



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

POSTGRADO EN
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD DE RESIDUOS PROVENIENTES DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN NORIA DE ÁNGELES, ZACATECAS

CAROLINA CERÓN RIVERA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

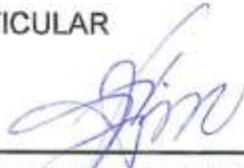
Salinas de Hidalgo., San Luis Potosí, México
Noviembre de 2017

La presente tesis, titulada: **Evaluación de la toxicidad de residuos provenientes de pasivos ambientales mineros en Noria de Ángeles, Zacatecas**, realizada por la alumna **Carolina Cerón Rivera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. JUAN FELIPE MARTÍNEZ MONTOYA

ASESOR:



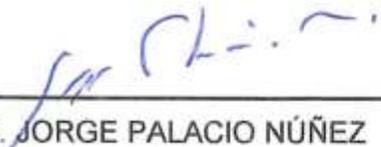
DR. GUILLERMO ESPINOSA REYES

ASESOR:



DR. GENARO OLMOS OROPEZA

ASESOR:



DR. JORGE PALACIO NÚÑEZ

SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ
NOVIEMBRE, 2017



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el (la) que suscribe CAROLINA CERÓN RIVERA, alumno(a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del (la) Profesor(a) DR. JUAN FELIPE MARTÍNEZ MONTOYA, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD DE RESIDUOS PROVENIENTES DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN NORIA DE ÁNGELES, ZACATECAS y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El (la) Consejero (a) o Director (a) de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, a 7 de noviembre de 2017.

CAROLINA CERÓN RIVERA

Firma

DR. JUAN FELIPE MARTÍNEZ MONTOYA

Vo. Bo. Profesor(a) Consejero(a) o Director(a) de Tesis

EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD DE RESIDUOS PROVENIENTES DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN NORIA DE ÁNGELES, ZACATECAS

Carolina Cerón Rivera, MC

Colegio de Posgraduados, 2017

RESUMEN

Los sitios contaminados por actividad minera (pasivos ambientales) representan un riesgo para la salud humana y para la vida silvestre; suelen presentar problemas por el manejo inadecuado de los residuos peligrosos, principalmente por la acumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT), tales como el mercurio, cadmio, plomo arsénico y plata. El objetivo fue conocer la concentración de minerales potencialmente tóxicos en dos pasivos ambientales y evaluar su posible daño ambiental en Noria de Ángeles, Zacatecas. El trabajo se realizó en un pasivo ambiental (PA) antiguo (colonial) y uno reciente (nuevo), y en un sitio de referencia en Salinas, S.L.P. El trabajo se efectuó en tres etapas: 1) campo, que consistió en muestreos preliminares y el definitivo en los tres sitios, 2) laboratorio, para análisis químicos y físicos y, 3) bioensayos. Los muestreos se realizaron entre mayo y agosto de 2015, con base en la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, adjudicando un número proporcional al área de cada pasivo y del sitio de referencia. Las muestras de suelo se tomaron a profundidad de 0-20, 20-40 y 40-60 cm y las de agua conforme a la NOM-230-SSA1-2002. También se registró la vegetación. Los análisis para elementos potencialmente tóxicos (EPT) en suelo se realizaron de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y para el agua NOM-127-SSA1-1994. También se realizaron bioensayos de germinación, y crecimiento, de semillas

de lechuga a varias concentraciones de metales y metaloide. La concentración en suelo de Hg no rebasó límites permisibles, mientras que Cd y As los rebasaron en los tres sitios y Pb sólo en los PA; Cd fue mayor ($P<0.05$) en el nuevo y el As en el colonial. El agua se encontró no apta para el consumo humano. Los resultados confirmaron el riesgo de toxicidad por Pb, Cd y As provenientes de los PA, tanto a la población humana como a la vida silvestre. Ante esto, se recomienda tomar medidas tanto de remediación como de reutilización del material de los PA en Noria de Ángeles, Zacatecas.

Palabras clave: Bioensayos, *Lactuca sativa*, arsénico, cadmio, mercurio, plomo, elemento potencialmente tóxico, residuos peligrosos.

**EVALUATION OF THE TOXICITY OF ENVIRONMENTAL RESIDUES
ORIGINATED FROM MINING ENVIRONMENTAL LIABILITIES IN NORIA DE
ÁNGELES, ZACATECAS**

Carolina Cerón Rivera, MC

Colegio de Posgraduados, 2017

ABSTRACT

The places contaminated by mining activity (environmental debits) represent a risk for the human health and for the wild life; they usually present problems for the inadequate handling of the dangerous residues, principally for the accumulation of elements potentially toxic, such as the mercury, cadmium, arsenic, lead and silver. The objective was to know the concentration of potentially toxic minerals in two environmental liabilities and evaluate their possible environmental damage in Noria de Angeles, Zacatecas. The work was carried out in an environmental liability (PA) ancient (colonial) and one recent (new), and in a reference site in Salinas, S.L.P. The work was carried out in three stages: 1) field, which consisted in sampling preliminary and the final in the three sites, 2) laboratory, for chemical and physical analyzes and, 3) bioassays. The samplings were carried out between May and August 2015, based on the Official Mexican Norm NMX-AA-132-SCFI-2006, awarding a number proportional to the area of each liabilities and reference site. The soil samples were taken at depths of 0-20, 20-40 and 40-60 cm and those of water according to NOM-230-SSA1-2002. The vegetation was also recorded. The analysis for elements potentially toxic in soil were carried out in accordance with the NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) and to the water according to the

NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000). In addition, germination bioassay were realized, and growth, from lettuce seeds to several metal concentrations and metalloid. The concentration in Hg soil did not exceed permissible limits. The concentration in Hg soil did not exceed permissible limits, while Cd and As exceeded in the three sites and Pb only in the PA; Cd was higher ($P = < 0.05$) in the new and As in the colonial. The water was not suitable for the human consumption. The results confirmed the risk of toxicity by Pb, Cd and As from the PA, both to the human population and wildlife. To this, it is recommended to take measures both remediation and reuse material of the PA, in Noria de Angeles, Zacatecas.

Keywords: Bioassay, *Lactuca sativa*, arsenic, cadmium, mercury, lead, potentially toxic element, hazardous waste.

DEDICATORIA

Por el amor, la confianza, los consejos y la máxima tolerancia que tienen para creer en mis sueños, tenerlos ha sido lo principal de mi vida y la mejor oportunidad para crecer en un mundo lleno de retos. Por ellos, que compartieron esfuerzos, risas, lágrimas y haber sido los únicos que tuvieron paciencia para que esta tesis finalizara.

A mis padres:

Gerardo Cerón Rivera

María de Jesús Patricia Rivera Rosas

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud, amor y sabiduría para terminar esta etapa.

A los integrantes de mi familia por todo el apoyo y la comprensión.

Al Concejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por otorgar la beca para realizar mi Maestría en Ciencias en el Programa de Posgrado Innovación en Manejo de Recursos Naturales en el Campus San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados.

A los Drs. Juan Felipe Martínez Montoya, Jorge Palacio Núñez y Genaro Olmos Oropeza por el apoyo brindado durante todas las etapas del proyecto; asesoría trabajo de campo, análisis de laboratorio, análisis estadísticos, identificación de especies vegetales y revisión de avances de la investigación.

Al Dr. Guillermo Espinosa Reyes de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, CIAAS-CIACYT por su asesoría, aportaciones en campo y en laboratorio.

Al Dr. Rogelio Vázquez Alarcón de la Universidad Autónoma Chapingo por sus aportaciones científicas y el apoyo brindado durante la estancia de investigación.

A la Dra. Brenda Trejo Téllez por la comprensión y al seguimiento académico para que culminara mi programa de maestría.

A la M.C. Clara Tovar, C. Barrios Aguirre Christopher y al personal de laboratorio de agua-suelo y planta por el apoyo en la etapa de análisis de la investigación.

Al M.C. José Domingo Cruz Labana y al C. Héctor Antonio Rodríguez por su constante apoyo académico y personal.

CONTENIDO	Pág.
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
CONTENIDO	x
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos particulares	2
1.3. Hipótesis	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Importancia de la actividad minera en México	3
2.2. Región minera de Real de Ángeles	4
2.3. Sitios contaminados por residuos peligrosos (RP)	6
2.4. Elementos potencialmente tóxicos (EPT) y sus efectos	10
2.5. Impacto ambiental por la actividad minera	11
2.6. Bioensayos de toxicidad con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Localización del área de estudio	16
3.2. Material y equipo de trabajo	18
3.3. Muestreo de los pasivos, de suelo y de agua	19
3.4. Muestreo del pasivo ambiental nuevo	23
3.5. Muestreo del sitio de referencia	26
3.6. Muestreo de agua	28
3.7. Muestreo de vegetación	29
3.7. Preparación de las muestras	31
3.9. Análisis de suelo y agua	31
3.10. Bioensayos con lechuga <i>Lactuca sativa</i> L.	32
3.11. Análisis estadístico	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Muestreo preliminar	36
4.2. Parámetros físicos y químicos	38
4.3. Contenido de metales y metaloides	42
4.4. Contenido de metales y metaloide en agua	43
4.5. Vegetación en los pasivos ambientales	46
4.6. Bioensayos con lechuga <i>Lactuca sativa</i> L.	48
5. CONCLUSIONES	53
6. CONSIDERACIONES O RECOMENDACIONES	53
7. LITERATURA CITADA	56
8. ANEXO	64

ÍNDICE DE CUADROS

No	Descripción	Pág.
1	Sitios contaminados con residuos peligrosos (RP), remediados o en proceso de remediación. Se especifican Pasivos ambientales (PA) y sitios remediados (SR).	7
2	Sitios abandonados, ilegales y contaminados con residuos peligrosos (RP) y tipo de residuos encontrados por entidad federativa.	9
3	Concentraciones mínimas y máximas de metales en el pasivo ambiental colonial de Noria de Ángeles, Zacatecas, y concentraciones máximas permisibles según SEMARNAT (2004) y USEPA (1986).	38
4	Concentración de metales en muestras de suelo obtenido a tres niveles de profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm) en el pasivo ambiental colonial de Noria de Ángeles, Zacatecas.	40
5	Parámetros físicos y químicos de los dos sitios de muestreo en Noria de Ángeles, Zacatecas, y del sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí.	41
6	Valores medios y desviación estándar (DE) de los parámetros físicos y químicos de los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia (SR).	42
7	Contenido de metales y metaloides (mg/kg) de los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia (SR) y comparación con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y USEPA (2016).	42
8	Valores medios (mg/kg) y desviación estándar (DE) de metales o metaloide en los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) en Noria de Ángeles, Zacatecas, y sitio de referencia (SR) en Salinas San Luis Potosí.	43
9	Contenido de metales y metaloides (MyM; en mg/L) en los cuerpos de agua (CA) presentes en los pasivos ambientales colonial (CA 1) y nuevo (CA 2, 3 y 4), y comparación con los límites máximos permisibles (MP) en agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) y la USEPA (2016).	44
10	Valores promedio (mg/kg) del contenido metales y metaloide en los cuerpos de agua (CA) en los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas.	45
11	Lista de vegetación recolectada en los pasivos ambientales colonial (PAC) y nuevo (PAN) en Noria de Ángeles, Zacatecas.	47
12	Porcentaje de germinación de semillas de lechuga a las 120 h de plantadas expuestas a varias concentraciones de metal y metaloide.	50
13	Longitud promedio (cm) de la radícula y del hipocótilo, derivadas de la germinación de 20 de semillas de lechuga, expuestas a varias concentraciones de metales y metaloides,	51
14	Elongación del hipocótilo y de la radícula de plántulas de lechuga establecidas en sustratos de los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, y el sitio de referencia (SR) en Salinas, San Luis Potosí.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

No	Descripción	Pág.
1	Fotografía Noria de Ángeles, Zacatecas, por Stoiser-Lee R. 1973	5
2	Número de sitios con residuos peligrosos por entidad federativa en México (SEMARNAT, 2014).	8
3	Generación de jales mineros por año en México (SEMARNAT, 2012c).	8
4	Morfología de la semilla y la plántula de lechuga <i>Lactuca sativa</i> L.	15
5	Ubicación del área de estudio para la determinación de metales y metales en pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, así como la localización del sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí.	18
6	Manantial en el pasivo ambiental colonial.	19
7	Aspecto físico del pasivo ambiental colonial.	20
8	Otro aspecto del pasivo ambiental colonial.	20
9	Muestreo del pasivo ambiental colonial.	20
10	Ubicación de los puntos de muestreo en el pasivo ambiental colonial para la determinación de metales y metales en Noria de Ángeles, Zacatecas (Carta topográfica F14A71).	21
11	Esquema de distribución de los puntos de muestreo para generar una muestra compuesta, tamaño 1x1m (SE, 2006).	22
12	Aspecto del pasivo ambiental nuevo.	24
13	Cárcavas, afloramiento y arrastre de material mal protegido en el pasivo ambiental nuevo.	25
14	Ubicación de los puntos de muestreo en el pasivo ambiental nuevo en Noria de Ángeles, Zacatecas (Carta topográfica F14A71).	26
15	Ubicación del sitio de referencia, Salinas, San Luis Potosí (Carta topográfica F14A61).	27
16	Muestreo de suelo en el sitio de referencia El Alegre, Salinas, San Luis Potosí.	28
17	Cuerpos de agua relacionados al pasivo ambiental nuevo, a) dentro y b) fuera del mismo.	29
18	Identificación de vegetación en los pasivos ambientales.	30
19	Vegetación del pasivo ambiental colonial.	30
20	Vegetación del pasivo ambiental nuevo.	31
21	Distribución de semillas de lechuga en las cajas Petri.	33
22	Semillas germinadas en las muestras compuestas.	33
23	Medición de la elongación de la radícula y del hipocótilo.	34

1. INTRODUCCIÓN

México cuenta con una amplia riqueza de minerales en todo el territorio nacional, tanto minerales metálicos como no metálicos (SIAM, 2015). Sin embargo, los procesos de extracción del mineral (exploración, evaluación, estudios de factibilidad, construcción, producción, distribución y cierre de la mina) tienden a alterar la biota de la zona (Gratzfeld, 2004). Ante esto, existe la necesidad de trabajar e investigar en torno a los métodos y técnicas más adecuados en aspectos de sostenibilidad y protección ambiental ante las actividades mineras en zonas áridas y semiáridas. Los ecosistemas se caracterizan por una elevada capacidad natural de resiliencia, pero en la actualidad se enfrentan a presiones inducidos por los seres humanos (Gratzfeld, 2004). Es necesario conocer y cuantificar la magnitud de los probables efectos en la vida de las personas que viven cerca de sitios contaminados por actividad minera. Para ello es importante implementar la caracterización ambiental y análisis de toxicidad de residuos, instrumento que sirve para definir si el sitio está contaminado; identificando los posibles minerales que se encuentran en niveles tóxicos tanto para humanos como para otros seres vivos, y saber si el sitio debe ser incluido en un programa de limpieza ambiental (Mejía *et al.*, 2002).

