

# Características de sustratos e identificación de plantas micorrizadas establecidas en presas de jales del distrito minero de Pachuca

Lucía V. Juárez Vázquez<sup>1</sup>, Gilberto Vela Correa<sup>1</sup>, Enrique Cruz Chávez<sup>2</sup>, Aurora Chimal Hernández<sup>1</sup>, Otilio A. Acevedo Sandoval<sup>2</sup> y Facundo Rivera Becerril<sup>1</sup>

**Resumen.** En el distrito minero de Pachuca se encuentran depositadas varias presas de jales como consecuencia de la explotación de oro y plata. Los objetivos de este trabajo fueron caracterizar física y químicamente los sustratos de tres depósitos (CEUNI, CE; Mina de Acosta, MA; Campo de Golf, CG), así como identificar algunas de las especies vegetales establecidas asociadas a hongos micorrízico arbusculares. Los sustratos de las tres presas presentan una textura franco-arenosa y franco-limosa, son deficientes en materia orgánica y nutrimentos; poseen un pH cercano a la neutralidad. Se identificaron trece especies vegetales (*Acmella repens* [Walter] Rich., *Atriplex muricata* Humb. & Bonpl. ex Willd., *A. semibaccata* R. Br., *Baccharis conferta* Kunth., *B. serraefolia* D. C., *Brassica rapa* L. sin. *Brassica campestris* L., *Chenopodium album* L., *Eruca sativa* Mill., *Hordeum jubatum* L., *Parinsonia aculeata* L., *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov., *Reseda luteola* L. y *Sonchus oleraceus* L.) de amplia distribución en ambientes perturbados o pobres en nutrimentos, algunas de ellas introducidas en México. El sistema radical de *S. oleraceus* presentó colonización micorrízico arbuscular elevada; esta especie podría ser utilizada en procesos de vegetación o fitorremediación de desechos mineros.

<sup>1</sup> Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-X, e-mail: frivera@correo.xoc.uam.mx

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

**Palabras Clave:** Fitorremediación, hongos micorrízico arbusculares, Pachuca, *Sonchus oleraceus*

**Abstract.** Several tailings deposits are found in the mining district of Pachuca, Mexico, as byproducts of gold and silver mining activities. The aims of this study were to 1) describe the physical and chemical properties of the substrates at three tailings sites (CEUNI, CE; Mina de Acosta, MA; Campo de Golf, CG), and 2) identify some mycorrhizal plant species growing at these sites. Texture in the three tailings was described as sandy loam and silty loam; substrates were low in organic matter and nutrient content; pH ranged from slightly acid to neutral. Thirteen plant species common to perturbed or nutrient-deficient soils were identified at the sites (*Acmella repens* (Walter) Rich., *Atriplex muricata* Humb. & Bonpl. ex Willd., *A. semibaccata* R. Br., *Baccharis conferta* Kunth., *B. serraeifolia* D. C., *Brassica rapa* L. sin. *Brassica campestris* L., *Chenopodium album* L., *Eruca sativa* Mill., *Hordeum jubatum* L., *Parkinsonia aculeata* L., *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov., *Reseda luteola* L. y *Sonchus oleraceus* L.), some of which were introduced to Mexico. In addition, roots of *S. oleraceus* showed high levels of arbuscular mycorrhizal colonization. This plant species could be considered in vegetation or phytoremediation processes of tailings deposits.

**Key Words:** Arbuscular mycorrhizal fungi, Pachuca, phytoremediation, *Sonchus oleraceus*

**Résumé.** Dans le district minier de Pachuca, Mexique, se trouvent plusieurs terrils comme conséquence de l'exploitation d'or et d'argent. Les objectifs de ce travail sont de caractériser physiquement et de manière chimique les couches de sol de trois dépôts (CEUNI, CE; Mina de Acosta, MA; Campo de Golf, CG), ainsi qu'identifier certaines espèces végétales établies, associées aux champignons mycorrhizes arbusculaires. Les couches de sol des trois terrils présentent une texture à dominante sableuse y à dominante limoneuse, les sols sont en déficit de matière organique et de nutriments; ils possèdent un pH proche de la neutralité.

