

# Las micorrizas arbusculares en la protección vegetal

Yazmín Carreón Abud, Nuria Gómez Dorantes y Miguel Martínez Trujillo

*Laboratorio de Genética y Microbiología, Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
ycabud@yahoo.com.mx*

---

## RESUMEN

Las micorrizas arbusculares (MA) se encuentran en la mayoría de las plantas de interés agrícola. Estos organismos juegan un papel importante en el mantenimiento y estabilidad del agroecosistema contribuyendo a la fertilidad, estructura y biodiversidad del suelo. También tienen un efecto en el desarrollo y sanidad de la planta, así como en la protección contra enfermedades y en la tolerancia y acumulación de metales pesados. El manejo apropiado del complejo suelo/planta/micorriza es una promesa biotecnológica para obtener a largo plazo un agroecosistema productivo y estable, lo que se denomina sistema sustentable. En esta revisión se destacan algunos aspectos relacionados con el potencial de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) para el control de las enfermedades de las plantas y la fitorremediación de metales pesados en suelos contaminados.

*Palabras clave:* Micorrizas arbusculares, protección, patógenos, metales.

## ABSTRAC

The arbuscular mycorrhiza (AM) are found in most crops. These organisms play an important role in the maintenance and stability of the agroecosystem contributing to the fertility, structure and biodiversity of soil. They also have an effect on the health and development of plants, as well as in disease protection and in the tolerance and accumulation of heavy metals. The appropriate handling of the soil/plant/mycorrhiza complex is a biotechnological promise to obtain in a long term a stable and productive sustainable agroecosystem. In this review, some aspects related to the HMA potential are highlighted. This potential is related to plant disease control and heavy metals phytoremediation in contaminated soils.

*Key words:* Arbuscular mycorrhiza, protection, pathogens, metals.

---

## INTRODUCCIÓN

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) son microorganismos del suelo que establecen una simbiosis mutualista con la mayoría de las plantas, formando una unión física entre el suelo y las raíces de éstas. Aproximadamente el 95% de las especies de plantas en el mundo se asocian a una familia característica de micorrizas y se benefician potencialmente de los hongos, mediante el suministro de nutrimentos. La simbiosis con micorrizas arbusculares se presenta en casi todos los tipos de hábitat, en donde interactúan con otros organismos, algunos de ellos

patógenos y también en suelos perturbados o contaminados con metales pesados.

Los HMA son un grupo muy selecto de hongos que pertenecen al Phylum Glomeromycota, (Schubler *et al.*, 2001). Los HMA se distinguen de otros grupos de hongos por la falta de reproducción sexual, además de que son simbioses obligados y sólo pueden germinar, pero no crecer, en ausencia de las raíces de las plantas (Smith y Read, 1997).

Se conoce que las plantas micorrizadas incrementan su fecundidad en comparación con las plantas no micorrizadas, por lo que la simbiosis

MA cobra mayor interés, especialmente en la investigación agronómica. En los HMA el micelio incrementa el área de absorción de la raíz de la planta hasta en 100 veces (Smith y Read, 1997) y las plantas micorrizadas tienen así mayor contenido de macro y micro nutrientes (Clark, y Zeto, 1996). En general, las plantas micorrizadas presentan un incremento en las tasas fotosintéticas (Dixon *et al.*, 1994) y mayor tolerancia a la sequía (Osonobi, *et al.*, 1992) y salinidad (Rosendhal y Rosendhal, 1991). También es notorio que se incrementa la tolerancia de la raíz a patógenos (Smith y Read, 1997) y la captación de metales pesados en suelos contaminados.

### CICLO DE VIDA

El ciclo de vida de los HMA comienza con una espora de tipo asexual, producida en la punta de la hifa o en algunos casos dentro de la raíz, dependiendo de la especie; cuando la espora madura ésta se separa de la hifa y se dispersa. Si la espora es producida en suelo, puede ser dispersada por el viento, agua u otros organismos del suelo y sin las plantas pueden sobrevivir por algunos años (Smith y Read, 1997).

Las esporas contienen grandes cantidades de lípidos y cientos de núcleos, y responden a la presencia de raíces de la planta propiciándose la germinación. Una vez germinada la espora, se promueve el crecimiento de la hifa hacia los pelos radicales de la raíz de la planta hospedera y al estar en contacto con ésta se desarrolla un apresorio, que funciona como punto de unión en la superficie de la raíz. A partir del apresorio, se desarrolla el micelio intrarradical entre las células internas de la planta y la capa epidérmica de la raíz y las hifas producen arbusculos por ramificaciones dicotómicas y simultáneamente la planta responde con invaginaciones del plasmalema (Friberg, 2001). Por la vía del área superficial del arbusculo se libera carbono de la planta, promoviendo el crecimiento micelial y formando una extensa red de hifas en el suelo, mientras que el agua y los nutrientes son transportados a través del micelio externo hacia los compartimentos internos y se liberan en el interior de la

planta. Los HMA compartimentalizan algunos derivados de los fotosintatos, como lípidos, en forma de vesículas elípticas producidas en muchos hongos en las hifas intrarradicales. Cuando se alcanza el nivel de colonización adecuado (Ej. ciertas cantidades de carbono almacenado), la mayoría de las especies de HMA empiezan nuevamente a esporular (Gazey *et al.*, 1992).

