

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Métodos de Rehabilitación de Áreas Afectadas por Residuos de Actividades Mineras

Por:

YARELI VIDAL PÉREZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Agosto, 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Métodos de Rehabilitación de Áreas Afectadas por Residuos de Actividades Mineras

Por:

YARELI VIDAL PÉREZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



MC. Héctor Darío González López
Asesor Principal



Dr. Genaro Esteban García Mosqueda
Coasesor



Ing. Sergio Braham Sabag
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Agosto, 2020



Esta monografía ha sido apoyada por el proyecto “Modelos biométricos para determinar el rendimiento de los productos forestales no maderables en el norte de México” con clave 38111-425103001-2268. Proyecto perteneciente al departamento forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, a cargo del M.C. Héctor Darío González López.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis ancestros, a toda la línea de personas que por sincronicidad han contribuido a mi existencia. En especial a Ricarda Pérez Rivera mi madre, una mujer valiente, guerrera, amorosa, sencilla... Qué me ha enseñado el valor de la familia y que a pesar de las adversidades su apoyo y amor incondicional nunca han faltado.

A mi hermanita Leti que me ha apoyado innumerables ocasiones y ha contribuido en hacer de mi vida un sitio más alegre.

A mis hermanos Jonathan y Jovany quienes me han enseñado que después de la tormenta viene la calma.

Y a mi padre.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a la vida por permitirme vivir cada una de las experiencias que van forjándome a ser. Me doy gracias por seguir aquí adquiriendo los conocimientos que me son necesarios para desarrollarme interior y exteriormente.

Gracias a mi familia por cada día vivido a mi lado, porque hacen especial cada instante de mi vida.

A mis amigos más cercanos que han sido como mi segunda familia.

Gracias a todas las personas que sin duda alguna aportaron buenos momentos y grandes experiencias durante mi estadía en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Gracias a mis asesores M.C. Héctor Darío González López, Dr. Genaro Esteban García Mosqueda e Ing. Sergio Braham Sabag por su paciencia y apoyo en el desarrollo de esta monografía.

INDICE DE CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
2 IMPORTANCIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO	3
2.1 Historia de la minería en México.....	3
2.2 Importancia socioeconómica de la minería en México.....	5
2.3 Actividad minera al norte de México	6
3 ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA.....	9
4 IMPACTOS DE LA MINERÍA	12
4.1 Impacto en el ambiente.....	12
4.2 Impacto social.....	13
5 RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS	14
5.1 Depósitos de residuos mineros.....	15
5.2 Contaminación por residuos mineros.....	16
5.3 Manejo de residuos mineros.....	17
5.4 Legislación para el manejo de residuos minero-metalúrgicos	17
5.4.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).....	17
5.4.2 Reglamentos de la LGEEPA	18
5.4.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	18

5.4.4 Reglamento de la LGPGIR	19
5.5 Normas Oficiales Mexicanas	19
6 REHABILITACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS.....	21
6.1 Remediación	21
6.1.1 Métodos de remediación	22
6.2 Tratamientos de remediación	23
6.2.1 Tratamientos físico-químicos	23
6.2.2 Tratamientos térmicos	25
6.2.3 Tratamientos biológicos	26
6.2.4 Fitorremediación	27
6.2.5 Plantas metalófitas	30
6.2.6 Estudios de fitorremediación	31
7 DISCUSIÓN	34
8 CONCLUSIONES	37
9 REFERENCIAS.....	38

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Producción minera al Norte de México (CAMIMEX, 2016).....	7
Cuadro 2. Normas Oficiales Mexicanas que regulan el manejo de residuos mineros (DOF, s/f).	20
Cuadro 3. Ventajas y desventajas del tipo de tratamiento (Lobo, 2013).	23
Cuadro 4. Ventajas y desventajas de la fitorremediación (Núñez et al., 2004).	28
Cuadro 5. Estudios relacionados con la fitorremediación de suelos contaminados en México.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Empleo en la industria minero metalúrgica 2007-2017 (Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2017).....	6
Figura 2. Diagrama de flujo para beneficio de minerales (Servicio Geológico Mexicano et al., 2017).....	10
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de mineral y generación del jal (Castro, 2018).....	14
Figura 4. Estructura de un depósito de jales (Moreno, 2017).....	15
Figura 5. Tuberías de descarga de relaves (Arrollo, 2017).....	15
Figura 6. Rehabilitación de Mina Cuale, Jalisco (Moreno, 2017).	21
Figura 7. Componentes de la Fitorremediación (Fitorremediación, 2019).	30
Figura 8. Respuesta típica de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo (Adriano, 2001).	31

RESUMEN

A pesar de que México es un país destacado por su producción minera a nivel mundial y a su amplia tradición minera, ha generado una serie de impactos sociales y ambientales negativos, por ello, el presente estudio tiene como objetivo describir diferentes métodos de rehabilitación aplicables a áreas afectadas por residuos de actividades mineras al norte de México, así como conocer la problemática que existe dentro del contexto ambiental y social después del cierre de minas. Para ello se realizó una revisión bibliográfica con la que se obtuvo información sobre el estado histórico y actual de la minería en México. Destacando su importancia como actividad económica y de desarrollo; los procesos de la industria minera como son: exploración, preparación del lugar y desbroce, explotación de la mina, disposición del desmonte o desecho de roca, beneficio o procesamiento del mineral, disposición de relaves, rehabilitación y cierre; así como sus residuos (jales mineros) que debido a sus características tóxicas, determinadas por la composición/oxidación y por su forma de manejo pueden poner en riesgo el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud; y su manejo de acuerdo a la normatividad nacional vigente. Dentro de los diferentes métodos de remediación (físico/químicos, térmicos y biológicos) se propone a la fitorremediación como alternativa de rehabilitación de áreas afectadas por residuos mineros, ya que, representa una alternativa sustentable, de bajo costo y se basa en el uso de plantas y microorganismos capaces de reducir la concentración de contaminantes en suelos, agua e inclusive en el aire. De acuerdo con diferentes fuentes para la zona minera correspondiente al norte de México se recomienda el uso de plantas metalófitas pertenecientes a las familias Fabaceae y Poaceae.

Palabras clave: Minería, jales mineros, fitorremediación, plantas metalófitas.

ABSTRACT

Despite the fact that Mexico is an outstanding country for its mining production worldwide and with a long mining tradition, it has generated a series of negative social and environmental impacts, therefore, this study aims to describe different rehabilitation methods applicable to areas affected by residues from mining activities in northern Mexico, as well as learning about the problems that exist within the environmental and social context after the closure of mines. For this, a bibliographic review was carried out with which information was obtained on the historical and current state of mining in Mexico. Stressing its importance as an economic and development activity; mining industry processes such as: exploration, site preparation and clearing, mine exploitation, disposal of rock clearing or disposal, ore processing or benefit, tailings disposal, rehabilitation and closure; as well as its residues (mining tailings) that due to their toxic characteristics, determined by the composition / oxidation and by their handling, can put in risk the ecological balance, the environment and the health; and its management according to current national regulations. Among the different remediation methods (physical / chemical, thermal and biological), phytoremediation is proposed as an alternative for the rehabilitation of areas affected by mining waste, since it represents a sustainable, low-cost alternative and is based on the use of plants and microorganisms capable of reducing the concentration of pollutants in soils, water and even in the air. According to different sources for the mining area corresponding to northern Mexico, the use of metalophytic plants belonging to the Fabaceae and Poaceae families is recommended.

Keywords: Mining, mining tailings, phytoremediation, metalophytic plants.

1 INTRODUCCIÓN

La actividad minera ha sido parte fundamental en la historia económica de México, se considera un factor importante en el desarrollo y formación del país (Gaytán, 2014). De acuerdo con datos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano la industria minera tiene mayor peso en la extracción de metales como el oro, plata, zinc, cobre y plomo. La región minera más importante se localiza al norte del país y está conformada por los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Durango y San Luis Potosí (Sánchez et al., 2003).

Durante muchos años la actividad minera ha generado grandes cantidades de residuos mineros que no han sido tratados adecuadamente en su momento, ya que no se contaba con leyes que establecieran criterios para su adecuado manejo, provocando daños al ambiente. Estos residuos son conocidos como relaves mineros en Sudamérica y jales mineros en México (Rivera, 2009).

Actualmente la legislación mexicana ha buscado la manera de tener un control ambiental en relación al manejo de residuos mineros (Santos, 2012). A través de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), así como normas oficiales mexicanas, en las que se encuentra la NOM-141-SEMARNAT-2003. La cual 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.

Las presas de jales son depósitos para el almacenamiento o disposición final de los jales cuya construcción y operación se realizan simultáneamente. Al cierre de una mina se debe asegurar que las presas de jales no representen un riesgo al ambiente, a la flora, a la fauna o a la salud humana. Por tal motivo se deben aplicar acciones como la rehabilitación para restablecer el relieve, la hidrología y el suelo. Uno de los componentes de la rehabilitación es la remediación que por su naturaleza es el más adecuado en minería (Torres-Batista et al., 2019).

La remediación busca tratar los problemas que no se pueden solucionar con simple restauración mediante procesos químicos, físicos y biológicos (Rivera, 2009). Dentro de los procesos biológicos de remediación se encuentra la fitorremediación que es una opción sustentable y de bajo costo cuyo objetivo es reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de los suelos, sedimentos, agua e incluso el aire mediante el uso de plantas y microorganismos catalizadores de contaminantes (Núñez et al., 2004).

1.1 Objetivo general

Describir diferentes métodos de rehabilitación aplicables a áreas afectadas por residuos de actividades mineras al norte de México

1.2 Objetivos específicos

1. Describir los principales impactos de la actividad minera y la normatividad vigente aplicable.
2. Revisar los principales tratamientos de remediación utilizados para el tratamiento de áreas contaminadas por residuos mineros.
3. Determinar el potencial de la utilización de tratamientos de fitorremediación para ser aplicados en presas de residuos mineros.

2 IMPORTANCIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO

La minería es una actividad económica secundaria cuya naturaleza aleatoria depende del origen de los recursos naturales no renovables, de la demanda internacional, avances tecnológicos, nuevos materiales sintéticos que compiten con los minerales, entre otros (Sánchez et al., 2003).

Se ha posicionado a la minería como un factor esencial de desarrollo durante los 200 años de vida independiente en México. Ha sido un factor importante en el desarrollo y formación del país ya que ciudades, centros poblacionales y las rutas de enlace que las vinculan son producto de la concentración de sus recursos minerales y su aprovechamiento (Gaytán y Benita, 2014).