*Treize espèces végétales sont identifiées (Acmella repens (Walter) Rich., Atriplex muricata Humb. & Bonpl. ex Willd., A. semibaccata R. Br., Baccharis conferta Kunth., B. serraefolia D. C., Brassica rapa L. sin. Brassica campestris L., Chenopodium album L., Eruca sativa Mill., Hordeum jubatum L., Parkinsonia aculeata L., Pennisetum clandestinum Hochst. ex Chiov., Reseda luteola L. y Sonchus oleraceus L.) qui sont de grande distribution dans des ambiances perturbées ou pauvres en nutriments, certaines ont été introduites au Mexique. Le système radical de S. oleraceus présente une colonisation mycorhize arbusculaire élevée; cette espèce pourrait être utilisée dans des processus de végétation ou phytoremédiation des déchets miniers.*

**Mots-clés:** *phytoremédiation, champignon mycorhize arbusculaire, Pachuca, Sonchus oleraceus*

## INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 500 años la minería ha sido una actividad económica relevante en México debido a la riqueza de sus yacimientos. Los procesos de explotación minera generan una gran cantidad de desechos denominados jales (Mendez y Maier, 2008), que, la mayoría de las veces, son acumulados a cielo abierto en presas. Cientos de millones de toneladas de estos materiales se encuentran depositados en diferentes sitios en nuestro país, generalmente cerca de las minas de origen, de los cuales poco se conoce acerca de sus características físicas y químicas y los riesgos potenciales para el ambiente debido a que pueden contener elementos o compuestos tóxicos (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006). Los desechos mineros son materiales susceptibles de ser frecuentemente transportados por acción del viento y del agua hacia la atmósfera, el suelo y los mantos freáticos, y de esta forma alcanzar asentamientos humanos.

El estado de Hidalgo posee un largo historial como sitio minero; numerosas presas de jales forman parte del paisaje en su territorio. Se estima que en el distrito minero de Real del Monte y Pachuca existen por lo menos cien mil toneladas de desechos acumulados como consecuencia de la extracción de oro y plata (Eslava, 1995). En un trabajo previo (Castañeda, 2002) fue analizado el contenido de diversos metales en lixiviados de jales de Pachuca, donde el cadmio alcanzó niveles tóxicos.

Los jales a menudo son colonizados por diferentes especies vegetales, pero el establecimiento de la vegetación está determinado por las características químicas del sustrato, el régimen de humedad y los microorganismos presentes en los desechos (bacterias y hongos), entre otros factores. En un trabajo llevado a cabo por Carrillo y González-Chávez (2006) fueron reportadas especies vegetales de distintas familias, establecidas en desechos mineros de Zacatecas, incluyendo *Polygonum aviculare* y *Jatropha dioica*, plantas acumuladoras de Zn. Más recientemente, en desechos mineros de plata fue descrita la presencia de plantas asociadas a hongos micorrízico arbusculares (HMA), simbioses de raíz (González-Chávez *et al.*, 2009). Este grupo fúngico del suelo, al establecer una interacción mutualista con las plantas, contribuye a incrementar la tolerancia vegetal contra las características físicas y químicas adversas de los jales, incluyendo el contenido de elementos o compuestos tóxicos (Leyval *et al.*, 1997). Plantas y HMA pueden atenuar en forma natural la toxicidad de contaminantes en los sustratos (González-Chávez *et al.*, 2009), por lo que ambos simbioses deben ser considerados en procesos de fitorremediación (Jeffries *et al.*, 2003). Asimismo, la cubierta vegetal impide el transporte de las partículas de los desechos por el viento o el agua.