A nivel nacional Zacatecas es un estado que sobrepasa los sitios contaminados, abandonados e ilegales, que sobrepasan la cantidad de residuos peligrosos, (SEMARNAT, 2012a), es el caso del Municipio Noria de Ángeles, con una población de 13 197 habitantes (INEGI, 2005), se encuentra entre los municipios vulnerables por contaminación por residuos peligrosos (RP) (SEMARNAT, 2012a). Aquí se encuentran dos pasivos ambientales, uno de ellos data de la época de la colonia, está dentro del poblado Noria de Ángeles, posiblemente se inició en 1705 y es de una extensión de 2 ha; el segundo pasivo se inició en 1980 y tiene una superficie aproximada de 472 ha, ubicado a orillas del pueblo (PDUCP, 2010; PMD, 2104). Dichos pasivos se depositaron en áreas aledañas al sitio de extracción, con probables daños ambientales y modificaciones en el ecosistema (Mejía *et al.*, 2002;

Volke *et al.*, 2005) por la acumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT), tales como mercurio, plata, cadmio, plomo y arsénico (Volke *et al.*, 2005) y riesgos a la salud de los habitantes locales y aledaños (Mejía *et al.*, 2002). Tales elementos pueden mostrar una tendencia a concentrarse en la capa superficial del suelo, extendiéndose a distancias que pueden sobrepasar los 3 km de los jales por efecto del viento (Puga *et al.*, 2006).

1.1. Objetivo general

Evaluar el potencial tóxico de residuos de dos pasivos ambientales mineros mediante el uso de bioensayos en Noria de Ángeles, Zacatecas.

1.2. Objetivos particulares

- Evaluar las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en residuos sólidos y agua de dos pasivos ambientales de Noria de Ángeles, Zacatecas.
- Determinar las características fisicoquímicas de los residuos sólidos de los pasivos ambientales de Noria de Ángeles, Zacatecas.
- Evaluar la toxicidad de los minerales potencialmente tóxicos de los pasivos ambientales mediante el uso de bioensayos con lechuga (*Lactuca sativa*).

1.3. Hipótesis

Tanto los pasivos ambientales como los cuerpos de agua contienen al menos un mineral potencialmente tóxico en niveles que sobrepasan la norma nacional.

Con los bioensayos se corroborará la presencia de al menos un mineral en niveles potencialmente tóxicos para los organismos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia de la actividad minera en México

La importancia económica y social de la minería en México contribuye en gran medida con el desarrollo del país. De acuerdo con datos de la Dirección General de Regulación Minera (SIAM, 2015), la inversión para la exploración minera a nivel mundial, México ocupó la tercera posición con EE. UU. y Chile. La producción de oro se coloca en la octava posición con 98 toneladas métricas al año (SGM, 2015). A nivel nacional, los estados con mayor producción de oro fueron Sonora (29.6%), Zacatecas (23.0%), Chihuahua (16.8%), Durango (11.2%) y Guerrero (7.2%). México se mantiene en primer lugar como productor de plata a nivel mundial, con 22 855 mil toneladas (SIAM, 2015). Los principales estados productores son Zacatecas (41.0%), Chihuahua (16.9%), Durango (14.1%), Sonora (6.2%), Oaxaca (4.1%) y México (3.7%); en conjunto aportan el 86.1% (SGM, 2015). A nivel mundial, México ocupa el quinto lugar en producción de cadmio con 22 643 toneladas y el quinto lugar de plomo con 4 510 toneladas/año; el zinc está en el sexto lugar con 11 617 mil toneladas y el décimo lugar en cobre con 14 879 mil toneladas (SIAM, 2015).

El valor de la producción minero-metalúrgica alcanzó 213.46 Mmp en 2015 (SIAM, 2015). Los principales estados productores fueron Sonora, con un valor de producción de 65.8 Mmp (26.4%), Zacatecas con 50.0 (20.0%), Chihuahua con 27.4 (11.0%) y Coahuila con 25.7 Mmp (10.3%). Estas cuatro entidades aportaron el 67.7% del valor total de la producción minera (SGM, 2015). Las exportaciones de productos minero-metalúrgicos alcanzaron un monto de 310.70 Mmp en el año y el número de personas empleadas alcanzó un total de 340 817 personas (SGM, 2015).

Una de las zonas mineras más importantes de nuestro país es Zacatecas, donde la producción metalífera sigue siendo una de las mayores, tanto por su volumen como

por su valor. Este estado es tradicionalmente minero desde la época de la colonia y cuenta con importantes yacimientos minerales (SGM, 2016); con la posición número dos a nivel nacional con un valor de la producción de 63.136 Mmp. Los principales minerales durante el 2015 fueron cobre, hierro, oro, plata, plomo y zinc (SIAM, 2015).

2.2. Región minera Real de Ángeles

La región minera de Real de Ángeles está conformada por una mina actualmente inactiva, su principal explotación eran los metales: plata (Ag), plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn). La explotación era a tajo abierto y la extracción era por el método patio (proceso de amalgación) y de flotación, con capacidad de 22 t/día (SGM, 2016). El Servicio Geológico Mexicano a través de la Secretaría de Economía (2010) menciona que la roca anfitriona del yacimiento es una secuencia marina de tipo *flysh*, constituida por alternancia de areniscas, limolitas y argilitas. Se ha estimado que más del 80% de los valores de Ag-Pb-Zn están contenidos en capas de areniscas, en su modalidad de enrejado de vetillas ramificadas llenas de materia mineral, cuando tienen mena es necesario trabajar la masa en conjunto por ser las vetas demasiado delgadas y estar demasiado juntas (*stockwork*). También se presentan rocas metamórficas (esquistos). Originalmente las reservas del yacimiento eran de 48 millones de toneladas de mineral, con una ley de 80 g/t de Ag, 1% de Zn-Pb combinados y en 1989 se estimó un total de 75 millones de toneladas con una ley promedio de 85 g/t de Ag y equivalente en Pb-Zn (SE, 2010).

De acuerdo a Solís (1969) y Arellano (1970), la Mina Real de Ángeles inició sus funciones probablemente a finales del siglo XVI o principios del XVII, cuando se iniciaran otros trabajos en las minas de Zacatecas, tal vez en el año 1705. A partir de esa fecha los trabajos fueron intermitentes (PDUCP, 2010; PMD, 2014); finalmente, en 1911 se suspendieron debido a factores de clima y al movimiento revolucionario. Entre 1920 y 1928 se reanudan operaciones en algunas secciones de la mina,

extrayendo pilares y retacos (Solís, 1969; Arellano 1970). En la Figura 1 se muestra una foto de la mina Noria de Ángeles del año 1973, tomada por R. Stoiser-Lee. Existen reportes mineros de 1969 y 1970 indicando diversas cantidades en toneladas de residuos, como desecho de antiguas plantas, producto del beneficio de los minerales procedentes de la mina Real de Ángeles, ubicada a 3 km al sur de la cabecera municipal. Los jales se les diferencian por ser de diferente época, uno denominado en el presente trabajo como “pasivo ambiental colonial”, corresponde a los residuos de la época de la colonia y “pasivo ambiental nuevo” que son los residuos que se generaron después de la colonia (Solís, 1969; Arellano 1970) y depositados en otro lugar.



Figura 1. Fotografía Noria de Ángeles, Zacatecas, por R. Stoiser-Lee 1973.

Los materiales del pasivo ambiental colonial originados por el proceso de patio fueron posteriormente calcinados para recuperar el Hg, tiene un volumen de 47 990 m³ y 114 697 toneladas de jales calcinados o rojos (Solís, 1969). Las características físicas del jal molido y calcinado son de color café rojizo. De los jales de patio se obtuvo un promedio de 2 566 m³ y 3 335 toneladas. Sin embargo, Arellano (1970) reporta 56 419 m³ de jales rojos es de y 57 319 m³ de jales azules para el pasivo ambiental colonial.

En 1970 y 1972, la Compañía Gamma S.A. realizó trabajos de exploración, incluyendo 20 barrenos de diamante (SE, 2010), terminado en esos mismos años la concesión. En 1973 ofrecen los fundos a la compañía Explomin S.A de C.V.

terminando la evaluación en 1975. Fue hasta finales de 1979 que la compañía Real de Ángeles S.A. de C.V. retomó el proyecto minero-metalúrgico de explotación y exploración (SE, 2010), por la razón social llamada Real de Ángeles, S.A. de C.V. Su principal objetivo era seguir con la extracción del mineral; planteándose trasladar el pueblo a otro sitio; el cambio de asentamiento no era fácil y se tuvo apoyo del poder ejecutivo del estado y de la Dirección de Monumentos Históricos del Instituto Nacional e Historia, evitando el desalojo de la zona urbana (PDUCP, 2010). El final de la producción del mineral ocurrió en 1992 (SE, 2010).

2.3. Sitios contaminados por residuos peligrosos (RP)

Según Porta *et al.* (2008), los sitios contaminados son aquellos que representan un riesgo actual o potencial para la salud humana y los recursos naturales como resultado de un uso actual o pasado; derivado de las acciones antropogénicas. Los sitios contaminados por actividad minera y que ya no están recibiendo materiales son denominados como pasivos ambientales (SEMARNAT, 2012a). Frecuentemente son de grandes dimensiones y presentan problemas por el manejo inadecuado de los residuos peligrosos que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de los contaminantes. En los artículos 138 y 139 del Reglamento de la LGPGIR (2015), señala que el contenido de información de un estudio de caracterización debe atenderse de manera obligatoria (SEMARNAT, 2010). En el Cuadro 1 se menciona el total de sitios contaminados por emergencias ambientales, reportando 627 y 3 241 pasivos ambientales (SEMARNAT, 2012a). El área remediada fue de 849 135 m², lo que equivale a un volumen de 1 702 025.15 m³ (SEMARNAT, 2014). Los sitios con residuos peligrosos por Estado se muestran en la Figura 2, de acuerdo con conteo entre 2008 y 2013. El área remediada de acuerdo con SEMARNAT (2014) fue de 849 135 m², con un volumen de 1 702 025.15 m³.

Cuadro 1. Sitios contaminados con residuos peligrosos (RP), remediados o en proceso de remediación. Se especifican Pasivos ambientales (PA) y sitios remediados (SR).

Año	Sitios contaminados (PA)	Sitios remediados (SR)
2008	479	76
2009	465	166
2010	548	138
2011	580	102
2012	582	72
2013	587	34

Fuente: (SEMARNAT, 2014)

La actividad minera en México produce 11,368,755.5 t/año de RP que contribuyen a la contaminación de suelo y agua (SEMARNAT, 2012a). La generación de pasivos ambientales es causa de daños ambientales, llegando a modificar el ecosistema por la acumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT), tales como mercurio, plata, cadmio, plomo y arsénico (Volke *et al.*, 2005). Existen 16 estados con actividad minera, pero seis son los principales generadores de jales mineros (Figura 3); siendo Zacatecas por mucho el estado con la mayor cantidad de residuos con 9,285,622 t, representando el 81.68%, Chihuahua con 1,319,841.18 t (11.61%), Hidalgo con 660,293 t (5.81%), Sonora con 77,646 t (0.68%), Michoacán con 25,180 t (0.22%) y por último Durango con una generación de 173 t que representa el 0.001% (SEMARNAT, 2012a).

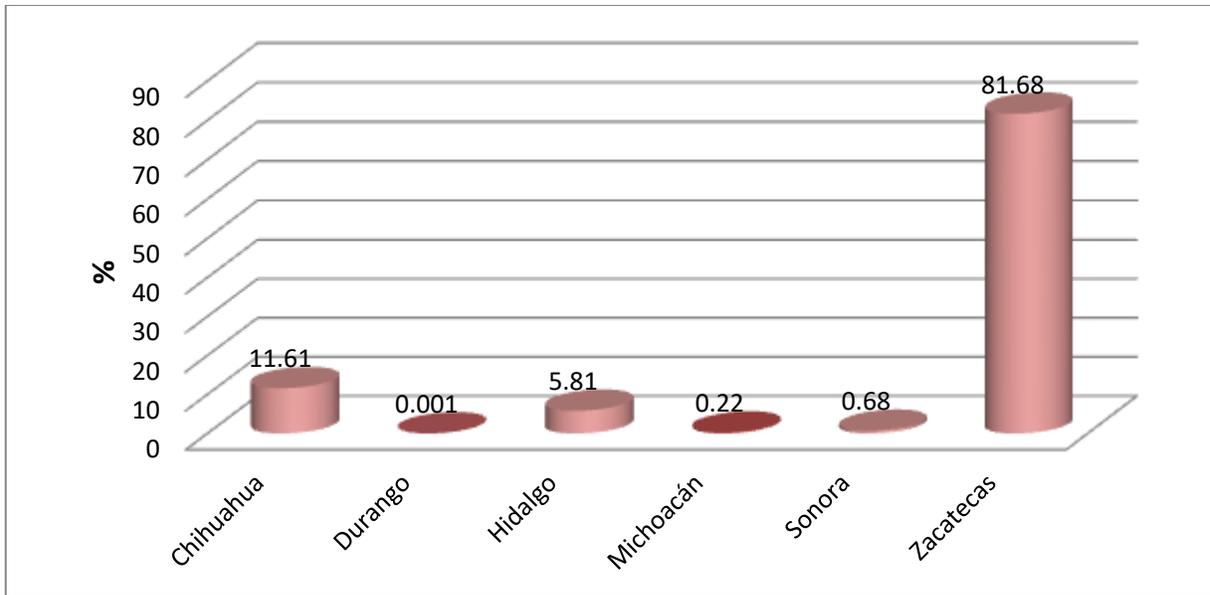


Figura 2. Número de sitios con residuos peligrosos por entidad federativa en México (SEMARNAT, 2014).

