. Publ., Madison, WI. pp. 45-70.
- LINDERMAN, R.G. (1994). Role of VAM fungi in biocontrol. En: Pflieger, L. & R.G. Linderman (Eds.) *Mycorrhizae and Plant Health*. APS, Minnesota. pp. 2-25.
- MILLER, R.M. & D. JASTROW (2000). Mycorrhizal fungi influence soil structure. En: Kapulnik, J. & D.D. Douds Jr. (Eds.). *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Kluwer, Dordrecht. pp. 3-18.
- ODUM, E. (1995). *Ecología: Peligra la vida*. 2ª Ed. Interamericana. McGraw-Hill, México. 268 pp.
- PORCUNA, J.L. (2010). La agroecología. Un enfoque necesario para la gestión de los sistemas sostenibles agrarios. *Rincones del Atlántico* 6/7: 392-398.
- PORCUNA, J.L. (2012). Manejo de plagas y enfermedades del suelo desde el punto de vista agroecológico. *Vida Rural* 346: 32-36.

- POZO M.J., C. AZCÓN-AGUILAR, E. DUMAS-GAUDOT & J.M. BAREA (1999). 1,3-glucanase activities in tomato roots inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and/or *Phytophthora parasitica* and their possible involvement in bioprotection. *Plant Science* 141: 149-157.
- SÁNCHEZ DE PRAGER, M. (2007). El suelo: principio y fin de la vida sobre la Tierra. En: Sánchez de Prager, M. (Coord.) *Las endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp: 31-61.
- SÁNCHEZ-DÍAZ, M. & J. AGUIRREOLEA (2002). El agua en la planta. En: Azcón-Bieto J. & M. Talón (Eds.) *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. M. McGraw-Hill-Interamericana. pp. 17-30.
- SIEVERDING, E. & J. M. BAREA (1991). Perspectivas de la inoculación de sistemas de producción vegetal con hongos formadores de micorrizas VA. En: Olivares, J. & J.M. Barea (Eds.) *Fijación y Movilización Biológica de Nutrientes*. Vol. II. "*Fijación de Nitrógeno y Micorrizas*". CSIC. pp: 221-245.
- SLEZACK, S., E. DUMAS-GAUDOT, M. PAYNOT & S. GIANINAZZI (2000). Is a fully established arbuscular mycorrhizal symbiosis required for bioprotection of *Pisum sativum* roots against *Aphanomyces euteiches*? *Molecular Plant Microbiology Interaction* 13: 238-241.