Con base en estos antecedentes, los objetivos de este trabajo fueron: i) caracterizar física y químicamente los sustratos de tres presas de jales de Pachuca, e ii) identificar algunas de las especies vegetales

micorrizadas establecidas con potencial de uso en procesos de fitorremediación.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA, MÉTODOS Y TÉCNICAS

Se realizaron dos muestreos (19 de febrero y 26 de mayo, 2005) de suelo y vegetación en periodo de floración en tres presas de jales depositadas a cielo abierto en el distrito minero de Pachuca: a) CEUNI (CE; 20°06'28" latitud Norte, 98°42'49" longitud Oeste), b) Campo de Golf (CG; 20°04'42" latitud Norte, 98°45'50" longitud Oeste) y c) Mina de Acosta (MA; 20°04'34" latitud Norte, 98°45'51" longitud Oeste). En cada presa se tomaron tres muestras de sustratos a una profundidad de 0-10 cm, en la zona cercana a las raíces de algunas plantas (suelo rizosférico); los tejidos (raíces, hojas, tallos e inflorescencias) de entre uno y tres ejemplares de esas especies vegetales fueron colectados y prensados para su identificación en el herbario (López, 1988; Rzedowski *et al.*, 2001). El suelo adherido a las raíces de las plantas fue separado manualmente; las raíces se almacenaron a 4°C para cuantificar posteriormente los niveles de micorrización.

En lo que concierne a los análisis físicos y químicos de los sustratos, la densidad real y la densidad aparente fueron estimadas por medio del picnómetro y núcleos inalterados de suelo, respectivamente (Semarnat, 2002); posteriormente se calculó el espacio poroso de acuerdo con Gavande (1979). La textura fue determinada a través del método de Bouyoucos (Semarnat, 2002). Se midió el pH de los sustratos con un potenciómetro con electrodo de vidrio en una relación 1:2.5 de sustrato y agua. La materia orgánica se estimó mediante el método de combustión en húmedo de Walkley y Black (1947), el fósforo disponible por el procedimiento de Bray 1 (Jackson, 1982), el contenido de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> por el método del versenato (Semarnat, 2002) y el Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> por flamometría. Finalmente, la cuantificación de óxidos totales se llevó a cabo por fluorescencia de rayos X en un analizador SIEMENS SRS 3000 en el Instituto de Geología, UNAM.

Para estimar el grado de colonización por los HMA, las raíces fueron clarificadas con KOH al 10% y teñidas con azul de tripano (Phillips y Hayman, 1970) en lactoglicerol. A continuación se depositaron 30 segmentos de 1 cm en un portaobjetos con glicerol para su observación al microscopio. Los niveles de micorrización se calcularon considerando la intensidad de la colonización micorrízica (hifas, vesículas, arbusculos; M%), así como la abundancia de arbusculos (A%) en el córtex del sistema radical (Trouvelot *et al.*, 1986), con el programa MycoCalc ([www.dijon.inra.fr/bbceipm/Mychintec/](http://www.dijon.inra.fr/bbceipm/Mychintec/)).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características físicas y químicas de los sustratos

La densidad aparente ( $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$ ) de los sustratos fue la misma en los diferentes sitios, mientras que la densidad real estuvo comprendida entre 2.5 y  $2.6 \text{ Mg m}^{-3}$  (Cuadro 1). Los valores de densidad aparente corresponden a materiales sueltos de granulometría gruesa como las arenas; asimismo, los niveles de densidad real sugieren que predomina la fracción mineral atribuida al origen geológico de las arenas derivadas de rocas intermedias ricas en  $\text{SiO}_2$  (cuarzo). El espacio poroso en todos los casos fue cercano a 50%, debido a que los materiales fueron depositados en capas con el empleo de maquinaria; ello favoreció el enraizamiento de las plantas que han logrado adaptarse a las condiciones de estos sustratos (Ramos-Bello *et al.*, 2001).

Los sustratos de las presas CE y MA se caracterizaron por su alto contenido en arenas (65%); los tres sitios presentaron baja proporción en arcillas (3-7%). De esta forma, la textura en los sitios CE y MA fue migajón-arenosa, en tanto que en CG correspondió a migajón-limosa, favoreciendo los procesos de lavado de bases o de metales a capas más profundas de los sustratos o incluso de los suelos. El pH se considera neutro en CG y MA, en tanto que en CE fue ligeramente ácido (Cuadro 1); el pH

tiende a la neutralidad debido a que los cationes liberados no se pierden por lixiviación, es decir, los sustratos no se acidifican debido a la escasa precipitación pluvial.