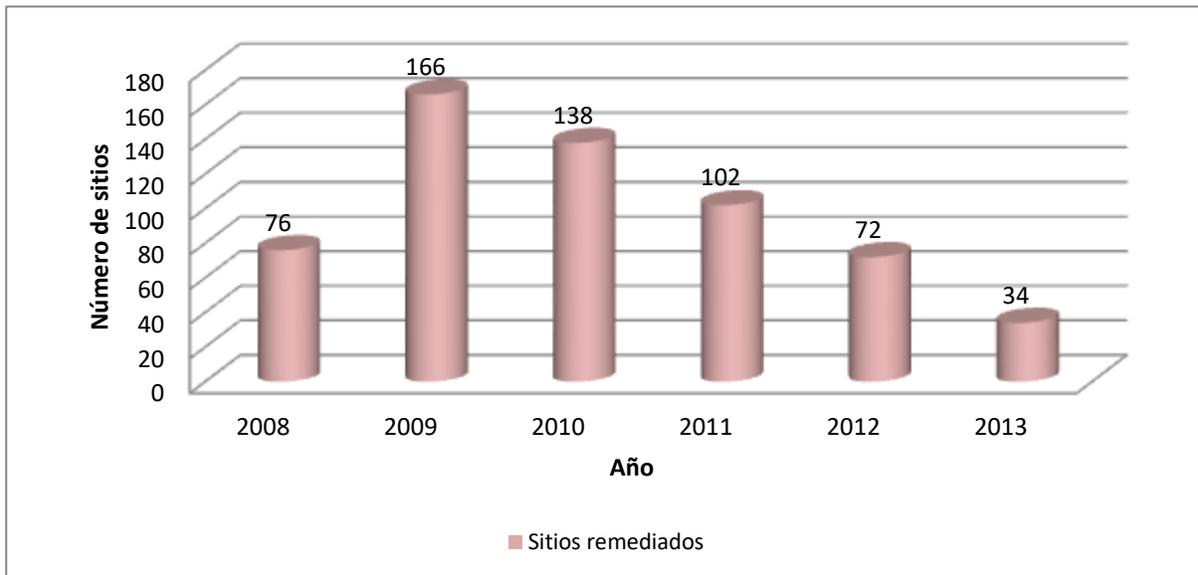


Figura 3. Generación de jales mineros por año en México (SEMARNAT, 2012c).

En el Cuadro 2 se muestran los sitios abandonados, ilegales y contaminados con RP (metales pesados, jales, entre otros) de algunos estados, (SEMARNAT, 2004a), resaltando un problema persistente (Volke *et al.*, 2005). En Zacatecas hay 12 sitios

contaminados por RP; sin embargo, en 2008 se realizó la remediación de dos pasivos ambientales, dejando 10 pendientes de remediación (SEMARNAT, 2014).

Cuadro 2. Sitios abandonados, ilegales y contaminados con residuos peligrosos (RP) y tipo de residuos encontrados por entidad federativa.

Entidad Federativa	Número de sitios	Residuos encontrados
Baja California	6	Jales y metales pesados
Coahuila	21	Jales y metales pesados
Guanajuato	12	Metales pesados
San Luis Potosí	46	Metales pesados
Sonora	8	Metales pesados
Zacatecas	12	Jales y metales pesados
Total	105	

Fuente: (SEMARNAT, 2004b; SEMARNAT, 2012b).

De acuerdo con Panorama Minero del estado de Zacatecas (SGM, 2016), se cuenta con 48 empresas explotando minerales, de las cuales dos se encuentran inactivas por el momento, 116 en exploración estimando que su explotación será a corto plazo en varios municipios del estado de Zacatecas; lo que significa que hay empresas que no se encuentran dentro del Inventario Nacional de Generación de RP. Sólo existen seis empresas que se encuentran dentro del padrón como grande, pequeñas y micro generadoras en este estado (SEMARNAT, 2012c). De acuerdo con estos datos, existe la necesidad de considerar en serio la protección ambiental y la aplicación del modelo de evaluación de riesgo para la salud humana y de la biota (Ilizaliturri *et al.*, 2009).

2.4. Elementos potencialmente tóxicos (EPT) y sus efectos

Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son de importancia ambiental y/o toxicológica por sus características físicas y químicas; ya sea por fenómenos de superficie (adsorción-desorción), formación de complejos con la materia orgánica, su solubilidad, movilidad, velocidad y toxicidad (comportamiento biogeoquímico) en el suelo. Por su ubicación en jales depositados sin respetar las normas, se encuentran biodisponibles; por lo tanto, pueden ser transportados por viento o agua a poblaciones, terrenos de cultivo, agostaderos y otros sitios de interés tanto para humanos como para ganado y para vida silvestre, ocasionando problemas de intoxicación (Volke *et al.*, 2005; Porta *et al.*, 2008; SEMARNAT, 2012a).

Los elementos traza en reacciones bioquímicas, tales como Hg, Cd y Ag, reaccionan en el metabolismo como veneno, inhiben sistemas enzimáticos, formando complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos en funciones biológicas (Volke *et al.*, 2005). Elementos como el Hg, As y el Pb, pueden formar iones órgano-metálicos liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. El As es un metaloide potencialmente tóxico con comportamiento diferente a la de otros metales, pero tiene diferentes propiedades físicas (Volke *et al.*, 2005). Los metales y metaloides As, Ag, Cd, Hg y Pb no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y se consideran tóxicos debido a su baja solubilidad (Volke *et al.*, 2005).

Debido a que los jales están expuestos al intemperismo, los EPT pueden ser afectados por reacciones de óxido-reducción, de ácido base, hidrólisis, adsorción-desorción, etc., que pueden modificar su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad, derivando en su liberación y subsecuente acumulación e infiltración. Estos fenómenos tienen variaciones si los jales se mezclan con el suelo (Carrillo, 2005). La movilidad de los metales es afectada por diversos parámetros fisicoquímicos,

especialmente por el pH, salinidad, textura, capacidad de intercambio catiónico, potencial redox y composición mineralógica (Porta *et al.*, 2005; Volke *et al.*, 2005).

La cantidad y dispersión de los EPT en el suelo, procedentes de residuos mineros, es variable ya que su concentración depende del contenido de los residuos y del material explotado, pero su biodisponibilidad es dependiente de las condiciones del suelo como el pH y la materia orgánica (Carrillo, 2005). La preocupación social por los EPT es por la aparición de enfermedades crónicas como el cáncer y las malformaciones congénitas; sin embargo, existen otros problemas de salud asociados como las alteraciones mutagénicas, daños renales, hepáticos, problemas neurológicos, enfermedades respiratorias y de pulmón (SEMARNAT, 2012a). A más detalle toxicológico sobre los metales y metaloides ver Anexo 2.

2.5. Impacto ambiental por la actividad minera

El impacto ambiental se define como cualquier modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o la naturaleza (SEMARNAT, 2012a). En la industria minera, el impacto ambiental relevante se ocasiona durante la exploración, la extracción y el beneficio del mineral, provocando un factor de riesgo de contaminación (PROFEPA, 2015; LGEEPA, 2016) con consecuente desequilibrio ecológico, daños a la salud y disminución de aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas (SEMARNAT, 2012a). En el suelo, la actividad minera genera anomalías biogeoquímicas al momento de la extracción, aumentando a niveles tóxicos, afectando la biota y la calidad del suelo, perturbando el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, e inhibiendo la descomposición de la materia orgánica (Volke *et al.*, 2005; Puga *et al.*, 2006).

El manejo inadecuado del agua y la disposición final durante y al término de la actividad minera conlleva efectos negativos; sobre todo cuando se tiene protección inadecuada de acuíferos, vulnerables contra las descargas de aguas residuales y

lixiviados combinados por metales pesados, ácidos, hierro, sulfatos, entre otros. El movimiento del agua y transporte de contaminantes desde la superficie del suelo a los acuíferos puede tomar décadas o años, antes de que el impacto del agua con metales llegue a los suministros de agua; sin embargo, la vulnerabilidad dependerá de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del suelo (Foster *et al.*, 2002).

Una herramienta importante para identificar y cuantificar los impactos generados mencionados anteriormente es la evaluación de impacto ambiental, de acuerdo a SEMARNAT (2012a). En México, esto inició en 1988 con la publicación de la LGEEPA (2016) en el Diario Oficial de la Federación, y su Reglamento en Materia de Impacto Ambiental, por lo que muchas empresas mineras, de acuerdo con su apertura antes de esa fecha, quedaron sin jurisdicción legal. Cuando se trate las actividades consideradas como altamente riesgosas, deberá incluirse además de esta manifestación de impacto, un estudio de riesgo. Entre 2003 y 2005 ingresaron 231 proyectos bajo el procedimiento de evaluación del impacto ambiental, conforme a la actividad minera (SEMARNAT, 2012a). Los estudios deben definir:

- I. Escenarios y medidas preventivas resultantes del análisis de los riesgos ambientales relacionados con el proyecto,
- II. Descripción de las zonas de protección en torno a las instalaciones, en su caso, y
- III. Señalamiento de las medidas de seguridad en materia ambiental (Art. 18, Reglamento de la LGEEPA, 2016).

Noria de Ángeles es un sitio que posee historia, cultura y riqueza, pero enfrenta un serio problema de impacto ambiental, resultado de la extracción minera, y es necesario mitigar los efectos o impactos, y cumplir con las medidas de prevención de acuerdo al PDUCP (2010). Existe deficiencia del servicio de agua por causa de insuficiencia y mala calidad de la misma; cuenta con más de 900 ha de tierras de

cultivo y producción pecuaria que se han perdido por el impacto negativo de los pasivos ambientales y la contaminación por plomo, arsénico y otras sustancias químicas tóxicas que se encuentran dispersos en agua, suelo y aire (PDUCP, 2010). Es un sitio relevante como campo de estudio para la evaluación de la exposición a los contaminantes, tal como los EPT, de manera integral, considerando jales, suelo, agua, organismos vivos y el ser humano (Ilizaliturri *et al.*, 2009).

2.6. Bioensayos de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Ramírez *et al.* (2008) indican que las pruebas de toxicidad aportan una conexión esencial entre la química ambiental, y la ecotoxicología dada la presencia de sustancias que no deberían estar en concentraciones mayores a las basales, medidos en organismos individuales y en poblaciones a través de análisis de estructura o función de las comunidades. Esto ofrece resultados de los efectos biológicos adversos de los contaminantes en los ecosistemas. Las pruebas de toxicidad aguda tienen las siguientes características:

- I. Aptos para generar resultados ecológicamente significativos.
- II. Ser capaces de generar información defendible desde el punto de vista científico y legal.
- III. Estar basadas en métodos rutinarios disponibles y ser de amplia aplicación.
- IV. Ser predictivas de efectos ecológicos.
- V. Ser aplicables a una amplia variedad de compuestos.
- VI. Ser simples y costo-efectivas.

El principal beneficio al efectuar una prueba por bioensayos es identificar el contaminante y evaluar los efectos potenciales generadas por actividades agrícolas, acuícolas, industriales y urbanas. Determinan índices de calidad ambiental (para controlar descargas de aguas residuales municipales e industriales, para regular el uso y producción de sustancias químicas y para enjuiciar y defender actividades relacionadas con los contaminantes en casos de litigio ambiental). Son utilizadas

para evaluar la biodisponibilidad de contaminantes, respuestas de alteraciones bioquímicas, moleculares y fisiológicas (efectos sobre crecimiento, reproducción). (Ramírez *et al.*, 2008).

Los bioensayos estiman el efecto de las concentraciones de los contaminantes sobre alguna propiedad del desarrollo de las plantas, como, por ejemplo: biomasa, elongación radicular y germinación (SEMARNAT, 2006b). Es una prueba que representa la estática de toxicidad aguda (120 h de exposición), en el que se pueden evaluar los efectos fitotóxicos de compuestos puros, o de mezclas complejas, en el proceso de germinación de las semillas, y en el desarrollo de las plántulas durante los primeros días de crecimiento (Sobrero, 2004; Cuevas Díaz *et al.*, 2012). Para la evaluación de los efectos fitotóxicos se determina la inhibición en la germinación, y en la elongación de la radícula y del hipocótilo; tal como se muestra en la Figura 4 sobre la morfología de la semilla y plántula de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Los bioensayos de toxicidad con semillas de esta especie se usan para determinar la relación causa-efecto (Ramírez *et al.*, 2008). Los efectos adversos de los contaminantes de los jales tienen una amplia heterogeneidad en la composición química y física, que puede alterar la respuesta de las plantas susceptibles en diversas maneras (Caramillo, 2015). La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria. Por ello, bajo el esquema de evaluación integral de sitios contaminados, se realiza un análisis preliminar de los componentes bióticos del sitio, para estimar el índice de toxicidad ambiental y la biodisponibilidad por medio de bioensayos, y evaluar la calidad de los suelos. Así, representan un punto importante dentro de la matriz suelo-agua-aire-flora-fauna-población humana de sitios contaminados (Mejía *et al.*, 2002; Loureiro *et al.*, 2005; SEMARNAT, 2006; Arrieta *et al.*, 2014). Los bioensayos con semillas proporcionan datos acerca del posible efecto de los contaminantes en las comunidades vegetales cercanas a suelos o a cuerpos de agua contaminados. Son de bajo costo, no requieren equipo sofisticado, se aplica a muestras ambientales, monitoreo de procesos de detoxificación, saneamiento, control de efluentes o rehúso

de biosólidos (SEMARNAT, 2006b). Por otra parte, la lechuga es de fácil y rápida germinación, por lo que es posible desarrollar la prueba en pocos días. Esta especie es uno de los principales cultivos de Noria de Ángeles, teniendo una superficie sembrada de 630 ha (PMDM, 2014; SIAP, 2015) con una producción de 11 980 toneladas anuales. Los bioensayos son complementarios y su extrapolación a otros organismos de la biota deberá asumirse con sumo cuidado (Mejía *et al.*, 2002).

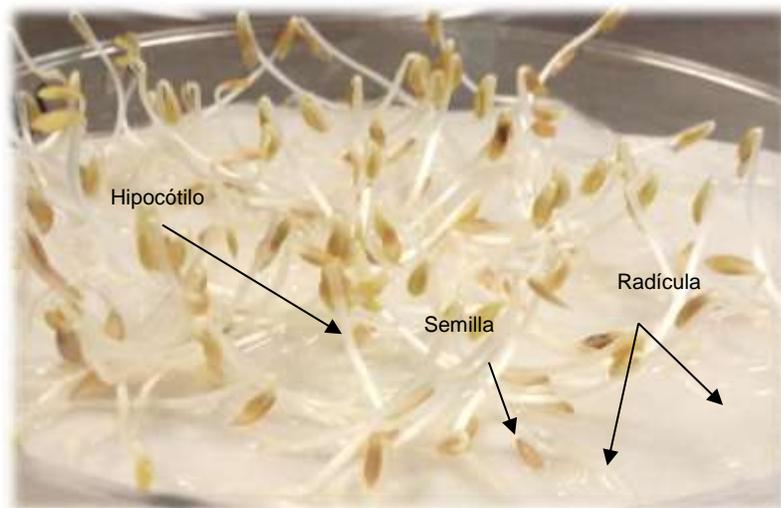


Figura 4. Morfología de la semilla y la plántula de lechuga *Lactuca sativa* L.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

El municipio Noria de Ángeles se encuentra entre los paralelos 22° 17' y 22° 31' de latitud norte; los meridianos 101° 45' y 102° 08' de longitud oeste (Figura 5). La altitud oscila entre 2 000 y 2 500 m. Las colindancias son al norte con el municipio Villa González Ortega y el estado de San Luís Potosí; al este con el estado de San Luís Potosí y el municipio de Villa Hidalgo; al sur con los municipios de Pinos y Loreto; al oeste con los municipios de Loreto, Luis Moya, Ojo Caliente y Villa González Ortega. La superficie es de 408.33 km² (PMDM, 2014), ocupando el 0.5 % de la superficie total del Estado. Cuenta con 41 localidades y una población total de 13 197 habitantes (INEGI, 2005), de los cuales 1 662 viven en la cabecera municipales de (CONAPO, 2010). Las viviendas están construidas con material sólido, los principales servicios son, agua potable, drenaje, energía eléctrica y pocas viviendas cuentan con cocina de leña o carbón. La vulnerabilidad de la comunidad, de acuerdo al índice de marginación, es medio (CONAPO, 2010). Los problemas de la comunidad son, empleo insuficiente, inseguridad, alta migración y desarrollo lento (PDUCP, 2010).