México es un país destacado por su producción mineral a nivel mundial y con amplia tradición minera (Jiménez et al., 2006). Gracias a la complejidad y diversidad geológica mexicana la minería se ha catalogado como una de las actividades económicas más importantes del país, un rasgo importante es la existencia de minerales metálicos y no metálicos a lo largo del territorio (Sánchez, 2010).

La región minera más importante se localiza al norte del país y está conformada por los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Durango y San Luis Potosí; de donde se extraen minerales como oro, plata, carbón, cobre y zinc (Sánchez et al., 2003).

2.1 Historia de la minería en México

Desde la época prehispánica en México la actividad minera se veía reflejada en la elaboración de artículos con motivos de cultos religiosos (Sánchez et al., 2003). Durante los primeros años de la época Colonial caracterizada por el saqueo masivo de metales preciosos y hasta el inicio del siglo XIX la explotación minera fue una de las actividades más importantes con potencial económico (Delgado, 2010). Sin embargo, con el inicio del movimiento de Independencia gran cantidad de minas fueron abandonadas, lo que provocó una baja considerable en la producción minera

y en la economía nacional. A finales del siglo XIX y durante la época del Porfiriato la actividad minera se recuperó con la inversión de Países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Francia y Alemania. Esto ayudo a mejorar los procesos de extracción con la integración de nuevas tecnologías (Sánchez et al., 2003).

Cárdenas (2004) describe que entre finales del siglo XIX y 1940 el sector minero representaba más de la mitad de las exportaciones mexicanas, debido a la alta demanda y al alza de precios que surgieron después de la primera guerra mundial. Sin embargo, en los años posteriores las exportaciones mineras decayeron ya que en 1942 se llegó al 42.2%, en 1960 al 22% y para 1970 13.8%.

Después de la segunda Guerra Mundial la minería dejó de ser una actividad importante en la economía nacional como lo había sido en los siglos anteriores (Sánchez et al., 2003).

A finales de la década de los 70's el país es mayoritariamente urbano e industrial por lo que las actividades industriales ocupaban el 93% del PIB (Garza, 2003).

Como resultado de la crisis estructural del capital mexicano al mismo tiempo que la crisis internacional del capitalismo en las dos últimas décadas del siglo XX la minería perdió peso histórico y regional dentro de la economía del país (Sánchez et al., 2003). En este lapso en que se inicia la aplicación de políticas neoliberales a la economía. La actividad minera sufrió muchos cambios como la reducción de la participación al PIB nacional y la reducción de la participación del estado en la actividad y la apertura a la inversión extranjera. Al mismo tiempo aumento la preocupación por el impacto ambiental que ocasiona esta actividad (Sánchez et al., 2003).

A principios del siglo XXI los precios de los minerales ascendieron creando mejores condiciones en el mercado, lo que hizo posible la reactivación de la exploración y la identificación de nuevos proyectos mineros (Vázquez, 2008).

En los años 2008 y 2009 la minería en México enfrente varios obstáculos entre ellos: el colapso de precios de metales y minerales, la contracción de los mercados, huelgas y paros en sus principales operaciones, retraso en el desarrollo de

proyectos de exploración y aumento en el precio de los energéticos (González, 2011).

A partir del año 2010 la actividad minera volvió a ser una actividad importante colocando a México como uno de los países más importantes a nivel mundial en aspectos de producción y valor, como en montos de inversión (Góngora, 2013). En 2011 las inversiones al sector minero aumentaron debido al incremento en la producción de metales y minerales. En este año la producción minera incremento un 38.4% con respecto a la anualidad anterior. Durante los años siguientes el incremento anual en la producción minera fue de: 12% en 2012, 9.9% en 2013, 0.8% en 2014, 14.1% en 2015, -1.6% en 2016, 20.9% en 2017 y 24.2% en 2018 (Servicio Geológico Nacional, 2012-2018).

2.2 Importancia socioeconómica de la minería en México

La actividad minera ha jugado un rol importante en el desarrollo económico del país (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2018). Un factor importante en la minería es la exportación a otros países a causa de la demanda de metales y minerales para la elaboración de productos de uso cotidiano e infraestructura (Jiménez et al., 2006).

A lo largo de la historia se ha visto reflejada la aportación de la minería al PIB Nacional ya que es una actividad generadora de divisas. Sin embargo, Delgado, 2010 señala que el aporte de la minería al PIB nacional decayó en los años 1983 donde el aporte fue de 1.63%, en 1994 1.38%, en 1996 1.47% y en 2007 de 1.25%. con relación a años anteriores. En los últimos años el PIB minero fue de 1.5% en 2008, 25.3% en 2009, 14.3% en 2010, 0.1% en 2011, 9.4 en 2012, -0.9% en 2013, 1.8% en 2014, 1.7% en 2015, -1.6% en 2016, 4.0% en 2017 y en 2018 el sector minero represento el 2.4% en el PIB nacional (Servicio Geológico Nacional, 2012-2018).

Socialmente la minería ha ayudado en la generación de empleos dentro los principales estados con potencial minero. En 1990 había registrados 122 572 empleados en el sector, 100 409 en 1993 y 96 796 en 1999 (Sánchez et al., 2003).

En el periodo de 2003-2010 el aporte del sector minero en relación al empleo nacional fue del 1% (Fundación Chile y CEETM, 2010).

Según datos proporcionados por el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2017) en el periodo 2007-2017 los años en los que se presentó una baja tasa de empleo fue entre 2008 y 2009, mismos en los que la economía nacional decayó debido a la crisis financiera del año 2008. A pesar de esto en 2010 se observa un incremento notable al pasar de 269 mil empleados en 2009 a 284 mil empleados en 2010 Figura 1.

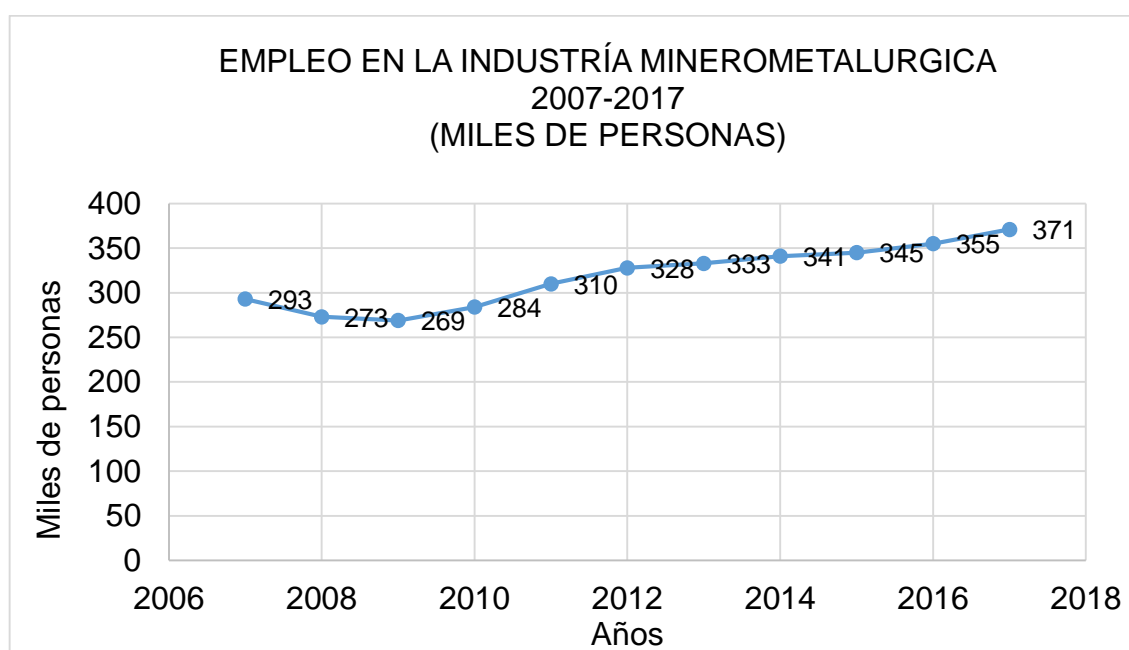


Figura 1. Empleo en la industria minero metalúrgica 2007-2017 (Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2017).

2.3 Actividad minera al norte de México

De acuerdo con datos proporcionados por la Cámara Minera de México los estados con mayor producción minera son los pertenecientes a la parte norte del país como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Producción minera al Norte de México (CAMIMEX, 2016).

Posición a Nivel Nacional	Estado	Valor de la producción (Millones de pesos)
1°	Sonora	73,795,218
2°	Zacatecas	60,733,702
3°	Durango	26,792,899
4°	Chihuahua	23,110,038
5°	Coahuila	22,292,966
6°	San Luis Potosí	9,034,803

En primer lugar, se encuentra el estado de Sonora el cual cuenta con un potencial geológico-minero importante a nivel nacional lo que lo ha posicionado como el principal productor de oro, cobre, molibdeno, grafito y wollastonita; ocupa el tercer lugar en producción de sal; el cuarto lugar en producción de plata y silicio; el quinto lugar en producción de Dolomita; y el séptimo lugar en producción de fierro y yeso (CAMIMEX, 2016 y SGM, 2018).

En segundo lugar, se encuentra el estado de Zacatecas cuya riqueza mineralógica ha hecho que la producción metalífera zacatecana sea una de las más grandes del país (Navarrete, s/f). Zacatecas es el principal productor de plata, plomo y zinc; y el segundo estado con mayor producción de cobre y oro (CAMIMEX, 2016).

En tercer lugar, se encuentra el estado de Durango cuya participación en la actividad minera ha sido importante a nivel nacional desde la época precolombina (SGM, 2018). Durango es el tercer productor de plata, plomo, fluorita y zinc; el cuarto productor de fierro; el quinto productor de oro, el séptimo productor de cobre y el octavo productor de caolín (CAMIMEX, 2016).

En cuarto lugar, se encuentra el estado de Chihuahua en donde desde la época del virreinato a la fecha se han explotado importantes yacimientos de minerales metálicos y no metálicos (SGM, 2019). Chihuahua es el principal productor de caolín y dolomita; el segundo productor de oro, plata, plomo y zinc; el tercer productor de barita; el quinto estado productor de cobre y fierro; y el sexto productor de yeso (CAMIMEX, 2016).

En quinto lugar, se encuentra el estado de Coahuila que de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2018) gran parte de su historia está estrechamente relacionada con la actividad minera. Coahuila es el principal productor de carbón, fierro, celestita, sulfato-magnesio, sulfato-sodio; ocupa el segundo lugar en producción de silicio, fluorita, barita y dolomita; cuarto lugar en producción de yeso; y el doceavo lugar en producción de plata (CAMIMEX, 2016).