La concentración ínfima de materia orgánica (0.5-0.6%) en los jales de Pachuca es atribuida a la falta de cobertura vegetal como una consecuencia, a su vez, de la porosidad de los sustratos que favorece la baja retención de humedad, y del escaso aporte nutrimental (fósforo,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , como se describe en seguida). En el sitio MA el fósforo disponible no se detectó, mientras que en CE y CG alcanzó 0.76 y 0.2  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente (Cuadro 1). La baja disponibilidad de fósforo se atribuye a que este elemento es retenido por los hidróxidos de aluminio y hierro que se han formado gracias a los procesos de intemperismo del vidrio volcánico que contienen estos materiales (Shoji *et al.*, 1993; Moreno-Tovar *et al.*, 2009).

**Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los sustratos aledaños a las raíces vegetales en tres depósitos de jales del distrito minero de Pachuca**

Características físicas	CE	CG	MA
Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.2	1.2	1.2
Densidad real ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	2.6	2.6	2.5
Porosidad (%)	45.8	46.2	50.5
Arena (%)	64.9	46.1	64.8
Limo (%)	32	46.4	39.3
Arcilla (%)	3	7.3	3.6
Textura	Migajón-arenosa	Migajón-arenosa	Migajón-arenosa

Características químicas	CE	CG	MA
pH	6.5	7.2	7.2
Materia orgánica (%)	0.5	0.6	<b>0.6</b>
Fósforo disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	0.76	0.20	0
<i>Bases intercambiables (meq 100 g<sup>-1</sup>)</i>			
Ca <sup>2+</sup>	1.9	3.6	2.7
Na <sup>+</sup>	0.8	0.8	0.4
Mg <sup>2+</sup>	0.06	0.03	0.01
K <sup>+</sup>	0.05	0.01	0.02
Óxidos totales (%)			
SiO <sub>2</sub>	55.1	55.9	56.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	8.2	8.5
SO <sub>4</sub>	5.9	3.8	5.4
CO <sub>3</sub>	4.9	3.6	2.9
K <sub>2</sub> O	3.0	3.6	3.5
CaO	3.5	3.2	3.3
MgO	1.0	1.2	1.2
Na <sub>2</sub> O	0.7	1.0	1.0
MnO	0.5	0.9	0.8
FeO	0.5	0.9	0.8
TiO <sub>2</sub>	0.3	0.3	0.3

CE, CEUNI; CG, Campo de Golf; MA, Mina de Acosta. Los resultados son el promedio de tres repeticiones.



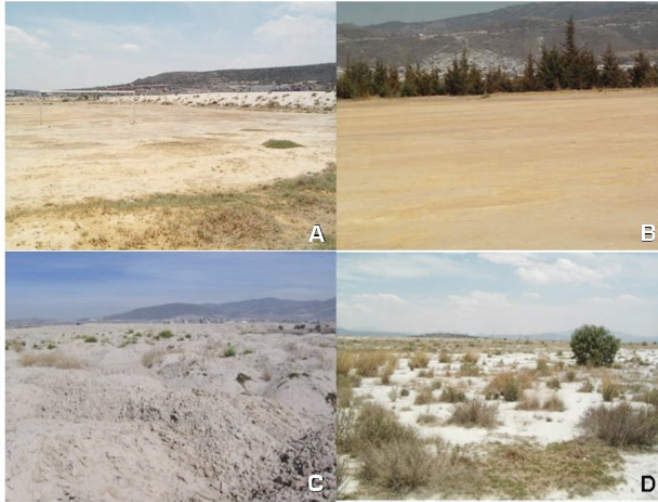
Las concentraciones de bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) fueron bajas en los tres jales y el complejo de saturación estuvo dominado por el  $\text{Ca}^{2+}$  proveniente de los feldespatos cálcicos que abundan en las rocas de la región donde prevalecen las andesitas y las dacitas, así como diversos materiales de tipo piroclástico (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2002).