El clima predominante es semiseco templado con lluvias en verano, temperatura media anual de 16 °C, precipitación promedio anual de 300 mm y evapotranspiración potencial de 2031 mm (INEGI, 2005). Se ubica en la provincia fisiográfica Mesa del Centro, Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes. Se presenta en el área un sistema de topofomas con llanura desértica con piso rocoso o cementado, meseta típica y lomerío de pie de monte con mesetas (INEGI, 2005). La geología se divide en cuatro periodos: cuaternario, cretácico, neógeno y triásico; con predominancia de material aluvial. Los principales tipos de roca son: de las sedimentarias la caliza-lutita, arenisca-conglomerado y lutita-arenisca, de las ígneas la riolita-toba ácida, y

de las metamórficas, la cuarcita. Se ubica dentro de la región hidrológica El Salado y Lerma–Santiago, en las cuencas San Pablo y Río Verde Grande y subcuencas P. San Pablo, Río Chicalote y Río San Pedro. Las corrientes de agua son intermitentes, sobresaliendo los arroyos La Aguililla y Carbonera; también existen cuerpos de agua intermitentes, tales como El Jarillal, La Grulla y La Larga (INEGI, 2005).

Los suelos dominantes son: Durisol, Phaeozem, Luvisol, Leptosol, Regosol y Kastañozem (INEGI, 2005). Se caracterizan por su profundidad menor a 50 cm, terrenos generalmente planos con pendientes menores de 2%, con pedregosidad superficial del 40%, de 10 a 20 cm de diámetro; en la capa superficial su coloración es pardo tenue, escasos materiales orgánicos y coloración blanquecina en el subsuelo por la acumulación de carbonatos de calcio (Sánchez, 2005). El uso de la tierra en los alrededores de los jales es, principalmente, la agricultura y la ganadería. La vegetación dominante es matorral con pastizal y área sin vegetación (INEGI, 2005).

Adicionalmente, se estableció un sitio de referencia ubicado en el ejido Salinas, en el Monte Las Burras, a unos tres km de El Alegre (Figura 5). El clima es semiárido templado (BS1kw) con temperatura promedio de 18°C, régimen de lluvias de verano y precipitación total promedio anual de 350 mm (INEGI, 2017a). La Altitud va de 2,360 a 3,290 msnm, y la pendiente promedio de 5°. El tipo de vegetación es crasirosulifolios espinosos con nopalera e izotal (CR-No-Iz). El tipo de roca predominante son las sedimentarias correspondiendo a lutita y arenisca, caliza y material aluvial en las partes bajas. En cuanto al tipo de suelo predomina el litosol eútrico fase petrocálcica somera y textura media (INEGI, 2017b).

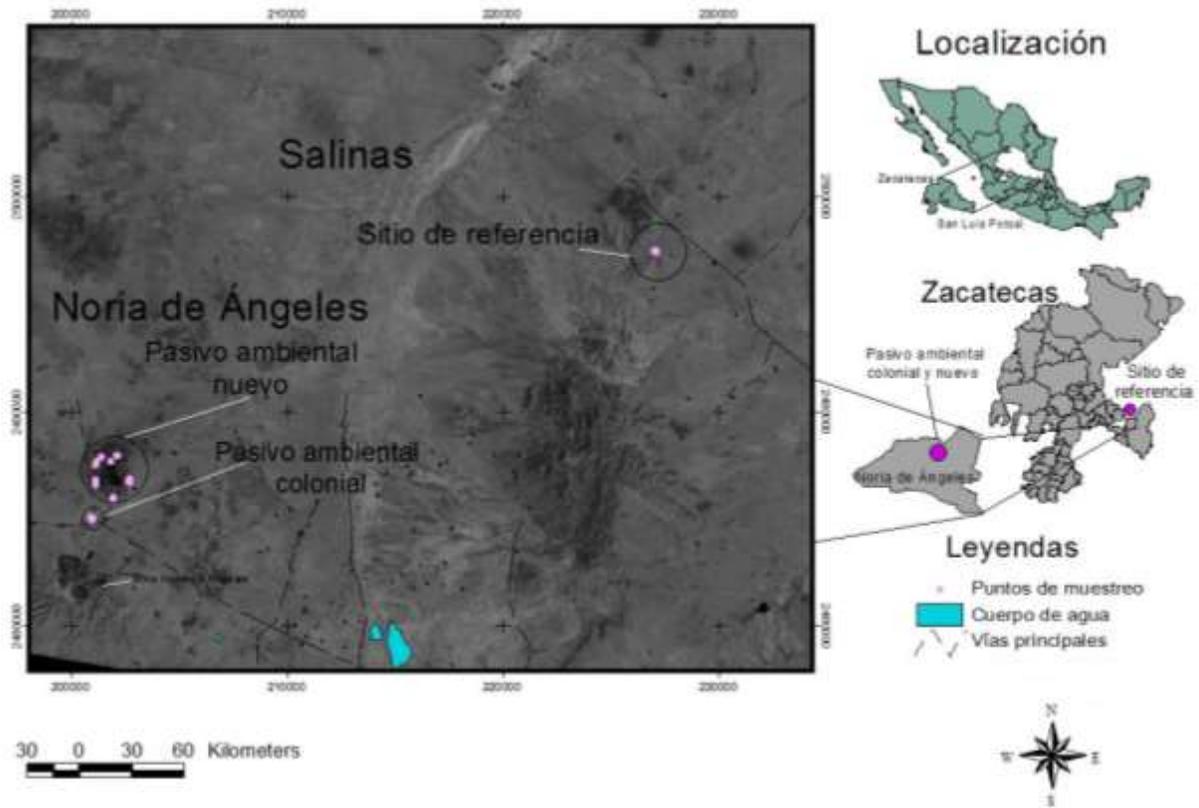


Figura 5. Ubicación del área de estudio para la determinación de metales y metaloides en pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, así como la localización del sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí.

3.2. Material y equipo de trabajo

El desarrollo del experimento se efectuó en tres etapas: 1) trabajo en campo el cual consistió en un muestreo preliminar y el definitivo de los tres sitios (pasivo ambiental colonial y nuevo, y sitio de referencia), 2) trabajo en laboratorio para el análisis químico y físico y, 3) bioensayos. Los muestreos en los pasivos ambientales y en el sitio de referencia se realizaron con base en la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides y manejo de las muestras se siguieron los criterios de la SE (2006).

3.3. Muestreo de los pasivos, de suelo y de agua

El muestreo preliminar se realizó en mayo de 2015 con fines exploratorios sobre la posible presencia de EPT. De manera aleatoria se ubicaron cinco puntos, el muestreo se hizo a la profundidad de 0-20, 20-40 y 40-60cm (Figuras 6 y 7). Las muestras fueron identificadas y etiquetadas debidamente para su posterior análisis químico en el laboratorio. El muestreo final se realizó en agosto de 2015 siguiendo las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (SE, 2006). Se indica que el número mínimo de puntos de muestreo debe ser de 6 por ha en sitios que se suponen contaminados. En las Figuras 8 y 9 se muestran fotos de este muestreo. El pasivo ambiental tiene una superficie menor de 2 ha y se seleccionaron 15 puntos distribuidos en tres transectos, considerando 5 puntos por encada uno, a distancia de 10 m entre ellos (Cuadro 3). La dirección de cada transecto se eligió con base a los últimos tres dígitos de billetes de \$200.00, considerándose como grados. Con dichos datos se orientó el transecto con una brújula. Se tomaron las coordenadas de cada punto (Figura 10 y Cuadro 3).



Figura 6. Manantial en el pasivo ambiental colonial.



Figura 7. Aspecto físico del pasivo ambiental colonial.



Figura 8. Otro aspecto del pasivo ambiental colonial.



Figura 9. Muestreo del pasivo ambiental colonial.

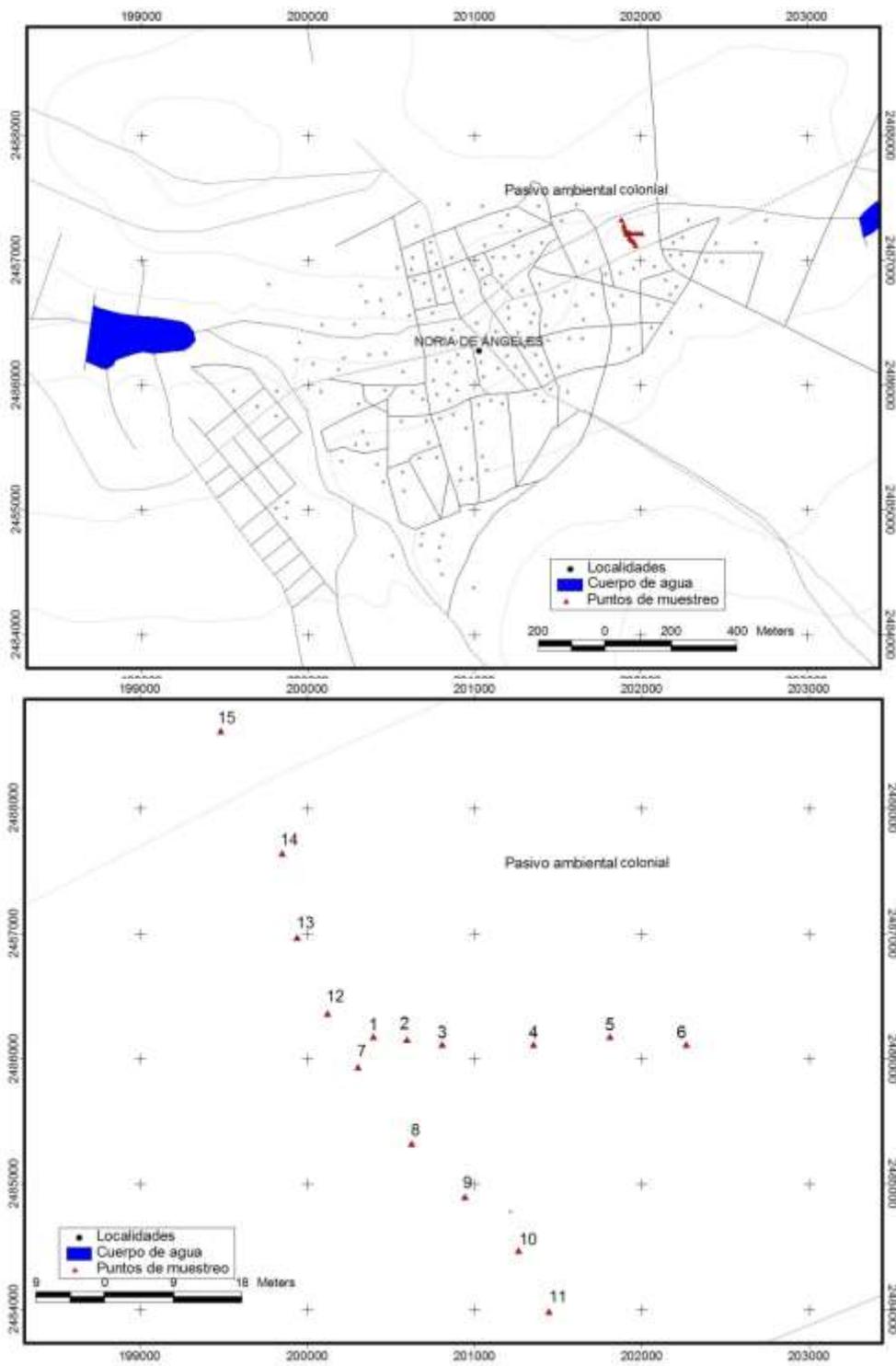


Figura 10. Ubicación de los puntos de muestreo en el pasivo ambiental colonial para la determinación de metales y metaloides en Noria de Ángeles, Zacatecas (Carta topográfica F14A71).

Para la toma de la muestra se trazó un cuadro de 1m², se eliminaron piedras, grava, vegetación, mantillo, etc. Se tomaron cinco submuestras a 20 cm de profundidad, una en cada esquina y otra en el centro (Figura 11). Se mezcló una parte proporcional de cada una y se generó una muestra compuesta (SE, 2006). Una vez obtenida la muestra del jal, se procedió a tamizarla con una criba de acero inoxidable de 2 mm de abertura y posteriormente con una de 0.5 mm. De la muestra cribada por la malla de 2 mm, 5 kg se transfirieron a una bolsa de polietileno y de la malla de 0.5 mm, 200 g se transfirieron a dos frascos de polietileno de 100g con tapa hermética para su transporte y almacenamiento. Cada bolsa y frasco fue etiquetada con una clave del sitio de muestreo y fecha, colocándolas en una hielera. Se fotografió el punto de muestreo y se registraron las coordenadas geográficas utilizando un GPS Garmin etrex vista HCx (Cuadro 3; SE, 2006). Se caracterizó cada sitio considerando color, humedad, hojarasca y presencia de otros materiales eliminados durante el muestreo.

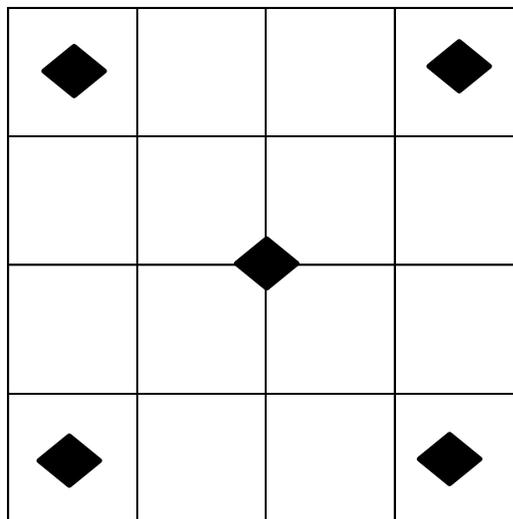


Figura 11. Esquema de distribución de los puntos de muestreo para generar una muestra compuesta, tamaño 1x1m (SE, 2006).

