

FITORREMEDIACIÓN ASISTIDA POR MICROORGANISMOS CON ENFÁSIS EN HONGOS ARBUSCULARES

MICROORGANISMS AIDED REMEDIATION WITH EMPHASIS ON ARBUSCULAR FUNGI

González-Chávez M.C.A.¹, Carrillo-González R.¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5. Carretera México-Texcoco, Texcoco Edo. de México 56230.

*Autor de correspondencia: carmeng@colpos.mx

RESUMEN

La contaminación de suelos por elementos potencialmente tóxicos (EPT) es un problema actual a nivel mundial. El objetivo de la remediación es reducir el riesgo de exposición de estos contaminantes a los organismos vivos. Ante ello, el uso de plantas asociadas con microorganismos benéficos es una alternativa verde promisoriosa. En este trabajo se enfatiza la participación de los hongos micorrízico arbusculares (HMA) en la fitorremediación con diversas ventajas para las plantas: el fomento del crecimiento y productividad, la inmovilización de EPT en las raíces micorrizadas y las estructuras fúngicas, así como la modificación del estado químico de dichos contaminantes para reducir su toxicidad. El presente trabajo resume varias investigaciones que muestran amplias perspectivas de su uso para la fitorremediación en el campo.

Palabras clave: Micorrizas, remediación, contaminación de suelos.

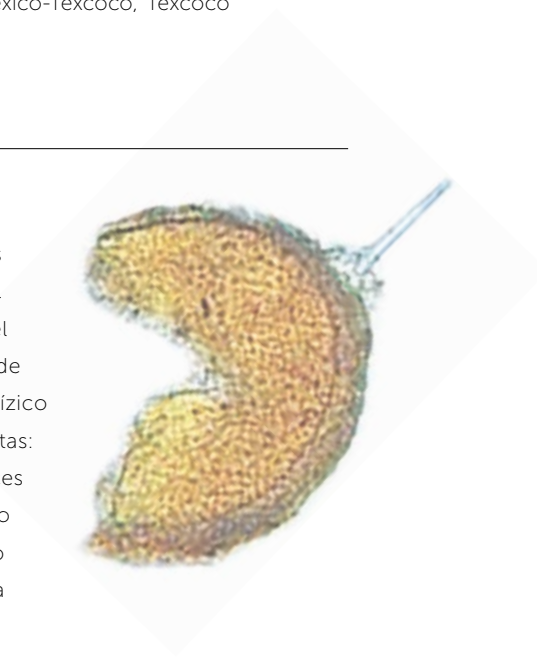
ABSTRACT

Soil contamination by potentially toxic elements (PTEs) is a current problem at the global level. The objective of remediation is to reduce the risk of exposure of living organisms to these contaminants. Before this, the use of plants associated with beneficial microorganisms is a promising green alternative. In this review the participation of AMF is emphasized, this association present relevant advantages for phytoremediation: improving growth and productivity, immobilizing the PTEs in mycorrhizal roots and fungal structures, as well as changing the chemical status of these contaminants to reduce their toxicity. This document sums up many studies that show broad perspectives of the use of AMF for phytoremediation in the field.

Keywords: mycorrhizae, remediation, soil contamination.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 4, abril. 2017. pp: 28-33.

Recibido: enero, 2017. **Aceptado:** marzo, 2017.



