



Estudios ambientales como instrumentos para garantizar la seguridad de los depósitos de residuos mineros

Environmental studies as tools to ensure the safety of tailings impoundments

José SANTOS¹

¹ Profesor de carrera. Facultad de Ingeniería. UNAM. jesantos@dictfi.unam.mx

RESUMEN: La legislación ambiental mexicana establece lineamientos particulares para el manejo y disposición de residuos producidos por la industria minero-metalúrgica. Las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental señalan los requisitos que se deben de cumplir para el diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de residuos mineros; sin embargo, hay deficiencias en la legislación que limitan la efectividad de los instrumentos normativos. Una forma de solventar las carencias que se tienen en el marco legal, es promover la aplicación adecuada de estudios ambientales antes de la construcción de un depósito de residuos en vez de limitarse a la realización de trabajos descriptivos de las características ambientales del sitio. La información que se genera a partir de un estudio ambiental debe ser utilizada en el diseño de los depósitos de residuos de tal forma que se apliquen criterios de ingeniería que garanticen su seguridad para bienestar de la sociedad y del propio ambiente. En el presente trabajo se analiza el marco regulatorio ambiental para el manejo y disposición de jales mineros y se describe el adecuado uso de la información que se genera con los estudios ambientales a fin de cubrir los vacíos que tiene la normatividad ambiental actual.

ABSTRACT: Mexican environmental laws establishes specific guidelines for handling and disposal of waste produced by mining and metallurgical industry. Mexican Official Standards on environmental issues, establish the requirements that must be met for the design, construction, operation and closure of tailings impoundments; however, there are deficiencies in the law that limit the effectiveness of policy instruments. One way to solve the deficiencies that have in the legal framework is to promote the proper implementation of environmental studies prior to construction of a waste rather than simply carrying out work descriptive of the environmental characteristics of the site. Information generated from an environmental study should be used in the design of waste repositories so that they apply engineering criteria to ensure their safety for the welfare of society and the environment itself. This paper analyzes the environmental regulatory framework for the management and disposal of mine tailings and describes the proper use of the information generated with the environmental studies to cover the gaps that have current environmental regulations.

1 INTRODUCCIÓN

Durante los cuatrocientos cincuenta años de actividad minera en México se han generado residuos a partir de las operaciones de extracción y procesamiento de los minerales, mismos que por conveniencia operativa se han depositado en sitios cercanos a las minas. Al tratarse de un residuo poco interés tenía el preocuparse por si estos materiales podrían ocasionar algún tipo de daño al ambiente o a las personas, así que simplemente se almacenaban a la intemperie y en el mejor de los casos procurando que no se dispersaran por el agua. Con el tiempo fue posible conocer que bajo ciertas condiciones, los residuos mineros si pueden causar daños a los elementos ambientales e incluso a las poblaciones cercanas a los centros mineros.

Nuestra legislación ambiental es joven, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) entró en vigor en el año 1988 (Semarnat, 2011) y a partir de este año se comenzaron a desarrollar instrumentos para regular desde el punto de vista ambiental las actividades industriales en México. Aproximadamente en 1994 se comenzó a trabajar en una normatividad para regular los depósitos de jales y fue hasta el año 2004 que se publicó en el Diario Oficial de la Federación la NOM-141-SEMARNAT-2003 (Semarnat, 2004). Sin embargo, desde que se comenzó a elaborar dicha norma y hasta su entrada en vigor, no se tenía en México el conocimiento que ahora se tiene sobre el comportamiento de los jales cuando quedan expuestos al intemperismo natural, ni sobre el daño que este material puede causar en el ambiente.

El objetivo de la NOM-141 es claro, que con su aplicación se garantice la seguridad de los depósitos de jales durante su construcción y hasta la etapa posterior al cierre; y sin embargo, actualmente es pertinente la pregunta ¿es suficiente la norma para cumplir con ese objetivo?. Desde su entrada en vigor en el 2004 prácticamente la norma no ha sufrido cambios, pero la gestión ambiental en el manejo de jales si ha evolucionado considerablemente en los últimos años.