### CONTROL BIOLÓGICO

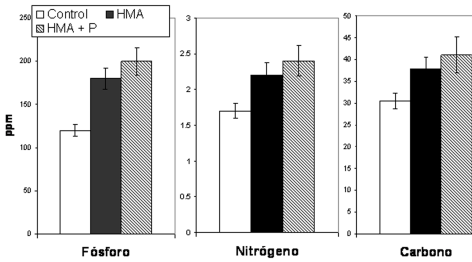
El control biológico vegetal puede definirse como el manejo directo de recursos biológicos, para proteger a las plantas contra patógenos. El uso excesivo de pesticidas para combatir a los patógenos y en particular del uso de bromuro de metilo para la fumigación del suelo (Ristaino y Thomas, 1997) ha dado especial ímpetu a la utilización de inoculantes microbianos como agentes de control de enfermedades. El control de las enfermedades de plantas se considera un área de gran interés, debido a la necesidad de reducir los insumos químicos en la agricultura y aumentar la sustentabilidad global.

Algunos grupos de microorganismos son capaces de proteger a las plantas contra patógenos a través de diversos mecanismos. Entre estos organismos, los hongos HMA resultan prometedores, debido a distribución ubicua en la naturaleza y en los ecosistemas agrícolas (Jeffries y Barea, 2001).

### ACCIONES POTENCIALES DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (HMA) EN EL CONTROL DE ENFERMEDADES

El efecto exitoso de los hongos micorrícicos, particularmente los HMA, ha sido comprobado en diversos cultivos y contra varios patógenos, incluyendo hongos, bacterias y nemátodos. Por ejemplo, varias especies de HMA del género *Glomus* inoculadas en el almácigo, son capaces de suprimir el ataque combinado (*Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora* y *Rhizoctonia*), el nemátodo del género *Meloidogyne* y algunas bacterias del género *Pseudomonas* (Alarcón *et al.*, 2004).

Otros importantes microorganismos patógenos de plantas como *Phytophthora capsici* y *P.*



**FIGURA 1. CONCENTRACIONES DE CARBONO, FÓSFORO Y NITRÓGENO EN PLANTAS DE JITOMATE CON DIFERENTES TRATAMIENTOS CON HMA Y *Phytophthora capsici*, A LOS 120 DÍAS DE CRECIMIENTO.** Control = control sin HMA. HMA = Plantas inoculadas con hongos micorrízico arbusculares. HMA + P = Plantas con HMA inoculadas con *Phytophthora capsici*. Las concentraciones de los elementos están en partes por millón. Adaptada de Gómez (2006). Se indican los intervalos de confianza de la media.

*parasitica* han sido eficazmente biocontrolados por los hongos micorrízicos arbusculares (Azcón et al., 1996).

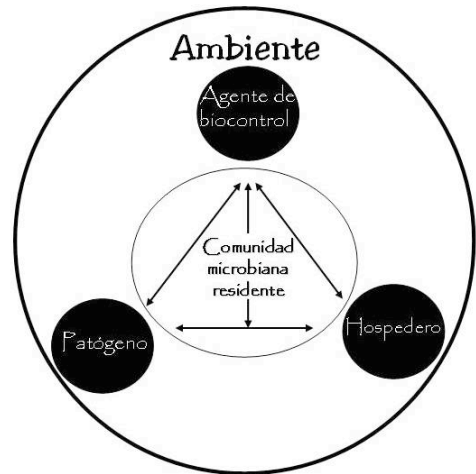
Por su parte, Khalil-Gardezi et al. (2001) señalan que la utilización de la micorriza arbuscular favorece el control biológico ocasionado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *gladioli* cuando se producen gladiolas en suelos contaminados por este fitopatógeno, que causa grandes daños, tanto en la producción de flor como en la obtención de bulbo.

En los últimos 30 años, ha aumentado el interés por el papel potencial de los HMA para el control de las enfermedades de plantas, y varios aspectos sobre este concepto han sido revisados (Marx, 1972; Perrin, 1990; Duchense, 1994; Fitter y Garbaye, 1994; Hooker et al., 1994; Lindemarn, 1994; Azcón-Aguilar y Barea, 1996; Dumas-Gaudot, et al., 1996; Singh et al., 2000; Borowicz, 2001; Graham., 2001; Sylvia y Chelllemi 2001; Barea et al., 2002).