INTRODUCCIÓN

Fitorremediación asistida por microorganismos

Dadas las condiciones físicas, químicas y biológicas desfavorables que se presentan en los sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos (EPT), el uso de microorganismos benéficos es muy importante en la fitorremediación. La rizósfera es la zona de influencia de la raíz y es muy dinámica. En ésta se presentan diversas relaciones mutualistas entre microorganismos y plantas. En este sitio hay una elevada exudación de sustancias útiles para el metabolismo microbiano y representa un hábitat ecológico (González-Chávez, 2005). Los microorganismos participan en diversos procesos que benefician a la planta y resultan en ventajas para lograr su establecimiento y desarrollo en sitios contaminados con EPT. Por ejemplo: fijación biológica de nitrógeno atmosférico, solubilización de fósforo, producción de antibióticos o sustancias para control de patógenos, sustancias promotoras del crecimiento, sideróforos, sustancias con actividad surfactante, etcétera (Khan, 2005; Ortega-Larrocea *et al.*, 2010; Velázquez-Aradillas *et al.*, 2011; Sessitsch *et al.*, 2013). Además, los microorganismos pueden interactuar directamente sobre los contaminantes (Khan, 2006; Juwarkar *et al.*, 2010), por lo que resulta de suma importancia considerar dentro de la fitorremediación a los microorganismos mutualistas que se asocian a las raíces de las plantas (Carrillo-González y González-Chávez, 2012). Son varios los microorganismos que se asocian a las plantas en condiciones de contaminación por EPT (Navarro-Noya *et al.*, 2010), pero los más estudiados, debido a su abundancia y beneficios, son las bacterias promotoras del crecimiento de plantas (BPCP) (Abhilash *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2011), hongos micorrízico arbusculares (HMA) (Figura 1) (Miransari, 2011; Mathur *et al.*, 2007; González-Chávez *et al.*, 2002 a,b) y hongos endófitos (Cherian *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2012). Además de las BPCP y de los HMA existen otros microorganismos que también participan en los procesos químicos que involucran a los EPT en el suelo. Algunos de éstos son los actinomicetos, las algas y las cianobacterias (El-Baz, 2015; El-Enany e Issa, 2000; Mehta y Gaur, 2005). A pesar de que estos grupos se asocian comúnmente con las raíces de las plantas existen muy pocos estudios de su actividad y función en suelos contaminados, por lo que se deberían considerar

en futuros estudios (González-Chávez *et al.*, 2005). Bajo la tendencia de la fitoestabilización, que se basa en la estabilización o inmovilización de los EPT en la rizósfera o en las raíces de las plantas, hay que retomar la ventaja que brindan los microorganismos al aumentar la tolerancia a EPT y no solo centrarse en que aumenten la absorción de EPT en los tejidos de las plantas con las que se asocian. No obstante, se han realizado pocos trabajos referentes al uso de bacterias en la estabilización de EPT, lo que abre un campo de investigación muy prometedor (Gonzalez-Chávez y Carrillo González, 2013 a, b). Especial énfasis se debería hacer en la aplicación de BPCP, las cuales en condiciones sin contaminación son un complemento natural al adecuado desarrollo de las plantas. Estos organismos pueden producir hormonas, proteger a las plantas, principalmente contra enfermedades de la raíz, e incrementar la tolerancia a diferentes tipos de estrés como salinidad, sequía o falta de nutrientes, por lo que es de esperarse que su función también sea importante en sitios contaminados, dado el fomento del crecimiento de las plantas a utilizarse para remediación de suelos contaminados con EPT (Argumedo-Delira *et*