En sexto lugar se encuentra el estado de San Luis Potosí que por su historia es uno de los estados más importantes si de minería se trata (SGM, 2018). San Luis Potosí es el principal productor de fluorita; el tercer productor de cobre y yeso; el sexto productor de dolomita y zinc; el séptimo productor de plata; el décimo productor de oro; y el onceavo productor de plomo (CAMIMEX, 2016).

3 ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA

Exploración: Consiste en la determinación de la extensión y forma del yacimiento mineral, contenido y calidad del mineral existente, actividades fundamentales para el inicio de un proyecto minero. Esta etapa se compone de inspecciones, estudios de campo, perforaciones de prueba, evaluación económica del yacimiento, factibilidad técnica, diseño de explotación, entre otros análisis exploratorios (Pérez, 2011).

Preparación del lugar y desbroce: Se propone la construcción de caminos de acceso ya sea para traer equipos pesados e insumos a la mina o para sacar los metales o minerales procesados. Cuando una mina se localice en un lugar remoto y sin desarrollo se debe empezar por desbrozar el terreno para la construcción de áreas de trabajo que alojaran al personal y al equipo. Es en esta etapa es donde ocurren cambios de mayor impacto a corto plazo (Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW), 2010).

Explotación de la mina: Esta etapa comprende un conjunto de operaciones mineras para la preparación y desarrollo del yacimiento. Los minerales metálicos se encuentran debajo de una capa de suelo o roca que debe ser removido o excavado para acceder al depósito del mineral. La extracción de minerales se ha tecnificado a través del tiempo dando como resultado varios métodos de extracción del mineral: Minería a tajo abierto; Minería aluvial, depósito del placer o placer; Minería subterránea; Procesamiento en minas inactivas y relaves (ELAW, 2010).

Disposición del desmonte o desecho de roca: Los yacimientos de metales están enterrados debajo de una capa de suelo o roca "material estéril" que debe ser retirada o excavada. Gran parte de los proyectos mineros generan una enorme cantidad de desechos (material estéril) que pueden tener niveles significativos de sustancias tóxicas por ello se deben evaluar cuidadosamente las opciones de manejo y los impactos asociados de la disposición del mineral (ELAW, 2010; Pérez, 2011).

Beneficio o procesamiento del mineral (Figura 4): Después de la extracción del material rocoso este es llevado a la planta de aprovechamiento en donde es triturado o molido hasta obtener el tamaño deseado en función de la técnica de aprovechamiento o concentración del mineral deseado. Las técnicas más usadas en la etapa de beneficio son: gravimetría, amalgamación, flotación de minerales y magnética (ELAW, 2010; Pérez, 2011; Jiménez et al., 2006).

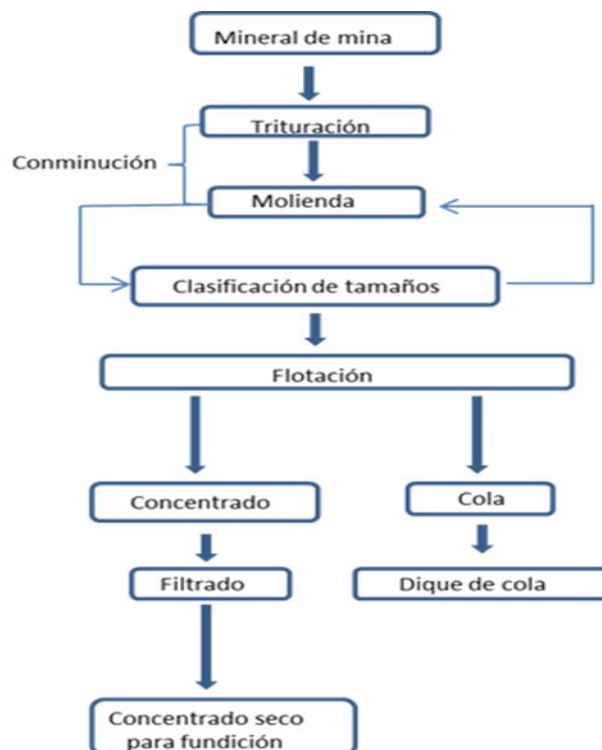


Figura 2. Diagrama de flujo para beneficio de minerales (Servicio Geológico Mexicano et al., 2017).

Disposición de relaves: El proceso de beneficio suele dejar gran cantidad de desechos denominados relaves en los cuales frecuentemente hay un gran contenido de metales tóxicos como cadmio, plomo y arsénico. Uno de los factores que determinan si el proyecto es ambientalmente aceptable es la manera en que se realiza la disposición de los relaves. Las principales opciones de disposición de relaves son: Deposito, cancha y tranque de relaves; deshidratación y disposición de relaves secos o con material de relleno; y disposición submarina de relaves (ELAW, 2010).

Rehabilitación y cierre: Es la última etapa de la actividad minera y su objetivo es el retorno de las condiciones del lugar lo más parecido posible a las condiciones ambientales y ecológicas previas a la existencia de la mina. Consta de actividades como cobertura de presas, aislamiento y señalamiento de zonas de peligro, restauración posible de la zona y mitigación de futuras contaminaciones (ELAW, 2010; Jiménez et al., 2006).

El cierre de minas debe buscar la estabilidad física, que se refiere a la estabilización de taludes, para proteger de derrumbes catastróficos a las áreas locales y aquellas ubicadas aguas abajo, así como la estabilidad contra la erosión eólica e hídrica, y al transporte de polvo o sedimentos; y la estabilidad química que se refiere a la contención de sustancias químicas contaminantes y a evitar que éstas sean introducidas al medio ambiente. La estabilidad química puede establecerse mediante el control de la fuente emisora, el control de migración o el tratamiento (Solleiro-Rebolledo y Figueroa Ramírez, 2017).

4 IMPACTOS DE LA MINERÍA

A pesar de que la minería es una actividad de desarrollo y que proporciona beneficios económicos a las regiones en las que se desarrolla, genera una serie de impactos sociales y ambientales negativos. Tales como la alteración y degradación de cuerpos de agua, daños a la biodiversidad, afectación a la salud humana, y la contaminación del aire (Dietrich y Cederstav, 2014).

4.1 Impacto en el ambiente

La industria minera es una de las más intensivas en el consumo de agua afectando así su disponibilidad con las grandes cantidades de agua utilizadas en los procesos de extracción (Paz, 2012). De igual forma se afecta su calidad, a causa de diferentes procesos contaminantes como: Drenaje ácido de mina y lixiviados contaminantes; Erosión de suelos y desechos mineros en aguas superficiales; Impactos causados por los embalses de relaves, escombreras o desechos de roca, lixiviación en pilas y botaderos; e Impactos por el desaguado de la mina (ELAW, 2010).

La calidad del aire suele ser afectada durante todas las etapas de la actividad minera, pero es en la etapa de operación donde se ve más reflejada (Pérez, 2011). La afectación al aire puede generarse por: transporte de material en el proceso de extracción por medio del viento, voladuras, transporte de materiales, erosión eólica, polvo fugitivo proveniente de depósitos de relaves, depósitos, pilas de desechos, emisiones de gases de vehículos y quema de combustibles. Estos contaminantes pueden afectar la salud de las personas y el ambiente (Prusty, 2012).

La minería afecta directamente al ambiente y a la vida silvestre (flora y fauna) mediante la remoción de vegetación y capa superficial del suelo, desplazamiento de la fauna, la liberación de contaminantes y la generación de ruido. Los resultados de este impacto son la pérdida y la fragmentación del hábitat (ELAW, 2010).

La calidad del suelo puede ser afectada por las actividades mineras y como consecuencia tenemos la modificación del paisaje, exposición de suelos,

desertización, modificación del relieve, desestabilización de laderas por sobrecargas y excavaciones, pérdida de propiedades físicas y químicas, suelos contaminados por partículas arrastradas por el viento, suelos contaminados por derrames químicos y residuos (Prusty, 2012).

4.2 Impacto social

A nivel social la industria minera genera impactos positivos como la creación de empleos, caminos, escuelas, aumento en las demandas de bienes y servicios en zonas remotas. Pero también puede generar impactos negativos como desplazamiento humano y reubicación, migración de personas, pérdida de acceso al agua limpia, impactos en los medios de subsistencia, impactos en la salud pública e impactos sobre los recursos culturales y estéticos (ELAW, 2010).

Los impactos más severos son aquellos que causan daños a la salud humana, la minería puede favorecer la disponibilidad de metales pesados al ambiente y al entrar estos en contacto con las personas pueden desencadenar diversas intoxicaciones y causar daños irreparables como defectos congénitos, cáncer e incluso la muerte (Londoño-Franco et al., 2016).

5 RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS

Durante muchos años la minería ha generado una gran cantidad de residuos conocidos como jales mineros (Rivera, 2009).

La minería a tajo abierto supone la extracción de grandes cantidades de desperdicio de roca para poder extraer el mineral en bruto deseado, posteriormente es molido hasta llegar a ser un grano fino de tierra que es procesado con químicos y separado en un proceso final como se muestra en la Figura 5. Los jales mineros son el desecho que queda después de haber extraído los materiales con valor comercial y su composición fisicoquímica depende de la mena explotada y las operaciones de beneficio (Rivera, 2009). Muchas veces se trata de una suspensión fina de sólidos en líquidos denominada “pulpa o lodo de jales” (Castro, 2018).

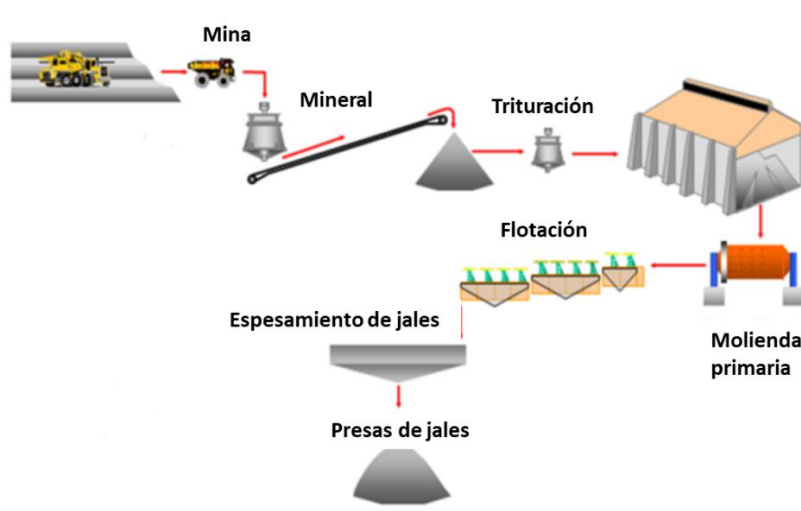


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de mineral y generación del jal (Castro, 2018).