3.4. Muestreo del pasivo ambiental nuevo

El muestreo se hizo en el mes de agosto de acuerdo con la NMX-AA-132-SCFI-2006 (SE, 2006; Figura 12). La superficie aproximada de este pasivo ambiental es de 472 ha, el cual está “protegido” con una capa de 40 cm de material no contaminado. También se aprecian obras de control de escorrentías para evitar el arrastre del jal. Sin embargo, existen lugares en los que aflora el material contaminado porque la capa protectora es muy delgada o inexistente y también hay afloramiento, arrastre y transporte de material (Figuras 12, 13 y 14). Debido a esta capa, no fue posible aplicar el mismo sistema de muestreo que en el pasivo colonial. Por ello, los materiales arrastrados o aflorantes fueron los que se seleccionaron para el muestreo, y se escogieron 15 lugares con afloramientos. La toma de muestras se hizo en forma similar al aplicado en el pasivo colonial (Figura 11).





Figura 12. Aspectos del pasivo ambiental nuevo.



Figura 13. Cárcavas, afloramiento y arrastre de material mal protegido en el pasivo ambiental nuevo.

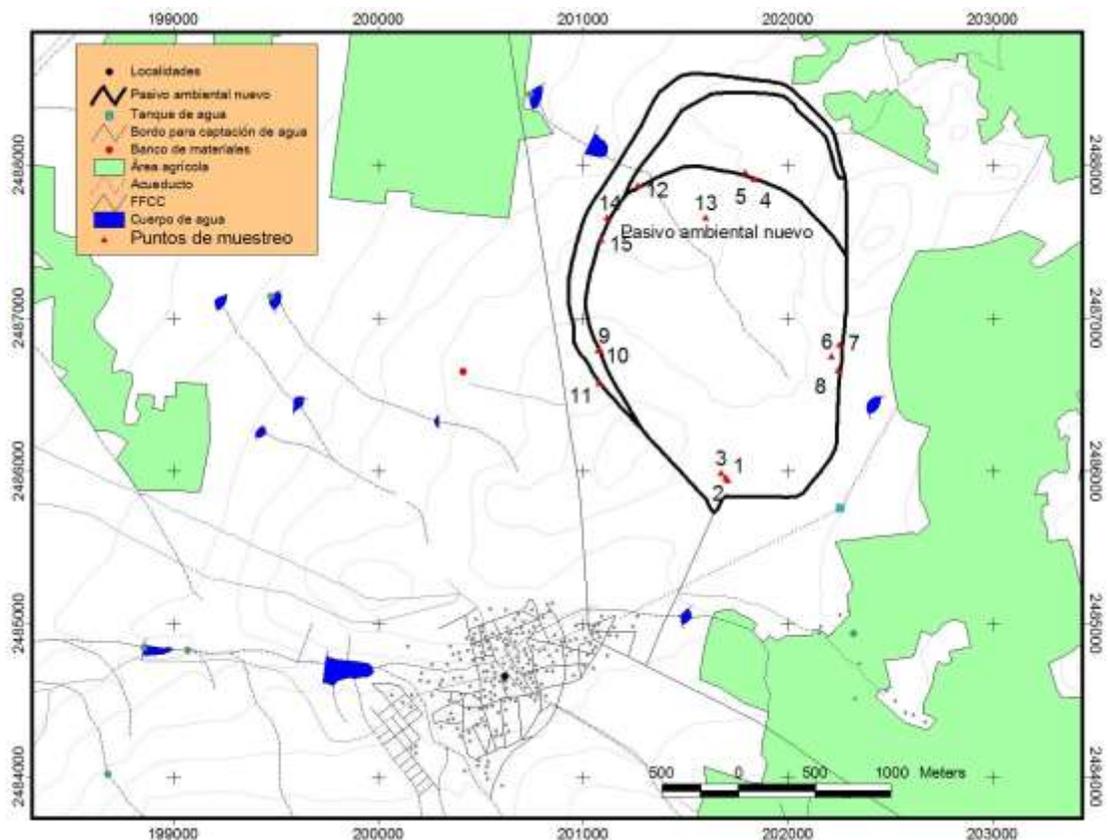


Figura 14. Ubicación de los puntos de muestreo en el pasivo ambiental nuevo en Noria de Ángeles, Zacatecas (Carta topográfica F14A71).

3.5. Muestreo del sitio de referencia

El sitio de referencia se ubica en el municipio de Salinas, San Luis Potosí, a unos tres kilómetros del poblado El Alegre (Figura 15 y 16). El muestreo de suelo se realizó de la misma forma que en el pasivo ambiental colonial. En total fueron 16 puntos. Es importante mencionar que se realizó el muestreo en dos sitios de referencia, ambos en el municipio de Salinas, San Luis Potosí, cercanos a las localidades El Alegre (septiembre del 2015) y La Cócona (en abril de 2016), con el fin de descartar presencia de EPT en ambos sitios. En el sitio de La Cócona se encontraron altas concentraciones de mercurio y arsénico, por ello, no se consideró como sitio de referencia.

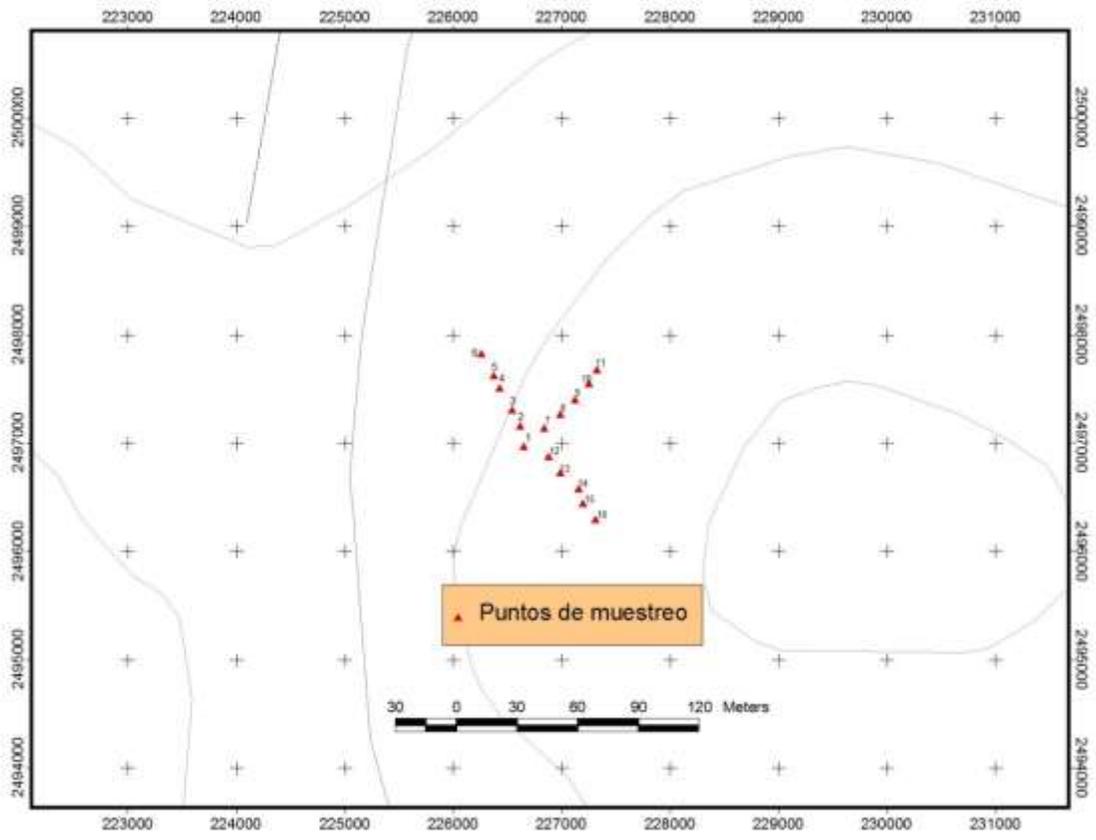


Figura 15. Ubicación del sitio de referencia, Salinas, San Luis Potosí (Carta topográfica F14A61).



Figura 16. Muestreo de suelo en el sitio de referencia, El Alegre, Salinas, San Luis Potosí.

3.6. Muestreo de agua

Se tomaron muestras de agua en los cuerpos ubicados en los pasivos ambientales en junio de 2016 conforme a la norma NOM-230-SSA1-2002 (SSA, 2003, Figura 17). Se tomaron muestras del único cuerpo de agua presente en el pasivo ambiental

colonial y de tres en el pasivo nuevo; no hubo cuerpos de agua en el sitio de referencia. Se muestreó con frascos estériles desechables, dejando 10% del frasco vacío, evitando la contaminación de la tapa del frasco, se etiquetó la muestra para su control, se guardaron en una hielera para su análisis en laboratorio. Para preservar la muestra se agregó 1 mL de ácido nítrico concentrado por cada 100 mL de muestra.



a) Sobre pasivo ambiental nuevo

b) Fuera del pasivo ambiental nuevo

Figura 17. Cuerpos de agua relacionados al pasivo ambiental nuevo, a) dentro y, b) fuera del mismo.

3.7. Muestreo de vegetación

Se recolectaron ejemplares de las especies vegetales en los pasivos ambientales (Figura 18); dicho muestreo se llevó a cabo en junio de 2016. Se identificó la especie, se anotó la fecha, el sitio de muestreo y el nombre común (Figuras 19 y 20). Finalmente, se identificaron las especies con ayuda de guías de taxonomía (Rzedowski, 1965; Conzatti, 1981; UNIBIO, 2010; CONABIO, 2010 y 2017).



Figura 18. Identificación de vegetación en los pasivos ambientales.



Figura 19. Vegetación del pasivo ambiental colonial.



Figura 20. Vegetación del pasivo ambiental nuevo.

3.8. Preparación de las muestras

Las muestras de suelo de los pasivos ambientales y del sitio de referencia se secaron al aire libre a temperatura ambiente, extendiéndolas sobre papel durante 48 h; las muestras que se tomaron en frascos de polietileno se almacenaron a 4° C para su conservación. En ambas muestras la preparación fue de acuerdo a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las muestras de agua se manejaron de acuerdo a la NOM-230-SSA1-2002 (SSA, 2003) y se refrigeraron a 4° C para su preservación.

3.9. Análisis de suelo y agua

Las muestras preliminares se analizaron en el laboratorio de suelo y agua del Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Se determinó: Plomo (Pb), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni). Las muestras de suelo y de agua de los pasivos ambientales y sitio de referencia se analizaron en el laboratorio del Colegio

de Postgraduados, *Campus* San Luis Potosí. Los metales y metaloides [Plomo, Mercurio (Hg), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Arsénico (As)] se analizaron acorde a la metodología USEPA (1986), Basta (2001) y a la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Con la finalidad de tener control de calidad en las lecturas de metales en el espectrofotómetro de absorción atómica, se empleó un estándar ISO/IEC 17025 Y ISO Guide 34. Las propiedades físicas y químicas como el pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), carbonatos de calcio (CaCO₃), textura, nitrógeno total (N) se analizaron de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). En el caso del agua sólo se determinaron metales y metaloides conforme a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000).

3.10. Bioensayos con lechuga *Lactuca sativa* L.

Los tratamientos probados en los bioensayos con lechuga (*Lactuca sativa* L.) consistieron en una dilución 1:1 agua: pasivo ambiental o suelo de los pasivos ambiental colonial (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia (SR). Cada tratamiento contó con cinco repeticiones obtenidas de muestras compuestas por tres submuestras (del 1 al 3, del 4 al 6, 7 al 9, 10 al 12 y del 13 al 15) y con tres réplicas por cada tratamiento. Para evaluar los efectos, se midió el crecimiento de hipocótilo y de la radícula de acuerdo al método de Sobrero y Ronco (2004). Cada caja Petri se rotuló con la fecha y la hora, se colocó papel filtro y 4 mL de la dilución 1:1 de cada muestra compuesta de jal y suelo de referencia evitando bolsas de aire, se introdujo 20 semillas con ayuda de una pinza para dispersar y permitir la elongación de las raíces (Figura 21). Además, las disoluciones utilizadas en el control fueron de 100, 30, 10, 3 y 1% de As, Hg, Pb, Cd y Ag, y el testigo consistió en agua destilada. Se cerraron las cajas Petri, para su posterior incubación durante 120 h (5 días) a temperatura de 22 ± 2 °C en cuarto oscuro. Se realizaron tres réplicas por cada muestra (Figura 22). Cada 24 h se anotó el número de semillas germinadas, no germinadas; registro de signos de fitotoxicidad (necrosis, efectos en pelos

absorbentes). Finalmente, al término de 120 h exactas se midió la elongación de la radícula y del hipocótilo (Figura 23). Con fines de verificación de la variabilidad de las semillas se desarrolló un blanco por triplicado con 20 semillas en cada caja Petri, obteniendo un 90 % de germinación sin signos de fitotoxicidad (Sobrero y Ronco, 2004).



Figura 21. Distribución de las semillas de lechuga en las cajas Petri.



Figura 22. Semillas germinadas en las muestras compuestas.



Figura 23. Medición de la elongación de la radícula y del hipocótilo.

3.11. Análisis estadístico

Los valores de las concentraciones de los metales Cu, Cd, Pb y Ni obtenidos a varias profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm) se analizaron en un diseño completamente al azar mediante el modelo matemático.

$$y = \mu + P_i + E_{\kappa(i)}$$

Donde “y” es la variable dependiente, μ representa la media general, P_i el efecto de la profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm) (2 g.l.) y $E_{\kappa(i)}$ el error experimental (28 g.l.). El análisis se realizó utilizando el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 2017) y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey (Steel and Torrie, 1980).

Los valores de los parámetros físicos y químicos y de los metales en los pasivos ambiental colonia (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia, se analizaron en un diseño completamente al azar mediante el modelo matemático:

$$y = \mu + SM_i + E_{\kappa(i)}$$

Donde “y” es la variable dependiente, μ representa la media general, S_{Mi} el efecto del sitio de muestreo (pasivo ambiental colonial, nuevo y sitio de referencia) (2 g.l.) y $E_{\kappa(i)}$ el error experimental (43 g.l.). El análisis se realizó utilizando el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 2017) y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey (Steel and Torrie, 1980).

Los resultados de los bioensayos (tamaño de hipocótilo y radícula) se analizaron en un diseño completamente al azar mediante el modelo matemático

$$y = \mu + S_i + E_{\kappa(i)}$$

Donde “y” es la variable dependiente, μ representa la media general, S_i el efecto del sitio (Pasivo ambiental colonial, pasivo ambiental nuevo, sitio de referencia y blanco) (3 g.l.) y $E_{\kappa(i)}$ el error experimental (36 g.l.). El análisis se realizó utilizando el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 2017) y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey (Steel and Torrie, 1980).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pasivo ambiental colonial está formado por residuos de color rojizo, presenta signos de erosión tanto laminar como en surcos y en cárcavas, sin rocas a simple vista. La consistencia es blanda, poca abundancia de vegetación y a la orilla permanece un cuerpo de agua permanente. El pasivo ambiental nuevo está formado por residuos color gris. Tiene una cubierta discontinua de tepetate con rocas, que en algunas partes presenta erosión en surcos y en cárcavas, principalmente en el talud. La consistencia también es blanda, arenosa, con poca vegetación. Se forman algunos cuerpos de agua estacionales.