En un estudio realizado en nuestro laboratorio (Gómez, 2006) para determinar el efecto de un consorcio de hongos micorrízicos arbusculares en la pudrición de raíz en plantas de jitomate a causa del oomicete patógeno *P. capsici*, se encontró que la asociación micorrícica protege efectivamente a las plantas contra el ataque de *P. capsici*, ayudándoles a absorber los nutrientes minerales de manera más eficaz. Se

midió la cantidad de C, N y P en plantas micorrizadas y plantas micorrizadas e infectadas con *P. capsici* a los 120 días (FIGURA 1). Los resultados demostraron que en todos los casos la presencia de la micorriza mantiene a las plantas con un estatus nutricional elevado, incluyendo las plantas infectadas con *P. capsici*, las cuales mantienen este nivel de nutrientes. Posiblemente, el mantener a las plantas en un buen estado nutricional les permite soportar e incluso disminuir el daño ocasionado por la presencia del patógeno en las raíces de éstas, impidiéndole que se propague por el resto de los órganos vegetales. Se observó que los HMA son efectivos supresores de la enfermedad ocasionada por *P. capsici*, un severo fitopatógeno, en plantas de jitomate. Esto confirma que la micorriza arbuscular tiene un gran potencial como agente de control biológico en varias enfermedades de plantas de importancia alimenticia y económica.

Aun con todos estos trabajos reportados, en donde los HMA le confieren resistencia a la planta contra patógenos, se hace difícil generalizar los efectos bioprotectores debido a que éstos dependen de muchas variables. Entre los factores más importantes que contribuyen al balance de la planta y la interacción del patógeno, se



**FIGURA 2. INTERACCIONES ECOLÓGICAS ASOCIADAS CON EL CONTROL BIOLÓGICO DE ENFERMEDADES.** Adaptada de Whipps (2004).

**TABLA 1.** Acciones potenciales de los hongos micorrícicos arbusculares involucrados en el biocontrol de enfermedades. Adaptada de Whipps (2004).

<i>Competencia o Inhibición directa</i>
Competencia por fotosintatos o carbono en la raíz. Competencia por exudados externos de la raíz Competencia por los sitios de infección o los espacios de la raíz. Calidad y cantidad de exudados de raíces o los HMA inhiben a los patógenos. Interacciones competitivas con los patógenos del suelo. Abscisión
<i>Aumento o alteración del crecimiento de las plantas, nutrición y morfología</i>
Incremento en la captación de nutrimentos (particularmente fósforo) Incremento en los elementos traza, tolerancia a la sequía, decremento de la toxicidad por sales y metales pesados (disminución del estrés abiótico). Alteración de la ramificación y morfología de las raíces. Cambios hormonales (ej. Acido abscísico, citocininas, etileno).
<i>Cambios bioquímicos asociados con mecanismos de defensa en plantas y resistencia inducida</i>
Compuestos fenólicos y fitoalexinas Niveles de aminoácidos (ej. arginina, prolina). Barreras estructurales internas (ej. ligninas, callosa, hidroxiprolina, glicoproteínas). Proteínas relacionadas con la defensa (ej. proteínas relacionadas con la patogénesis, b1.3 glucanasas, quitosanasas, quitinasas, peroxidadas, fenilalanina amonio liasa, chalcona sintasa, superóxido dismutasa). Incremento en la metilación del ADN y reparación Resistencia sistémica inducida
<i>Desarrollo de microbiota antagonica</i>
Bacterias y Hongos

pueden incluir: *i*) el aislado de los HMA, *ii*) el patógeno y su virulencia, *iii*) la planta hospedera, *iv*) el sustrato de crecimiento, y *v*) las condiciones ambientales prevalecientes.

Las interacciones ecológicas asociadas con el control biológico pueden expresarse gráficamente (FIGURA 2) en varias áreas: 1) La etiología y epidemiología del patógeno; 2) el crecimiento y método de cultivo del patógeno; 3) el ambiente microbiológico físico y químico, y 4) la disponibilidad de los agentes de biocontrol.

La protección efectiva contra los patógenos de la raíz conferida por los HMA es probablemente una consecuencia de varios mecanismos que interaccionan, entre los cuales se pueden mencionar el genotipo de la planta y las condiciones medio ambientales, los cuales establecen los mecanismos de biocontrol. Esos mecanismos tienen como consecuencia acciones potenciales de los HMA que repercuten en la planta y con-

tribuyen en el control de las enfermedades. (TABLA 1).

En conclusión, los HMA juegan un papel clave en la protección de las plantas contra los patógenos y son probablemente un componente importante del fenómeno de supresión de patógenos en el suelo. La combinación de las estrategias de investigación básica y aplicada será la base del diseño del manejo para el establecimiento de protocolos en el desarrollo de la agricultura basados en prácticas sustentables, y finalmente para la explotación y el incremento de los HMA más eficaces para la supresión de patógenos.

### BIORREMEDIACIÓN

Los metales pesados (MP) se encuentran agrupados en una categoría de 53 elementos con peso específico mayor de 5 g/cm<sup>3</sup> (Holleman y Wiberg, 1985). De éstos, los elementos traza,

tales como Cu, Fe, Mn, Ni y Zn resultan esenciales para un desarrollo normal de las plantas. Estos elementos se requieren en un gran número de enzimas que actúan en reacciones redox, en transferencia de electrones y también como componentes estructurales en el metabolismo de ácidos nucleicos. Contrariamente, los metales como Cd, Pb, Hg y Cr no son esenciales (Mertz, 1981). Los MP se encuentran principalmente en ecosistemas terrestres o acuáticos aunque también pueden ser emitidos a la atmósfera. Para las plantas terrestres la raíz es el órgano que entra inmediatamente en contacto con los iones metálicos. En la interfase planta y suelo, la homeostasis de los MP esenciales debe estar bien controlada por la planta para estabilizar su deficiencia o exceso. Los MP no esenciales pueden entrar a la raíz por difusión pasiva, pero también pueden usar transportadores de baja afinidad con cierta especificidad (Hall y Williams, 2003).