En lo que respecta a los óxidos, predominó el  $\text{SiO}_2$ , seguido por el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y  $\text{CO}_3$  (Cuadro 1). Esta concentración de óxidos es un reflejo del escaso grado de alteración de los minerales, donde prevalece el  $\text{SiO}_2$ , por lo que se sugiere que la composición de los sustratos de desecho es muy cercana al material parental (andesitas, dacitas). Por otra parte, la presencia de  $\text{SO}_4$ , con valores de 3.8 a 5.9% se atribuye a la oxidación férrica y a la posible precipitación de minerales sulfurosos primarios como la pirita, que es muy común en la zona de Pachuca.

## **Especies vegetales establecidas asociadas a hongos micorrízico arbusculares**

Aún cuando las propiedades físicas y químicas imponen ciertas limitaciones, los desechos mineros son frecuentemente colonizados por diferentes especies vegetales como ha sido previamente documentado (Turnau *et al.*, 2001; Carrillo y González-Chávez, 2006). En el sitio CE, menos del 50% del área está cubierta por vegetación; este depósito ha sido habilitado para la práctica de diferentes deportes por lo que fue compactado y nivelado. Por su parte, en CG y MA, alrededor de 20% y más de 50% del área, respectivamente, se encuentra cubierta por vegetación herbácea y arbustiva (Figura 1).

**Figura 1. Vista general de los tres depósitos de jales del distrito minero de Pachuca considerados en este estudio**



A-B) CEUNI, donde se aprecian sitios habilitados para practicar deportes, así como algunos *Cupressus* spp. introducidos; C) Campo de Golf, con manchones de herbáceas; D) Mina de Acosta, cuya superficie está colonizada por diferentes especies de herbáceas y arbustivas.

En las tres presas de jales de Pachuca se identificaron trece especies vegetales pioneras (Cuadro 2), de amplia distribución en ambientes perturbados o pobres en nutrientes o desnudos con elevada producción de semillas, la mayoría de ellas introducidas en México (Villaseñor y Espinosa, 1998; Rzedowski *et al.*, 2001): *Acmella repens* (Walter) Rich., *Atriplex muricata* Humb. & Bonpl. ex Willd., *A. semibaccata* R. Br., *Baccharis conferta* Kunth., *B. serraefolia* D. C., *Brassica rapa* L. sin. *Brassica campestris* L., *Chenopodium album* L., *Eruca sativa* Mill., *Hordeum jubatum* L., *Parkinsonia aculeata* L., *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov., *Reseda luteola* L. y *Sonchus oleraceus* L.

**Cuadro 2. Especies vegetales identificadas en tres depósitos de jales del distrito minero de Pachuca y niveles de micorrización en las raíces de algunas de ellas. Intensidad de colonización micorrízica (M%) y abundancia de arbusculos (A%) en el sistema radical**

Planta	Familia	M%	A%
Jale CEUNI			
<i>Atriplex semibaccata</i> *	Chenopodiaceae	–	–
<i>Baccharis conferta</i> (n=3)	Asteraceae	6.4	0
<i>Parkinsonia aculeata</i>	Fabaceae	–	–
<i>Pennisetum clandestinum</i> * (n=2)	Poaceae	0.5	0
Jale Campo de Golf			
<i>Atriplex muricata</i>	Chenopodiaceae	–	–
<i>Brassica rapa</i> * (n=2)	Brassicaceae	0	0
<i>Chenopodium album</i> * (n=2)	Chenopodiaceae	0.6	0
<i>Eruca sativa</i> *	Brassicaceae	–	–
<i>Pennisetum clandestinum</i> *	Poaceae	–	–
<i>Reseda luteola</i> * (n=2)	Resedaceae	0	0
<i>Sonchus oleraceus</i> * (n=3)	Asteraceae	47.3	20.1
Jale Mina de Acosta			
<i>Acmella repens</i>	Asteraceae	–	–
<i>Baccharis serraefolia</i>	Asteraceae	–	–
<i>Hordeum jubatum</i> *	Poaceae	–	–