4.1. Muestreo preliminar

Las concentraciones totales (CT) de metales del muestreo preliminar se presentan en el Cuadro 3, de acuerdo con los promedios mínimos y máximos de cada muestra, así como los valores máximos permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y en la USEPA (1986). La concentración de Cu sólo rebasó los límites máximos permisibles en un punto de muestreo, con 915.92 mg/kg en la muestra 3, por lo que se descartó a este metal para el muestreo definitivo.

Cuadro 3. Concentraciones mínimas y máximas de metales en el pasivo ambiental colonial de Noria de Ángeles, Zacatecas, y concentraciones máximas permisibles según SEMARNAT (2004) y USEPA (2016).

Muestra	Cu (mg/kg)		Cd (mg/kg)		Pb (mg/kg)		Ni (mg/kg)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	51.76	478.98	21.74	59.58	29.56	57.99	ND	1.2
2	13.83	406.86	2.05	50.69	ND	515.43	ND	0.10
3	29.03	915.92	24.93	81.47	10.56	126.62	0.11	0.73
4	173.36	294.04	13.45	23.41	7.22	43.55	ND	0.43
5	112.78	322.77	23.26	45.07	ND	99.71	ND	1.39
6	38.91	277.63	31.39	58.44	10.56	62.47	ND	0.54
¹ NOM (³ CR _T mg/kg)	-----		37		400		1600	
² USEPA (CR _T mg/kg)	3100		20		150		150	

¹Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

²United States. Environmental Protection Agency.

³Concentración de referencia totales (CR_T), por uso de suelo agrícola/residencial/comercial mg/kg.

ND=No detectado

El contenido medio de este metal fue significativamente más alto (329.05 mg/kg) en el nivel de 40-60 cm (Cuadro 4). En el caso del Cd, se encontraron concentraciones que rebasan los límites permisibles en todas las muestras, excepto en el sitio 4 para la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004), por lo que se eligió como contaminante crítico a analizar. Las concentraciones promedio de Cu, Cd, Pb y Ni en los jales y sitio de referencia obtenido a diferentes profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm) se muestran en el cuadro 4. La mayor ($P < 0.05$) concentración de Cu y Pb se encontró de 40-60 cm de profundidad con respecto a las encontradas a 0-20 y 20-40, entre estas la concentración fue similar ($P > 0.05$). Sin embargo, la concentración de Cd y Ni fue similar en las tres profundidades ($P > 0.05$).

Cuadro 4. Concentración de metales en muestras de suelo obtenido a tres niveles de profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm) en el pasivo ambiental colonial de Noria de Ángeles, Zacatecas.

Metal	Profundidad (cm)	Concentración (mg/kg)			<i>P</i>
Cu	0-20	217.76 _b	±	89.38	0.0008
	20-40	217.83 _b	±	136.38	
	40-60	329.05 _a	±	296.72	
Cd	0-20	34.47	±	11.27	0.0536
	20-40	34.47	±	21.12	
	40-60	32.03	±	15.91	
Pb	0-20	44.68 _b	±	32.76	<0.0001
	20-40	39.51 _b	±	29.72	
	40-60	92.51 _a	±	155.05	
Ni	0-20	0.17	±	0.25	0.4274
	20-40	0.22	±	0.38	
	40-60	0.33	±	0.39	

^{a,b} Medias para cada elemento en una misma columna con letra distinta son diferentes ($P < 0.05$).

4.2. Parámetros físicos y químicos

Las características físicas y químicas de las muestras de los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, y del sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí se muestran en el Cuadro 5. El pH en los pasivos ambientales fue moderadamente ácido, mientras que, en el sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí fue mediamente alcalino, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La relevancia en los valores del pH es que afecta la disponibilidad de un determinado mineral (USDA, 2014), e influye en la tasa de liberación de nutrientes, en la solubilidad de los minerales y en la cantidad de iones nutritivos y en el crecimiento de las plantas (Thompson, 1988). De esta manera, a pH ácido sólo hay biodisponibilidad deseable de Fe, Mn y B; para el Fe su disponibilidad

disminuye en pH alcalino mientras que para Mn en muy ácido o alcalino. En valor muy alcalino sólo hay disponibilidad de S, P y B. El Mg se encuentra mayormente disponible en valores medios y el Ca en valores de neutro a alcalino. El P es más biodisponible en valores neutros o muy alcalinos (Ibáñez, 2017). La salinidad del pasivo ambiental colonial fue muy alta, y presentó una CE de 23.2 dS m^{-1} . El nuevo varió de salino a muy fuerte y el sitio de referencia de muy ligeramente salino a moderadamente salino, conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La salinidad en los pasivos ambientales es un factor adicional que puede influir en la baja producción de vegetación; el sitio de referencia no presentó problemas de salinidad.

La materia orgánica (MO) tiene que ver con la fertilidad, la estructura y la permeabilidad (Thompson, 1988). El pasivo ambiental colonial presentó valores muy contrastantes, variando de bajo a alto, mientras que el nuevo tuvo valores medios y el de referencia de medio a alto. La textura del pasivo ambiental colonial y del sitio de referencia fue franco arenoso, mientras que en el pasivo ambiental nuevo fue arenoso, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Thompson (1988) que los suelos arenosos son generalmente permeables al aire, al agua y a las raíces, pero presentan dos importantes limitaciones: baja capacidad de retención de agua y de intercambio catiónico, suelen ser pobres en MO. En contraparte, los suelos francos retienen mejor el agua y óptimos para el crecimiento vegetal. El porcentaje de carbonato de calcio (CaCO_3) en ambos pasivos ambientales varió de bajo a medio, de acuerdo a la clasificación de SEMARNAT (2002), mientras que en el sitio de referencia fue medio. De igual manera, el N total mostró valores bajos en los dos pasivos ambientales, y valor medio en el sitio de referencia. Para Thompson (1988), la deficiencia de este elemento es consecuencia de la baja mineralización de la MO, liberando escasos iones inorgánicos, limitando el desarrollo radicular de plantas y de microorganismos.

Cuadro 5. Parámetros físicos y químicos de los dos sitios de muestreo en Noria de Ángeles, Zacatecas, y del sitio de referencia en Salinas, San Luis Potosí.

Parámetro	Pasivo ambiental colonial			Pasivo ambiental nuevo			Sitio de referencia		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
pH	5.39	5.79	6.10	5.4	5.59	5.88	6.49	6.91	7.90
CE (dS m ⁻¹)	22.25	23.20	23.85	5.01	16.58	28.05	1.56	2.05	3.42
MO (%)	0.57	1.72	4.00	1.09	2.59	3.87	2.52	3.50	5.51
Arena (%)	68.16	74.6	79.60	57.28	95.28	98.16	55.56	63.92	76.16
Arcilla (%)	11.84	17.28	23.84	1.28	1.37	4.28	4.40	9.72	16.72
Limo (%)	5.12	9.00	10.44	0.09	2.47	40.09	13.56	25.18	33.36
CaCO ₃ (%)	0.60	2.23	4.10	0.50	3.12	5.90	4.10	6.49	10.40
N total (%)	0.0050	0.0060	0.0072	0.0050	0.0057	0.0075	0.0054	0.0057	0.0078

Los resultados del análisis estadístico de los parámetros físicos y químicos entre los sitios de muestreo se muestran en el Cuadro 6. El pH fue similar ($p > 0.05$) entre los pasivos ambientales, pero diferentes al sitio de referencia ($p < 0.05$). La CE fue mayor en el pasivo colonial y menor en el sitio de referencia, con valor diferente intermedio en el pasivo nuevo ($p < 0.05$). La MO fue mayor ($p < 0.05$) en el sitio de referencia, y menor en el colonial. El porcentaje de arena fue mayor ($p < 0.05$) en el pasivo nuevo y menor en el sitio de referencia. Para la arcilla, el valor mayor fue en el colonial, mientras que el menor fue en el nuevo ($p < 0.05$). Para el limo fue mayor ($p < 0.05$) en el sitio de referencia, sin diferencia ($p > 0.05$) entre los pasivos ambientales; situación similar se presentó para CaCO₃, mientras que para N total no hubo diferencia entre sitios.

Cuadro 6. Valores medios y desviación estándar (DE) de los parámetros físicos y químicos de los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia (SR).

Parámetro	Sitio	Media	DE	<i>P</i>
pH	PAC	5.79 _b	0.19	<0.0001
	PAN	5.59 _b	0.16	
	SR	6.91 _a	0.33	
CE (dS m ⁻¹)	PAC	23.19 _a	0.49	<0.0001
	PAN	16.58 _b	7.38	
	SR	2.05 _c	0.43	
M.O. %	PAC	1.72 _c	0.84	<0.0001
	PAN	2.59 _b	0.95	
	SR	3.50 _a	0.76	
Arena %	PAC	73.23 _b	3.89	<0.0001
	PAN	92.54 _a	10.24	
	SR	64.83 _c	6.29	
Arcilla %	PAC	17.38 _a	3.98	<0.0001
	PAN	2.11 _c	0.95	
	SR	10.66 _b	3.62	
Limo %	PAC	8.68 _b	1.23	<0.0001
	PAN	5.34 _b	9.92	
	SR	24.50 _a	4.93	
CaCO ₃ %	PAC	2.23 _b	1.00	<0.0001
	PAN	3.12 _b	1.62	
	SR	6.49 _a	1.81	
N total %	PAC	0.0061	0.0006	0.1625
	PAN	0.0057	0.0007	
	SR	0.0061	0.0007	

^{a,b,c}Medias para cada elemento en una misma columna con letra distinta son diferentes ($P < 0.05$).

4.3 Contenido de metales y metaloides

Conforme a los contaminantes críticos seleccionados por su toxicidad y peligrosidad de los resultados del análisis preliminar, se analizó Hg, Cd, As y Pb. La concentración para Hg (Cuadro 7) no rebasó los límites máximos permisibles según la Norma Oficial Mexicana NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y la USEPA (2016). La concentración de este metal fue significativamente mayor en los pasivos ambientales respecto al sitio de referencia (Cuadro 8). Por su parte, las concentraciones de Cd y de As rebasaron los límites de las dos normas en los tres sitios y el Pb rebasó estos límites de ambas normas en el pasivo ambiental colonial, y de la USEPA (2016) en el pasivo nuevo. Mientras que la concentración de Cd fue significativamente mayor en el pasivo ambiental nuevo con respecto a los otros dos sitios, el As fue mayor en el pasivo colonial. La concentración de Pb en el sitio de referencia se encontró muy por debajo de los límites permisibles, significativamente menor que en los pasivos ambientales (Cuadro 8). De acuerdo con estos resultados, ambos pasivos ambientales presentaron concentración de referencia totales (CR_T) por encima de lo permisible, constituyendo una amenaza para la salud pública y para la vida silvestre.

Cuadro 7. Contenido de metales y metaloides (mg/kg) de los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) y sitio de referencia (SR) y comparación con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y USEPA (2002).

Metal o metaloide	PAC		PAN		SR		CR _T (mg/kg)	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	NOM	USEPA
Hg	0.64	5.54	0.72	5.38	ND	3.40	23	8
Cd	17.46	66.78	123.80	257.20	12.48	39.96	37	20
As	72.74	462.00	ND	188.40	ND	151.40	22	-----
Pb	120.8	480.80	ND	394.40	ND	4.28	400	150

CR_T=Concentración de referencia totales por uso de suelo agrícola/residencial/comercial mg/kg. ND=No detectado.

Cuadro 8. Valores medios (mg/kg) y desviación estándar (DE) de metales o metaloide en los pasivos ambientales colonial (PAC), nuevo (PAN) en Noria de Ángeles, Zacatecas, y sitio de referencia (SR) en Salinas San Luis Potosí.

Metal o metaloide	Sitio	Media	DE	<i>P</i>
Hg	PAC	4.15 _a	1.60	<0.0001
	PAN	3.23 _a	1.04	
	SR	1.11 _b	1.12	
Cd	PAC	23.88 _b	13.62	<0.0001
	PAN	202.65 _a	43.44	
	SR	19.10 _b	7.03	
As	PAC	263.34 _a	128.82	<0.0001
	PAN	47.90 _b	74.89	
	SR	93.21 _b	32.04	
Pb	PAC	248.80 _a	116.84	<0.0001
	PAN	149.67 _a	95.39	
	SR	2.81 _b	1.67	

^{a,b,c}Medias para cada elemento en una misma columna con letra distinta son diferentes ($P < 0.05$).

4.4. Contenido de metales y metaloide en agua

De acuerdo con los valores máximos permisibles tanto por la Secretaría de Salud (SSA, 2003), la USEPA (2016) y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE, 1989) para la vida silvestre, los cuatro metales o metaloide exceden dichos máximos (Cuadros 9 y 10). Los que se encontraron en mayores concentraciones fueron Pb, Hg, Cd y As. Cabe mencionar que se realizaron pruebas también para Ag, pero los valores no fueron detectados. Por lo tanto, el agua de estos cuerpos no es apta para el consumo humano, pero también constituye una amenaza para la vida silvestre, conforme a los criterios ecológicos de calidad del agua. En este sentido, los cuerpos de agua presentes en el pasivo ambiental nuevo son estacionales; en estos se

observaron algunas huellas de fauna que posiblemente los usen como abrevadero, uso que se corroboró por parte de ganado doméstico. De vida silvestre se observaron sólo algunos moluscos gasterópodos (caracoles), insectos acuáticos y una pequeña capa de algas adheridas al fondo. En contraparte, el cuerpo de agua en el pasivo ambiental colonial corresponde a un arroyo formado por un manantial adyacente, que aporta agua de manera permanente. En este arroyo se observó, además de moluscos e insectos, peces y anfibios nativos, así como varias especies de plantas acuáticas sumergidas, emergentes o ribereñas, por lo que constituye un foco de biodiversidad acuática empotrado en un ambiente semiárido. Esta biodiversidad de alguna manera ha sobrevivido tanto a la actividad minera en sí, como a sus efectos contaminantes a largo plazo.

Cuadro 9. Contenido de metales y metaloide (MyM; en mg/L) en los cuerpos de agua (CA) presentes en los pasivos ambientales colonial (CA 1) y nuevo (CA 2, 3 y 4), y comparación con los límites máximos permisibles (MP) en agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2002), la USEPA (2016) y los (CE, 1989) para la vida silvestre.