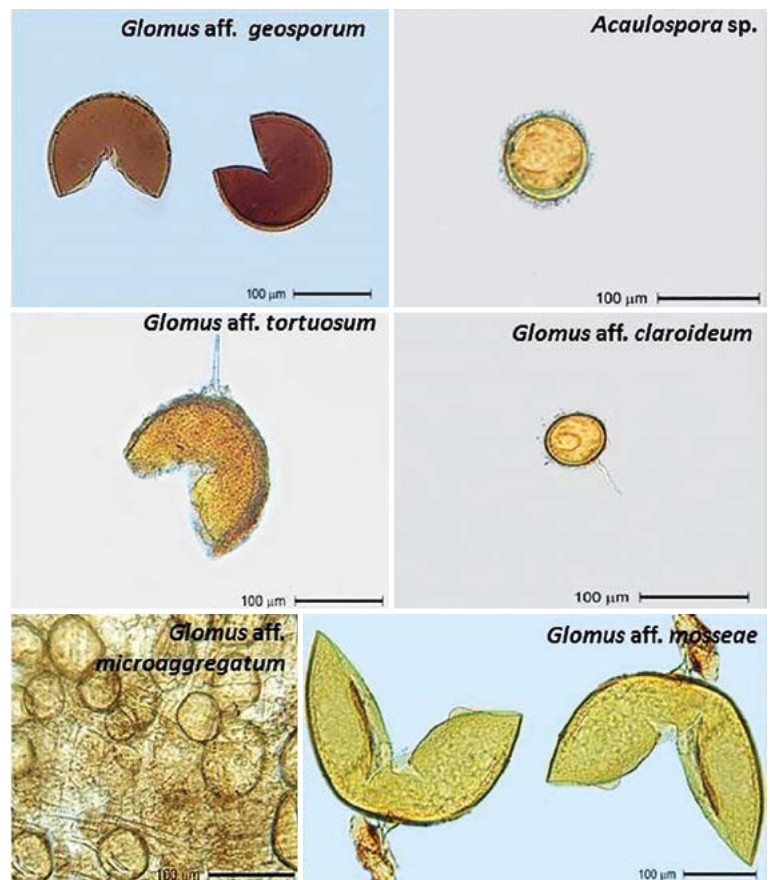


Figura 1. Hongos micorrízico arbusculares aislados de la rizósfera de plantas que crecen en sitios contaminados con residuos de minas, los cuales contienen altas concentraciones de EPT.



al., 2005; Carrillo-González y González-Chávez, 2012; González-Chávez *et al.*, 2009; González-Chávez, 2005; González-Chávez *et al.*, 2005). Existen numerosos trabajos donde se analiza su participación en el aumento de la acumulación de EPT en la planta. Sin embargo, en una revisión reciente se menciona que la respuesta de las bacterias en la fitoextracción es inconsistente y que aún se necesitan entender claramente los procesos fisiológicos involucrados en ello (Sessitsch *et al.*, 2013); se observa una situación parecida con los microorganismos endófitos. Hasta ahora solo se ha reportado su participación en el aumento de la concentración de EPT en parte aérea y raíz, por lo que también este grupo de microorganismos requiere mayor investigación para su uso en la fitorremediación de sitios contaminados. No obstante, existe una limitante en el empleo de microorganismos benéficos. Ésta es que en condiciones de campo en forma natural existe una población microbiana nativa, que compite y puede ser antagónica con los microorganismos que se inoculan, por lo que es necesario seleccionar microorganismos altamente competitivos y realizar pruebas previas para confirmar la utilidad de la introducción de microorganismos al suelo, así como utilizar microorganismos nativos los cuales están adaptados a las condiciones edáficas (González-Chávez, 2005).

Fitorremediación y hongos micorrízico arbusculares

Los HMA del grupo Glomeromicetes, simbiontes obligados de la mayoría de las plantas terrestres, desempeñan funciones importantes en el suelo. Algunos autores los consideran parte integral de las raíces por su función para la mayor adquisición de nutrientes como P, N y algunos micronutrientes. De igual manera, participan en la modificación del ambiente rizosférico (área de influencia de las raíces en el suelo), mejoran la estructura del suelo, favorecen la presencia selecta de grupos microbianos benéficos para la planta, disminuyen las condiciones de estrés (salinidad, sequía, acidez, etcétera) e incrementan la tolerancia a enfermedades de la raíz. En condiciones de altas concentraciones de EPT en el suelo se ha observado que los HMA colonizan en forma natural las raíces de plantas que crecen en estos sitios contaminados (Ortega-Larrocea *et al.*, 2010; Figura 1). Los hongos modulan la absorción de los EPT en un amplio intervalo de concentraciones. González-Chávez *et al.* (2009) mostraron evidencias de que éstos pueden estar involucrados en la atenuación natural de éstos ambientes. En esta condición, el manejo de buenas prácticas agronómicas incrementará los propágulos fúngicos y sus beneficios; por ejemplo, adición de materia

orgánica, mínima labranza, uso de plantas micorrízicas (que son colonizadas con HMA), rotación de cultivos, bajo insumo de plaguicidas y fertilizantes. Además de los beneficios antes mencionados, bajo condiciones de contaminación se ha demostrado que los HMA incrementan la tolerancia de la plantas a los contaminantes. Los principales mecanismos que actúan en HMA son la restricción en la absorción de EPT; si éstos se absorben entonces ocurre un secuestro intracelular y compartimentalización. También los hongos cuentan con bombas de expulsión de contaminantes.