En la norma es posible identificar con facilidad que en el inciso correspondiente a las especificaciones, particularmente el inciso 5.3, se hace referencia a la información que se debe recopilar sobre las condiciones ambientales del sitio donde se pretende construir el depósito para jales. Siendo rigurosos, en la norma se indica el tipo de información que se debe generar e incluso estudios que se deben presentar (se asume que son estudios que deben de estar disponibles para la autoridades ambientales), pero no se indica con claridad cómo debe de utilizarse la información y los resultados de los estudios para lograr un mejor diseño del depósito de jales. Hacer una recopilación de información de carácter ambiental para cumplir con las especificaciones señaladas en la NOM-141 no tiene sentido si no se aplica adecuadamente en el diseño de los depósitos.

Afortunadamente en la actualidad existen diversas metodologías para realizar estudios ambientales que permiten tener el conocimiento preciso de las condiciones naturales del sitio y aplicar esta información en el diseño de los depósitos para jales. Pero también, los estudios ambientales servirán como referencia para hacer un seguimiento a lo largo de la vida de los depósitos, durante la operación y en la etapa de posterior al cierre.

De lo anterior, el propósito del presente trabajo es analizar el marco regulatorio ambiental para el manejo y disposición de jales mineros, y describir el adecuado uso de la información que se genera con los estudios ambientales a fin de cubrir los vacíos que tiene la normatividad ambiental actual.

2 LOS JALES Y SU RIESGO PARA EL AMBIENTE

Actualmente se conoce que los residuos mineros, sean jales o mineral agotado de los procesos de lixiviación en pilas (terrosos), pueden representar un riesgo para el ambiente por su contenido de elementos potencialmente tóxicos (metales pesados y metaloides asociados al azufre) y/o por su capacidad parar generar acidez.

En la diversa literatura que existe sobre el tema, está bien documentado el proceso de oxidación de los minerales sulfurados (principalmente los sulfuros de hierro como pirita, marcasita y pirrotita) que se produce cuando los residuos quedan expuestos a las condiciones naturales de intemperismo,

principalmente a la presencia de agua y oxígeno. (Sengupta 1993; Lottermoser 2007; US-EPA 1994).

Esta oxidación natural de los minerales con azufre produce lo que se conoce como drenaje ácido (DA), el cual representa un problema para el ambiente ya que la solución que se genera tiene un pH ácido (2 a 3) que permite la solubilización de los metales y metaloides presentes en el residuo (As, Pb, Cd, Cu, Zn, Sb, etc.). Una vez que los metales se encuentran en solución, el DA puede incorporarse a cuerpos de agua superficiales o subterráneos, dispersándose así los contaminantes.

En México se ha estudiado la afectación al ambiente producida por la dispersión de jales en regiones mineras como Zimapán Hidalgo (Ongley *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2006), Taxco Guerrero (Armienta *et al.*, 2003; Romero *et al.*, 2007), Santa María de la Paz en San Luís Potosí (Castro *et al.*, 1997; Razo *et al.*, 2004), y en Guanajuato Guanajuato (García *et al.*, 2004; Mendoza *et al.*, 2006), por citar algunos ejemplos. Los estudios realizados generalmente se han dirigido a investigar los procesos físicos y químicos que ocurren en los depósitos de jales fuera de operación y a definir los mecanismos de dispersión y liberación de los metales y metaloides y a determinar la magnitud y extensión de la afectación producida.

Si bien los estudios mencionados se han hecho en depósitos de jales abandonados desde hace muchos años, a nivel mundial se han registrado derrames de jales en depósitos en operación los cuales se ocasionaron por una conjunción de fenómenos naturales extraordinarios y fallas en el diseño de los propios depósitos (Tailings Info 2012; y Wise Uranium 2012). Algunos de los casos recientes que destacan por la magnitud de la afectación ambiental ocasionada son: Merriespruit, Sudáfrica (1994), Omai, Guyana (1995), Marcopper, Filipinas (1996), Los Frailes, España (1998), Baia Mare, Rumania (2000), Cerro Negro, Chile (2003), Pinchi Lake, Canadá (2004), Bangs Lake, EUA (2005), Nchanga, Zambia (2006), Huayuan, China (2009) y Kolontar, Hungría (2010).

