

---

# FLORA QUE CRECE NATURALMENTE EN PRESAS DE JALE MINERO ABANDONADAS SUSCEPTIBLES DE SER UTILIZADAS EN RECLAMACIÓN, ZIMAPÁN, HIDALGO, MÉXICO

---

Cecilia Elizondo, Marco A. Márquez-Linares, M. Liliana Marín-García y Pedro Joaquín Gutiérrez-Yurrita

## RESUMEN

Las especies vegetales resistentes a los residuos mineros son ampliamente utilizadas en reclamación de sitios con problemas de contaminación e impactos estéticos negativos en el paisaje. En este estudio trabajamos en la microcuenca San Miguel, próxima a la Comunidad de San Francisco, Zimapán, Hidalgo, México, en dos depósitos de desperdicios de plantas de beneficio minero ('jales') abandonados en diferentes tiempos y bajo distintas condiciones ambientales. El concepto de reclamación ecológica está asociado a realizar acciones conducentes a redirigir los procesos ecológicos para regresar un ecosistema deteriorado por el hombre a unas condiciones inmediatas

anteriores a su perturbación, recobrar parte de sus funciones ecológicas o minimizar los efectos adversos de las operaciones de minería de superficie y subterráneas. Así, las tierras se recuperan para usos alternativos sin peligro para la salud o la seguridad pública. El objetivo del presente trabajo fue conocer las especies de flora que crecen naturalmente en presas de jales, considerando que pudieran ser utilizadas en una futura estrategia de reclamación del sitio. El inventario de especies botánicas encontradas asciende a 76 especies, divididas en 59 géneros y 28 familias. La mayoría son generalistas (nativas y exóticas), resistentes al estrés hídrico y de amplia distribución.

---

## Introducción

En los últimos años se han incrementado las estrategias para lograr que la actividad minera se desarrolle en mejores condiciones sociales, laborales y ecológicas, como alternativas de la reclamación de sitios mineros abandonados, focos de contaminación ambiental y problemas de salud pública (Romero *et al.*, 2008; Menéndez, 2010; Santos-Jallath *et al.*, 2012; Martínez-Villegas *et al.*, 2013). Algunas de esas alternativas se relacionan con revegetación de los depósitos de desperdicios de plantas de beneficio minero o 'jales', como práctica inicial para la reclamación (Peters, 1984; Azadpour y Matthews, 1996; Tordoff *et al.*, 2000; Conesa

*et al.*, 2007; Ortega-Larrocea *et al.*, 2010; Sheoran *et al.*, 2010; Mukhopadhyay *et al.*, 2013; Balaguer *et al.*, 2013).

Aunque en este trabajo no se lleva a cabo reclamación alguna del área, consideramos importante definir el término y qué se necesita para lograrla. Para ello se requiere de la comprensión del funcionamiento general del ecosistema, así como de la detección de los principales procesos ecológicos del entorno que le otorgan identidad al paisaje (Weng *et al.*, 2015). A diferencia de la restauración ecológica, en la reclamación no se persigue recuperar las funciones del ecosistema, sino que se pretende recuperar algunos de los procesos ecológicos (Gutiérrez-Yurrita, 2014a).

De acuerdo a Kavamura y Esposito (2010) y Srivastava *et al.*, (2014), los principales objetivos a cubrir con la reclamación es regresar al suelo su capacidad ecológica de productividad, incluyendo la microbiana y fúngica, lograr el progresivo establecimiento de especies colonizadoras de la región, así como el regreso de la fauna local, y abatir los índices de erosión. Al cubrir los aspectos estructurales y funcionales clave del ecosistema se generan las condiciones para que se recupere su capacidad ecológica en general (Gutiérrez-Yurrita y Montes, 1999). Es decir que el propósito de la mencionada acción es integrar varios elementos, especialmente botánicos, al ecosistema deteriorado para que éste pueda

recuperar su resiliencia, reducir su vulnerabilidad y permitir la coevolución de los elementos del sistema natural y de los antropogénicos que configuran el paisaje (Gutiérrez-Yurrita, 2014b).

La zona central de México, en particular, es de especial importancia como área donde se desarrolla la actividad minera, debido a la alta concentración de población que la habita y que vive de la minería (San Román *et al.*, 2013, Vallejo Miranda, 2015). Por las escasas alternativas laborales, esta actividad ha incrementado como opción laboral para la gente del campo, en especial de zonas semiáridas y de selva baja caducifolia. El gobierno federal y gobiernos locales impulsan esta actividad (Secretaría de Economía,

---

## PALABRAS CLAVE / Ecotoxicología / Minería / Paisaje / Plantas Tolerantes / Reclamación Ecológica /

Recibido: 09/02/2016. Modificado: 16/06/2016. Aceptado: 20/06/2016.

**Cecilia Elizondo.** Candidata a Doctora en Ciencias en Conservación del Patrimonio Paisajístico, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD), Instituto Politécnico Nacional, México. Responsable, Jardín

Botánico ECOSUR, Dr. Alfredo Barrera Marín. Dirección: ECOSUR Unidad Chetumal, Av. Centenario Km. 5.5, AP 424. Chetumal, Quintana Roo 77000, México. e-mail: ce10@hotmail.com  
**Marco A. Márquez-Linares.** Doctor en Manejo de Recursos

Naturales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Profesor Investigador, CIIDIR Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional, México.  
**M. Liliana Marín-García.** Doctora en Ciencias Químicas, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto

Politécnico Nacional, México. Investigadora Independiente.  
**Pedro Joaquín Gutiérrez-Yurrita.** Doctor en Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, España. Profesor Investigador, CIEMAD, Instituto Politécnico Nacional, México. e-mail: pguiterrezy@ipn.mx

## NATURALLY GROWING FLORA IN ABANDONED MINE TAILINGS SUSCEPTIBLE OF BEING USED IN RECLAMATION, ZIMAPÁN, HIDALGO, MEXICO

Cecilia Elizondo, Marco A. Márquez-Linares, M. Liliana Marín-García and Pedro Joaquín Gutiérrez-Yurrita

### SUMMARY

Reclamation through planting of species resistant to mining waste has been widely used in mine tailing sites. This study took place in two mine tailings abandoned at different times and under different environmental conditions, in the San Francisco community, Zimapán, Hidalgo, México. The concept of reclamation is the course to redirect the ecological processes of an ecosystem to its former conditions, or at least to recover its ecological functions, minimizing the adverse effects caused by surface and underground mining operations. Mine lands are

reclaimed to operational condition for alternate land uses and to reduce danger to public health or safety. The objective of the present research was to identify the species of flora that grow naturally in the mine sites, susceptible of being used in a future reclamation strategy of the site. Seventy-six plant species, grouped in 28 families and 59 genera, were found. Most of these species are generalists (native and exotic) and have proven their resistance to the soil conditions, water stress and climate changes, and are widely distributed.