En altas concentraciones, los MP interfieren con actividades enzimáticas esenciales por modificación de la estructura proteica o por el reemplazo de elementos vitales, dando como resultado síntomas de deficiencia en la planta. La membrana plasmática es particularmente vulnerable a la toxicidad de MP y de esta manera su funcionalidad puede ser afectada por la alteración de proteínas membranales intrínsecas como las  $H^+$ -ATPasas (Hall, 2002). También la producción de oxígeno reactivo debido a los niveles altos de MP, ocasionan daño oxidativo en tejidos de plantas. Como una consecuencia, se presentan en la planta síntomas de toxicidad tales como clorosis, retraso en el crecimiento, oscurecimiento en raíces, efectos en los fotosistemas y arresto en el ciclo celular, entre otros. Las plantas han desarrollado varios mecanismos para mantener la homeostasis para concentraciones elevadas de MP (Hall, 2002). Los principios básicos de los mecanismos de detoxificación incluyen la quelación extracelular de los MP por los exudados de la raíz o por unión de los MP en las paredes celulares de la rizodermis. Los sistemas activos de las plantas en el citosol controlan las concentraciones de los MP por eflujo. La célula de la planta produce agentes quelantes como fitoquelatinas y metalotioneínas, las cuales tienen una

alta afinidad por los MP. El complejo resultante puede finalmente ser exportado del citoplasma al tonoplasto y llegar a ser secuestrado dentro de la vacuola (Hall, 2002).

Los HMA se encuentran en el suelo en la mayoría de los ecosistemas, incluyendo suelos contaminados. Los HMA mejoran el estado nutricional de sus hospederos (las plantas), por medio de adquisición de fosfatos y micronutrientes. De manera similar, los MP son absorbidos por la vía de la hifa fúngica y pueden ser transportados por la planta. De esta manera, en algunos casos las plantas micorrizadas pueden demostrar aumento en la toma de MP y éstos pueden ser transportados de la raíz al tallo (fitoextracción), mientras que en otros casos los HMA contribuyen a la inmovilización de los MP dentro del suelo (fitoestabilización). El resultado de la eficiencia de colonización micorrízica como descontaminante de suelos depende de la combinación de la planta/hongo/MP y de su influencia en las condiciones del suelo (Gaur y Adholeya, 2004).

#### **LOS HMA EN LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS**

Para utilizar la simbiosis MA en la fitorremediación, es importante entender al hongo por sí mismo y cómo se afecta el establecimiento de la simbiosis en suelos contaminados. Las esporas y las hifas presimbióticas son generalmente sensibles a los MP en ausencia de plantas. La germinación y el crecimiento de las hifas son inhibidos por los MP en todos los casos. Sin embargo, las esporas de suelos contaminados son más tolerantes a elevadas concentraciones de MP que las esporas que no provienen de suelos contaminados.

Algunos reportes indican que existe una mayor captación de metales pesados en las plantas debido a los HMA (Joner y Leyval, 1997). Los HMA son de gran importancia porque juegan un papel importante y un rol vital en la tolerancia (Del Val, *et al.*, 1999) y acumulación a metales (Jamal, *et al.*, 2002). La gran mayoría de los metales pesados son también almacenados en las estructuras micorrízicas presentes en las raíces

de las plantas y en las esporas (Gaur y Aldholeya, 2004).

El número total de esporas de HMA decrece cuando se aplican contaminantes y a su vez se incrementan las cantidades de metales pesados en la micorriza, sin embargo, las esporas de HMA no desaparecen completamente en suelos con los más altos rangos de contaminación, sugiriendo una cierta adaptación de los HMA al estrés ambiental (Del Val *et al.*, 1999). Las esporas de lugares que naturalmente tienen exceso de metales pesados, germinan mejor en suelos contaminados con éstos, con relación a esporas presentes en suelos no contaminados (Leyval *et al.*, 1995).

El efecto de la inoculación con HMA sobre la acumulación de metales es variable entre las diferentes especies de plantas (Malcova, *et al.*, 2003) y dependiendo del metal pesado, el HMA interacciona en estas especies (Kaldorf, *et al.*, 1999). Una serie de factores como son las propiedades inherentes del hongo, la capacidad de captar el MP por las plantas y la absorción del suelo, son características que pueden influir en la captación del metal en el suelo por las plantas micorrizadas (Leyval y Weissenhorn, 1996).

En otros estudios, sin embargo, la adición de residuos contaminados con MP no afectó significativamente el desarrollo del HMA bajo condiciones de campo (Arnold y Kaputska, 1987), probablemente porque diferentes ecotipos de HMA pueden tener diferentes grados de tolerancia a MP (Leyval y Weissenhorn, 1996).