La Comisión Federal de Mejora Regulatoria, en el anteproyecto de la NOM-157 (planes de manejo para residuos mineros, actualmente en vigencia), reporta en uno de sus anexos algunos de los accidentes ocurridos en depósitos de jales en México (Cofemer, 2012). Estos eventos han ocurrido en: La Negra, Querétaro (1987, 1996 y 1997), Las Torres, Guanajuato (1988 y 1993), Cuale, Jalisco (1990), El Monte, Hidalgo (1992), Peña Colorada, Colima (1995 y 1998), Cerro de Mercado, Durango (1995), Santa Fe, Guanajuato (1996), Bacis, Durango (1996), Villa de La Paz, SLP (1997), Santiago Papasquiaro, Durango (1999), Rutilo Mexicano, Oaxaca (1999), Bolañitos, Guanajuato (2000), Rey de Plata, Guerrero (2001) y Molango, Hidalgo (2003).

Con el fin de poder dimensionar la importancia que tiene el adecuado diseño de los depósitos para jales y su correcta operación y cierre, sería interesante conocer en los casos que se mencionan de México, las implicaciones ambientales en cada caso, así como los recursos económicos que las empresas han tenido que invertir para la limpieza y remediación de los sitios afectados.

3 LA NOM-141 COMO INSTRUMENTO DE REGULACIÓN AMBIENTAL

La regulación ambiental en materia de residuos mineros se desprende del artículo 108 de la LGEEPA (Semarnat, 2011), que señala "para prevenir y controlar los efectos generados por la exploración y explotación de los recursos no renovables, la Secretaría expedirá normas oficiales que permitan: ...

III. La adecuada ubicación y formas de los depósitos de desmontes, relaves y escorias de las minas y establecimientos de beneficios de los minerales".

En este mismo sentido, el artículo 17 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) (Semarnat, 2003), señala que los jales y otros residuos mineros son de regulación y competencia federal, que podrán disponerse finalmente en el sitio de su generación, y que su peligrosidad y manejo integral se determinará conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables.

Entonces, estos dos artículos sirven de sustento a la 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.

Ahora bien, en materia de evaluación del impacto ambiental es muy importante considerar lo indicado en el artículo 28 fracción III de la LGEEPA, que se requiere de autorización en materia de impacto ambiental para realizar actividades de exploración, explotación y beneficio de minerales. Para obtenerla, el artículo 30 señala que es necesario presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, que es el instrumento de gestión que la Secretaría ha desarrollado para evaluar los daños que una actividad puede ocasionar en los diversos elementos del ambiente.

Sin embargo, y esto es muy importante, el artículo 30, fracción I, indica que en los casos de obras y actividades para los que exista una norma oficial mexicana, como es el caso de la construcción de depósitos para jales, se debe presentar un informe preventivo y no una manifestación de impacto ambiental. Siendo el informe preventivo un instrumento de alcance más limitado que la

manifestación de impacto ambiental, se puede considerar que una verdadera evaluación de impacto ambiental para un depósito de jales, queda en gran medida supeditada a los buenos criterios que se apliquen de acuerdo con lo señalado en la NOM-141.

En la NOM-141 el inciso 5 hace referencia a las especificaciones que se deben de cumplir en todo el proceso de desarrollo del depósito de jales, desde la caracterización del residuo hasta el cierre y la postoperación. Particularmente los incisos 5.2 caracterización del jal y el 5.3 caracterización del sitio, son de mucha importancia para el diseño del depósito.

La determinación de la peligrosidad del jal está bien definida; un jal es peligroso por: a) la movilidad de sus constituyentes tóxicos (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se, según Tabla 2 de la NOM-052-SEMARNAT-2005 (Semarnat, 2006) y, b) por su potencial para generar acidez. Las pruebas para determinar estas características están claramente descritas en los anexos 1 y 5 de la norma; la prueba de extracción de constituyentes tóxicos con agua en equilibrio con CO₂ y la prueba modificada de balance ácido-base.

La complejidad para definir la peligrosidad de los jales radica en obtener muestras que sean verdaderamente representativas para la aplicación de las pruebas. Aunque en el anexo 1 se describe el origen que pueden tener las muestras, de pruebas piloto o de la operación diaria de la planta de beneficio, no precisa los criterios para que éstas sean representativas.