## FLORA QUE CRESCE NATURALMENTE EM DIQUES DE RESÍDUO DE MINÉRIO ABANDONADOS SUSCETÍVEIS DE SEREM UTILIZADOS EM RECLAMAÇÃO, ZIMAPÁN, HIDALGO, MÉXICO

Cecilia Elizondo, Marco A. Márquez-Linares, M. Liliana Marín-García e Pedro Joaquín Gutiérrez-Yurrita

### RESUMO

As espécies vegetais resistentes aos resíduos de minério são amplamente utilizadas em reclamação de locais com problemas de contaminação e impactos estéticos negativos na paisagem. Neste estudo trabalhamos na microbacia San Miguel, próxima à Comunidade de San Francisco, Zimapán, Hidalgo, México, em dois depósitos de desperdiços de plantas de benefício mineiro ('jales') abandonados em diferentes tempos e sob distintas condições ambientais. O conceito de reclamação ecológica está associado a realizar ações conducentes a redirecionar os processos ecológicos para regressar um ecossistema deteriorado pelo homem a umas condições imediatas anteriores a sua per-

turbação, recobrar parte de suas funções ecológicas ou minimizar os efeitos adversos das operações de mineração de superfície e subterrâneas. Assim, as terras se recuperam para usos alternativos sem perigo para a saúde ou a segurança pública. O objetivo do presente trabalho foi conhecer as espécies de flora que crescem naturalmente em diques de resíduos ('jales'), considerando que puderam ser utilizadas em uma futura estratégia de reclamação do local. O inventário de espécies botânicas encontradas ascende a 76 espécies, divididas em 59 gêneros e 28 famílias. A maioria é generalista (nativas e exóticas), resistente ao estresse hídrico e de ampla distribuição.

2015), siendo en la actualidad el primer destino de inversión extranjera en minería de América Latina y el cuarto a nivel mundial (MEG, 2013).

Por la importancia que representa la actividad minera para el desarrollo económico, es necesario que en México se profundice en la investigación sobre alternativas de reclamación de sitios mineros y restauración ecológica en general, y en particular conocer las especies que pueden sobrevivir en ambientes degradados, para entonces ser utilizadas (Ceccon *et al.*, 2015).

El objetivo del presente trabajo fue identificar las especies de flora que crecen naturalmente en dos jales mineros abandonados. A futuro, la información puede ser utilizada en el diseño de programas específicos y continuos de reclamación ecológica en la microcuenca San Miguel, Zimapán (Hidalgo).

La geología que presenta el área de trabajo es de rocas de

origen marino del mesozoico, donde sobresalen afloramientos del jurásico al cretácico tardío, con abundantes calizas arcillosas en estratos delgados, piritita y arsenopiritita por ejemplo. Esto convierten a la microcuenca en un lugar natural con elevadas concentraciones de metales y metaloides potencialmente tóxicos (EPT): As, Pb, Cd, Cr, Cu y Zn (INE, 1987; Vallejo-Miranda, 2015). Estos metales inhiben el crecimiento de las plantas induciendo reacciones de estrés (Castillo-Ortiz, 2015), se forman sulfuros que se oxidan a sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y contribuyen a la reducción del pH en los jales (Prince, 2015). La acidificación asociada a los procesos de oxidación, favorece la movilización natural de especies químicas tóxicas limitantes de la actividad biológica (Ortiz *et al.*, 2007).

Sin embargo, estas condiciones geoquímicas naturales se

ven potenciadas por actividades antropocéntricas tales como la minería, al concentrar los residuos de sus procesos químicos, los llamados 'jales' (Reyes *et al.*, 2009; Romero y Gutiérrez, 2010). Aunque el establecimiento de una presa de jale, así como la gestión de las mismas está perfectamente normada por la autoridad (NOM-141-SEMARNAT-2003; NOM-157-SEMARNAT-2009), la peligrosidad de un jale aumenta al incrementar el potencial de lixiviación de metales o de elementos tóxicos solubles en agua, la edad de la presa y el mantenimiento que se le da a la misma (Rodríguez *et al.*, 2009). Para el caso de la zona de estudio se han encontrado concentraciones de plomo en agua de  $2034\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , ~20 veces superiores a las máximas permitidas por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, ya que las presas sobrepasan su vida útil y en su mayoría tienen

un mantenimiento medio-bajo (Vallejo-Miranda, 2015).

Por las características que presenta el sitio de estudio, se considera que los resultados obtenidos son fundamentales. Efectivamente, las especies encontradas han sido reportadas para las áreas circundantes, pero muy pocas en sitios de presas de jale (González-López, *et al.* 2015). La posibilidad que las 76 especies de plantas identificadas pueden estar colonizando el área es información novedosa y abre opciones de investigación sobre el uso de las mismas en la reclamación de jales mineros.

Igualmente se realizó una revisión bibliográfica sobre reclamación de sitios mineros abandonados, y sobre especies utilizadas para tal fin.

### Justificación del estudio

El inventario de especies botánicas es fundamental para

proponer una estrategia de reclamación, por lo que la información recabada en este trabajo podrá ser utilizada por la empresa minera si decide establecer acciones en esa dirección. Se realizaron muestreos longitudinales durante todo un año, por lo menos, que sirvieron como referente de la vegetación intranual. Este muestreo ayuda a conocer la ocurrencia de las especies en cada época del año y establecer con mayor claridad su fenología reproductiva y por tanto, su probabilidad de supervivencia en un jale (Ortega-Larrocea *et al.*, 2010).

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

La microcuenca San Miguel se localiza en el territorio de la comunidad San Francisco, Municipio de Zimapán, Hidalgo, México (Figura 1), a 144km al norte de la Ciudad de Pachuca, entre los paralelos 20°44'N y 99°23'O. Está a una altura de ~1780msnm (Mayorga Chávez, 1993).

La ubicación de los sitios de colecta es a 22km al norte de la cabecera Municipal de Zimapán y a 2,5km al nordeste de la Comunidad San Francisco, en el Noroeste del Esta-

do de Hidalgo, México, donde se ubica la minera (Figura 2). El conjunto de las presas de jales abandonadas están sobre el cauce del arroyo San Miguel, el cual fue desviado para establecer los jales, incluyendo la presa que aún mantiene en operación la minera (Carrizal Mining, 2012). La altura de la cortina de las presas de jales es de alrededor de los 60m, y almacena ~2,5×10<sup>6</sup>t de desperdicios de minería.