Existen reportes de que las poblaciones autóctonas de HMA aisladas de suelos contaminados con metales presentan algunas adaptaciones potenciales para soportar el estrés del metal. Gidon y Tinker (1981) aislaron una cepa micorrízica tolerante a 200 mg/Kg de Zn en el suelo. Similarmente, Weissenhorn *et al.*, 1993, aislaron HMA de los suelos con MP los cuales eran más resistentes al cadmio que otros HMA de la misma especie que fueron aislados de un suelo no contaminado.

En un estudio realizado en nuestro laboratorio (Aguilar, 2004), se estudiaron esporas de hongos micorrízicos que fueron aisladas de suelos contaminados con MP. Los resultados mos-

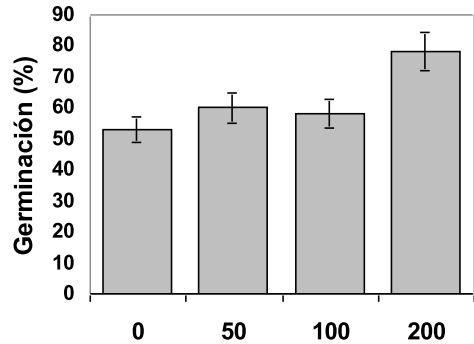
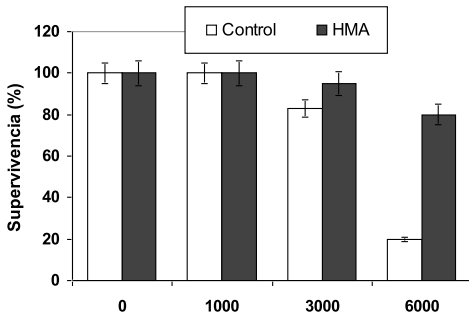


FIGURA 3. GERMINACIÓN DE ESPORAS DE *Glomus geosporum* EN MEDIOS CON CLORURO DE ALUMINIO. Se colocaron 30 esporas por tratamiento, con dos repeticiones. Se indican los intervalos de los porcentajes obtenidos para proporciones de  $\chi^2$ . Adaptada de Aguilar (2004).

traron un alto porcentaje de aluminio presente en el suelo, quizá debido a que la industria de peletería de León Guanajuato desaloja sus desechos sobre estos suelos y por lo tanto hay presencia de sustancias nocivas como son el aluminio y el cromo. Las esporas de HMA más abundantes aisladas se incluyeron dentro del género *Glomus* y la más común y numerosa se identificó como *Glomus geosporum*, que es una especie indicadora de perturbación encontrada en suelos contaminados con MP (Gaur y Adholeya, 2004). Los resultados de germinación en nuestro laboratorio mostraron que *Glomus geosporum* estimuló su proceso germinativo cuando estaba presente el aluminio en la más alta concentración probada (200  $\mu$ M)(FIGURA 3). Esto sugiere que dicha especie es una cepa adaptada a condiciones de altas concentraciones de aluminio y pueda ser un prospecto de HM metalo-tolerante, que inclusive pueda ser utilizada en la fitorremediación. Los datos obtenidos en este trabajo coinciden con un trabajo realizado en la India por Sambandan *et al.* (1992) donde se encontró a *Glomus geosporum* en suelo contaminado.

Los inóculos de HMA autóctonos pueden ser una herramienta para los esfuerzos de remediación de los suelos. La remediación puede llevarse a cabo de un sitio a otro sin mover grandes cantidades de suelo para las facilidades de des-



**FIGURA 4. EFECTO DE LOS HONGOS MICORRÍFICOS ARBUSCULARES (HMA) EN LA SUPERVIVENCIA DE PLANTAS DE JITOMATE (*Lycopersicon esculentum*) TRATADAS CON DICROMATO DE POTASIO.** Las plantas fueron germinadas y crecidas hasta 10 cm y posteriormente fueron regadas a saturación cada 4 días con las soluciones con dicromato de potasio. La supervivencia fue evaluada a los 50 días utilizando 50 plantas por tratamiento. Se indican los intervalos de los porcentajes obtenidos para proporciones de  $\chi^2$ . Adaptada de Martínez (2003).

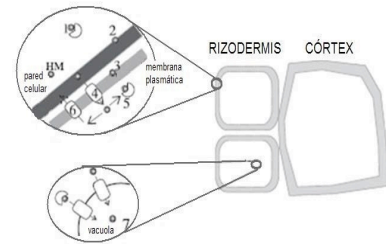
contaminación. Si el suelo está ya tratado o destruido, la inoculación de HMA resistentes de suelos similares, puede acelerar el establecimiento de la simbiosis y mejorar la remediación del suelo.

Incluso, los HMA de suelos no contaminados con metales pesados pueden brindar protección a las plantas. El cromo en su estado de oxidación VI usualmente se asocia con el oxígeno para formar los iones cromato ( $CrO_4^{2-}$ ) o dicromato ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) (Shanker *et al.*, 2005). En un estudio con plantas de jitomate, encontramos que un consorcio de hongos micorrízicos de una zona agrícola de Tiripetío, Michoacán, confirió una mayor supervivencia a plantas de jitomate tratadas con dicromato de potasio; mientras que las plantas control tuvieron un 20% de supervivencia a los 45 días, las plantas tratadas con HMA incrementaron la supervivencia al 80% (FIGURA. 4) (Martínez, 2003).