\*Especies introducidas en México (Villaseñor y Espinosa, 1998; Rzedowski et al., 2001). – no determinada

*Eruca sativa* y *B. rapa* pertenecen a la familia Brassicaceae, cuyos miembros no se asocian con HMA (Smith y Read, 1997). *S. oleraceus* mostró una elevada intensidad de colonización micorrízica (47%) y abundancia de arbuscúlos (20%) en el sistema radical. Los arbuscúlos se consideran como rasgo morfológico definitivo para determinar la presencia de HMA en una raíz (McGonigle *et al.*, 1990), puesto que hifas y vesículas también son formadas por otros grupos de hongos. Las especies vegetales establecidas, así como la presencia de HMA asociados a ellas, podrían estar atenuando, en conjunto, el estrés ambiental (González-Chávez *et al.*, 2009) que en este caso es impuesto por la textura gruesa y las condiciones nutrimentales deficientes de los sustratos.

La cobertura vegetal protege los desechos mineros del arrastre eólico e hídrico, disminuye la energía del impacto de las gotas de lluvia, las raíces retienen las partículas y la humificación de la materia orgánica contribuye con la agregación e incrementa su capacidad de retención de humedad. La actividad de los microorganismos asociados a las plantas, particularmente aquellos que se encuentran en la rizosfera, es fundamental para el establecimiento vegetal en los jales, así como para la transformación de los sustratos en ambientes menos hostiles. Se reconoce ampliamente la participación de los hongos del suelo en procesos de formación de agregados (Gianinazzi *et al.*, 2010) y por ende, en la retención de agua.

Hace algunos años los trabajos de fitorremediación de sitios contaminados con metales pesados se enfocaban principalmente en el uso de especies vegetales no micotróficas como las pertenecientes a la familias Caryophyllaceae y Brassicaceae (Pawlowska *et al.*, 2000). Sin embargo, recientemente se ha demostrado que las plantas asociadas a los HMA son eficientes en procesos de fitorremediación. Los HMA desempeñan un papel primordial en la productividad biológica dentro de los jales; confieren una mayor tolerancia vegetal contra el estrés abiótico impuesto por los sustratos.

En este trabajo, *S. oleraceus* exhibió altos niveles de micorrización en el sitio CG de Pachuca; su presencia podría estar constituyendo lo que se conoce como "islas de recursos" ricas en propágulos fúngicos micorrí-

zicos en los sustratos (Camargo-Ricalde y Dhillion, 2003) como ha sido reportado en plantas creciendo en desechos mineros de plata (González-Chávez *et al.*, 2009). Asimismo, *S. oleraceus* es considerada como una especie vegetal de utilidad potencial para la remoción de cadmio (Khan *et al.*, 1998), plomo y zinc (Xiong, 1997; Pawlowska *et al.*, 2000).

## CONCLUSIONES

Este estudio lleva a concluir que los sustratos de las tres presas de jales de Pachuca presentan una textura gruesa, predominando la franco-arenosa y la franco-limosa; son pobres en materia orgánica y en nutrimentos; poseen un pH cercano a la neutralidad como resultado del escaso nivel de intemperismo a que están sujetos estos materiales. Asimismo, se identificaron trece especies vegetales, algunas de ellas de amplia distribución en ambientes perturbados; en los tres jales hubo miembros de la familia Asteraceae. Finalmente, los niveles más elevados de colonización micorrízica fueron observados en *S. oleraceus*, por lo que es un candidato para evaluar su potencial de uso en procesos de vegetación o fitorremediación de jales; su presencia podría estar incrementando el número de propágulos micorrízicos que podrían a su vez colonizar otras especies vegetales o permitir el establecimiento de plantas no tolerantes a ambientes inhóspitos y/o contaminados.