El clima predominante en la región es templado semiseco con lluvias en verano, de junio a septiembre (~70% de la precipitación media anual), y una temporada de secas invernal de diciembre a marzo; la precipitación media anual es de 449mm, con una temperatura media de 19°C; la oscilación térmica anual ronda los 5°C, siendo los más calurosos los que anteceden la temporada de lluvia (marzo a junio) y los más fríos los de mayor escasez de precipitación (noviembre a febrero) (Estación 00013044 Zimapán, serie 1951-2010; snm 2015).

La vegetación del área circundante es de bosque de pino-encino en una de las laderas, compuesto por asociaciones de *Pinus patula* (ocote rojo), *Quercus laurina* (encino manzanilla), *P. pseudostrobus*, *P. teocote* y *Q. rugosa*, *Juniperus*

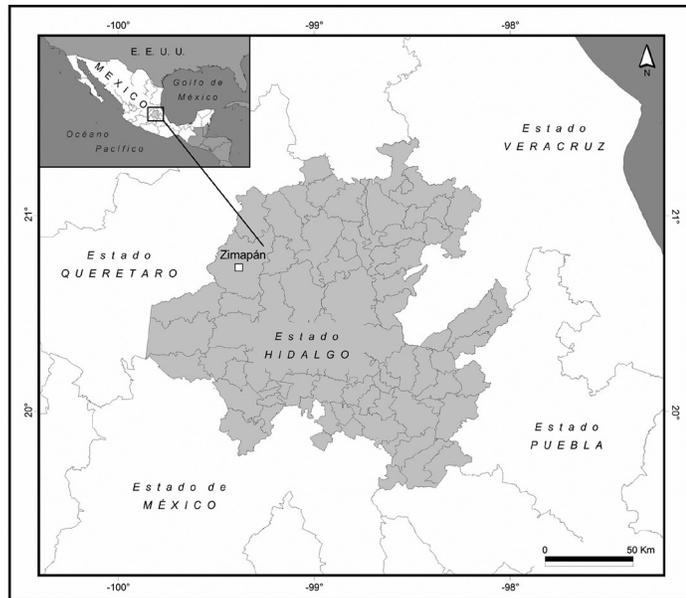


Figura 1. Ubicación del Municipio de Zimapán en el Estado de Hidalgo, México.

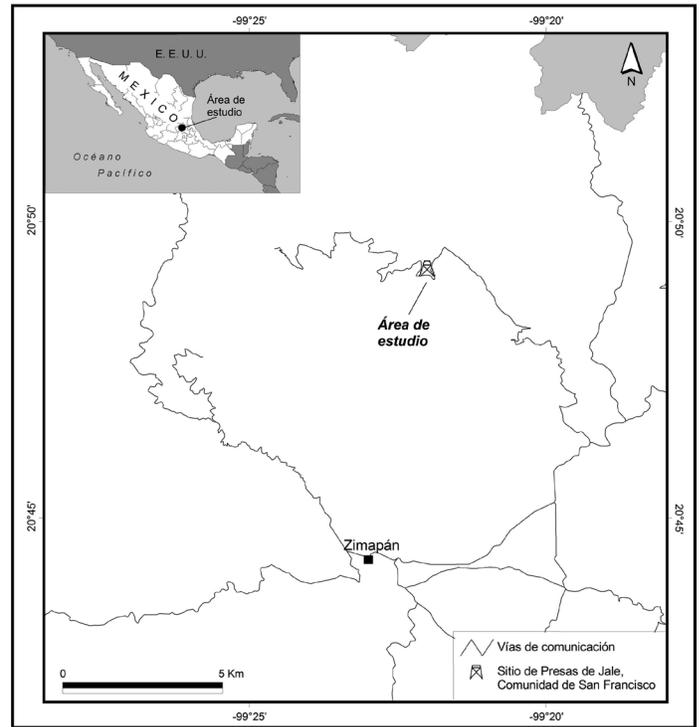


Figura 2. Ubicación del área de presas de jale en la comunidad de San Francisco, minera Carrizal Mining, Municipio de Zimapán, Hidalgo, México.

*deppeana* y *J. flaccida*. La distribución de este tipo de vegetación se reporta para Hidalgo, limitada solamente a pequeñas áreas dentro de las cuencas de los ríos Estorax, Moctezuma, Axtla y Tulancingo (Zamudio-Ruiz, 1984; Aurelio Colmenero, comunicación personal). La parte ribereña de las microcuencas de la región tenían bosque de galería de *Taxodium mucronatum* (Rzedowski, 2006).

Se seleccionaron dos presas de jale abandonadas, las cuales se identifican como presa 7 y presa 4 (Figura 3), debido a que ambas presentan crecimiento natural de flora pero con diferentes antigüedades, de tal forma que se podía comparar la progresión ecológica de la vegetación en dos estados naturales. Cabe destacar que todas las demás presas de jale abandonadas del área (total de ocho) están desprovistas totalmente de vegetación; es decir, ninguna especie vegetal crece en ellas, excepto en estas dos áreas elegidas. En las mismas, la empresa arrojó sobre una parte de ambas presas material de piedra caliza que sobró de la construcción

de la presa que actualmente está en funcionamiento (presa 9). No fue de manera intencional, sino porque el material sobraba y decidieron disponerlo en esas áreas. La primera fue en la presa 7 (hace seis años) y la segunda en la presa 4 (hace un año). Más allá de expresar estos detalles de manera anecdótica, se realiza la descripción debido a que es un dato fundamental, las plantas no crecen en los residuos del jale de manera directa, sino en sitios en los cuales sobre ese mismo jale se dispuso una capa de no más de medio metro, en su parte más profunda, de piedra caliza.