En el caso de la restricción de ingreso de EPT, el micelio externo (o extrarradical) y la glomalina son capaces de inmovilizar EPT. Éstos actúan a nivel de pared celular fúngica. El micelio se encuentra fuera de la raíz y explora ampliamente el suelo, mientras que la glomalina es una glicoproteína a nivel de superficie que las hifas de los HMA producen abundantemente durante su crecimiento activo (González-Chávez *et al.*, 2004). Por tanto, ambas estructuras fúngicas reducen la disponibilidad y así disminuyen la toxicidad de estos contaminantes en el sistema suelo-planta (Joner *et al.*, 2000; González-Chávez *et al.*, 2002a, b). El secuestro intracelular ocurre a nivel de citoplasma por formación de complejos de los iones metálicos por medio de aminoácidos, fitoquelationas o metalotioneínas (González-Guerrero *et al.*, 2007 y Shine *et al.*, 2015). También se observa compartimentalización, principalmente en las vacuolas (González-Guerrero *et al.*, 2008); así, se disminuye la forma iónica de los EPT y su toxicidad.

Cuellar *et al.* (2011) observaron significativamente menor producción de micelio externo al incrementar la concentración de Cd (1 mg L^{-1} adicionado en la solución nutritiva), Pb (20 mg L^{-1}) y Zn (40 mg L^{-1}). Sin embargo, a estas altas concentraciones de los elementos la capacidad del micelio para secuestrar estos EPT aún fue significativa ($20 \mu\text{g}$ de Cd por g micelio seco, $60 \mu\text{g}$ de Pb g^{-1} y $25 \mu\text{g}$ de Zn g^{-1}). González-Chávez *et al.* (2004) mostraron que la glomalina secuestra Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, entre otros EPT presentes en suelos contaminados. Ésta disminuye el riesgo de EPT en su forma iónica y, por tanto, su toxicidad. Aunado al carácter recalcitrante de la glomalina y su abundante producción, el secuestro de EPT puede considerarse un proceso irreversible a largo plazo. El alto contenido de C en la glomalina también ofrece ventajas de secuestro de C en el suelo de sitios contaminados con EPT. Esto representa un servicio ambiental que relaciona su participación a nivel global

con la mitigación de los efectos del cambio climático. Los HMA también cuentan con mecanismos moleculares específicos de expulsión de ciertos EPT, como el arsénico (As). Una vez que el As (V) ingresa a la célula fúngica, el hongo lo reduce (AsIII) y la bomba inicia su expulsión en un tiempo tan corto como 3 h hasta su eliminación de la célula (González-Chávez *et al.*, 2013b; González-Chávez *et al.*, 2014). De esta manera, el As no se acumula en las células fúngicas ni hacen daño en su funcionamiento bioquímico (Figura 2).

Cuando las poblaciones nativas de HMA no son abundantes o son ineficientes es necesaria la inoculación con HMA nativos y seleccionados. Khan (2006) propuso el término micorrizorremediación para aludir el empleo de los HMA en conjunto con plantas para remediar suelos contaminados con EPT.

González-Chávez *et al.* (2002b) observaron que pastos inoculados (*Holcus lanatus*) con HMA nativos producen mayor número de hijuelos por planta, incrementan su biomasa y absorben menos As, pero más P. Este último es un proceso paradójico debido a que As y P son químicamente análogos y se absorben con el mismo sistema de transporte (transportador de fosfatos de alta afinidad); sin embargo, el hongo absorbe selectivamente más P que As. En suelos contaminados con EPT, al estar micorrizadas, las plantas adquieren mayor tolerancia y capacidad para sobrevivir la condición de estrés abiótico (González-Chávez *et al.*, 2009, 2011, 2013b; González-Chávez, 2009). Genes fúngicos involucrados en el transporte de Cu, Zn, Fe y Mn se han reportado recientemente (González-Guerrero *et al.*, 2005, Tisserant *et al.*, 2013, Tamayo *et al.*, 2014). Sin embargo, se ha observado que los HMA influyen menor translocación de estos contaminantes. González-Chávez y Carrillo-González (2013) demostraron que plantas de crisantemo (*Chrysanthemum maximum*) creciendo en residuos de mina e inoculadas con *Funneliformis mosseae* BEG25 tuvieron menor concentración de Cu y Pb en su parte aérea, en comparación con plantas no inoculadas (testigo). González-Chávez *et al.* (2016) también observaron que *Acaulospora* sp. disminuyó el factor de bioacumulación de Cd en la parte aérea de plantas de *Jatropha*