## AGRADECIMIENTOS

Al editor y a los revisores anónimos por sus valiosas observaciones para mejorar el contenido de este artículo.

## REFERENCIAS

- Acevedo, O. *et al.*, 2002, "Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico", en *Agrociencia*, 36: 401-409.
- Camargo, S. y S. Dhillion, 2003, "Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal 'resource islands' within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico", en *Mycorrhiza*, 13: 129-136.
- Carrillo, R. y M. González, 2006, "Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes", en *Environmental Pollution*, 144: 84-92.
- Castañeda, E., 2002, *Experimentos de laboratorio para evaluar los solutos lixiviables en jales del distrito minero Pachuca-Real del Monte*, Tesis de maestría, UNAM, México, D.F.
- Eslava, A., 1995, *Determinación de algunos metales en jales de la mina de Real del Monte, Hgo., por medio de análisis por activación neutrónica*, Tesis de maestría, UNAM, México, D.F.
- Gavande, A., 1979, *Física de suelos: principios y aplicaciones*, Limusa, México D.F.
- Gianinazzi, S., *et al.* 2010, "Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services", en *Mycorrhiza*, 20: 519-530.
- González-Chávez, M. *et al.*, 2009, "Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: the role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi", en *Journal of Hazardous Materials*, 161: 1288-1298.
- Jackson, L., 1982, *Análisis químico de suelos*, Omega, Barcelona.
- Jeffries, P. *et al.*, 2003, "The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility", en *Biology and Fertility of Soils*, 37: 1-16.
- Khan, G. *et al.*, 1998, "Physical, chemical and biological characterisation of a steelworks waste site at Port Kembla, NSW, Australia", en *Water, Air and Soil Pollution*, 104: 398-402.
- Leyval, C. *et al.*, 1997, "Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects", en *Mycorrhiza*, 7: 139-153.

- López, F., 1988, *El herbario*, Universidad Autónoma de Chapingo, Montecillo.
- McGonigle *et al.*, 1990, "A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi", en *New Phytologist*, 115: 495-501.
- Mendez, O. y M. Maier, 2008, "Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments-An emerging remediation technology", en *Environmental Health Perspectives*, 116: 278-283.
- Moreno, R. *et al.*, 2009, "Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero de Zimapán, estado de Hidalgo, México", en *Minería y Geología*, 25(2): 1-30.
- Pawlowska, E. *et al.*, 2000, "Effects of metal phytoextraction practices on the indigenous community of arbuscular mycorrhizal fungi at a metal-contaminated landfill", en *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 2526-2530.
- Phillips, M. y S. Hayman, 1970, "Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection", en *Transactions of the British Mycological Society*, 55: 158-161.
- Ramos, R. y Siebe, C., 2006, "Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México", en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23: 54-74.
- Ramos, R. *et al.*, 2001, "Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México", en *Agrociencia*, 35: 385-395.
- Rzedowski, C. *et al.*, 2001, *Flora fanerogámica del Valle de México*, Instituto de Ecología A. C., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro.
- Semarnat, 2002, Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección, México, DF.

- Shoji, S. *et al.*, 1993, *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization*, Elsevier, Amsterdam.
- Smith, E. y J. Read, 1997, *Mycorrhizal symbiosis*, Academic Press, Londres.
- Trouvelot, A. *et al.*, 1986, "Measure du taux de mycorhisation VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle", en Gianinazzi, V. y S. Gianinazzi (comps.), *Mycorrhizae: Physiology and genetics*, INRA Press, París.
- Turnau, K. *et al.*, 2001, "Identification of arbuscular mycorrhizal fungi in soils and roots of plants colonizing zinc wastes in Southern Poland", en *Mycorrhiza*, 10: 169-174.
- Villaseñor, J. y G. Espinosa, 1998, *Catálogo de malezas de México*, Serie Texto Científico Universitario, UNAM y Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- Xiong, T., 1997, "Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus oleraceus* L", en *Environmental Pollution*, 97: 275-279.
- Walkley, A. y A. Black, 1947, "An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method", en *Soil Science*, 37: 29-38.