### Muestreo

El muestreo fue sistemático por transectos que cruzaban el jale. La superficie total de muestreo de la presa de jale 4 fue de 3077m<sup>2</sup>; mientras que en la presa 7 el área fue de 13578m<sup>2</sup>. Se respetó el área donde naturalmente crece la vegetación, que coincide con las áreas que poseen recubrimiento de calizas (Figura 3). En la presa de jale 4 se esta-

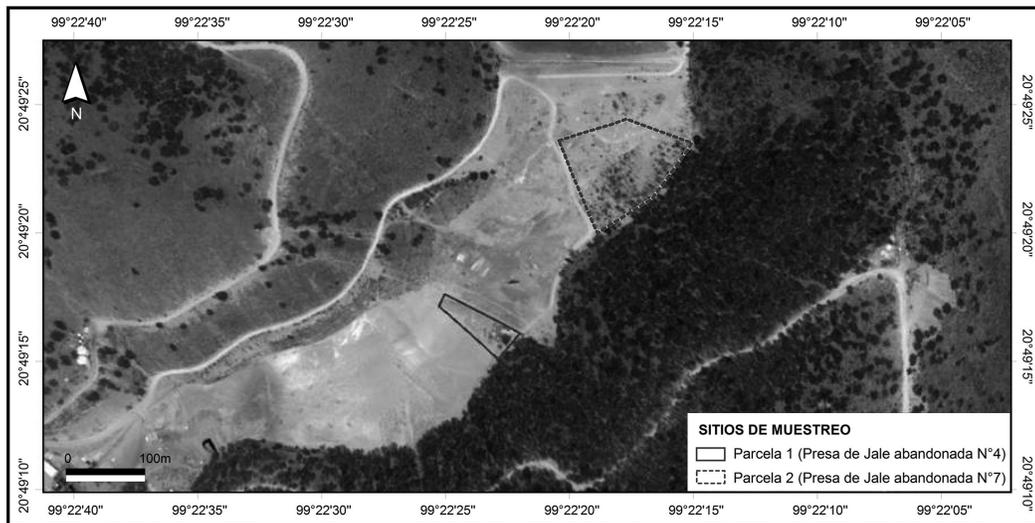


Figura 3. Ubicación de las dos parcelas en las que se realizaron las colectas para la identificación de las plantas que crecen en el jale.

blecieron 9 transectos, cada 10m de manera transversal al lado más largo del polígono (100m); el largo de cada transecto fue variable, ya que el polígono es irregular. En cada transecto se trazaron parcelas de 4m<sup>2</sup> equidistantes. De igual manera en la presa de Jale 7, se establecieron 12 transectos, cada 10m de manera transversal partiendo del lado del polígono adyacente al camino que marca el límite de esa presa (126m), y en cada uno se trazaron parcelas de 4m<sup>2</sup> equidistantes. Se colectaron al menos tres individuos de cada espécimen botánico hallado, anotando si era herbácea, suculenta, arbustiva o arbórea, siguiendo, además, el método de colecta de material botánico de Liesner (1997). La colecta se hizo en dos períodos del año (lluvia y secas), esto es, verano 2013 e invierno 2013-2014.

Se llevó a cabo la determinación taxonómica del material vegetal colectado en gabinete, utilizando las claves e información de diversas tesis que describen vegetación del área (Zamudio-Ruiz, 1984; Sánchez-Hernández, 2014) y las obras *Flora del Bajío* (Rzedowski y Rzedowski, 2008), *Vegetación de México* (Rzedowski, 2006), *Lista Florística del Estado de Hidalgo* (Villavicencio Nieto *et al.*, 1998) y *Plantas Útiles de Hidalgo* (Pérez Escandón

*et al.*, 2003). El trabajo de co-tejo se realizó en herbario, y las muestras fueron depositadas en el Herbario CIIDIR, Unidad Durango.

### Resultados

Se determinaron 76 especies, divididas en 59 géneros y 28 familias (Tabla I). Se encontró que la familia más abundante es Asteraceae con 23 especies, seguida de Leguminosae con nueve especies; Solanaceae con siete especies; Convolvulaceae, Euphorbiaceae, Lamiaceae y Malvaceae con tres cada una; Cupressaceae, Hydrophyllaceae, Lythraceae y Papaveraceae con dos cada una; y finalmente 17 familias con una especie cada una. Cabe destacar que una de las especies encontradas solo pudo ser identificada a nivel familia, y 26 solo a nivel género. Este resultado es relevante ya que en el mismo sitio y misma presa, González-López *et al.* (2015) reportan la presencia de solo 12 especies.

En el jale más joven (presa 4), la especie más abundante es *Ricinus communis*. En el jale más antiguo (presa 7) se encuentra una mayor frecuencia de árboles como *Acacia farnesiana*, *Juniperus flaccida*, *A. greggii*, *J. deppeana*, *Quercus* spp.

Otro resultado interesante es que en ambas presas de jale se encuentran especies vegetales

tanto del ecosistema de las laderas colindantes, caracterizado por bosque de pinos y encinos (Rzedowski, 2006), como de la vegetación riverense localizada en el fondo de las cañadas (Zamudio-Ruiz, 1984). Esto coincide con lo reportado por diferentes autores que confirman que se ha observado que la vegetación circundante generalmente influye en la sucesión natural de plantas en los sitios mineros abandonados (Borgegard, 1990; Rebele, 1992; Rehounkova y Prach, 2007; Prach *et al.*, 2014). La presa de jale más joven (presa 4) no presentó tanta diversidad florística como la más antigua (presa 7).

### Discusión

La actualización del listado de especies confirma que la mayoría de las nativas e introducidas encontradas son euriplásticas, referente al rango de toxicidad que toleran (Prince, 2015), y que las exóticas están naturalizadas al área desde hace tiempo (Ruiz-Olivarez *et al.*, 2013; González-Chavez *et al.*, 2014).

Las plantas determinadas sobreviven en un ambiente extremo en presas de jale abandonado, pero en un área donde se arrojó previamente piedra caliza (donde no se encuentra ese sustrato, no crece ninguna

especie). Inferimos que eso ayudó a incrementar el pH del suelo, brindando las condiciones necesarias para el crecimiento natural de vegetación. Esta suposición se debe a que hay antecedentes que mencionan que las acciones para aumentar el pH edáfico de los jales son recurrentes, utilizando fertilizantes y compostas nutritivas con base alcalina (Andrews, 2003). En otros estudios se evidencia la utilización de piedra caliza para eliminar sulfatos para tratamientos de aguas de residuos mineros (Silva, *et al.* 2012), y hay varios estudios de vegetación que muestran que en canteras de piedra caliza crece naturalmente vegetación que sirve como una herramienta eficaz para la restauración del ecosistema (Rehounkova y Prach, 2007; Tropek, *et al.*, 2010; Salek, 2012). Esto es confirmatorio de que la sucesión ecológica natural puede ser utilizada como práctica de conservación sistémica en la reclamación de un jale abandonado, porque comienza con la colonización botánica en las irregularidades de rocas calizas, escarpadas, con agujeros, grietas, etc., y dicha colonización modifica el propio entorno natural permitiendo la diversificación de la vida (Tropek *et al.*, 2010; Salek, 2012). Sin embargo, no se ha encontrado información sobre la utilización de caliza para cubrir jales mineros, previo a acciones de revegetación. Esto abre una puerta a nuevas investigaciones sobre el tema.