MyM	CA1		CA2		CA3		CA4		MP		
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	¹ NOM	² USEPA	³ CE
Hg	101.2	104.8	73.6	75.2	76.8	86.4	82.4	84	0.001	0.002	0.001
Cd	154.4	164.4	17.24	33.96	40.8	48.4	47.6	54.8	0.005	0.005	0.001
As	ND	55.6	140.8	148.8	102.4	138.8	40.4	76.4	0.05	0.05 - 0.010	0.005
Pb	0.2	0.4	0.28	0.44	0.2	0.36	0.04	0.28	0.001	0.01	0.05
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001	0.01	0.05

¹Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000).

²United States. Environmental Protection Agency (USEPA, 2016).

³Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE, 1989).

ND=No detectado.

Cuadro 10. Valores promedio (mg/kg) del contenido metales y metaloide en los cuerpos de agua (CA) en los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas.

Metal o metaloide	CA	Media
Hg	1	103.00
	2	74.40
	3	81.60
	4	83.20
Cd	1	159.40
	2	25.60
	3	44.60
	4	51.20
As	1	27.80
	2	144.80
	3	120.60
	4	58.40
Pb	1	0.30
	2	0.36
	3	0.28
	4	0.16

CA: 1. ubicado en el pasivo ambiental colonial; 2,3 y 4, ubicados en el pasivo ambiental nuevo.

4.5. Vegetación en los pasivos ambientales

La vegetación característica de Noria de Ángeles, Zacatecas es matorral desértico micrófilo (Rzedowski, 1957; INEGI, 2005). Ecológicamente se relaciona con suelos aluviales de textura arenosa y está representada por un matorral de menos de 1m de alto (INEGI, 2005). Las especies dominantes dentro de los pasivos ambientales se enlistan el Cuadro 11. Se observaron diferencias entre ambos

pasivos ambientales; en el colonial se encontraron 18 especies vegetales de 8 familias, mientras que en el nuevo hubo 20 especies de 11 familias taxonómicas. Las especies no encontradas en el pasivo colonial fueron *Asclepias angustifolia*, *Gymnosperma glutinosum*, *Aster tanacetifolius*, *Astragalus allochrous*, *Mimosa biuncifera* y *Allionia choisyi*, mientras que las ausencias en el nuevo fueron *Zynnia acerosa*, *Prosopis juliflora*, *Muhlenbergia repens* y *Eucalyptus* sp. Las condiciones tanto en el contenido de EPT, así como en las características tanto físicas como químicas difieren entre ambos sitios, pero también se observó diferencia en el uso, y que el pasivo nuevo tiene una cubierta de material no proveniente de la mina. Ante esto, no se puede adjudicar que la diferente presencia de especies se deba a las condiciones en general. Sin bien, hay vegetación presente en ambos pasivos, esta se observó más escasa que en los sitios (no agrícolas) adyacentes, sin embargo, las plantas mostraron vigor similar a las de fuera. La presencia de estas especies indica adaptación, tolerancia o que las condiciones no han sido suficientemente restrictivas para su desarrollo. Esta presencia sugiere que pueden ser útiles para sanear y recuperar los espacios perturbados (Díaz *et al.*, 2005).

Cuadro 11. Lista de vegetación recolectada en los pasivos ambientales colonial (PAC) y nuevo (PAN) en Noria de Ángeles, Zacatecas.

Familia	Nombre científico	Nombre común	PAC	PAN
Anarcardiaceae	<i>Schinus molle</i>	Pirul	*	*
Asclepiadaceae	<i>Asclepias angustifolia</i>	Algodoncillo		*
Asphodelaceae	<i>Asphodelus fistulosus</i>	Cebollín	*	*
Asteraceae	<i>Gymnosperma glutinosum</i>	Escobilla		*
Compositae	<i>Aster tanacetifolius</i>	Árnica		*
	<i>Bahia absinthifolia</i>	Bahía peluda	*	*
	<i>Haplopappus venetus</i>	Hierva de la mula	*	*
	<i>Zinnia acerosa</i>	Chatilla	*	
Fabacea	<i>Astragalus allochrous</i>	Hierva loca		*
	<i>Prosopis juliflora</i>	Mezquite	*	
Gramineae	<i>Andropogon barbinodis</i>	Popotillo plateado	*	*
	<i>Bouteloua curtispindula</i>	Navajita banderita	*	*
	<i>B. repens</i>	Navajita anual	*	*
	<i>B. scorpioides</i>	Navajita perenne	*	*
	<i>B. simplex</i>	Navajita anual	*	*
	<i>Eragrostis intermedia</i>	Pasto amor	*	*
	<i>Muhlenbergia repens</i>		*	
Myrtaceae	<i>Eucalyptus</i> sp.	Eucalipto	*	
Leguminosae	<i>Mimosa biuncifera</i>	Garabatillo, uña de gato		*
Nyctaginaceae	<i>Allionia choisyi</i>	Garrapatilla		*
Solanaceae	<i>Solanum corymbosum</i>		*	*
	<i>S. angustifolium</i>		*	*
	<i>S. elaeagnifolium</i>	Trompillo	*	*
Zygophyllaceae	<i>Larrea tridentata</i>	Gobernadora	*	*

* Presencia

4.6 Bioensayos con lechuga *Lactuca sativa* L.

Con la finalidad de generar información sobre los efectos adversos derivados de los EPT, se presenta la relación dosis-respuesta del As, Cd, Pb, Hg y Ag. La concentración usada para cada elemento fue de 0.01, 0.03, 0.001 y 0.003 ppm. El criterio para elegir estos valores de selección fue por la solubilidad de cada uno de los metales. Al realizar pruebas de ensayo y error, resultó una germinación nula en concentraciones mayores a 1 ppm. Los porcentajes de germinación por metal y metaloide (Cuadro 12) mostraron que, a mayor concentración, menor fue el porcentaje de germinación, mientras que en el testigo la germinación fue 100%. La inhibición por As y Pb fue de 5% a partir de la concentración de 0.001 ppm, para Cd, Hg y Ag fue 15%. La mayor inhibición se observó con Cd y Hg a concentración de 0.03. Los valores medios de 20 plántulas, del crecimiento tanto de hipocótilo como de la radícula de las plántulas de lechuga se muestran en el Cuadro 13. La respuesta de estas semillas a la concentración de metales o metaloide fue variada, así para As ($P = 0.0041$), Cd ($P = 0.0125$), Hg ($P = 0.0011$) y Pb ($P = 0.1104$), en las primeras tres concentraciones disminuyó el tamaño de la radícula, y vuelve a crecer en la mayor concentración, aunque sin igualar la de menor concentración siendo menor que el tamaño alcanzado en el testigo. Respecto a Ag, a mayor concentración, menor tamaño de la radícula, aunque no hay diferencia entre 0.01 y 0.03 ppm (Cuadro 13). En lo tocante al desarrollo del hipocótilo, en As ($P = 0.0392$), Hg ($P = 0.0064$), Pb ($P = 0.1362$) y Ag, a mayor concentración menor tamaño; para Cd fue a la inversa, excepto en la concentración 0.003 ppm, en la cual el tamaño fue menor al de la concentración 0.001 ppm. La respuesta en el testigo fue ligeramente menor a la máxima concentración, excepto para As (Cuadro 13).

En función al sustrato proveniente de los sitios de estudio sobre el crecimiento de las plántulas de lechuga, para el hipocótilo no hubo diferencia entre sitios, sólo entre estos y el testigo (Cuadro 14). En contraparte, para la radícula el crecimiento fue

significativamente diferente sólo entre el pasivo nuevo y el testigo, sin diferencias entre sitios, ni entre los demás sitios y el testigo. En términos generales, el crecimiento de las partes de las plántulas de la lechuga no fue restrictivo bajo las concentraciones del sustrato proveniente de los sitios de muestreo. De hecho, no hubo diferencia entre el material proveniente de los pasivos ambientales con respecto al sitio de referencia. La inhibición se encontró a partir de 1 ppm para cada uno de los metales o metaloides.

Cuadro 12. Porcentaje de germinación de semillas de lechuga a las 120 h de plantadas expuestas a varias concentraciones de metal y metaloide.

Metal o metaloide	Concentración (ppm)	% Germinación
As	0.001	95
	0.003	90
	0.01	80
	0.03	80
	Promedio	86.25 %
Cd	0.001	85
	0.003	85
	0.01	75
	0.03	70
	Promedio	78.75 %
Hg	0.001	85
	0.003	80
	0.01	75
	0.03	70
	Promedio	77.5 %
Pb	0.001	95
	0.003	90
	0.01	90
	0.03	75
	Promedio	87.5 %
Ag	0.001	85
	0.003	80
	0.01	80
	0.03	75
	Promedio	80 %

Cuadro 13. Longitud promedio (cm) de la radícula y del hipocótilo, derivadas de la germinación de 20 de semillas de lechuga, expuestas a varias concentraciones de metales y metaloides.

Metal o metaloide	Concentración (ppm)	Radícula	Hipocótilo
As	0.001	3.1 _a	3.19 _a
	0.003	2.6 _{ab}	2.3 _{ab}
	0.01	1.5 _b	2.3 _b
	0.03	1.9 _b	2.0 _b
	<i>P</i>	0.0041	0.0392
Cd	0.001	2.6 _a	2.8
	0.003	2.2 _{ab}	2.6
	0.01	1.4 _b	3.1
	0.03	2.0 _{ab}	3.3
	<i>P</i>	0.0125	0.5861
Hg	0.001	2.7 _a	3.5 _a
	0.003	1.7 _b	3.0 _{ab}
	0.01	1.3 _b	2.2 _b
	0.03	1.9 _{ab}	2.1 _b
	<i>P</i>	0.0011	0.0064
Pb	0.001	2.6	2.9
	0.003	1.8	3
	0.01	1.8	2.2
	0.03	1.9	2.2
	<i>P</i>	0.1104	0.1362
Ag	0.001	2.5	2.9
	0.003	2.4	2.8
	0.01	1.9	2.4
	0.03	1.9	2.4
	<i>P</i>	0.3267	0.5813
Testigo	Agua destilada	1.72	2.04

^{ab}Medias en una misma fila con distinta letra son diferentes ($P < 0.05$).

Cuadro 14. Elongación del hipocótilo y de la radícula de plántulas de lechuga establecidas en sustratos de los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, y el sitio de referencia (SR) en Salinas, San Luis Potosí.

Sitio	Hipocótilo (mm)		Radícula (mm)	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
PAC	33.0 _b	8.1	24.8 _{ab}	9.1
PAN	34.9 _b	7.5	27.8 _b	11
SR	33.7 _b	10.1	22.5 _{ab}	10.2
Testigo	20.4 _a	6.6	17.2 _a	7.6
Probabilidad (<i>P</i>)	0.0002		0.0195	

^{a,b}Medias para cada elemento en una misma columna con letra distinta son diferentes ($P < 0.05$).

5. CONCLUSIONES

Los metales (plomo, cadmio) y metaloide (arsénico) encontrados en dos pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, son potencialmente tóxicos para humanos y posiblemente para fauna doméstica y silvestre, ya que rebasan los niveles máximos permisibles por la Norma Oficial Mexicana.

Los metales (plomo, cadmio y mercurio) y metaloide (arsénico) encontrados en los cuerpos de agua dentro o adyacentes a los pasivos ambientales en Noria de Ángeles, Zacatecas, son potencialmente tóxicos para humanos y posiblemente para fauna doméstica y silvestre. Por lo tanto, el agua no es apta para el consumo humano ni para uso pecuario.

Con los bioensayos no fue posible corroborar la toxicidad de metales y metaloide presentes en los pasivos ambientales ya que el tamaño de la radícula e hipocótilo fue superior al testigo. Lo anterior demuestra una posible respuesta de hormesis a los elementos potencialmente tóxicos en las plántulas de lechuga.

6. CONSIDERACIONES O RECOMENDACIONES

Con base al modelo de evaluación integral de riesgo de SEMARNAT (2006b), los resultados del presente trabajo confirmaron el riesgo por toxicidad por metales (plomo, cadmio y mercurio) o metaloide (arsénico) provenientes de los pasivos ambientales, tanto a la población humana como a la vida silvestre, en Noria de Ángeles, Zacatecas. Respecto a los puntos de exposición se observó lo siguiente:

1. El pasivo colonial está expuesto a la intemperie, a alrededor de 20 m de distancia de la primera casa habitación, y a escasa distancia del resto del poblado. La gente y el ganado tienen acceso libre, y no hay barreras o medidas que impidan que el

material sea transportado por los elementos naturales (agua, viento), o por la gente. Esto se consideró alarmante dado los niveles de contaminantes expuestos a la intemperie y la cercanía con la gente. Respecto al cuerpo de agua presente, derivado este de un manantial *in situ*, se encontraron valores que determinaron definitivamente que esa agua no es apta para el consumo humano. Sin embargo, la evidencia de poblaciones sanas, al menos en apariencia, de peces, anfibios y vegetación acuática nativos, que en expectativa habitan ahí desde mucho antes de que se estableciera la minería, da una idea de que la contaminación en ese arroyo no es ni fue grave en algún momento.

2. El pasivo nuevo tiene la ventaja tanto de tener una cubierta de material externo al proveniente de la mina, como de encontrarse a una distancia mayor (1.04 km) del poblado. El acceso tampoco está restringido, por lo que cualquiera (fauna silvestre o doméstica o ser humano) puede acceder a este terreno. Esto se corroboró por la presencia de ganado vacuno, ovino y caprino, así como de alguna fauna silvestre como liebres y conejos. En ambos casos, elementos como el viento y la lluvia pueden transportar material de estos pasivos y dispersarlos a varios kilómetros a la redonda. Respecto a los cuerpos de agua presentes, estos son de origen artificial dados por desniveles en el terreno o barreras de contención para el mismo pasivo. No hay biota nativa significativa; sólo los omnipresentes insectos acuáticos, unos pocos ejemplares de moluscos gasterópodos y una ligera capa de algas microscópicas. Esta agua tampoco cumple con las condiciones para ser potable, pero presentó incluso menor contenido de mercurio, cadmio y de plomo que la del arroyo del pasivo colonial, sin embargo, mayor concentración de arsénico.

Cabe mencionar que los efectos tóxicos de este tipo de contaminantes dependen de la dosis (cantidad de contaminante que entra al cuerpo), la intensidad (tiempo de exposición al contaminante), y la forma en que se entra en contacto con esta sustancia. También se debe tener en cuenta que en el grado de toxicidad puede intervenir otras sustancias químicas, la edad, sexo, dieta, características familiares,

estilo de vida y estado de salud (ATSDR, 2005). Resultados más precisos sobre efectos de contaminación consisten en hacer análisis directos tanto a las personas, como al ganado y a la vegetación expuesta. Los resultados mostraron que existen riesgos a la salud, ante lo cual se considera importante, y se recomienda que se realice el trámite ante las autoridades pertinentes para la “Evaluación de la propuesta del Programa de Remediación” (SEMARANAT, 2010) para la localidad Noria de Ángeles y para los alrededores. Es difícil y costoso eliminar del suelo los metales pesados debido a que se encuentran fuertemente retenidos en los intercambios de cationes, pero los posibles efectos de un sitio contaminado por la exposición de los jales mineros deben ser una prioridad para reducir posibles riesgos a la salud (Díaz *et al.*, 2006).