curcas establecidas en un residuo de mina en comparación con el uso de biochar. Estos autores también observaron que la inoculación incrementó 31% la concentración de clorofila a en estas plantas. La disminución de los pigmentos fotosintéticos son resultado de toxicidad de EPT en las plantas; así, los HMA pueden funcionar como organismos que disminuyen los efectos tóxicos de estos contaminantes. Recientemente, Cuellar-Sánchez *et al.* (2016) analizaron el uso de vermicompost y la inoculación de *Ricinus communis* con HMA como una alternativa verde para la fitorremediación de un sitio contaminado con residuos de baterías ácidas de automóviles. En sitios contaminados con estos residuos, el Pb en concentraciones muy altas (42,000 mg kg⁻¹ suelo)

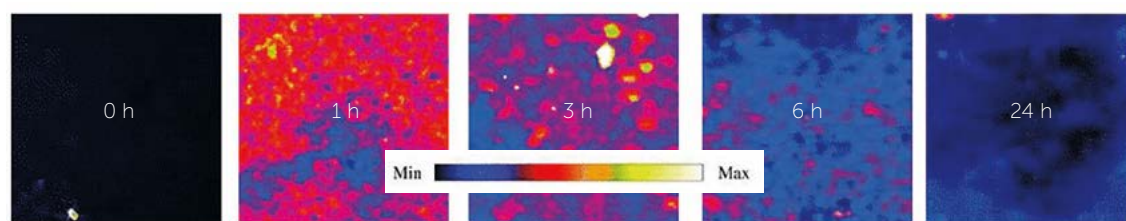


Figura 2. Cinética de expulsión de arsénico del micelio externo del hongo micorrizico *Rhizofagus intraradices* (*Rhizofagus irregularis*) observada a través del análisis de espectroscopia de radiación de sincrotrón.

es el principal contaminante. Estos autores observaron que en las plantas testigo (sin inocular) el vermicompost disminuyó tres veces la concentración extractable de Pb en el suelo; adicionalmente, los HMA favorecieron las condiciones del suelo contaminado y disminuyeron la absorción de Pb en la parte aérea de las plantas de *R. communis*. *Funneliformis mosseae* BEG-25 fue el hongo que más disminuyó la conductividad eléctrica del suelo rizosférico (0.3 dS m⁻¹ vs. 2.2 dS m⁻¹ en la rizosfera de plantas testigo), mientras que tres HMA: *F. mosseae* BEG-25, *Acaulospora* sp. y *Glomus* sp., disminuyeron la concentración de Pb en la parte aérea de plantas (67, 100 y 107 mg Pb kg⁻¹ peso seco, respectivamente), en comparación con plantas no inoculadas y las inoculadas con *Gigaspora gigantea* (234 y 119 mg Pb kg⁻¹ peso seco, respectivamente). La clorofila se incrementó en las plantas inoculadas (hasta 68 mg g⁻¹ de hojas) en comparación con las no inoculadas (43 mg g⁻¹ de hojas). También los HMA incrementaron el peso seco de semillas, el contenido y la calidad del aceite de *R. communis*. Algunos investigadores han incursionado en el estudio de la interacción de los HMA con otros contaminantes menos comunes en el suelo. Guo *et al.* (2013) reportaron la participación de los HMA en el establecimiento de plantas en suelos contaminados con elementos raros en China (La, Ce, Pr y Nd). La colonización micorrizica

disminuyó la concentración de dichos elementos en el tejido aéreo de las plantas. Sin embargo, son necesarios más estudios que fortalezcan la información existente y demuestren la importancia de estos hongos y su interacción con éstos y otros elementos raros.

CONCLUSIONES

La fitorremediación asistida con HMA es una opción económicamente redituable para remediar suelos contaminados con EPT. Las diferentes investigaciones demuestran que los HMA no solo interactúan con la planta, sino también con los contaminantes y el suelo. Todo ello modifica las condiciones para que las plantas se puedan establecer, crecer e incrementar su tolerancia y productividad en dichos sitios. La mayor estabilización de los EPT con la consecuente disminución de su disponibilidad es uno de los principales efectos de los HMA, lo cual resulta en una alternativa altamente promisoría para su uso extensivo.