Para el primer caso, se menciona que se debe hacer una muestra compuesta con los jales de todas las pruebas piloto que se realicen para cada una de las menas identificadas. Sabiendo que en un proyecto, para definir los parámetros específicos del proceso de beneficio se realizan una infinidad de pruebas, es difícil establecer un criterio para seleccionar aquéllas que resulten más apropiadas para conformar la muestra de jales. Además, en el anexo 1 se hace referencia a la Figura 1 en la cual se puede determinar el número de muestras de acuerdo con la masa de unidad geológica (toneladas); y aquí la pregunta es ¿qué se debe entender por masa de unidad geológica?. En este caso una recomendación puede ser que el número de muestras se determine con base en el tonelaje de reservas positivas que se tienen de mineral. Si se cuenta con testigos de núcleos de barrenación debidamente ubicados, se cuenta con un modelo del yacimiento obtenido a partir de dichos barrenos y se tiene clasificado el yacimiento con base en diferentes características del mineral por zona; entonces es posible obtener una muestra representativa a partir de los testigos de los núcleos de barrenación.

En el segundo caso, muestras obtenidas de la operación diaria de la planta de beneficio, la norma

señala que debe hacerse un muestreo continuo de la descarga de los jales y determinar un número de muestra, nuevamente con base en la Figura 1. Esta descripción tampoco es clara y tiene como limitante que las muestras así obtenidas serán representativas de las zonas de mineral que en ese momento se estén explotando. Aquí la recomendación podría ser que dentro de la mina se identifiquen las zonas que proveerán de mineral a la planta de beneficio en los próximos cinco o diez años, para que de esas zonas se obtengan muestras representativas que sean utilizadas en pruebas metalúrgicas y que de ellas se obtengan las muestras de jales.

En conclusión, lo importante para determinar la peligrosidad de los jales es que las muestras que se utilicen sean representativas del mineral que se va a beneficiar en el futuro. Para ello se deben de tener en el yacimiento, bien definidas las zonas que muestran características de mineralización diferentes.

El inciso 5.3 caracterización del sitio, señala que una vez definida la peligrosidad del jal, "el generador debe llevar a cabo estudios que le permitan identificar los elementos del ambiente y biota que sean susceptibles de daño por el depósito de jales. El generador previo a la selección del sitio debe realizar los siguientes estudios e indicar la(s) fuente(s) de referencia". Literalmente en este parte se pide hacer estudios para identificar los elementos ambientales, pero no es precisa la norma en señalar que mucha de la información que se genera en esos estudios ambientales debe ser utilizada en el diseño del depósito de jales. En los aspectos climáticos se indica que es necesario investigar y documentar información sobre la zona hidrológica, la precipitación media, tormenta máxima en 24 horas, tormentas de diseño con periodo de retorno de los 5 a los 100 años, así como velocidad, dirección y frecuencia de los vientos. Sin embargo, debería precisarse que esta información debe servir como sustento en la memoria de cálculo para el diseño del depósito. Es importantísimo considerar la carga hidráulica proveniente de la precipitación pluvial en los cálculos de la estabilidad del depósito; por ello los datos de precipitación media, tormenta máxima y los periodos de retornos deben ser incluidos en el diseño.

En cuanto a los aspectos geotécnicos, la norma pide describir la estructura geológica general y a detalle, así como otras características de la roca. También señala que se deben determinar las propiedades mecánicas de los depósitos de suelos. Sin embargo, la norma no especifica que se deben realizar sondeos a profundidad en el sitio para contar con información precisa tanto de la masa rocosa como del suelo sobre el que descansarán los jales, ni tampoco hace referencia a la obtención de muestras para que en el laboratorio se determinen las características físicas y mecánicas tanto de la roca como del suelo.

Respecto a los estudios hidrológicos se señala que para aguas superficiales debe delimitarse la subcuenca hidrológica donde su ubique el depósito, determinar el volumen medio de escurrimiento, determinar áreas de inundación en un plano, y determinar la calidad de cuerpos superficiales aguas abajo y aguas arriba del depósito. La norma pide que deben presentarse estos estudios, pero no especifica que la información que se genera se utilice para captar los escurrimientos aguas arriba del depósito. En el caso de las aguas subterráneas, cuando exista un acuífero en el sitio se debe evaluar la vulnerabilidad de acuerdo con la metodología del anexo 2, verificar la existencia de aprovechamientos de agua en un perímetro de 500 m (alrededor del depósito), y hacer la caracterización de la calidad del agua subterránea tomando muestras en los aprovechamientos cercanos al depósito.