Se ha iniciado desde hace algún tiempo un cambio de perspectiva o de paradigma con respecto a la finalidad de la remediación de sitios contaminados, dicho cambio es el hecho de pasar de un enfoque meramente de “remediación”, para evitar o eliminar riesgos y daños a la salud y el medio ambiente, al enfoque de la “reutilización de sitios contaminados remediados, y su inserción en una estrategia de renovación urbana o regional”. Hay alternativas tanto para la remediación como para la reutilización. Por ejemplo, para USEPA (2016) es prioritario el desarrollo de proyectos de energía renovable en tierras contaminadas, incluyendo el desarrollo de estas energías en los sitios de procesamiento de minería y minerales en jales y en pasivos. También hay alternativas como la aplicación de materiales orgánicos, tales como el estiércol, lodos de aguas residuales o composta, mejorando la capacidad de cambio de cationes y de retención hídrica, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes (Thompson, 1988). La materia orgánica añadida es también benéfica, pues no sólo mejora la estructura del suelo, sino que proporciona una reserva de nitrógeno para el futuro crecimiento de las plantas (Cepeda, 2012). Las soluciones son rara vez sencillas, pero pueden llevarse a cabo mediante un esfuerzo concertado. La humanidad puede utilizar el suelo de manera productiva, sin arruinarlo. Los esfuerzos que, actualmente, se realizan para aprender a usar la tierra con sabiduría son extraordinariamente alentadores (Thompson, 1988).

7. LITERATURA CITADA

- Arellano, G. 1970. Cubica y muestreo de los jales de Noria de Ángeles, Zacatecas, ubicados dentro del terreno urbano denominado "La Hacienda Grande", propiedad del Sr. E. W. Bergmann. Archivo técnico del Consejo de recursos naturales no renovables. Zacatecas. México.
- Arrieta, O., Espinosa, G., Loredo, R., Cruz, G., Costilla, R., Rocha, D. 2014. Evaluación de toxicidad de suelos contaminados del estado de Guanajuato, a través de bioensayos con *Eisenia* spp. Ciencia en la Frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ 12:31-37.
- ATSDR. 2005. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Acerca de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. https://www.atsdr.cdc.gov/es/es_about.html
- Basta, N.T., McGowen, S.L., Brown, G.O. 2001. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil. Journal of Environmental Quality 30:493-500.
- Caramillo, D., Barajas, M., Rodríguez, R. 2015. Evaluación de la fitotoxicidad de jales mineros de cuatro especies empleadas como bioindicadoras de metales pesados. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 31(2): 133-143.
- Carrillo, R. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. Pp. 34-60. In: María del C. González Chávez, Jesús Pérez Moreno, Rogelio Carrillo González (Eds.). El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Castillo, M.G. 2004. Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. <https://prd-idrc.azureedge.net/sites/default/files/openebooks/147-7/index.html>.
- Cepeda, J. 2012. Química de suelos. Ed. Trillas. México. D.F. Pp 155.
- CONABIO (2010). Gramíneas de Zacatecas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad., México. IPN- Smithsonian Institution,

- National Museum of Natural History- Botanical Research Institute of Texas. USA. pp.246
- CONABIO (2017). Especies. Herbario virtual. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/otros/cgi-bin/herbario.cgi>
- CONAPO (2010). Consejo Nacional de Población. Datos abiertos del índice de marginación. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_del_Indice_de_Marginacion.
- Conzatti, C. 1981. Flora Taxonómica Mexicana. Tomo I y II. Tercera edición. IPN-CNETI. México, D.F. 377p.
- CE. 1989. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. CE-CCA-001/89. Secretarías de Marina, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión Nacional del Agua, de Salud y de Pesca. Diario Oficial de la Federación, 13 de diciembre de 1989. México.
- Cuevas Díaz M.C., Rosaldo Santiago J.L, López Luna J. 2012. Evaluación de toxicidad de los suelos mediante bioensayos. Pp. 87-105. In: Cuevas Díaz, M.C., Espinosa Reyes, G., Ilizaliturri Hernández, C.A., Mendoza Cantú, A. (Eds.). Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Veracruzana y Fondos Mixtos CONACyT. México, D.F.
- Mejía, J., Yáñez L., Carrizales L., Díaz-Barriga F. 2002. Evaluación integral de sitios contaminados (Una propuesta metodológica). Laboratorio de Toxicología Ambiental. Facultad de Medicina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. <http://ambiental.uaslp.mx/docs/FDB-EvalRiesgo.pdf>.
- Díaz, L., Díaz A., Carrillo R., González M. 2005. Plantas que se desarrollan en áreas contaminadas con residuos mineros. Pp. 9-33. In: González Chávez M.C., Pérez Moreno J., Carrillo González R. (Eds.). El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

- Díaz, F., Jasso Y., Espinosa G., González D., Razo I., Torres A., Mejía J., Monroy M., Irina A., Yarto M. 2006. An integrated health risk assessment approach to the study of mining sites contaminated with arsenic and lead. *Integrated. Environmental Assessment and Management* 3(3): 344-350.
- EPA. 1997. Recent developments for in situ treatment of metal contaminated soils. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office. Washington, D.C. 64p.
- EPA. 2007. Treatment technologies for site cleanup: Annual status report. Twelfth Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response Report. Washington, D.C. 290p.
- Espinoza, L. 1974. Estudio metalúrgico por percolación sobre muestras de mineral procedentes del municipio Noria de Ángeles, Zacatecas y presentada a estos laboratorios por la compañía Explomín, S.A., Estado de México. 161 p.
- Foster, S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M. 2002. Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Washington, USA: Mundi-Prensa Libros. Pp.2-8.
- González, M., Pérez J., Carrillo R. 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Pp. 1-8. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Gratzfeld, J. 2004. Industrias extractivas en zonas áridas y semiáridas. Planificación y gestión ambientales. Unión Mundial para la Naturaleza. Gland, Suiza, y Cambridge, Reino Unido. VIII. 112 p.
- Ibáñez, J.J. 2017. Biodisponibilidad de los nutrientes por las plantas, pH del suelo y el complejo de cambio o absorbente. Los suelos y la vida. <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/09/65262>.
- Ilizaliturri, C., González D., Pelayo N., Domínguez G., Mejía J., Torres A., Pérez I., Batres L., Díaz F., Espinosa G. 2009. Revisión de las metodologías sobre evaluación de riesgos en salud para el estudio de comunidades vulnerables en América Latina. *Interciencia* 34(10):710-717.

- INEGI, 2005. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Noria de Ángeles, Zacatecas.
- INEGI, 2007a. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Cartas topográfica y geológica. Espíritu Santo F14A62, escala 1:50,000. México.
- INEGI, 2007b. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Cartas topográfica y geológica. Salinas de Hidalgo F14A61, escala 1:50,000. México.
- INEGI, 2007c. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. México.
- INEGI, 2017a. Climatología, datos vectoriales escala 1:1 000 000 - descarga <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>.
- INEGI, 2017b. Cartografía temática 1:50000 F14A62. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825643348>.
- LGEEPA. 2016. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1988. México.
- LGPGR. 2015. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación, 22 de mayo de 2015. México.
- Loureiro, S., Soares A.M.V., Nogueria A.J. 2005. Terrestrial avoidance behavior test as screening tool to assess soil contamination. *Environmental Pollution* 138:121-131.
- PDUCP. 2010. Programa de desarrollo urbano del centro de población de Noria de Ángeles 2010-2030. H. Ayuntamiento. Noria de Ángeles, Zacatecas.
- PMD. 2014. Plan Municipal de Desarrollo del Municipio de Noria de Ángeles, Zacatecas 2013-2016. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Zacatecas, 15 de marzo de 2014. Zacatecas, México.
- Porta, J., López M. y Poch R. 2008. Edafología: uso y protección del suelo. Editorial Mundi Prensa. España. Pp. 265-267.

- PROFEPA, 2015. Informe de actividades. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 158 p.
- Puga, S., Sosa M., Lebgue T., Quintana C., Campos A. 2006. Contaminación por metales pesados en el suelo provocado por la industria minera. *Ecología Aplicada* 5(1 y 2):149-155.
- Ramírez, R.P. y Mendoza, C.A. 2008. Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. 414 p.
- Rzedowski, J. 1957. Vegetación de las partes áridas de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 18(1-4):49-101.
- Rzedowski, J. 1965. Vegetación del estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina*, 5(1-2):5-291.
- Sánchez-Guzmán, P. 2005. Características de los suelos aledaños a los depósitos de residuos de minas. Pp. 126-136. In: M. C. González-Chávez, J. Pérez-Moreno y R. Carrillo-González (eds.). *El sistema planta-microorganismo-suelo de áreas contaminadas con residuos de minas*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- SE. 2006. Secretaría de Economía. Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Servicio Geológico Mexicano. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación, 21 de agosto de 2006. México.
- SE. 2010. Secretaría de Economía. Monografía Geológico-Minera del Estado de Zacatecas. Servicio Geológico Mexicano. Secretaría de Economía. Pachuca, Hidalgo, México.
- SEMARNAT, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 7 de diciembre de 2001. México, D.F.

- SEMARNAT, 2004a. Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, 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 de septiembre 2004. México, D.F.
- SEMARNAT, 2004b. Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1995-1996. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_2010/conjunto_basico/10.10.8.236_8080/ibi_apps/05_residuos_peligrosos/WFServletd2a3.html?IBIF_exIC53A&IBIC_user=dgeia_mia&IBIC_pass=dgeia_mia&INDIC=53&TEMA=5&RANDOM=11.33.49
- SEMARNAT, 2006a. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación, 7 de junio de 2006. México, D.F.
- SEMARNAT, 2006b. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgos ambientales de sitios contaminados. 1 Julio de 2006. Distrito Federal, México.
- SEMARNAT, 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de caracterización de sitios contaminados. Septiembre de 2010. Distrito Federal, México.
- SEMARNAT, 2012a. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Edición 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 361p. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf.
- SEMARNAT, 2012b. Dirección de Restauración de Sitios Contaminados (DRSC). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 3p. <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/informacion/Informacion.pdf>.

- SEMARNAT, 2012c. Integración y actualización del inventario nacional de generación de residuos peligrosos. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 115p.
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001401.pdf>
- SEMARNAT, 2014. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. El medio ambiente. Residuos peligrosos y Sitios contaminados. Actualizado al 2014.
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/07_residuos.html.
- SGM. 2015. Anuario estadístico de la minería mexicana, 2014. Publicación no. 44. Servicio Geológico Mexicano. Distrito Federal. México. 582 p.
- SGM. 2016. Panorama minero del Estado de Zacatecas. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca, Hgo., México. 62 p.
- SIAM, 2015. Sistema de Administración Minera. Estadísticas. Actualizado al 2015.
http://www.siam.economia.gob.mx/swb/es/siam/p_Estadistica
- SIAP, 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. Actualizado al 2015.
http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- Sobrero, M. C., Ronco, A. 2004. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. Pp: 71-80. In: Castillo Morales, G. (Ed.). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Solís, J.V. 1969. Los jales de Noria de Ángeles, Zacatecas, México. Archivo técnico del Consejo de Recursos Naturales no Renovables. Departamento de Exploraciones, Zona Norte de Zacatecas. Residencia Zacatecas. México. 29p.
- SSA, 2000. Secretaría de Salud y Asistencia. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su

- potabilización. Diario Oficial de la Federación, 16 de noviembre de 1999. México.
- SSA. 2003. Secretaría de Salud y Asistencia. Norma Oficial Mexicana NOM-230-1SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación, 01 de agosto 2003. México.
- Steel, R.G.D., Torrie J.H. 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 2nd edition. McGraw-Hill. New York. 620 p.
- Stoiser, L. 1973. Open pit feasibility study Real de Ángeles, Zacatecas, México.
- Thompson, L.M., Troeh F. R. 1988. Los suelos y su fertilidad. 4^a Ed. Editorial Reverte, S.A. Barcelona, España. 661p.
- UNIBIO. 2010. Instituto de Biología. Índice de Colecciones Biológicas en el Instituto de Biología de la UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://unibio.unam.mx/collections/specimens/urn>
- USDA. 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 5.0. United States Department of Agriculture (USDA). Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. 1003 p.
- USEPA. 1986. Test methods for evaluating solid waste: Vol. II - Field Manual, Physical/Chemical Methods. SW-846. 3^o Ed. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, D.C. 317 p.
- USEPA. 2002. Region 9 Preliminary Remediation Goals (PRG). United States Environmental Protection Agency, Region 9. The Pacific Southwest, <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables-june2017>.
- USEPA. 2016. United States. Environmental Protection Agency. Soil bioavailability at superfund sites. Washington, D.C. <https://www.epa.gov/superfund/soil-bioavailability-superfund-sites>.

Volke. S.T., Velasco T.J.A., de la Rosa P.D.A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. 141 p.

8. ANEXO

Términos y definiciones

Bioensayo: ensayo en el cual el poder o potencia de una sustancia es medido a través de la respuesta de organismos vivos o sistemas vivientes (Castillo, 2004).

Biodisponibilidad: La biodisponibilidad es la cantidad de un contaminante absorbido en el cuerpo después de contacto con la piel, ingestión o inhalación (USEPA, 2016).

Biodisponibilidad relativa: es la cantidad de un contaminante absorbida del suelo en comparación con la cantidad de contaminante que se absorbe de los alimentos o el agua (USEPA, 2016).

Residuos peligrosos (RP): Aquellos que poseen alguna de las características CRETIB (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-infecciosos, B) que les confieren peligrosidad, así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados, según lo establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2015).

Caracterización de Sitios Contaminados: Es la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación, según lo establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2015).

Riesgo: Probabilidad o posibilidad de que el manejo, la liberación al ambiente y la exposición a un material o residuo, ocasionen efectos adversos en la salud humana, en los demás organismos vivos, en el agua, aire, suelo, en los ecosistemas, o en los bienes y propiedades pertenecientes a los particulares (LGPGIR, 2015).

Jales: residuos de la industria minera-metalúrgica provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales (LGPGIR, 2015).

Sitios contaminados: aquellos lugares donde ha habido depósito, enterramiento o vertido de sustancias químicas o residuos, vinculados a actividades industriales, comerciales, agrícolas o domésticas (SEMARNAT, 2012a).