LITERATURA CITADA

- Abhilash P.C., Powell J.R., Singh H.B., Singh B.K. 2012. Plant-microbe interactions: novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies. *Trends in Biotechnology* 30: 416-420.
- Argumedo-Delira R. 2005. Caracterización de rizobacterias aisladas de suelos contaminados con metales pesados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A. 2012. Aplicación de fitotecnologías en suelos. XXXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Zacatecas, Zacatecas. 11-16 noviembre 2012.
- Cherian S., Weyens N., Lindberg S., Vangronsveld J. 2012. Phytoremediation of trace element-contaminated environments and the potential of endophytic bacteria for improving this process. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42: 2215-2260.
- Cuellar-Sánchez A., González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R. 2011. Production of extraradical mycelium and its metal immobilization capacity in the association *Glomus mosseae* BEG25-sorghum. *Revista Latinoamericana El Ambiente y las Ciencias* 1: 1-11.
- Cuellar-Sánchez A., González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R., Delgado-Alvarado A., Suárez-Espinosa J., Solís Domínguez F., Maldonado Mendoza I. 2016. Hongos micorrízico arbusculares y *Ricinus communis* en la fitorremediación de un suelo contaminado con residuos de batería de automóvil. VIII Simposio Nacional y V Reunión Iberoamericana de la Simbiosis Micorrízica. 20-24 junio. Oaxtepec, Morelos.
- El-Baz S, Baz M., Barakate L., Hassani L., El-Gharmali A., Imziln B. 2015. Resistance to and Accumulation of Heavy Metals by Actinobacteria Isolated from Abandoned Mining Areas. *Hindawi Publishing Corporation Article ID 761834*.
- El-Enany A.A., Issa A.A. 2000. Cyanobacteria as a biosorbent of heavy metals in sewage water. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 8: 95-101.
- González-Chávez, M.C.A. 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *TERRA Latinoamericana* 23: 29-37.
- González Chávez, M.C.A. 2009. Bio-recuperación de suelos contaminados con elementos potencialmente tóxicos: uso de hongos arbusculares. *In: Ecología de micorrizas arbusculares y restauración de ecosistemas*. FJ Álvarez (ed.). Las prensas de ciencias. pp. 305-322.
- González-Chávez C., D'Haen J., Vangronsveld J., Dodd, J.C. 2002a. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of different *Glomus* spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil* 240, 287-297.
- González Chávez M.C., Dodd J.C., Harris P., Meharg A. 2002b. Arsenate resistance in arbuscular mycorrhizal associations: implications for phosphorus nutrition of plants. *New Phytologist* 155: 163-171.
- González-Chávez, M.C.A., Carrillo-González R., Wright S.F., Nichols K.A. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution* 130: 317-323.
- González-Chávez, M.C.A., Carrillo González R., González-Ramírez P., Díaz Garduño M.L. 2005. Remediation of Polluted soils using rhizospheric microorganisms and plants. I. Identification and characterization. 8th International Conference on the Biogeochemistry of trace elements. April 3-7th. Adelaide, Australia.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R., Gutiérrez-Castorena M.C. 2009. Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: The role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Hazardous Materials* 161: 1288-1298.
- González-Chávez, M.C., Ortega-Larrocea, M.P., Carrillo-González, R., López-Meyer, M., Xoconostle-Cazares, B., Gómez S.K., Harrison, M.J., Figueroa-López, A.M., Maldonado-Mendoza, I. E. 2011. Arsenate induces the expression of fungal genes involved in As transport in arbuscular mycorrhiza. *Fungal Biology* 115: 1197-1209.
- González-Chávez, M.C., Carrillo-González, R. 2013a. Tolerance of *Chrysanthemum maximum* to heavy metals: the potential for its use in the revegetation of tailings heaps. *Journal of Environmental Sciences* 25: 367-375.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo González R. 2013b. Enlazando fitorremediación de sitios contaminados y secuestro de carbono como servicio ambiental. IV Simposio Internacional del Carbono en México. 20 - 24 de mayo del 2013. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- González-Chávez M.C.A., Miller B., Maldonado-Mendoza I.E., Scheckel K., Carrillo-González R. 2014. Speciation of Arsenic in *Glomus intraradices* by Synchrotron Radiation Spectroscopic Analysis. *Fungal Biology* 118: 444-452.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R., Hernández-Godínez I., Evangelista Lozano S. 2016. *Jatropha curcas* and assisted phytoremediation of a mine tailing with biochar and a mycorrhizal fungus. *International Journal of Phytoremediation* doi.org/10.1080/15226514.2016.1207602.
- González-Guerrero M, Azcón-Aguilar C, Mooney M, Valderas A, MacDiarmid CW, Eide DJ, Ferrol N. 2005. Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. *Fungal Genetics and Biology* 42: 130-140.