Generalmente las características de los jales mineros son: un pH bajo, concentraciones de metales pesados, contenido de sulfatos generadores de ácido, bajo contenido de materia orgánica, ausencia de estructura de suelo y baja retención de agua. Las propiedades de los jales dependen de la concentración de sólidos que posean y granulometría, predominantemente se clasifican como arenas (S), limos (M) y arcillas (C) (Beltrán-Rodríguez et al., 2018).

5.1 Depósitos de residuos mineros

Las presas de jales son depósitos para el almacenamiento o disposición final de los jales (Figura 6) basados en una deposición hidráulica, cuya construcción y operación ocurren de manera simultánea (NOM-141-SEMARNAT-2003). Es considerado el método más versátil y económico para la disposición de relaves en la mayoría de los proyectos mineros (Rennat y Miller, 1997).

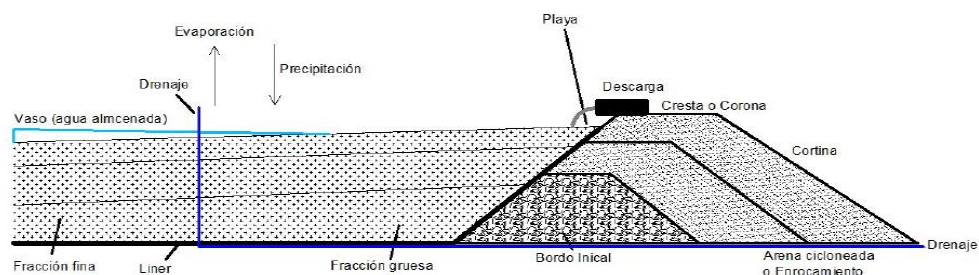


Figura 4. Estructura de un depósito de jales (Moreno, 2017).

Los jales mineros son transportados desde la planta de beneficio hasta el sitio final de depósito (embalses o presas) por medio de una tubería (Figura 7), en forma de lodos. Después de ser vertidos comienza un proceso de separación en el que los sólidos más pesados se van al fondo del depósito, formándose así una playa de leve inclinación que se extiende desde el punto de descarga hasta la poza de decantación donde el agua es acumulada para posteriormente ser recirculada a la planta de beneficio (Rennat y Miller, 1997).

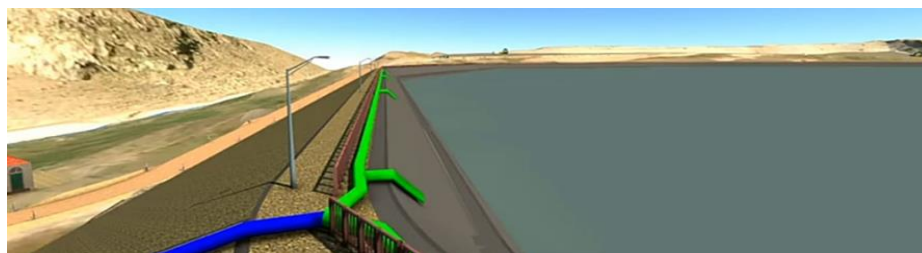


Figura 5. Tuberías de descarga de relaves (Arrollo, 2017).

5.2 Contaminación por residuos mineros

La composición mineralógica de los jales mineros contiene sulfuros metálicos residuales como la pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS). Estos al ser expuestos a la intemperie reaccionan ante la presencia de oxígeno, agua y microorganismos, dando inicio a un proceso de oxidación. Propiciando así la aparición de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), etc. (Romero et al., 2008).

Por sus características tóxicas, determinadas por la composición/oxidación y por su forma de manejo, los jales mineros pueden poner en riesgo el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Estos EPT representan un riesgo ambiental por la posibilidad de lixiviación e incorporación a cuerpos de agua, así como la movilización a otros ecosistemas por dispersión eólica o hídrica (Medel et al., 2008).

Debido a sus características fisicoquímicas algunos metales pueden interferir en las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones que lograrían causar problemas a los organismos. El arsénico por ejemplo por su alto grado de toxicidad representa un peligro al mezclarse con aguas naturales y ser ingerido causando efectos dañinos a la salud (Medel, 2009).

Uno de los principales problemas ambientales asociado a los jales es la producción de drenaje ácido y su dispersión a través de escurrimientos hídricos en zonas lluviosas, mientras que en zonas áridas se relaciona con la dispersión eólica (Romero et al., 2008; Romero y Gutiérrez, 2010).

El drenaje ácido se origina cuando los minerales que se extraen contienen altos contenidos de sulfuro y al ponerse en contacto con el oxígeno y el agua entran en un proceso de oxidación (Corrales-Pérez y Romero, 2013).

Los sulfuros son minerales poco frecuentes en la corteza terrestre. Sin embargo, en minería están asociados en la extracción de *Au*, *Ag*, *Fe*, *Cu*, *Zn* y *Pb*. La pirita (FeS_2)

es el sulfuro más común en la naturaleza (encontrándose en formaciones hidrotermales, rocas ígneas y depósitos sedimentarios). Cuando esta entra en contacto directo con la atmosfera y en presencia de agua se oxida produciendo acidez y liberación de EPT (LIFE-ETAD, 2012). Las minas generadoras de ácido pueden causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática (Revilla, 2018).

5.3 Manejo de residuos mineros

En el pasado los residuos mineros no tenían un manejo adecuado y muchos de ellos fueron depositados inadecuadamente en los alrededores de las minas, vertidos en cañadas o ríos sin consideración ambiental alguna, dejando pasivos mineros que requieren ser remediados (Medel, 2009). Actualmente la legislación mexicana ha buscado la manera de tener un control ambiental en relación al manejo de residuos mineros (Santos, 2012).

5.4 Legislación para el manejo de residuos minero-metalúrgicos

5.4.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) es la primera ley que establece un marco legal ambiental. Fue promulgada el 28 de enero de 1988 y es considerada la máxima ley de derecho ambiental en México. Tiene como objetivo principal favorecer el desarrollo sostenible y establecer las bases para “garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018b).

En el capítulo VI de la LGEEPA se establecen los lineamientos para el manejo de materiales y residuos peligrosos en el que se incluye su uso, recolección,

almacenamiento, transporte, reusó, reciclaje, tratamiento y disposición final (LGEEPA, 1988).

5.4.2 Reglamentos de la LGEEPA

Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos tiene por objeto reglamentar la LGEEPA en lo que se refiere a residuos peligrosos. En su Capítulo II, Artículos 20 y 36 se dispone lo que a jales mineros se refiere (REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS, 1988).

Reglamento de la LGEEPA en materia de prevención y control de la contaminación a la atmósfera tiene por objetivo reglamentar la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera mediante la Evaluación de Impacto Ambiental (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2016).

5.4.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) es la máxima ley en el territorio mexicano en materia de gestión de residuos. Su objetivo principal es asegurar el derecho de los ciudadanos al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

El artículo 17 de la LGPGIR señala que el manejo de los residuos de la industria minera-metalúrgica como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y

transformación de metales, deben disponerse en el sitio de su generación (LGPGIR, 2003).

5.4.4 Reglamento de la LGPGIR

El Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR) tiene como objetivo reglamentar la LGPGIR (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2016).

En el RLGPGIR (2006) dentro del Capítulo IV, Título Tercero se describen los artículos relacionados con el manejo de residuos provenientes de la industria minero metalúrgica. El artículo 32 enlista los residuos provenientes de los procesos metalúrgicos que son de competencia federal; el artículo 33 establece que los residuos minero-metalúrgicos deben manejarse de acuerdo a los planes de manejo establecidos en el proyecto minero; y el artículo 34 señala el uso de las normas oficiales mexicanas para la regulación de la disposición final de los residuos de la industria metalúrgica. Que deben incluir las condiciones para la construcción, operación, cierre almacenamiento temporal que se requieran en los proyectos.

5.5 Normas Oficiales Mexicanas

Dentro de la legislación ambiental en México se establecen lineamientos para el manejo y disposición de los residuos producto de la industria minero-metalúrgica. Las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental describen los requisitos para el diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de residuos mineros (Cuadro 3) (RLGPGIR, 2006).

Cuadro 2. Normas Oficiales Mexicanas que regulan el manejo de residuos mineros (DOF, s/f).

Norma Oficial Mexicana	Que establece	Especificaciones
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.	6. Procedimiento para determinar si un residuo es peligroso. 7. Características que definen a un residuo como peligroso
NOM-120-SEMARNAT-2011	Establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos.	4.1 Especificaciones generales. 4.2 Especificaciones particulares. 4.3 Límite máximo de afectación por hectárea.
NOM-141-SEMARNAT-2003	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.	5.1 Cambio de uso de suelos en terrenos forestales, y utilización de cauces y zonas federales. 5.2 Caracterización del jal. 5.3 Caracterización del sitio. 5.4 Criterios de preparación del sitio. 5.5 Criterios del proyecto. 5.6 Criterios de construcción-operación. 5.7 Criterios de postoperación. 5.8 Monitoreo.
NOM-157-SEMARNAT-2009	Establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros su objetivo es promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos, así como alentar su manejo integral a través de nuevos procesos, métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles.	5.1 Clasificación de los residuos mineros. 5.2 Propósito de los planes de manejo. 5.3 Elementos y procedimientos a considerar al formular planes de manejo de los residuos mineros. 5.4 Caracterización de los residuos. 5.5 Criterios generales para la valorización de residuos. 5.6 Criterios para el almacenamiento y disposición final de residuos.

6 REHABILITACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS

De acuerdo a Torres et al. (2019) la rehabilitación es el proceso de restablecimiento de un ecosistema cuando ha sido destruido por disturbios extremos, donde se busca restablecer el relieve, la hidrología y el suelo; la diversidad de especies de la flora y la fauna se desarrolla de forma espontánea o asistida por el hombre y se recuperan los procesos ecológicos vitales, de tal forma que el ecosistema resultante sea capaz de auto sostenerse (Figura 8).