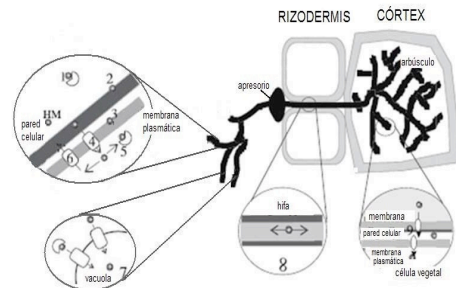
### FITOESTABILIZACIÓN

La fitoestabilización previene la propagación de los MP en el suelo, así como también la filtración de los mismos en el suelo debido a la erosión. Las especies de plantas metalo-tolerantes

### MECANISMOS PRESENTES EN LAS CÉLULAS DE LAS PLANTAS



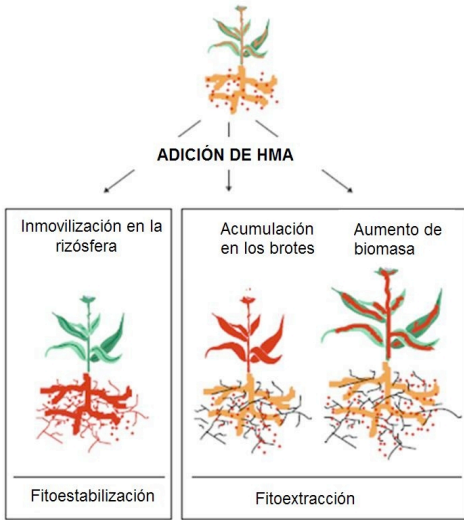
### MECANISMOS PRESENTES EN HONGOS



**FIGURA 5. MECANISMOS DE DESTOXIFICACIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS Y HONGOS EN LA SIMBIOSIS MICORRÍFICA ARBUSCULAR.** 1. Los agentes quelantes son secretados y se unen a los metales en el suelo. Ej. Histidina y ácidos orgánicos a partir de la planta y glomalina a partir del hongo. 2. Unión de los MP a los componentes de la pared celular en plantas y hongos. 3. La membrana plasmática como una barrera activa y selectiva en plantas y hongos. 4. Transportadores de metales específicos y no específicos en la membrana plasmática de plantas y hongos (importe pasivo y activo). 5. Quelación en el citosol. Ej. Metalotioneinas (plantas y hongos), ácidos orgánicos, aminoácidos, y chaperonas metalo-específicas. 6. Exportación vía específica o no específica o transporte pasivo de las células de la planta al hongo. 7. Secuestro de MP en la vacuola de las células de plantas y de hongos. 8. Transporte de MP en la hifa del hongo. 9. En arbusculos, exportación del metal a partir del hongo para importarlo dentro de las células de la planta vía transporte activo o pasivo.

con extensos sistemas de raíz y buena cubierta vegetal previenen la erosión por viento y agua de los MP y por lo tanto pueden servir como estrategias de fitoestabilización. La inmovilización de los MP dentro de la rizosfera está asociada con la precipitación de los MP dentro del suelo, la absorción en la superficie de la raíz o la absorción y acumulación dentro de las raíces. Los HMA contribuyen a la inmovilización de los MP en el suelo fuera de la rizosfera de la planta y





**FIGURA 6. CONTRIBUCIÓN DE LOS HMA A LA FITORREMEDIACIÓN DE MP.** Arriba: Plantas no micorrizadas en suelos contaminados con metales pesados. Izquierda: Mejoramiento de la estabilización de MP en el suelo bajo la colonización micorrízica que favorece la fitoestabilización. Derecha: Aumento de la toma y transferencia de MP por las raíces (planta izquierda) e incremento de la biomasa de plantas, dando por resultado del aumento de nutrientes por los HMA permitiendo un incremento en la remoción de MP del suelo. (Planta derecha): beneficios por la fitoextracción (Puntos: MP en el suelo, Líneas: bajas y altas concentraciones de MP en raíces y parte aérea, respectivamente). Adaptada de Göre y Paszkowski (2006).

por lo tanto, mejoran la fitoestabilización. Los hongos emplean estrategias similares a las plantas hospedadoras, entre las que se encuentran la inmovilización de metales por compuestos secretados por el hongo, la precipitación de gránulos de polifosfato en el suelo, la adsorción a las paredes celulares por el hongo y la quelación de metales dentro del hongo (Gaur y Adholeya, 2004; Göhre y Paszkowski, 2006). (FIGURA 5).