- González-Guerrero M, Cano C, Azcón-Aguilar C, Ferrol N. 2007. GintMT1 encodes a functional metallothionein in *Glomus intraradices* that responds to oxidative stress. *Mycorrhiza* 17: 327-35.
- González-Guerrero M, Melville LH, Ferrol N, Lott JNA, Azcón-Aguilar C, Peterson RL. 2008. Ultrastructural localization of heavy metals in the extraradical mycelium and spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *Canadian Journal of Microbiology* 54: 103-110.
- Guo W., Zhao R., Zhao W., Fu R., Guo J., Bi N., Zhang J. 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grown in rare earth elements of mine tailings. *Applied Soil Ecology* 72: 85-92.
- Joner E.J., Briones R., Leyval C. 2000. Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. *Plant Soil* 226: 227-234.
- Juwarkar A.A., Singh S.K., Mudhoo A. 2010. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 9: 215-288.
- Khan A.G. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18: 355-364.
- Khan A.G. 2006. Mycorrhizoremediation: an enhanced form of phytoremediation. *Journal of Zhejiang University Science B* 7: 503-514.
- Li H.Y., Wei D.Q., Shen M., Zhou Z.P. 2012. Endophytes and their role in phytoremediation. *Fungal Diversity* 54: 11-18.
- Ma Y., Prasad M.N.V., Rajkumar M., Freitas H. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances* 29: 248-258.
- Miransari M. 2011. Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnology Advances* 29: 645-653.
- Mathur N., Bohra J.S.S., Quaizi A., Vyas A. 2007. Arbuscular mycorrhizal fungi: a potential tool for phytoremediation. *Journal of Plant Sciences* 2: 127-140.
- Mehta S.K., Gaur J.P. 2005. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects. *Critical Reviews in Biotechnology* 25: 113-152.
- Navarro-Noya Y. E., Jan-Roblero J., González-Chávez M.C.A., Hernández-Gama R., Hernández-Rodríguez C. 2010. Bacterial communities associated with the rhizosphere of pioneer plants (*Bahia xylopoda* and *Viguiera linearis*) growing on heavy metals-contaminated soils. *Antonie van Leeuwenhoek* 97: 335-349.
- Ortega-Larrocea M.D.P., Xoconostle-Cazares B., Maldonado-Mendoza I.E., Carrillo-Gonzalez R., Hernández-Hernández J., Garduño M.D., López-Meyer M., Gómez-Flores L., González-Chávez M.C.A. 2010. Plant and fungal biodiversity from metal mine wastes under remediation at Zimapan, Hidalgo, Mexico. *Environmental Pollution* 158: 1922-1931.
- Sessitsch A., Kuffner M., Kidd P., Vangronsveld J., Wenzel W., Fallmann K., Puschenreiter M. 2013. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 60: 182-194.
- Shine AM, Shakya VP, Idnurm A. 2015. Phytochelatin synthase is required for tolerating metal toxicity in a basidiomycete yeast and is a conserved factor involved in metal homeostasis in fungi. *Fungal Biology and Biotechnology* 2: 1-21.
- Tamayo E, Gómez-Gallego T, Azcón-Aguilar C, Ferrol N. 2014. Genome-wide analysis of copper, iron and zinc transporters in the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. *Frontiers in Plant Science* 5: 1-13.
- Tisserant E, Malbreil M, Kuo A. 2013. Genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insight into the oldest plant symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 20117-20122.
- Velázquez-Aradillas J.C., Toribio-Jiménez J., González-Chávez M.C.A., Bautista F., Cebrián M.E., Esparza-García F.J., Rodríguez-Vázquez R. 2011. Characterisation of a biosurfactant produced by a *Bacillus cereus* strain tolerant to cadmium and isolated from green coffee grain. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 27: 907-913.