En el inciso 5.3.5 biodiversidad y ecosistemas frágiles o únicos, se hace referencia a identificar las especies que pudieran estar listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2001, que se refiere a las especies de flora y fauna protegidas o en riesgo. En este inciso también se señala que el sitio seleccionado para el depósito debe no representar riesgo para las especies citadas en cualquiera de las categorías de riesgo que menciona la norma y además que produzca el mínimo impacto ambiental sobre los recursos naturales. De este último requisito se deriva la importancia de hacer una evaluación de impacto ambiental integral en el sitio seleccionado para el depósito.

Finalmente el inciso 5.3.6 potencial del daño, se refiere a la necesidad de identificar centros de población, cuerpos de agua superficiales, ecosistemas frágiles, especies en riesgo o áreas de suelos agropecuarios, que puedan ser afectados en caso de derrame o fuga por falla parcial o total del depósito. En el inciso se indica que en caso de que se identifiquen algunas de las condiciones mencionadas, se debe proceder como lo indica el anexo 3. Este anexo contiene una tabla con los criterios a considerar en la selección del método de almacenamiento para los jales, construcción, operación y monitoreo del depósito. Sin embargo, no se menciona en este inciso la conveniencia de hacer una evaluación del riesgo en caso que ocurra una falla en el depósito. Para esto cabe mencionar que la LGEEA cuenta con un instrumento de gestión denominado Estudio de Riesgo que podría ser aplicado para hacer una evaluación del daño que se podría causar bajo condiciones no controladas.

Lo anteriormente expuesto en este apartado, tiene la finalidad de comprender que en la norma están citados los estudios ambientales que se deben realizar pero no se especifica con precisión cómo debe utilizarse la información de estos estudios para lograr un mejor diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de jales. En el siguiente apartado se tratará de aclarar de una manera

sencilla la forma como deben de aplicarse la información que se genera en los estudios.

4 ESTUDIOS AMBIENTALES Y SU APLICACIÓN

Lo más importante que se debe de entender de los estudios ambientales, es que su objetivo es que la información generada a partir de ellos se utilice en la selección del sitio, en el diseño mismo del depósito, en el diseño de obras que garanticen su estabilidad, en el monitoreo ambiental durante la operación, en el diseño de las medidas para el cierre del depósito y, de gran relevancia en la actualidad, en el impacto social que los depósitos de jales puede ocasionar en las poblaciones cercanas. No se trata de hacer estudios ambientales solo por cubrir los requisitos señalados en la legislación y en la normatividad ambiental.

De lo anterior se puede señalar que es muy importante que la NOM-141, y las demás norma que tienen que ver con residuos, especifiquen con claridad dos puntos: a) que la información de los estudios ambientales debe ser utilizada desde la selección del sitio y hasta el monitoreo en la postoperación, y b) los estudios ambientales deben mantenerse disponible, a través de un responsable, tanto para las autoridades ambientales como para la sociedad en general.

El primer estudio que se realiza antes de la construcción de un depósito de jales es el de caracterización del sistema ambiental, cuyo objetivo es precisamente definir las características particulares de los diferentes elementos físicos y biológicos; agua superficial, agua subterránea, suelo, aire, vegetación, fauna, e incluso condiciones sociales.

Para este tipo de estudios existe una metodología que se llama Estudios de Línea Base (ELB) la cual permite definir, mediante muestreos y la determinación de diversos parámetros, las condiciones naturales de los elementos ambientales antes de que sean afectados por la presencia de los jales. Este estudio debe realizarse antes de la instalación del depósito y los datos que se obtienen sirven de referencia para determinar durante y después de la operación, posible afectaciones al ambiente ocasionadas por la dispersión del residuo.