Los elementos de la rehabilitación son: preparación técnica del terreno ayuda a la conformación de terrazas constantes que permiten mitigar los procesos erosivos de las áreas afectadas por la minería; remediación del terreno basada en técnicas de tratamiento para neutralizar, eliminar o transformar los elementos o sustancias contaminantes en el ambiente para conseguir la estabilidad química; y rehabilitación biológica: Selección y clasificación de las especies a utilizar en áreas degradadas, promueve la recuperación biológica del suelo, la reducción y control de la erosión, la estabilización de terrenos, la protección de los recursos hídricos y la integración paisajística de los ecosistemas (Torres-Batista et al., 2019).



Figura 6. Rehabilitación de Mina Cuale, Jalisco (Moreno, 2017).

6.1 Remediación

La LGPGIR (2003) define a la remediación como un conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta

un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos. La remediación trata los problemas que no se pueden solucionar con simple restauración (Rivera, 2009).

6.1.1 Métodos de remediación

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse (Guzmán, 2012; INECC, 2019; Fundación Chile, s.f.):

a) Según el objetivo de la remediación:

Técnicas de contención: Aíslan el contaminante en el medio, sin actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en el suelo.

Técnicas de confinamiento: Reducen la movilidad del contaminante mediante la alteración de condiciones fisicoquímicas del medio.

Técnicas de descontaminación: Disminuyen o eliminan la concentración de contaminantes presentes en el medio.

b) Según el lugar en el que se realizan:

Tratamiento *in situ*: Es cuando el tratamiento de remediación se lleva a cabo directamente en el sitio contaminado, sin necesidad de excavaciones ni de transportar el suelo fuera de la zona contaminada. Utiliza técnicas como la adsorción, precipitación o la complejación sobre las partículas del suelo para impedir la movilidad potencial de los contaminantes.

Tratamiento *ex situ*: implica la excavación y el transporte del suelo contaminado, para trasladarlo a instalaciones fijas en donde se aplicará el tratamiento para buscar la separación/extracción. Este método conlleva a la degradación del suelo contaminado debido a los tratamientos físico-químicos o biológicos, para lograr la remoción de los contaminantes metálicos. Se divide en dos tratamientos: *on site* que se realiza en el mismo sitio en donde se realizó la excavación y *off site* que se realiza fuera del sitio del que se excavo.

c) Según el tratamiento aplicado:

Tratamientos físico químicos: Se aplica para reducir la movilidad de los contaminantes, fundamentalmente inorgánicos como metales pesados, mediante reacciones químicas que reducen su solubilidad en el suelo y su lixiviado.

Tratamientos térmicos: Utilizan altas temperaturas para volatizar, descomponer o fundir los contaminantes.

Tratamientos biológicos: Se enfocan en la degradación, transformación y/o remoción de contaminantes mediante la actividad metabólica de ciertos organismos.

Cuadro 3. Ventajas y desventajas del tipo de tratamiento (Lobo, 2013).

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	<p>Pueden mejorar las condiciones del medio ambiente.</p> <p>Los contaminantes generalmente son destruidos.</p> <p>Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior</p> <p>Efectivo en cuanto a costo.</p>	<p>Mayores tiempos de tratamiento.</p> <p>Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos.</p> <p>No puede emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.</p>
TRATAMIENTOS TÉRMICOS	<p>Tiempos rápidos de limpieza.</p>	<p>Mano de obra intensiva.</p> <p>Tratamiento más costoso (empleo de energía y equipo).</p>
TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS	<p>Se realiza en periodos cortos.</p> <p>Equipo accesible y no necesita mucha energía ni ingeniería.</p> <p>Efectivos en cuanto a costos.</p>	<p>Residuos generados por separación deben tratarse (aumento en costos)</p> <p>Los fluidos de extracción aumentan la movilidad de los contaminantes (se necesitan sistemas de recuperación).</p>

6.2 Tratamientos de remediación

6.2.1 Tratamientos físico-químicos

Ortiz, et al. (2007) y Fundación Chile (s.f.) describen los siguientes tratamientos físico-químicos:

1. Adición de enmiendas: Se basa en la reducción de la movilidad y biodisponibilidad de sales y metales pesados mediante la adición de sustancias orgánicas e inorgánicas al suelo contaminado.
2. Barreras de suelo seco: Deseccación del suelo mediante un flujo de aire seco que aumenta la capacidad de retención de sustancias contaminantes líquidas, impidiendo su movilización hacia depósitos de agua subterránea.
3. Barreras físicas (verticales-horizontales): Consiste en la introducción de barreras impermeables en el suelo de tal manera que evite la migración de la contaminación.
4. Barreras hidráulicas: Consiste en la extracción de aguas subterráneas en la zona contaminada o aguas arriba para evitar su contaminación.
5. Barreras permeables activas: Instalación de una pantalla perpendicular al flujo de contaminación para la absorción, precipitación y degradación de aguas subterráneas.
6. Inundación de suelos: Extracción de contaminantes con el uso de agua o soluciones acuosas que transporten los contaminantes a una zona para su tratamiento.
7. Estabilización físico química: Limitación de la solubilidad o movilidad del contaminante por la adición de materiales como cemento, cal o polímeros.
8. Extracción de agua: consiste en la extracción del agua contaminada del suelo y subsuelo para su posterior tratamiento.
9. Extracción de aire: Extracción de contaminantes en el suelo mediante su volatilización o evaporación a través de pozos de extracción que conducen el aire y los contaminantes a la superficie, donde pueden ser tratados
10. Inyección de aire comprimido: Volatiliza los contaminantes disueltos en el agua subterránea y provoca su desplazamiento en forma de vapor.

11. Inyección de solidificantes: Encapsulamiento de contaminantes mediante la mezcla de suelos con aditivos solidificantes.
12. Lavado de suelos: El suelo es separado por tamizado, densidad o gravedad de las partículas más gruesas y posteriormente es lavado con químicos que permiten desorber y solubilizar los contaminantes.

6.2.2 Tratamientos térmicos

La fundación Chile (s.f.) en su manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados describe los siguientes tratamientos térmicos:

1. Calentamiento por conducción térmica: Evaporación o destrucción de contaminantes aplicando calor a través de tubos de acero o mantas que cubren la superficie del suelo.
2. Calentamiento por radiofrecuencia: Calentamiento del suelo por medio de energía electromagnética para favorecer la evaporación de contaminantes.
3. Calentamiento por resistencia eléctrica: Volatilización y movilización de contaminantes mediante arreglos de electrodos instalados en torno a un electrodo central que genera hasta 100°C.
4. Desorción térmica: Volatilización de contaminantes en suelos extraídos y tratados en equipos denominados desorbedores.
5. Incineración: Exposición a altas temperaturas (800-1200°C) en presencia de oxígeno de compuestos orgánicos contaminantes para su oxidación y volatilización
6. Inyección de agua caliente: Movilización de contaminantes mediante la inyección de agua caliente.
7. Inyección de aire caliente: Volatilización de contaminantes mediante la inyección de aire caliente a altas temperaturas.
8. Inyección de vapor: Movilización, evaporación y destrucción de contaminantes mediante la inyección de vapor.

9. Pirolisis: Descomposición química de compuestos orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno.
10. Vitrificación: Calentamiento del suelo contaminado a altas temperaturas para transformarlo en un material vítreo estable, reduciendo la movilidad de los contaminantes. Genera gases tóxicos que deben ser tratados antes de emitirse a la atmosfera.

6.2.3 Tratamientos biológicos

A pesar de que existen diversas técnicas de remediación (físico-químicas) de suelos en los últimos años la utilización de técnicas de remediación biológica (bio-remediación) ha sido la más aceptada. Consiste en el empleo de los sistemas biológicos de los organismos vivos para degradar o transformar a los contaminantes, de manera que su toxicidad se vea reducida. Además de que utilizan tecnologías más sencillas, más baratas y más respetuosas con el ambiente con respecto a otros tratamientos en los que los contaminantes son simplemente extraídos y transportados a otros lugares (Ortiz, et al., 2007; Guzmán, 2012).

De acuerdo con Ortiz, et al. (2007) y la Fundación Chile (s.f.) los principales tratamientos biológicos son:

1. Bioaumentación: Biodegradación o biotransformación de contaminantes mediante la adición de microorganismos con capacidad de degradación de contaminantes orgánicos.
2. Bioestimulación: Aceleración de las reacciones de biodegradación mediante la optimización de las condiciones medioambientales que favorecen el crecimiento de aquellos microorganismos que realicen la metabolización de contaminantes orgánicos.
3. Biotransformación de Metales: Inmovilización y/o transformación microbiana de metales u otros compuestos inorgánicos mediante mecanismos de oxidación, reducción, metilación, dimetilación, formación de complejos, biosorción y/o acumulación intracelular, entre otros.

4. Bioventilación: Estimulación de la biodegradación natural de compuestos contaminantes en condiciones aeróbicas, mediante el suministro de aire a través de pozos de inyección, suministrando el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores.
5. Compostaje: Estimulación de la actividad biodegradadora, aerobia y anaerobia, de microorganismos nativos, a partir de una mezcla del material contaminado con sólidos biodegradables, mejorando el balance de nutrientes.
6. Fitorremediación: Remoción, transferencia, estabilización, concentración y/o destrucción de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) presentes en suelos, lodos y sedimentos, mediante la utilización de especies vegetales.
7. Biolabranza: Variación del compostaje en la cual el suelo contaminado es mezclado con agentes de volumen y nutrientes, y es removido periódicamente mediante el arado, favoreciendo su aireación.
8. Lodos Biológicos: Degradación en fase acuosa llevada a cabo mediante microorganismos en suspensión o inmovilizados en fase sólida.
9. Pilas Biológicas: Variación del compostaje en la cual, además de agentes de volumen, se adiciona agua y nutrientes. Las pilas de suelo generalmente se cubren con plástico para controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento.

6.2.4 Fitorremediación

La Fitorremediación es una de las vertientes de la biorremediación. Ha experimentado un auge como técnica emergente, debido a las ventajas que presenta, como beneficios económicos, ambientales y estéticos, además de una buena aceptación social (Guzmán, 2012).

Se ha descrito a la fitorremediación como una tecnología sustentable que mediante procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema radicular pueden reducir la concentración y/o peligrosidad de

contaminantes orgánicos e inorgánicos de los suelos, sedimentos, agua e incluso el aire (Núñez et al., 2004). Es de aplicación *in situ* y considera un equilibrio costo-efectivo, lo que la hace preferible entre otras técnicas (Rivera, 2009). Puede ser muy eficiente al tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos; compuestos inorgánicos como Cd, Cr, Co, Pb, Ni, Se y Zn; y también en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua (Agudelo et al., 2005).