La especie más abundante de la presa 4, el ricino o higuierilla (*R. communis*) también ha sido reportada como la más abundante en jales mineros en los trabajos de Ruiz-Olivarez *et al.* (2013), González-Chavez *et al.* (2014) y Prince (2015). Es una planta invasora originaria de Sudáfrica, pionera y tolerante a amplias variaciones ambientales de humedad relativa, pH y nutrientes. Sin embargo, como mencionan Bonkowski *et al.* (2000), al ser una planta anual, cuando sus hojas caen pueden ser degradadas y rápidamente colonizadas por bacterias y hongos, formando un

TABLA I  
LISTADO DE FLORA CON REGENERACIÓN NATURAL EN PRESAS DE JALE MINERO  
ABANDONADAS, ZIMAPÁN, HIDALGO, MÉXICO

Familia	Especie	Familia	Especie
1 Apocynaceae	<i>Asclepias linaria</i> Cav.	39 Lamiaceae	<i>Marrubium vulgare</i> L.
2 Asparagaceae	<i>Agave</i> sp.	40 Lamiaceae	<i>Salvia mexicana</i> L.
3 Asteraceae	<i>Adenophyllum cancellatum</i> (Cass.) Villarreal	41 Lamiaceae	<i>Salvia tiliifolia</i> Vahl
4 Asteraceae	<i>¿Sclerocarpus uniserialis</i> (Hook.) Benth. & Hook. f. ex Hemsl.?	42 Leguminosae	<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.
5 Asteraceae	<i>¿Sonchus</i> sp.?	43 Leguminosae	<i>Acacia greggii</i> A. Gray
6 Asteraceae	<i>Ageratina</i> sp.	44 Leguminosae	<i>Cassia didymobotrya</i> Fresen
7 Asteraceae	<i>Asteraceae</i> sp. 1	45 Leguminosae	<i>Dalea bicolor</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.
8 Asteraceae	<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	46 Leguminosae	<i>Dalea</i> sp.
9 Asteraceae	<i>Bidens odorata</i> Cav.	47 Leguminosae	<i>Leguminosae</i> sp. 1
10 Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> L.	48 Leguminosae	<i>Mimosa</i> sp.
11 Asteraceae	<i>Brickellia</i> sp.	49 Leguminosae	<i>Senna septemtrionalis</i> (Viviani) H.S. Irwin & Barneby
12 Asteraceae	<i>Brickellia subuligera</i> (S. Schauer) B.L. Turner	50 Leguminosae	<i>Senna</i> sp.
13 Asteraceae	<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray	51 Lythraceae	<i>Cuphea</i> sp.
14 Asteraceae	<i>Calypocarpus vialis</i> Less.	52 Lythraceae	<i>Cuphea</i> sp. 2
15 Asteraceae	<i>¿Perymenium</i> sp.?	53 Malvaceae	<i>Anoda cristata</i> (L.) Schlecht.
16 Asteraceae	<i>Cirsium</i> sp.	54 Malvaceae	<i>Malvastrum coromandelianum</i> (L.) Garcke
17 Asteraceae	<i>Eupatorium</i> sp. 1	55 Malvaceae	sp. 1
18 Asteraceae	<i>Fleischmannia pycnocephala</i> (Less.) R.M. King & H. Rob.	56 Onagraceae	<i>Oenothera rosea</i> L'Hér. ex Aiton
19 Asteraceae	<i>Gnaphalium</i> sp. 1	57 Papaveraceae	<i>Argemone mexicana</i> L.
20 Asteraceae	<i>Perymenium</i> sp. 1	58 Papaveraceae	<i>Argemone</i> sp.
21 Asteraceae	<i>Perymenium</i> sp. 2	59 Passifloraceae	<i>Passiflora</i> sp.
22 Asteraceae	<i>Piqueria trinervia</i> Cav.	60 Phytolaccaceae	<i>Phytolacca icosandra</i> L.
23 Asteraceae	<i>Pluchea carolinensis</i> (Jacq.) G. Don	61 Platanaceae	<i>Platanus mexicana</i> Moric.
24 Asteraceae	<i>Sanvitalia procumbens</i> Lam.	62 Poaceae	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) P. Beauv.
25 Asteraceae	<i>Stevia</i> sp.	63 Ranunculaceae	<i>Clematis</i> sp.
26 Brassicaceae	<i>Lepidium virginicum</i> L.	64 Rutaceae	<i>Ruta graveolens</i> L.
27 Convolvulaceae	<i>Dichondra argentea</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	65 Sapindaceae	<i>Dodonaea viscosa</i> Jacq.
28 Convolvulaceae	<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth	66 Scrophulariaceae	<i>Buddjeja cordata</i> Kunth
29 Convolvulaceae	<i>Ipomoea</i> sp. 2	67 Solanaceae	<i>Datura innoxia</i> P. Mill.
30 Cupressaceae	<i>Juniperus deppeana</i>	68 Solanaceae	<i>Nicotiana glauca</i> Graham
31 Cupressaceae	<i>Juniperus flaccida</i> Schltdl.	69 Solanaceae	<i>Physalis chenopodifolia</i> Lam.
32 Euphorbiaceae	<i>Acalypha</i> sp.	70 Solanaceae	<i>Physalis</i> sp.
33 Euphorbiaceae	<i>Croton ciliatoglandulifer</i> Ortega	71 Solanaceae	<i>Solanum erianthum</i> D. Don.
34 Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> L.	72 Solanaceae	<i>Solanum</i> sp.
35 Fagaceae	<i>Quercus</i> sp.	73 Solanaceae	<i>Solanum torvum</i> Sw.
36 Geraniaceae	<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér.	76 Taxodiaceae	<i>Taxodium mucronatum</i> Ten.
37 Hydrophyllaceae	<i>Nama</i> aff. <i>dichotomum</i> (L.) Gould	75 Verbenaceae	<i>Glandularia elegans</i> (Kunth) Umber
38 Hydrophyllaceae	<i>Nama</i> sp.	76 Vitaceae	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planch.

microcosmos esencial en todos los procesos de mineralización de suelos y reciclado de nutrientes. Este suelo incipiente también interactúa con una compleja comunidad microbiana y de pequeños invertebrados de la mesofauna edáfica, como parte importante de la cadena alimenticia del suelo. Cabe decir que esta planta, ampliamente cultivada en todo el mundo, tiene propiedades curativas y sirve para generar biodiesel; en suma, es una planta muy útil bajo producción controlada (Mazzani, 2007). La higuera se destaca, además, por ser la especie con mayor número de regeneración natural en la presa 4 (la de un año de antigüedad), lo que coincide con los resultados de González-Chávez *et al.* (2014). Sin embargo, no sucede lo mismo en la presa 7, de seis de antigüedad, es decir

que la misma puede estar apoyando la generación de las condiciones para el establecimiento de otras especies, pero va dejando el espacio para que las otras especies se desarrollen. Cabe destacar que la higuera es exótica, pero no es considerada como planta invasora (CONABIO, 2016). En este caso en particular, podemos confirmar que no se observa en las áreas colindantes a los jales que presentan vegetación conservada.