Otro estudio importante es la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) que tiene como objetivo identificar los posibles impactos que pueden ocurrir bajo condiciones no controladas durante la operación del depósito. La ventaja de este tipo de metodologías es que permiten identificar con anticipación posibles escenarios de riesgo para los elementos del ambiente, de tal forma que se pueden establecer de manera previa, medidas específicas para evitar, o en su defecto minimizar, dichos riesgos. La aplicación de un estudio EIA requiere que se cuente con el proyecto detallado del depósito

de residuos, ya que en todas las actividades que se van a realizar para su construcción, operación y cierre, se evalúan las afectaciones ambientales que se pueden ocasionar y para cada una de ellas se establecen medidas de prevención y control.

La importancia de los estudios hidrológicos (aguas superficiales) radica en que estos permiten identificar los patrones de escurrimiento del agua en el sitio donde se instalará el depósito de residuos. Considerando los datos meteorológicos de precipitación pluvial, la extensión de la cuenca o subcuenca hidrológico correspondiente al sitio, y la topografía del lugar, así como otra información como el gradiente de escurrimiento, permeabilidad de suelo, y otros, se estima el volumen de agua que puede llegar al depósito de residuos; así como la cantidad de agua que se captará en un evento extraordinario dentro del mismo depósito. Con esta información se deben de diseñar las obras hidráulicas para el desvío del agua en el perímetro del depósito, a fin de evitar que el exceso de agua pueda causar inestabilidad en el depósito. Además, las obras hidráulicas de desvío permiten conducir el agua captada hacia la misma dirección que marcan los patrones naturales de drenaje del tal forma que no se altere la recarga de los cuerpos de agua superficial. Por otro lado, la carga hidráulica debida a la precipitación pluvial dentro del área que abarca el depósito debe ser considerada, junto con el agua que viene mezclada con los jales, en el diseño del sistema de drenaje para que éste tenga la capacidad suficiente para evacuar sin problemas el agua acumulada en un evento extraordinario de precipitación.

Los estudios del suelo, que en la norma se señalan como aspectos edafológicos, no se deben concretar únicamente las características físicas y químicas para determinar el tipo de suelo, entendiendo por suelo la capa más superficial del terreno. Es muy importante considerar que en la geotécnica deben realizarse sondeos que permitan identificar los diferentes estratos de suelo y subsuelo existentes en el sitio, y que además sea posible la recuperación de muestras, en el mejor de los casos inalteradas, para determinar las propiedades físicas y mecánicas de cada estrato y que estos datos sirvan para modelar la estabilidad del terreno en las diferentes etapas de la construcción del depósito.

Los estudios geohidrológicos no deben de ser una mera recopilación de información sobre la existencia de acuíferos, número de aprovechamientos y calidad del agua en la zona. En la norma se indica la necesidad de evaluar la vulnerabilidad del acuífero y para ello propone la metodología conocida como GOD, la cual considera solamente tres parámetros: confinamiento hidráulico, granulometría y litología, y profundidad del acuífero; sin embargo, en la norma también se incluyen las tablas de donde pueden obtenerse estos parámetros. Los resultados de la aplicación de esta metodología pueden ser

erróneos, ya que la determinación de los parámetros a partir de tablas puede llevar un sesgo si no se aplican los criterios adecuados. Además, este método no toma en cuenta otros parámetros importantes como la recarga, las características del suelo, la topografía, la conductividad hidráulica, y el espesor de los estratos, los cuales sí son considerados en otras metodologías más completas como DRASTIC, AVI o SINTACS. Lo más conveniente para hacer un adecuado estudio de vulnerabilidad es la obtención de los parámetros citados directamente en campo. Cabe recordar que la determinación de la vulnerabilidad es necesaria para establecer las medidas de protección del acuífero ante posibles infiltraciones de contaminantes a partir de los jales.

Finalmente, los estudios de biodiversidad de los ecosistemas deben estar incluidos en los ELB. En estos estudios debe realizarse un censo de las especies que existen en la zona y que pueden ser afectadas por la disposición de los residuos. El censo debe incluir la identificación taxonómica de las especies predominantes y una cuantificación de la densidad de las especies por unidad de superficie. Identificadas las especies se debe consultar la NOM-059-SEMARNAT-2001 para verificar que no existan especies protegidas o en riesgo. El estudio de biodiversidad debe servir también para establecer un programa de reforestación en el que se incluya la reproducción de especies nativas, para que sean utilizadas en la rehabilitación de áreas afectadas por los residuos o para la reforestación del depósito una vez que concluya su vida útil.

5 CONCLUSIONES

De lo descrito anteriormente se puede concluir que actualmente se tienen plenamente identificados los riesgos que los jales mineros representan para el ambiente, y en gran medida esto se debe a que en los últimos años se han realizado diversos estudios para conocer con precisión los procesos geoquímicos que ocurren en los residuos y que permiten la generación de drenaje ácido y la liberación de elementos potencialmente tóxicos. También se han estudiado diversos casos de fallas ocurridas durante la operación de depósitos de jales, las cuales ocasionaron severos impactos ambientales. Estos casos han permitido un mayor aprendizaje por parte de los profesionales de las diversas disciplinas relacionadas con el manejo de jales. Con la experiencia que se ha adquirido en México sobre el almacenamiento de jales mineros, se comprende que la NOM-141 puede ser mejorada significativamente, y en gran medida esta mejora se debe basar en ofrecer una mayor claridad del objetivo y la utilidad que tienen los estudios ambientales para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y cierre del depósito.

6 REFERENCIAS

- Armienta, M.A., Talavera O., Morton O. y Barrera, M. (2003). "Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco". Mexico. *Bull. Environmental Contamination and Toxicology*. Vol. 71: 387-393.
- Castro, J., Kramer U. y Puchelt, H. (1997). "200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Mexico – Consecuentes for environment and geochemical exploration". *Jornal of Geochemical Exploration* Vol. 58: 81-91.
- Cofemer. (2012). "Comisión Federal de Mejora Regulatoria". Consultado en julio de 2012. <http://www.cofemermir.gob.mx/mir/crLecAnte.asp?seccionid=F102&formId=102&submitid=16418>
- García, J.V., Ramos, E., Carrillo, A., y Durán, C. (2004). "Mineralogical and chemical characterization of historical mine tailings from the Valenciana mine, Guanajuato, Mexico: Environmental implications". *Environmental Contamination and Toxicology* Vol. 72:170-177.
- Lottermoser, B. (2007). "Mine Wastes. Characterization, treatment and environmental impacts". Second Edition. Springer. U.S.A.: 304 p.
- Mendoza, E., Armienta, M.A., Ayora, C., Soler, A., y Ramos, E. (2006). "Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 23 (1) :75-83.
- Ongley, K., Sherman, L., Armienta, A., Concilio, A., y Ferguson, C. (2007). "Arsenic in the soils of Zimapán, México". *Environmental Pollution* Vol. 145: 793-799.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., y Monroy, M. (2004). "Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico". *Water, air and soil pollution* Vol. 152: 129-152.
- Romero, F.M., Armienta, M. A., Villaseñor, G., y González, J.L. (2006). "Mineralogical constraints on mobility of arsenic in tailings from Zimapán, Hidalgo". México. *J. Environment and Pollution*, Vol. 26 (1/2/3): 23 – 40.
- Romero F.M., Armienta M.A., González, G. (2007). "The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico". Mexico: *Applied Geochemistry*, Vol. 22: 109-127.
- Semarnat. (2003). "Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos". Diario Oficial de la Federación. 8 de octubre de 2003.
- Semarnat. (2004). "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 del 13 de septiembre de 2004.

-
- Semarnat. (2006). "NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listado de los residuos peligrosos". Diario Oficial de la Federación. 23 de junio de 2006.
- Semarnat. (2011). "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente". Diario Oficial de la Federación. 28 de enero de 2011.
- Sengupta, M. (1993). "Environmental impacts of mining. Monitoring, restoration and control". Lewis Publishers. USA. :494 p.
- Tailings.info. (2012). "Tailings related handling and storage technologies". Consulta Septiembre de 2011. <http://www.tailings.info/index.htm>
- US-EPA. (1994). "Acid mine drainage prediction. Office of Solid Waste". U.S. Environmental Protection Agency. EPA 530-R-94-036
- Wise Uranium Project. (2012). "Tailings Dam Safety". Consulta Julio 2012. <http://www.wise-uranium.org/indexm.html>