Cuadro 4. Ventajas y desventajas de la fitorremediación (Núñez et al., 2004).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es una tecnología sustentable. • Bajo costo. • Es aplicable a ambientes con concentraciones de contaminantes de bajas a moderadas. • Es poco perjudicial para el ambiente. • No produce contaminantes secundarios. • Tiene una alta probabilidad de ser aceptado por el público. • Los metales absorbidos pueden ser reciclados. • Se pueden aplicar a una gran variedad de contaminantes. • Reduce la entrada de contaminantes al ambiente y salida al sistema de aguas subterráneas debido a que los contaminantes se quedan en la planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso lento cuando se trabaja con árboles y arbustos. • El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a utilizar. • Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas. • Puede depender de la estación del año. • Los contaminantes pueden acumularse en la madera para combustión. • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras. • Los contaminantes acumulados en hojas pueden ser liberados al ambiente durante el otoño.

6.2.4.1 Mecanismos de la fitorremediación

Delgadillo et al. (2011) señala que las tecnologías de fitorremediación pueden utilizarse como medio de contención o eliminación. Siendo seis procesos básicos a través de los cuales las plantas pueden contribuir a la recuperación de suelos, sedimentos y aguas contaminadas (Lobo, 2013).

De acuerdo con Arias et al. (2010) los mecanismos que conforman la fitorremediación de acuerdo a las partes de la planta son (Figura 9):

Fitoestabilización: Se enfoca en la formación de una capa vegetal donde se fijan los metales a través de un proceso de inmovilización dentro de la raíz de la planta, reduciendo la biodisponibilidad hacia la fauna silvestre. La planta sirve para la reducción de la dispersión eólica y las raíces para evitar la erosión hídrica y lixiviación.

Fitoextracción: Se basa en el uso de plantas para la remoción o reducción de metales contaminantes en jales mineros, mediante la acumulación de metales en la biomasa de la planta.

Rizofiltración: Las plantas a través de su sistema radicular pueden absorber, concentrar y precipitar materiales pesados de aguas contaminadas y degradar compuestos orgánicos en asociación con los microorganismos.

Fitoestimulación: Se utilizan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradantes.

Fitovolatilización: Los contaminantes o compuestos orgánicos son captados, modificados y liberados a la atmósfera por medio de la transpiración de las plantas.

Fitodegradación: Consiste en el metabolismo de contaminantes a través de enzimas catalizadoras de su degradación dentro de los tejidos de la planta.

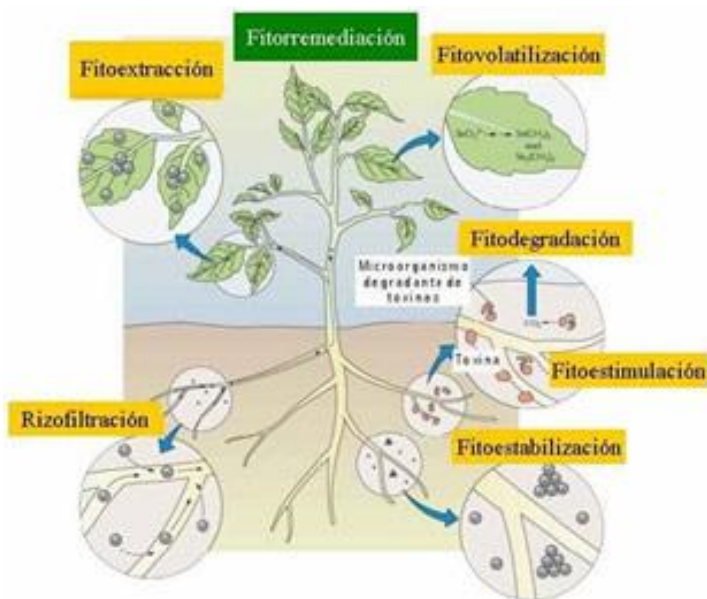


Figura 7. Componentes de la Fitorremediación (Fitorremediación, 2019).

6.2.5 Plantas metalófitas

Las plantas metalófitas son especies que se desarrollan sobre suelos degradados por actividades mineras. Han desarrollado mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos contenidos de metales, y son consideradas herramientas biológicas fundamentales que pueden utilizarse en los procesos de fitorrestauración y fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados por actividades industriales y mineras (Becerril et al., 2007).

Estas especies pueden restringir la absorción o translocación de metales hacia las hojas (plantas exclusoras), o absorberlo y acumularlo en su biomasa aérea (plantas acumuladoras). En un nivel intermedio se encuentran las plantas indicadoras que cuya concentración metálica refleja la del suelo (Jara-Peña et al., 2014; Servellón, 2011).

Dentro de las plantas acumuladoras destacan las plantas hiperacumuladoras, que se caracterizan por concentrar metales entre 10 y 100 veces las concentraciones normales (Servellón, 2011). Las plantas hiperacumuladoras poseen las características de absorción, tolerancia y translocación de altos niveles de metales

pesados, por lo que pueden desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales pesados y también pueden utilizarse en las diferentes técnicas de fitorremediación (Trejo-Calzada et al., 2015). Actualmente en los mecanismos de fitoextracción, se han utilizado plantas hiperacumuladoras para la limpieza de suelos contaminados (Guevara et al., 2018).



Figura 8. Respuesta típica de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo (Adriano, 2001).

6.2.6 Estudios de fitorremediación

Cuadro 5. Estudios relacionados con la fitorremediación de suelos contaminados en México.

AUTOR	FECHA	TITULO DE INVESTIGACIÓN	APORTE	APLICACIÓN
Cabezas et al.	2004	Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora	Evaluaron la capacidad de absorción y acumulación de metales pesados (Pb, Cu, Ni, Zn y Cr) en la parte aérea y raíces de tres especies vegetales.	Las especies <i>Vicia sativa</i> L, <i>Hordeum vulgare</i> y <i>Heliantus annuus</i> L se plantaron en suelos enmendados con lodos de depuradora en condiciones de invernadero. La adición de lodos ayudo a que la acumulación de metales en las plantas aumentara.
López-Martínez et al.	2005	Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas	Muestran a la fitorremediación como una tecnología útil para la limpieza de suelos contaminados.	En la solución a los problemas de la contaminación y la eventual recuperación de suelos.

Villagrana	2006	Fitorremediación de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial	Señala que las características físico-químicas del suelo pueden ser un limitante para la fitorremediación.	Utilizo pasto Ryegrass para la absorción de plomo, sobre un suelo salino-sódico.
Ruiz et al.	2007	Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros	Utilizan zacate Sudán, Bermuda y Ryegrass para el mejoramiento de suelos.	Mejoramiento y cobertura vegetal de suelos salinos de zonas áridas y semiáridas.
Landeros-Márquez et al.	2011	Uso potencial del huizache (<i>acacia farnesiana</i>) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo	Evaluaron el efecto del plomo en la actividad fotosintética y fitoextracción de huizache como una alternativa de remediación.	La acumulación de plomo en los tejidos de huizache puede servir para la determinación de métodos de manejo en un proceso de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados.
Galaviz y Trejo	2011	Uso de <i>Cenchrus ciliaris</i> L y <i>Setaria verticillata</i> en la fitoestabilización de suelos contaminados con plomo y cadmio	Las especies evaluadas resultaron ser buenas fitoestabilizadoras de suelos contaminados.	Al tener un buen desarrollo sobre suelos contaminados con plomo y cadmio pueden usarse en rehabilitación de suelos contaminados por la actividad minera.
Delgado	2014	Riesgo ambiental y alternativas de fitorremediación de un sitio contaminado por residuos mineros	Aporta elementos para la implementación de programas de fitorremediación.	Programas de fitorremediación que aporten beneficios a la salud y calidad de vida.
Martínez et al.	2015	Restauración de un suelo contaminado con hidrocarburos por un tren de tratamiento químico-biológico	Señala que la combinación entre tratamientos físico-químicos y tratamientos biológicos pueden reducir el contenido de hidrocarburos en suelos.	Experimentación para la reducción de hidrocarburos en suelos contaminados.
Arias-Trinidad et al.	2017	Uso de <i>Leersia hexandra</i> (poaceae) en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo fresco e intemperado	Evaluaron la densidad de bacterias, producción de biomasa vegetal y fitorremediación de <i>Leersia hexandra</i> en un suelo contaminado con petróleos frescos.	<i>Leersia hexandra</i> es un pasto que tiene la capacidad de crecimiento y adaptación a sitios contaminados con hidrocarburos y puede usarse en la fitorremediación de estos.

Carrillo-González	2017	Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos	Análisis de las prácticas de manejo de enmiendas que pueden tener un impacto positivo en fitorremediación.	Fitorremediación asistida o inducida.
González-Chávez et al.	2017	Uso de leguminosas (fabaceae) en fitorremediación	El uso de fabaceae en remediación es de utilidad debido a que pueden fijar nitrógeno atmosférico y no depende de fertilización.	El uso de leguminosas en la remediación de suelos con altas concentraciones de EPT.
Perea-Vélez et al.	2017	Fitorremediación asistida por microorganismos: énfasis en bacterias promotoras del crecimiento de plantas	Asegura que la participación microbiana en fitorremediación favorece el ciclo de nutrientes, aumenta la producción de la biomasa vegetal y disminuye la toxicidad de los EPT.	La identificación, aislamiento e inoculación de BPCP puede ser de utilidad para mejorar la revegetación de sitios contaminados con EPT.
González-Chávez et al.	2017	Alternativas de fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos	Describe las principales alternativas prácticas de remediación, fundamentadas científicamente y con mayor aceptación pública.	se puede aplicar para la remediación de sitios con otros problemas de contaminación y a sitios degradados o marginales.
Covarrubias y Peña	2017	Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación	Una estrategia para mejorar el proceso de fitoextracción de metales es a través de la inoculación de microorganismos del suelo.	Proponen la fitorremediación como una alternativa para remediar suelos contaminados por metales pesados producto de actividades mineras.
Guevara et al.	2018	Fitorremediación de suelos contaminados con Mn y Cu a partir de <i>Ocimum basilicum</i> .	<i>Ocimum basilicum</i> (Albahaca) puede utilizarse como planta hiperacumuladora de cobre y manganeso	La utilización de la fitorremediación con la planta <i>Ocimum basilicum</i> se utiliza para descontaminar la tierra expuesta a metales pesados, específicamente el cobre y el manganeso

“Elaboración propia”

7 DISCUSIÓN

La fitorremediación es el tratamiento biológico que más se ha usado en acciones de remediación de áreas afectadas por residuos de actividades mineras (Covarrubias y Peña, 2017). Sin embargo, los tratamientos físico-químicos también han demostrado ser eficientes en la rehabilitación de estas áreas (Lobo, 2013). Villagrana (2006), Martínez et al. (2015) y Carrillo-González (2017) indican que la combinación entre la fitorremediación y los tratamientos físico-químicos tiene mayor eficiencia en la remediación de suelos contaminados, ya que mejoran las condiciones del suelo para la estabilidad de las plantas, así como, la reducción del tiempo del proceso de rehabilitación.