### FITOEXTRACCIÓN

La fitoextracción es una tecnología reciente y representa una estrategia eficiente y atractiva para limpiar suelos contaminados (Kramer, 2005). Ésta se lleva a cabo en plantas con altas cantidades de transferencia de MP de raíz al tallo y por lo tanto acumulan grandes cantidades de

éstos en sus tejidos. Consecuentemente, los MP pueden ser removidos junto con las plantas cuando se cosechan y pueden ser recapturados (fitominimización) y usados para producir energía por combustión y almacenados en bajos volúmenes de materia seca (Krämer, 2005). Sin embargo, la máxima limpieza del suelo requiere de muchos años para disminuir la contaminación del suelo a la mitad (McGrath y Zhao, 2003) y la eficiencia de la fitoextracción depende de la producción de biomasa por las plantas y de su tolerancia al metal. De manera natural, la utilización de los hiperacumuladores puede enriquecer los MP de 100 a 1000 veces en relación a los no acumuladores sin mostrar síntomas de toxicidad (Peuke y Rennenberg, 2005).

La colonización por HMA puede permitir la captación y la subsiguiente acumulación de MP en los tejidos de las plantas. Aunque este escenario puede ser deseable para el aumento de la tolerancia de MP en plantas, puede interferir con la fitoextracción eficiente. Es por eso que es crucial determinar las condiciones apropiadas (tales como la combinación hongo-planta) para un sitio contaminado determinado y maximizar la utilización de la simbiosis micorrízica arbuscular. (FIGURA 6).

### REFERENCIAS

- Aguilar L. (2004). Germinación *in vitro* de esporas de hongos micorrizógenos arbusculares a diferentes concentraciones de aluminio. Tesis Profesional. Facultad de Biología. UMSNH. 65 pp.
- Alarcón A, Almaraz SJJ, Ferrera-Cerrato R, González-Chávez MCA, Lara HME, Manjarez MMJ, Quintero LR, Santamaría RS. (2004). Manual: Tecnología de hongos micorrízicos en la producción de especies forestales en vivero. 33-73 pp. En: Ferrera-Cerrato, A. Alarcón y M. E. Lara (Eds.). Colegio de Postgraduados, Montecillo. SEMARNAT-PRONARE. México. 98 pp.
- Arnold PT, Kaputka LA. (1987). VA mycorrhizal colonization and spore population in abandoned agricultural field alter five years



- of studge additions. *Ohio J. Sci.* 87: 112 – 114.
- Azcón Aguilar C, Barea JM. (1996). Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens. An overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6: 457-464.
- Barea JM, Azcón R, Azcón-Aguilar C. (2002). Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van Leeuwenhoek* 81: 343–351.
- Borowicz VA. (2001). Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant–pathogen relations? *Ecology* 82: 3057–3068.
- Clark RB, Zeto SK. (1996). Mineral acquisition by mycorrhizal maize grown on acid and alkaline soil. *Soil Biol. Biochem.* 28: 1495-1503.
- Del Val C, Barea JM, Azcon-Aguilar C. (1999). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungus populations in heavy-metal-contaminated soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 718–723.
- Dixon R, Rao MV, Garg VK. (1994). Water relations and gas exchange of Mycorrhizal *Leucaena leucocephala* seedlings. *J. Trop. Forest. Sci.* 6: 542-532
- Duchesne LC. (1994). Role of ectomycorrhizal fungi in biocontrol. In *Mycorrhizae and plant health*. F. L. Pfleger and R. G. Linderman (eds). APS Press, St. Paul, Minn. pp. 27–45.
- Dumas-Gaudot E, Slezack S, Dassi B, Pozo MJ, Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S. (1996). Plant hydrolytic enzymes (chitinases and  $\beta$ -1,3-glucanases) in root reactions to pathogenic and symbiotic microorganisms. *Plant Soil* 185: 211–221.
- Fitter AH, Garbaye J. (1994). Interactions between Mycorrhizal fungi and other soil organisms. *Plant Soil* 159: 123–132.
- Friberg S. (2001). Distribution and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in traditional agriculture on the Niger island delta, Mali west Africa. *CBM:s Skriftserie* 3: 53-80.
- Gaur A, Adholeya A. (2004) Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Sci.* 86: 528–534.
- Gazey C, Abbott LK, Robson AD. (1992). The rate of development of mycorrhizas affects the onset of sporulation and production of external hypha by two species of *Acaulospora*. *Mycol. Res.* 96: 643- 650.
- Gidon A, Tinker PB. (1981). A heavy metal tolerant strain of mycorrhizal fungus. *Trans Br. Mycol. Soc.* 77: 648-649.
- Göhre V, Paszkowski U. (2006). Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta* 223: 1115–1122.
- Gómez N. (2006). Efecto de la micorriza arbuscular en el control de la pudrición de la raíz causada por *Phytophthora capsici* L. en el desarrollo de plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Tesis profesional. Facultad de Biología. UMSNH. 133 pp.
- Graham JH. (2001). What do root pathogens see in mycorrhizas? *New Phytol.* 149: 357–359.
- Hall JL. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exp. Bot.* 53: 1–11.
- Hall JL, Williams LE. (2003). Transition metal transporters in plants. *J. Exp. Bot.* 54: 2601–2613.
- Holleman A, Wiberg E. (1985). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Berlin. Springer-Verlag.
- Hooker JE, Jaizme-Vega M, Atkinson D. (1994). Biocontrol of plant pathogens using mycorrhizal fungi. In *Impact of mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems*. S. Gianinazzi and H. Schüepp (eds). Birkhäuser Verlag, Basel. pp. 191–200.
- Jamal A, Ayub N, Usman M, Khan AG. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance zinc and nickel uptake from contaminated soil by soybean and gentil. *Int. J. Phytoremed.* 4: 205–221.
- Jeffries P, Barea JM. (2001). Arbuscular mycorrhizal, a key component of sustainable plant soil ecosites. In: Hock. B. (ed) *The mycota*. Vol. IX fangal associations. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Pp 95-113.