También existen antecedentes de utilización de otras especies que se han encontrado en el área de estudio, para acciones de reclamación (Mukhopadhyay *et al.*, 2013; Skousen *et al.*, 2013), como por ejemplo revegetación con especies del género *Quercus* en jales abandonados de África, que ha sido exitosa. Wilson-Kokes (2014)

empleó para ello 11 especies de árboles de madera dura en West Virginia (EEUU). En el Distrito Minero de la Unión de España, describen especies de flora que crecen naturalmente en presas de jale minero abandonadas, y que pueden ser utilizadas para reclamación (Conesa *et al.*, 2007). En la presa 7 se encuentra una mayor frecuencia de árboles nativos de la región, como acacias, juniperos y encinos, lo que permite inferir la posibilidad de que puedan ser utilizadas para una revegetación que conlleve a futuro un aprovechamiento maderable sustentable. Esta posibilidad productiva daría un ingreso adicional a la comunidad de San Francisco, diversificando su actividad productiva y generando empleos estables (Gutiérrez-Yurrita *et al.*, 2014). Programas de este tipo promueven una reclama-

ción ecológica productiva, o 'restauración productiva', como lo llamó Ceccon (2013).

La revegetación con las especies arbóreas localizadas en la presa de jale 7 indica que si se deja una presa tiempo suficiente para que los procesos ecológicos de progresión y sucesión se desarrollen de manera natural, ello constituye la forma más ampliamente aceptada y útil de recuperación de sitios mineros abandonados para reducir la erosión y proteger los suelos contra la degradación (Mukhopadhyay y Maiti, 2011), restaurándose en alguna medida la función biótica y la productividad (Sheronan *et al.*, 2010).

La revegetación con plantas nativas resistentes a las condiciones de los jales, como las que encontramos en este estudio, debe hacerse siguiendo criterios de sucesión ecológica

natural, comenzando por pioneras, mezclando pioneras ruderales con arbustivas de rápido crecimiento y estrategia r, para finalmente, cuando ya se tiene un suelo incipiente y nutritivo, comenzar a poner plantas arbóreas de estrategia k (Lambers *et al.*, 2008). Esta sucesión inducida, semejante a la natural, facilita el desarrollo de bacterias fijadoras de N y la asociación de micorrizas, fundamentales para el mantenimiento de la calidad del suelo por el mejoramiento de los procesos de circulación de materia orgánica y nutrimentos (Hernández-Cuevas *et al.*, 2011). Una vez comenzada la regeneración del suelo, se facilita la permanencia de plantas menos tolerantes y de invertebrados colonizadores como gusanos y escarabajos (Rebele, 1992; Prach *et al.*, 2014). Sumado a ello y de acuerdo a lo recomendado por Martínez-Garza y Howe (2003), puede fortalecerse la reclamación con la siembra de las sucesionales tardías para acelerar la recuperación de la biodiversidad (Martínez-Garza y Howe, 2010).

Las plantas encontradas en los jales estudiados representan importante información a ser transmitida de manera temprana, ya que grupos de investigadores se encuentran trabajando en propuestas de reclamación de sitios similares sin tener claro cómo comenzar, con qué especies iniciar la introducción, o la duración que debería tener un proyecto para ver resultados significativos. La evidencia de que estas plantas son resistentes a las concentraciones de residuos mineros es relevante para iniciar procesos de reclamación. Lograr que estos sitios mineros abandonados puedan recuperarse apoya la conservación del patrimonio paisajístico, con el consecuente mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades locales colindantes a los sitios donde se desarrolla la minería.

### Conclusiones

- Se obtuvo un inventario de especies botánicas que asciende a 76 especies, divididas en 59

géneros y 28 familias. La mayoría son generalistas (nativas y exóticas), resistentes al estrés hídrico y de amplia distribución. - Varias de las especies botánicas determinadas, de acuerdo a la bibliografía consultada, pueden ser utilizadas en una futura estrategia de reclamación de jales abandonados en esta microcuenca u otros sitios con características ecológicas similares. - Hay especies colonizadoras de rápido crecimiento que generan suelo para que, posteriormente sean especies arbóreas las colonizadoras, lo que puede fortalecerse con la introducción de semillas o plántulas de las especies sucesionales tardías (en particular especies forestales) y que pueda desarrollarse esa actividad de manera sustentable a largo plazo en las áreas de jales abandonados.

- *R. communis* es la planta más abundante y que, a pesar de ser exótica, puede ser utilizada de diversas maneras en programas de aprovechamiento controlado, para lo cual se deberán hacer los estudios necesarios. - La simple adición de roca caliza en un jale abandonado permite el desarrollo de una vegetación variada, compuesta por especies nativas, endémicas y exóticas naturalizadas.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la empresa Carrizal Mining, en particular a Mireya Aguiar Durant, Omar Robles Huerta, Gilberto Rojo Ortiz, Alicia Yañez Paniagua, y a Don Florencio Trejo Ponce de la comunidad de San Francisco por ser nuestro guía en campo; a Socorro González Elizondo y Martha González Elizondo (Herbario CIIDIR Durango); a Gabriel Solano Cuellar y Omar Rocha Gutiérrez (Dirección General de Vida Silvestre); a Aurelio Colmenero (ENCB y SIP del IPN); a David López Merlín (PNUD-CONAFOR) por el apoyo en la colecta e identificación de especies en campo y revisión del manuscrito; a Holger Weissenberger (LAIGE Ecosur Chetumal) por el apoyo en la elaboración de los mapas;

y a Víctor Luna Monterrojo (Jardín Botánico "Francisco Javier Clavijero"), a Jonathan Muthuswamy Ponniah y Shruti Venkata Chari (CIEMAD-IPN), Gustavo Pérez Verdín (CIIDIR Durango), Martha Velázquez Machuca (CIIDIR Michoacán) y Dora Almeida Valles (CONABIO), por sus revisiones y recomendaciones. Cecilia Elizondo tiene una beca del CONACYT para realizar su doctorado. En este trabajo confluyeron los proyectos de investigación SIP-IPN 20131377, 20140833 y 20150856.

### REFERENCIAS

- Andrews RL (2003) *Comparison of Bucket-Wheel Spoil and Phosphogypsum/Clay Blend as Substrates for Nonriverine Wet Hardwood Forest Restoration*. Tesis. North Carolina State University. Raleigh, NC, EEUU. 49 pp.
- Azadpour A, Matthews J (1996) Remediation of Metal-contaminated Sites Using Plants. *Remed. J.* 6(3): 1-18.
- Balaguer L, Nicolau JM, García Álvarez A (2013) Revegetación de espacios mineros desde la perspectiva de la restauración ecológica. En *Restauración Ecológica en Áreas Afectadas por la Minería*. Fundación Ciudad de la Energía. Ponferrada, España. pp. 87-108.
- Bonkowski M, Griffith BS, Ritz K (2000) Food preference of earthworms for soil fungi. *Pedobiología* 44: 666-676.
- Borgegard SO (1990) Vegetation development in abandoned gravel pits: Effects of surrounding vegetation, substrate and regionalilty. *J. Veget. Sci.* 1: 675-682.
- Carrizal Mining (2012) *Manifestación de Impacto Ambiental, Operación del 26% Faltante de la Presa de Jales N° 9*. Documento. 2.5 Km al Noreste de la Ranchería San Francisco, Mpio. de Zimapán, Hidalgo, México. SEMARNAT 13HI2013MD006.
- Castillo-Ortiz A (2015) *Estudio del Desarrollo de la Especie Ricinus communis Cultivada en Residuos Mineros en Condiciones de Invernadero*. Tesis. grado de Maestro en Ciencias, CIEMAD, Instituto Politécnico Nacional. México. 109 pp.
- Ceccon E (2013) *Restauración en Bosques Tropicales: Fundamentos Ecológicos, Prácticos y Sociales*. Díaz de Santos. Madrid, España. Impreso en México. 288 pp.

- Ceccon E, Barrera-Cataño JI, Aronson J, Martínez-Garza C (2015) The socioecological complexity of ecological restoration in Mexico. *Restor. Ecol.* 23: 331-336.
- CONABIO (2016) *Listado de Especies Exóticas Presentes en México*. www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/pdf/presentes\_confinados.pdf (Cons. 03/05/2016).
- Conesa HM, García G, Arnaldos R (2007) Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere* 68: 1180-1185.
- González-Chávez MCA, Ruiz Olivares A, Carrillo-González R, Ríos-Leal E (2014) Crude oil and bioproducts of castor bean (*Ricinus communis* L.) plants established naturally on metal mine tailings. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12: 2263-2272.
- Gutiérrez-Yurrita PJ (2014a) Fuzzy logic applied into a holistic model to manage seasonal watersheds in México. *EnviroGeoChim. Acta I*: 352-374.
- Gutiérrez-Yurrita PJ (2014b) A socio-economical perspective for a holistic management of temporary watersheds in Central Mexico based on a simple mathematical model for decision-makers. *Int. J. Nat. Sci. Res.* 2: 206-226.
- Gutiérrez-Yurrita PJ, Montes C (1999) Bioenergetics and phenology of reproduction of the introduced red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in Doñana National Park (Spain), and implications for management. *Freshw. Biol.* 42: 561-574.
- Gutiérrez-Yurrita PJ, Ortega-Marín BA, Álvarez A, García-Serrano L, Rebollar M (2014) The holistic management of the landscape of ethnic communities will reduce climate change and promote its sustainability. *Int. J. Environ. Sci. Devel.* 5: 317-323.
- Hernández-Cuevas L, Santiago-Martínez G, Cuatlal-Cuahutencos P (2011) Propagación y micorrización de plantas nativas con potencial para restauración de suelos. *Rev. Mex. Cs. Forest.* 2(7): 87-96.
- INE (1987) *Estudio de la Calidad del Agua en la Cuenca del Río Moctezuma*. Libro AE 002368. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. México. 137 pp.
- Kavamura VN, Esposito E (2010) Biotechnological strategies applied to the decontamination of soil polluted with heavy metals. *Biotechnol. Adv.* 28: 61-69.

- Lambers H, Raven JA, Shaver GR, Smith SE (2008) Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends Ecol. Evol.* 23: 95-103.
- Liesner R (1997) (Comp.) *Técnicas de Campo Utilizadas por el Jardín Botánico de Missouri*. Traducido del Inglés por Claudio Tygier. Santa Cruz, Bolivia. (Cons. 02/2013).
- Martínez-Garza C, Howe HF (2003) Restoring tropical diversity: beating the time tax on species loss. *J. Appl. Ecol.* 40: 423-429.
- Martínez-Garza C, Howe HF (2010) Características foliares y tasas vitales de árboles sucesionales tardíos de un bosque tropical perennifolio. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 86: 1-10.
- Martínez-Villegas N, Briones-Gallardo R, Ramos-Leal JA, Avalos-Borja M, Castañón-Sandoval AD, Razo-Flores E, Villalobos M (2013) Arsenic Mobility Controlled by Solid Calcium Arsenates: A Case Study in Mexico Showcasing a Potentially Widespread Environmental Problem. *Environ. Pollut.* 176: 114-122.
- Mazzani E (2007) El tártago: la planta, su importancia y usos. *CENIAP Hoy*, 14(abril-diciembre). pp. 1-9.
- MEG (2013) *Worldwide Exploration Trends. A Special Report from SNL Metals Economics Group for the PDAC International Convention*. Metals Economics Group. Halifax, Nova Scotia, Canada. 6 pp.
- Menéndez MT (2010) Minería y Enfermedad. *Antropología Física*, Divulgación de la Antropología, Divulgación de la Ciencia. (Cons. 15/06/2013).
- Mukhopadhyay S, Maiti SK (2011) Mine soil reclamation due to tree plantation: a chronosequence study. *Afr. J. Basic Appl. Sci.* 3(5): 210-218.
- Mukhopadhyay S, Maiti SK, Masto RE (2013) Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. *Ecol. Eng.* 57: 133-142.
- NOM-141-SEMARNAT-2003. *Ley que Establece el Procedimiento para Caracterizar los Jales, así como las Especificaciones y Criterios para la Caracterización y Preparación del Sitio, Proyecto, Construcción, Operación y Postoperación de Presas de Jales*. Diario Oficial de la Federación (13/09/2004).
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. *Ley que Establece Criterios para Determinar las Concentraciones de Remediación de Suelos Contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio*. Diario Oficial de la Federación (02/03/2007).
- NOM-157-SEMARNAT-2009. *Ley que Establece los Elementos y Procedimientos para Instrumentar Planes de Manejo de Residuos Mineros*. Diario Oficial de la Federación (30/08/2011).
- Ortega-Larrocea MP, Xoconostle-Cázares B, Maldonado-Mendoza I, Carrillo-González R, Hernández-Hernández J, Díaz-Garduño M, López-Meyer M, Gómez-Flores L, González-Chavez MC (2010) Plant and fungal biodiversity from metal mine wastes under remediation at Zimapán, Hidalgo, Mexico. *Environ. Pollut.* 158: 1922-1931.
- Ortiz BI, Sanz GJ, Doradoñ VM, Villar FS (2007) Técnicas de recuperación de suelos contaminados. En *Informe de Vigilancia Tecnológica*. Consejería de Educación. Madrid, España. pp. 12-51.
- Pérez Escandón BE, Villavicencio Nieto MA, Ramírez Aguirre A (2003) *Lista de las Plantas Útiles del Estado de Hidalgo*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. 136 pp.
- Peters TH (1984) Rehabilitation of mine tailings: A case of complete ecosystem reconstruction and revegetation of industrially stressed lands in the Sudbury Area, Ontario, Canada. En Sheeha PJ, Miller DR, Butler GC, Bourdeau P (Eds.) *Effects of Pollutants at the Ecosystem Level*. SCOPE. Wiley. Ontario, Canadá. pp. 403-421.
- Prach K, Pysek P, Rehounková K (2014) Role of substrate and landscape context in early succession: An experimental approach. *Perspect. Plant Ecol. Evol. System.* 16: 174-179.
- Prince S (2015) *Una estrategia para la Rehabilitación de las Presas de Jales Abandonadas en el Municipio de Zimapán, Hidalgo*. Tesis. CIEMAD, Instituto Politécnico Nacional. México. 112 pp.
- Rebele F (1992) Colonization and early succession on anthropogenic soils. *J. Veget. Sci.* 3: 201-208.
- Rehounková K, Prach K (2007) Spontaneous vegetation succession in gravel-sand pits: A potential for restoration. *Restor. Ecol.* 16: 305-312.
- Reyes CVE, Veloz RMA (2009) Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el Distrito Minero de Zimapán. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. *Innova Ciencia electrónica* COCYTEHFOMIX.
- Rodríguez L, Ruiz E, Alonso AJ, Rincón J (2009) Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain. *J. Environ. Manag.* 90: 1106-1116.
- Romero FM, Armienta MA, Gutiérrez ME, Villaseñor G (2008) Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int. Contam. Amb.* 24: 43-54.
- Romero FM, Gutiérrez RM (2010) Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 62: 43-53.
- Ruiz-Olivares A, Carrillo-González R, González-Chávez MCA, Soto-Hernández RM, (2013) Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production. *J. Environ. Manag.* 114: 316-323.
- Rzedowski J (2006) *Vegetación de México*. 1ª ed. Digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 pp.
- Rzedowski J, Rzedowski GC (2008) *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*. Fascículo 157. Instituto de Ecología, A.C. México. 504 pp.
- Salek M (2012) Spontaneous succession on opencast mining sites: implications for bird biodiversity. *J. Appl. Ecol.* 49: 1417-1425.
- San Román J, Marín-García L, Muñoz P, López MA, Gutiérrez-Yurrita PJ (2013) Ecological considerations for the management of a protected area with a strong urban pressure: the case of Lake Texcoco, México. *Int. J. Ecol. Environ. Sci.* 39: 26-37.
- Sánchez-Hernández M de C (2014) *Vulnerabilidad Paisajística Asociada a las Actividades Mineras no Metálicas en el Parque Nacional Los Mármoles, Hidalgo, México*. Tesis. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medioambiente y Desarrollo. Instituto Politécnico Nacional. México. 91 pp.
- Sánchez-López A, González-Chávez MC, Carrillo-González R, Vangronsveld J, Díaz-Garduño M. (2015) Wild flora of mine tailings: perspectives for use in phytoremediation of potentially toxic elements in a semi-arid region in Mexico. *Int. J. Phytoremed.* 17: 476-484.
- Santos-Jallath JA, Castro-Rodríguez J, Huezco-Casillas L, Torres B (2012) Arsenic and heavy metals in native plants at tailings impoundments in Queretaro, Mexico. *Phys. Chem. Earth* 37-39: 10-17.
- Secretaría de Economía (2015) [www.economia.gob.mx/comunidad-negocios/mineria](http://www.economia.gob.mx/comunidad-negocios/mineria) (Cons. 02/06/2014).
- Sheoran V, Sheoran AS, Poonia P (2010) Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review. *Int. J. Soil Sedim. Water* 3(2).
- Silva AM, Lima RMF, Leão VA (2012) Mine water treatment with limestone for sulfate removal. *J. Hazard. Mat.* 221-222: 45-55.
- Skousen J, Cook T, Wilson-Kokes L, Pena-Yewtukhiw E (2013) Survival and growth of chestnut backcross seeds and seedlings on surface mines. *J. Environ. Qual.* 42: 690-695.
- Srivastava NK, Ram LC, Masto E (2014) Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: A sustainable ecological approach. *Ecol. Eng.* 71: 479-489.
- Tordoff GM, Baker AJM, Willis AJ (2000) Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere* 41: 219-228.
- Tropek R, Kadlec T, Karesova P, Spitzer L, Kocarek P, Malenovsky I, Banar P, Tuf IH, Hejda M, Konvicka M (2010) spontaneous succession in limestone quarries as an effective restoration tool for endangered arthropods and plants. *J. Appl. Ecol.* 47: 139-147.
- Vallejo-Miranda O (2015) *Efecto de la Dispersión Hídrica de Arsénico, Cadmio y Plomo en la Calidad de los Sedimentos y Agua Superficial de la Microcuenca San Miguel, Zimapán*. Tesis. CIEMAD, Instituto Politécnico Nacional. México. 131 pp.
- Villavicencio Nieto MN, Pérez Escandón BE, Ramírez Aguirre A (1998) *Lista Florística del Estado de Hidalgo*. Universidad autónoma del Estado de Hidalgo, México. 147 pp.
- Weng YC, Fujiwara T, Houg HJ, Sun CH, Li WY, Kuo YW (2015) Management of landfill reclamation with regard to biodiversity preservation, global warming mitigation and landfill mining: experiences from the Asia Pacific Region. *J. Cleaner Prod.* 104: 364-373.
- Wilson-Kokes L, Emerson P, DeLong C, Thomas C, Skousen J (2014) hardwood tree growth after eight years on brown and gray mine soils in West Virginia. *J. Environ. Qual.* 42: 1353-1362.
- Zamudio-Ruiz S (1984) *Vegetación de la Cuenca del Río Estorax en el Estado de Querétaro y sus Relaciones Fitogeográficas*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. 275 pp.