Ortiz, et al. (2007); Guzmán (2012) y Núñez, et al. (2004) aseguran que la fitorremediación en comparación con las técnicas físico-químicas es más práctica, de bajo costo, y tiene más aceptación social porque considera el uso de especies vegetales y microorganismos asociados a sus raíces. Por otro lado, señalan que la fitorremediación es el tratamiento que más tiempo necesita, porque considera el ciclo biológico de las plantas y de acuerdo a lo establecido por Carrillo-González (2017) puede resultar inefectivo si no se conocen las características físico-químicas de los residuos mineros.

Corrales-Pérez y Romero (2013), mencionan que los riesgos ambientales generados por la actividad minera son totalmente opuestos a sus beneficios socio-económicos, por lo que es necesario buscar una alternativa de remediación que asegure la estabilidad química de los suelos afectados por residuos de mina; por ello es necesario realizar pruebas que permitan identificar el potencial de los residuos mineros para generar acidez y la presencia de elementos potencialmente tóxicos sirviéndonos de guía las Normas Oficiales Mexicanas que regulan el manejo de los residuos mineros (Romero y Gutiérrez, 2010).

Los mecanismos de fitorremediación que pueden tener buenos resultados para la remediación de depósitos de residuos mineros son la fitoestabilización debido a que reduce la biodisponibilidad de contaminantes hacia el ambiente mediante la

absorción y acumulación de contaminantes a través de la raíz de la planta; y la fitoextracción la cual consiste en la remoción o reducción de contaminantes mediante la acumulación de metales en la biomasa de la planta (González-Chávez et al., 2017).

La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que para la remediación de depósitos de residuos mineros la superficie del depósito debe cubrirse con suelo recuperado o con materiales que permitan la fijación de especies vegetales; se debe estabilizar el talud de la cortina contenedora para dar una inclinación que garantice su estabilidad estática y dinámica; y las especies vegetales que se utilicen para cubrir el depósito deben ser nativas para garantizar la sucesión y su permanencia (DOF, 2004).

Aunque es escasa la información sobre las especies vegetales que pueden crecer en suelos contaminados Rivera et al. (2009); Gómez-Bernal et al. (2010); Arias et al. (2010); Trejo-Calzada et al. (2015) y González-Chávez (2017) tienen registros de especies que se han desarrollado sobre estos y que pueden utilizarse como remediadoras.

Estudios realizados en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo describen a las siguientes especies como posibles fitorremediadoras en zonas áridas: *Washingtonia robusta* (palmera de abanico mexicana) tiene la capacidad de acumular plomo en los tejidos de sus raíces evitando la movilidad de los contaminantes hacia el subsuelo, por lo que puede ser usada en fitoestabilización; *Acacia farnesiana* (huizache) esta especie puede acumular plomo en su tallo por lo que puede utilizarse en fitoextracción; *Amaranthus hybridus* (quelite) puede acumular plomo en hojas, tallo y raíz por lo que puede usarse en fitoextracción de metales pesados; y *Opuntia ficus indica* (nopal) en asociación con micorrizas y algunas dosis de fertilizantes puede favorecer la fitoestabilización de suelos (Trejo-Calzada et al., 2015).

En el mismo contexto, Noriega-Luna, et al. (2016) identificaron especies vegetales asociadas a jales en Guanajuato y como resultado del estudio obtuvieron que en el área se encuentran presentes especies como *Acacia farnesiana* (huizache), *Acacia parviflora* (fabaceae), *Dodonaea viscosa* (Chapulixtle), *Senecio salignus* (Asomiate

amarillo), *Asclepias curassavica* (algodoncillo) y *Phoradendron sp* (muérdago americano) que pueden tener un gran potencial como especies remediadoras, sin embargo, mencionan que es necesario realizar estudios para conocer cuáles son las características que permiten a estas especies desarrollarse en este ambiente. Además, Hernández-Acosta, et al. (2009) en un estudio realizado en un jal de Pachuca, Hidalgo encontró que las especies acumuladoras de ETP fueron: *Solanum corymbosum* (solanaceae; cobre), *Brickellia veronicifolia* (mejorana; plomo y zinc), *Atriplex suberecta* (atriplex, cadmio), *Cynodon dactylon* (zacate bermuda; manganeso), y *Bouteloua curtipendula* (banderilla; níquel).

Por otro lado, en Taxco, Guerrero Gómez-Bernal, et al. (2010) identificaron las especies vegetales que se desarrollan sobre áreas perturbadas de jales mineros, como resultado se observa que las familias más representativas son *Asteraceae*, *Cupressaceae*, *Amaranthaceae*, *Commelinaceae* y *Fabaceae*. Así mismo, algunas pruebas realizadas en jales de Nacozari de García, Sonora señalan el uso de *Atriplex Lentiformis* (arbusto de codorniz) y *Buchloe Dactyloides* (Buffalo Grass), así como a la familia *Euphorbiaceae* como posibles fitoestabilizadoras del suelo (Rivera. 2009). También, Díaz, et al. (2005) citado por Gómez-Bernal, et al. (2010) realizaron un estudio en jales de Zacatecas, donde se encontró que las familias desarrolladas en estos jales fueron *Asteraceae*, *Poaceae* y *Solanaceae*.

Un estudio más reciente es el realizado por González-Chávez (2017) propone el uso de leguminosas como fitorremediadoras, dentro de las especies posibles a utilizar se encuentran *Sesbania virgata* (acacia café) que por sus propiedades de tolerancia y estabilización de altas concentraciones de Cu, Zn y Cr puede usarse como fitoestabilizadora, *Acacia farnesiana* (huizache) que tiene la capacidad de acumular concentraciones altas de Pb lo que le da el potencial como fitoestabilizadora, y como especies fitoextractoras sugieren a *Sesbania drummondii* (poisonbean), *Melilotus albus* (trébol blanco) y *M. officinalis* (trébol amarillo) por su capacidad para acumular altas concentraciones de plomo.

8 CONCLUSIONES

Los tratamientos de remediación que han tenido más éxito en la rehabilitación de áreas afectadas por residuos mineros son la fitorremediación y los tratamientos físico-químicos.

En conjunto la fitorremediación y algunos tratamientos físico-químicos también han demostrado ser una buena opción para remediar suelos contaminados con residuos mineros, propiciando las condiciones óptimas para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, para determinar el tipo de tratamiento a utilizar es necesario realizar procedimientos de identificación y clasificación de residuos mineros.

El tratamiento de fitorremediación se ha considerado como un tratamiento biológico adecuado para la rehabilitación de depósitos de residuos mineros debido a sus múltiples ventajas y a sus mecanismos fitoextracción y fitoestabilización que ayudan a reducir la biodisponibilidad de contaminantes al ambiente,

La fitorremediación es la técnica de remediación que genera menos impactos negativos al ambiente, esto es muy importante debido a que generalmente la actividad minera produce una serie de impactos que se necesitan mitigar, para el caso de suelos contaminados con residuos mineros se utilizan especies vegetales, ya que cumplen con las características de fitoestabilización o fitoextracción, y generalmente son aquellas especies que se desarrollan sobre o alrededor de suelos de mina (plantas metalófitas). Para remediar suelos contaminados con residuos de actividades mineras de zonas áridas se utilizan especies de las familias Fabaceae y Poaceae.

De acuerdo con la presente revisión, se concluye que es escasa la literatura reciente en relación a la fitorremediación de áreas afectadas por residuos de minas en México. Por lo que se evidencia un área de oportunidad para la realización de estudios en la materia.

9 REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals* (2a ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Agudelo, L. M., Macias, K. I., y Suárez, A. J. (2005). *Fitorremediación: La alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos*. 2(1), 5.
- Arias-Trinidad, A., Rivera-Cruz, M. del C., Roldán-Garrigos, A., Aceves-Navarro, A., Quintero-Lizaola, R., y Hernández-Guzmán, J. (2017). Uso de *Leersia hexandra* (Poaceae) en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo fresco e intemperizado. *Revista de Biología Tropical*, 65(1), 21–30.
- Arrollo, D. (2017, agosto 18). *Recrecimiento de Depósito de Relaves*. LinkedIn. <http://bit.ly/Proyectista3D>
- Becerril, J. M., Barrutia, O., Plazaola, J. I. G., Hernández, A., Olano, J. M., y Garbisu, C. (2007). *Especies nativas de suelos contaminados por metales: Aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación*. 16, 7.
- Beltrán-Rodríguez, L. N., Larrahondo, J. M., y Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: Oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 0(44), 5–20. <https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- Cabezas, J. G., Alonso, J., Pastor, J., Sastre-Conde, I., y Lobo, M. C. (2004). Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora. *Proceedings of the First International Meeting on Environmental Biotechnology and Engineering.*, 6–8.
- CAMIMEX. «Mapa de Indicadores Mineros», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_nacional/.
- CAMIMEX. «Mapa Estatal Chihuahua», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=Chihuahua&idEstado=9.
- CAMIMEX. «Mapa Estatal Coahuila», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=Coahuila&idEstado=6.

- CAMIMEX. «Mapa Estatal de San Luis Potosí», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=San%20Luis%20Potos%20C3%AD&idEstado=25.
- CAMIMEX. «Mapa Estatal Durango», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=Durango&idEstado=11.
- CAMIMEX. «Mapa Estatal Sonora», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=Sonora&idEstado=27.
- CAMIMEX. «Mapa Estatal Zacatecas», 2016. https://camimex.org.mx/index.php/mapa_estatal/?estado=Zacatecas&idEstado=33.
- Carrillo-González, R. (2017). FITORREMEDIACIÓN ASISTIDA CON ENMIENDAS Y FITOESTABILIZACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS. *AgroProductividad*, 10(4). <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/990>
- Castro Arias, M. (2018). *Nuevas tecnologías para el uso y disposición de relaves mineros aplicados a CODELCO, División El Teniente* [Tesis, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3592>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2018). *El Sector Minero y su Importancia en las Finanzas Públicas de México, 2007-2017* (Núm. 034). <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2018/cefp0342018.pdf>
- Corrales-Pérez, D., y Romero, F. M. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427–446. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n3a1>
- Covarrubias, S., y Peña, J. J. (2017). CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS EN MÉXICO: PROBLEMÁTICA Y ESTRATEGIAS DE FITORREMEDIACIÓN. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental), 7–21.