- Joner EJ, Leyval C. (1997) Uptake of Cd by roots and hyphae of a *Glomus mossese/Trifolium subterraneum* mycorrhiza from soil amended with high and low concentration of cadmium. *New Phytol.* 135: 353–360.
- Kaldorf M, Kuhn AJ, Schröder WH, Hildebrandt U, Bothe H. (1999). Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. *J. Plant Physiol.* 154: 718–728.
- Khalil-Garzezi A, Cetina VM, Ferrera-Cerrato R, Velásquez M, Peréz CA, Larqué SM. (2001). Hongos micorrízicos arbusculares como componente de control biológico de la pudrición causada por *Fusarium* sp. en gladiola. *Terra* 3: 259-264.
- Krämer U. (2005). Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Curr. Opin. Biotechnol.* 16: 133–141.
- Leyval C, Sing BR, Poner EJ. (1995). Occurrence and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in some Norwegian soils influenced by heavy metals and soil properties. *Water Air Soil Pollut.* 84: 203–216.
- Leyval, C. Weissenhorn H. (1996). Tolerance to metals of arbuscular mycorrhizal fungi from heavy metal polluted soils. A summary of results, p. 452–454. En: Azcón–Aguilar C. y Barea, J. M. (eds). *Mycorrhizae in integrated systems: from genes to plant development*. European Commission, Brussels, Belgium.
- Linderman RG. (1994). Role of VAM fungi in biocontrol. In: Pflieger FL, Linderman R. G. (eds). *Mycorrhiza and Plant Health* APS. Pp 1-25. St. Paul Minnesota.
- Malcova R, Vosátka M, Gryndler M. (2003). Effects of inoculation with *Glomus intraradices* on lead uptake by *Zea mays* L. and *Agrostis capillaries* L. *Appl. Soil Ecol.* 23: 55 – 67.
- Martínez C. (2003). Efecto de los metales pesados en la colonización micorrízica arbuscular y el crecimiento de plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* L.). Tesis profesional. Facultad de Biología. UMSNH. 73 pp.
- Marx DH. (1972). Ectomycorrhizae as deterrents to pathogenic root infections. *Annu. Rev. Phytopathol.* 10: 429–454.
- Mertz W. (1981) The essential trace elements. *Science* 213: 1332–1338.
- McGrath SP, Zhao FJ. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Curr. Opin. Biotechnol.* 14: 277–282.
- Osonobi O, Bakare ON, Mulongoy K. (1992). Interactions between drought stress and vesicular arbuscular mycorrhiza on the growth of *Faidherbia albida* (syn. *Acacia albida*) and *A. nilotica* in sterile and no sterile soils. *Biol. Fert. Soils* 14: 159-165.
- Perrin R. (1990). Interactions between mycorrhizae and diseases caused by soil-borne fungi. *Soil Use Management* 6: 189-195.
- Peuke AD, Rennenberg H. (2005). Phytoremediation. *EMBO Rep.* 6:497–501.
- Ristaino JB, Thomas W. (1997). Agriculture, methyl bromide, and the ozone hole: Can we fill the gaps? *Plant Dis.* 81: 964–977.
- Rosendahl CN, Rosendahl S. (1991). Influence of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus spp.*) on the response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salt stress. *Env. Exp. Bot.* 31: 313-318.
- Sambandan K, Kannan K, Raman N. (1992). Distribution of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in heavy metal polluted soils of Tamil-Nadu, India. *J. Environ. Biol.* 13: 159-167.
- Sharma DE, Gianinazzi SJ. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae in relation to plant disease. *World J. Microb. Biotechnol.* 8:559-563.
- Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Env. Int.* 31: 739-753.
- Singh R, Adholeya A, Mukerji KG. (2000). Mycorrhiza in control of soil-borne pathogens. In *Mycorrhizal biology*. K.G. Mukerji, B.P. Chamalo, and J. Singh (eds). Kluwer Academic Plenum Publishers, New York. pp. 173–196.
- Schüßler A, Schwarzott D, Walker C. (2001). A new fungal phylum, the *Glomeromycota*:

- phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105: 1413-1421.
- Smith SE, Read DJ. (1997). *Mycorrhizal Symbiosis*, 2nd ed. Academic Press Ltd., London, England.
- Sylvia DM, Chellemi DO. (2001). Interactions among root inhabiting fungi and their implications for biological control of root pathogens. *Adv. Agron.* 73: 1-33.
- Weissenhorn I, Leyval C, Berthelin J. (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy metal polluted soils. *Plant Soil* 157: 247-256.
- Whipps JM. (2004). Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Can. J. Bot.* 82: 1198-1227.