- Delgado, M. del R. (2014). *Riesgo Ambiental y Alternativas de Fitorremediación de un Sitio Contaminado por Residuos Mineros* [Tesis Doctoral]. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
- Delgado, R. G. C. (2010). *La ecología política de la minería en América Latina*. <http://www.librosoa.unam.mx/xmlui/handle/123456789/1325>
- Dietrich, S., y Cederstav, A. (2014). *Lineamientos Básicos para la Evaluación de Impactos Ambientales de Proyectos Mineros: Términos de referencia recomendados*. Interamerican Association for Environmental Defense (AIDA). <https://aida-americas.org/es/lineamientos-b-sicos-para-la-evaluacion-de-impactos-ambientales-de-proyectos-mineros-t-rminos-de>
- DOF. (s/f). *Normas Oficiales Mexicanas*.
- DOF. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-141-SEMARNAT-2003, 55 (2003).
- DOF. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, (2006).
- DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, 32 (2009).
- DOF. NORMA Oficial Mexicana NOM-120-SEMARNAT-2011, (2011). <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4672/semarnat/semarnat.htm>
- Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). (2010). *Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. <https://www.elaw.org/es/content/gu%C3%AD-para-evaluar-eias-de-proyectos-mineros>
- Fitorremediación*. (2019). Cuaderno de Cultura Científica. <https://culturacientifica.com/2019/01/20/fitorremediacion/>
- Fundación Chile, y CEETM. (2010). *SECTOR MINERÍA ESTRATEGIAS PARA EL FORTALECIMIENTO DEL CAPITAL HUMANO DEL SECTOR, CON BASE A LAS COMPETENCIAS DE LAS PERSONAS*. <https://conocer.gob.mx/wp-content/uploads/2017/05/mineria.pdf>
- Galaviz, A. D., y Trejo, R. (2011). USO DE *Cenchrus ciliaris* L. y *Setaria verticillata* L. EN LA FITOESTABILIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PLOMO Y CADMIO. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas.*, 10, 27–31.
- Garza, G. (2003). *La urbanización de México en el siglo XX* / (1. ed.). Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, El Colegio de México,.

- Gaytán, E., y Benita, F. (2014). La industria minera en México: Patrones de desempeño y determinantes de eficiencia. *Lecturas de Economía*, 80. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n80a4>
- Góngora, J. P. (2013). *Evolución reciente de la minería en México*. 63, 5.
- González, J. de J. (2011). *Minería en México. Referencias generales, régimen fiscal, concesiones y propuestas legislativas*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- González-Chávez, M. C. A., Carrillo, R., Sánchez-López, A. S., y Ruiz-Olivares, A. (2017). Alternativas de fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos. *AgroProductividad*, 10(4).
- Guevara, Ma. D., Cruz, N., Rivera, Ma. M., y Fuentes, A. K. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Mn y Cu a partir de *Ocimum basilicum*. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 9(22), 76–89.
- Guzmán, G. (2012). “Estrategia para la remediación de sitios contaminados con Cu, Cd, Pb y Zn aplicando tratamientos químico-agronómicos a jales minerometalúrgicos y suelos” [Maestría]. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Jiménez, C., Huante, P., y Rincon, E. (2006). *Restauración de minas superficiales en México*. 84.
- Landeros-Márquez, O., Tejo-Calzada, R., Reveles-Hernández, M., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Pedroza-Sandoval, A., y Ruíz-Torres, J. (2011). Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 11–20. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.059>
- LIFE-ETAD. (2012). *Proyecto LIFE ETAD. Proyecto europeo para la depuración de aguas procedentes de las minas del Río Tinto (Huelva)*. <http://www.life-etad.com/index.php/es/>
- Lobo, P. (2013). *Evaluación de la sostenibilidad de las diferentes técnicas de recuperación de suelos contaminados* [Maestría]. UNIVERSIDAD DE OVIEDO.

- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M., Pérez, L., y Gutiérrez, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(2), 91–100.
- Marrero-Coto, J., Amores-Sánchez, I., y Coto-Pérez, O. (2012). *Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental*. 46(2), 52–61.
- Martínez, Y. A., Ángeles, A. J. R., Rubio, J. Z., Xochitl, P., Navarro, S., Villavicencio, M. B., y Pérez, M. V. (2015). *RESTAURACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS POR UN TREN DE TRATAMIENTO QUÍMICO- BIOLÓGICO*. 4.
- Medel, A. (2009). *CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE JALES MINEROS Y EVALUACIÓN DE BIOSÓLIDOS COMO PROPUESTA DE REMEDIACIÓN* [Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C.]. <http://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/56909>
- Medel, A., Ramos, S., Avelar, F. J., Godínez, L. A., y Rodríguez, F. (2008). *Caracterización de Jales Mineros y Evaluación de su Peligrosidad con Base en su Potencial de Lixiviación*. 35, 5.
- Moreno, B. (2017). *PROPUESTA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE JALES 1-2-3 DEL COMPLEJO MINERO METALÚRGICO LA CARIDAD, CON BASE EN LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL MEXICANA*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA.
- Navarrete, D. (s/f). *La minería en Zacatecas, 1546-1950. Una revisión bibliográfica*. 20.
- Núñez López, R. A., Meas, Y. V., Ortega Borges, R., y Olgúin, E. (2004). *Fundamentos y aplicaciones*. 15.

- Núñez, R. A., Vong, Y. M., Ortega, R., y Olguín, E. (2004). *Fitorremediación: Fundamentos y aplicaciones*. 15.
- Paz, T. (2012, diciembre 3). *Minería: ¿Un riesgo para el derecho humano al agua?* Interamerican Association for Environmental Defense (AIDA). <https://aida-americas.org/es/blog/miner%C3%ADa-%C2%BFun-riesgo-para-el-derecho-humano-al-agua>
- Perea-Vélez, Y. S., Carrillo-González, R., y González-Chávez, M. C. A. (2017). FITORREMEDIACIÓN ASISTIDA POR MICROORGANISMOS: ENFÁSIS EN BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO DE PLANTAS. *AgroProductividad*, 10(4).
- Pérez, S. (2011). *Estudio de la acumulación microbiana de metales y formación de nanopartículas con aplicación potencial en la industria minera* [Maestría]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- LEY General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 28 (2003). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR_orig_08oct03.pdf
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 63 (2006). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.pdf
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2016a, 2016). *REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*. gob.mx. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/reglamento-de-la-ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2016b, septiembre 5). *REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*. gob.mx. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/reglamento-de-la-ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 135 (1988).

- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS, 15 (1988).
- Prusty, A. K. (2012). Artículo: Ambient Air Quality Surveillance and Indexing in and around Mining Clusters in Western Kachchh Region, Gujarat, India. *Scientific Research Publishing*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/vigilancia-de-la-calidad-del-aire-ambiente-e-indexacion-en-y-alrededor-de-clusters-mineros-en-la-region-de-kachchh-occidental-gujarat-india>
- Rennat, E. A., y Miller, S. (1997). *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina*. 191.
- Revilla, C. (2018). *Preocupados: Contaminación del agua a causa de la minería*. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/carlos-revilla-calcina/preocupados>
- Rivera, J. (2009). *DISEÑO GEOTÉCNICO PARA ESTABILIZACIÓN DEL DEPÓSITO DE JALES MINEROS (PRESA I), EN NACUZARI DE GARCÍA, SONORA, MÉXICO* [Tesis de Maestría]. UNIVERSIDAD DE SONORA.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., y Villaseñor, G. (2008). *FACTORES GEOLÓGICOS Y CLIMÁTICOS QUE DETERMINAN LA PELIGROSIDAD Y EL IMPACTO AMBIENTAL DE JALES MINEROS*. 24, 13.
- Romero, F. M., y Gutiérrez Ruíz, M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43–53.
- Ruiz, E., Aldaco, R., Montemayor, J. A., Fortis, M., Olague, J., y Villagómez, J. C. (2007). Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Téc Pecu Méx*, 45(1), 19–24.
- Sánchez, M. (2010). *La estructura territorial de la minería mexicana al inicio del tercer milenio* (pp. 97–131).
- Sánchez, M., Coll-Hurtado, A., y Ramírez, J. (2003). *La minería en México. Geografía, historia, economía y medio ambiente*.
- Santos, J. (2012). *Estudios ambientales como instrumentos para garantizar la seguridad de los depósitos de residuos mineros*. 7.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017, Enero 10). *Residuos de Manejo Especial (RME)*. gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-de-manejo-especial-rme>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018b, Octubre 16). *La LGEEPA, eje rector del sistema jurídico ambiental de México | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-lgeepa-eje-rector-del-sistema-juridico-ambiental-de-mexico?idiom=es>
- Servellón, D. (2011). *BIOPROSPECCIÓN DE PLANTAS METALÓFITAS/PSEUDOMETALÓFITAS EN ZONAS MINERAS DE EL SALVADOR* [Licenciatura]. Universidad de el Salvador.
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Panorama Minero del Estado de Chihuahua*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama Minero del Estado de Coahuila*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama Minero del Estado de Durango*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama Minero del Estado de San Luis Potosí*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama Minero del Estado de Sonora*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama Minero del Estado de Zacatecas*. Subsecretaría de Minería.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017, Marzo 22). *Beneficio y transformación de minerales*. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html
- Servicio Geológico Nacional. (2012). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*.

- Solleiro-Rebolledo, J. L., y Figueroa Ramírez, B. (2017). *Futuro de la minería zacatecana y los retos en capital humano*. CamBioTec A.C. <https://rei.iteso.mx/handle/11117/5458>
- Torres-Batista, Y., Rodríguez-Córdova, R. G., y Reynaldo-Argüelles, C. L. (2019). Propuesta de un procedimiento para la rehabilitación minera en explotaciones a cielo abierto. *Minería y Geología*, 35(1), 17–30.
- Trejo-Calzada, R., Pedroza-Sandoval, A., Reveles-Hernández, M., Ruiz-Torrez, J., y Márquez-Hernández, C. (2015). *Tópicos selectos de Sustentabilidad: Un Reto Permanente. Durango* (Vol. 3). Editorial de la Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Vázquez, C. (2008). *Historia de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México*, A. C. (Primera edición).
- Villagrana, R. S. (2006). *Fitorremediación de un Suelo Contaminado con Plomo por Actividad Industrial*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO.