



## COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN ESTÁTICOS DE ELEMENTOS TÓXICOS EN RESIDUOS MINEROS

### COMPARISON OF STATIC LEACHING ESSAYS OF TOXIC ELEMENTS IN TAILINGS

M.E. García-Arreola<sup>1\*</sup>, S.H. Soriano-Pérez<sup>1</sup>, L.M. Flores-Vélez<sup>1</sup>, I. Cano-Rodríguez<sup>2</sup>, P.A. Alonso-Dávila<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Manuel Nava No. 6, Zona Universitaria Poniente, 78210 San Luis Potosí, S.L.P.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N 36050, Guanajuato, Gto.

Recibido 27 de Mayo 2014; Aceptado 23 de Octubre de 2014

#### Resumen

La minería es una de las principales actividades económicas en México, sin embargo, la explotación de minerales es sumamente grande y esto conlleva a una gran generación de residuos acumulados en el territorio nacional sin ningún control. En este estudio se utilizaron jales históricos de los poblados de Monte de San Nicolás y Peregrina ubicados en el distrito minero de Guanajuato, con los cuales se realizaron ensayos de lixiviación estáticos con tres metodologías: El procedimiento de extracción de constituyentes tóxicos (PECT) descrito por la NOM-053-SEMARNAT-1993 que utiliza ácido acético como extractante, el método de la NOM-141-SEMARNAT-2003 el cual utiliza agua acidificada con CO<sub>2</sub> y el método SPLP (Synthetic precipitation leaching procedure) 1312 que utiliza un extractante que simula lluvia ácida. Los elementos estudiados fueron: As, Pb, Mn, Zn, Cd y Cr, de acuerdo al análisis de varianza existen diferencias significativas entre los métodos estudiados. La liberación de Pb y Zn en los residuos está en función del pH del extractante, la de As, Zn, Cd y Cr dependen del grado de adsorción a los óxidos de manganeso y aluminio. Para todos los elementos estudiados la liberación fue mayor con el extracto PECT, influenciada por la acidez y el ligando orgánico.

*Palabras clave:* lixiviación, residuos mineros, metales, jales, ensayos de lixiviación estáticos.

#### Abstract

Mining is still one of the main economic activities in Mexico. However, mineral exploitation is extensive, leading to a considerable generation of waste that has accumulated without any control. The present study used historical tailings from Guanajuato mining district, in the towns of Monte San Nicolas and Peregrina. Batch leaching tests were performed with three different methodologies: PECT method (extraction procedure toxic constituents) described in the NOM-053-SEMARNAT-1993, the NOM-141-SEMARNAT-2003 (CO<sub>2</sub> acidified water) and the SPLP (Synthetic Precipitation leaching Procedure) 1312 (EPA, 1989). The elements studied were: As, Pb, Mn, Zn, Cd and Cr. According to variance analysis, there were significant differences between the types of extractant. The results show that the release of Pb and Zn in the waste is a function of the pH of the extractant. The release for As, Zn, Cd and Cr depend on the degree of adsorption to manganese and aluminum oxides. For all elements studied the release was greater with the TCLP extract, influenced by the acidity and the organic ligand.

*Keywords:* leaching, waste mining, metals, tailing, static leaching test.

\*Autora para la correspondencia. E-mail: : maria.garcia@uaslp.mx  
Tel. (52)444 8262330

## 1 Introducción

La riqueza de los yacimientos de minerales de México ha originado que la industria minera sea una de las mayores actividades económicas en el país, la cual ha contribuido en gran medida con el desarrollo económico (CAMIMEX, 2010). Entre los principales estados productores de minerales metálicos en México se encuentra Guanajuato, con el 4.1% de oro a nivel nacional (INEGI, 2012), sin embargo, también tienen en su territorio gran cantidad de pasivos mineros expuestos al ambiente sin ningún control.

La lixiviación es el proceso por el cual los elementos en un material sólido como los residuos mineros, son liberados al ambiente a través del contacto con el agua. Conociendo la velocidad y proporción a la cual los constituyentes de interés pueden ser liberados, se podrán definir los impactos en el medioambiente potenciales como la contaminación de aguas superficiales, los riesgos ecológicos y la salud humana (van der Sloot, y col., 2003).

Una de las principales preocupaciones en relación a las pruebas de lixiviación, es la relación muy limitada entre las condiciones de prueba que establecen las normas y la liberación real de elementos potencialmente tóxicos en condiciones de campo (van der Sloot, y col., 1997), esto debido a que los mecanismos de liberación de los elementos en residuos de procesos minerales, son afectados por intemperismo, oxidación de los minerales, disolución en condiciones reductoras y/o desorción en la superficie (Souhail y col., 2008). Comúnmente la capa superficial de los residuos se encuentra oxidada por la presencia de oxígeno y agua, lo cual puede producir la liberación de elementos tóxicos (Catalan y col., 2003).

En la actualidad se utilizan varios métodos de lixiviación como experimentos en columna, experimentos en lote o estáticos, pruebas de tanque para residuos sólidos, etc., (Kosson y col., 2002; Townsend y col., 2002). Los métodos de lixiviación más utilizadas son los de lixiviación estáticos, cuyo objetivo es lograr las condiciones de equilibrio al final del experimento (van der Sloot y col., 1997; van der slot 1998; van der Sloot, 1999). Sin embargo, el equilibrio se alcanza dependiendo de las condiciones de lixiviación, por lo tanto los resultados de estos experimentos son difíciles de comparar (Kalbe y col., 2008) debido a diversas variables implícitas en el experimentos como la relación líquido/sólido, la composición, el pH del extractante, el tiempo de contacto del material con el extractante, etc. Por lo tanto unas de las principales razones por las que son

utilizados los métodos de lixiviación estático, se debe a que resultan ser sencillos y económicos.

La Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 (DOF, 2006), establece que para determinar si un residuo es peligroso por su toxicidad al ambiente, se debe evaluar mediante el procedimiento de extracción de constituyentes tóxicos (PECT, NOM-053-SEMARNAT-1993) (DOF,1993), en la cual se utiliza como extractante una solución de ácido acético. Antes de entrar en vigencia esta norma, los residuos mineros eran considerados peligrosos, sin embargo desde el año 2006 se debe cumplir la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004a), la cual establece la metodología a seguir para determinar si un residuo minero es considerado peligroso, dicha norma utiliza como solución extractante agua en equilibrio con dióxido de carbono. Este método permite obtener un extracto acuoso para estimar la disponibilidad de los metales y metaloides presentes en los jales, bajo condiciones de laboratorio y no pretende simular el tipo de lixiviado que se produce bajo condiciones específicas de campo. La EPA desde 1986 estableció el procedimiento de lixiviación para conocer las características tóxicas (método TCLP) el cual es equivalente al método PECT de la Norma Oficial Mexicana. Posteriormente, el Congreso Americano de Minería solicitó un cambio en la metodología para evaluar la peligrosidad de los residuos mineros, argumentando que el método TCLP fue diseñado para residuos sólidos municipales, por lo que este organismo desarrolló el método SPLP 1312 para determinar si los residuos mineros son considerados peligrosos (EPA, 1995). Esta prueba utiliza una mezcla de  $H_2SO_4$  - $HNO_3$  (60 - 40 % peso), la cual simula una lluvia ácida, con nitratos y sulfatos disueltos que se encuentran en el ambiente producto de la contaminación antropogénica.

Los objetivos de este estudio son evaluar la lixiviación de As, Pb, Mn, Zn, Cd y Cr en función de los diferentes extractantes, los cuales tienen diferente pH y determinar si existen diferencias significativas en la concentración de los elementos lixiviados con los diferentes métodos, para los sitios de Monte de San Nicolás y Peregrina del estado de Guanajuato, México.

## 2 Metodología

Se tomaron 3 muestras de jales en Monte de San Nicolás y 3 en Peregrina, los dos sitios están ubicados en el distrito minero de Guanajuato, en el estado de Guanajuato, México. Las muestras se tomaron a

diferente profundidad, a 5 cm de la parte superior, llamada perfil 1 (P1, SN1), otra en la parte media a 40 cm de la anterior llamada perfil 2 (P2, SN2) y otra a 40 cm de la última llamada perfil 3 (P3, SN3). La identificación de las muestras es “P” para los jales de la mina de Peregrina y “SN” para los de Monte de San Nicolás. Las muestras se secaron a temperatura ambiente en el laboratorio y se tamizaron a menos de 2 mm.

Las muestras se caracterizaron por FRX (Fluorescencia de Rayos X) y DRX (Difracción de Rayos X), determinando también el pH (NOM-021-RECNAT-2000) (DOF, 2000b), tamaño de partícula (Mathieu y col., 1998) y densidad (NOM-021-RECNAT-2000). Para la medición de elementos totales, las muestras se digirieron con ácido nítrico y fluorhídrico hasta evaporación total y posteriormente se agregó ácido clorhídrico para completar la digestión, se evaporó el ácido y se aforó con ácido nítrico al 2% para el análisis de elementos totales en un espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OEE), Marca Jobin Yvon modelo JY 38s.

Para realizar los método de prueba de lixiviación se pesaron 2 g de muestra y se colocaron en viales de 50 mL con tapa de rosca, se añadió la solución extractante, para el caso de la NOM-141-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004a), donde se establece que se utiliza agua acidificada con CO<sub>2</sub> a pH 5,5 como solución extractante y se agregó a una relación de 20 mL de extractante por gramo de muestra, se tapó el vial y se colocó en agitación rotatoria durante 18 h a una velocidad de 30 ± 2 rpm a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo se centrifuga la muestra y se separa la fase líquida de la fase sólida, la fase líquida es filtrada con una membrana de 0.45 μm. Este filtrado posteriormente se acidifica a pH < 2 con HNO<sub>3</sub> para el análisis de elementos. Para el método con el extracto PECT, se utiliza ácido acético glacial a pH 2,88 (DOF, 1993) siguiendo el procedimiento anterior.

La extracción mediante el método de la EPA SPLP 1312 (EPA, 1989) fue realizada de la misma forma

que el procedimiento anterior, solamente cambiando el extractante, el cual es una mezcla sulfo-nítrica (60 g de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - 40 g de HNO<sub>3</sub>) de ácidos sulfúrico-nítrico a pH 4.20. Los ensayos se realizaron por triplicado y a todos los extractos se les midió el pH el cual fue ajustado posteriormente a menos de 2 para medir los elementos en un espectrómetro de masas cuadrupolo (ICP- MS), marca Thermo Scientific modelo XSeries 2.

### 3 Resultados y discusión

#### 3.1 Caracterización de los residuos

Se determinó el pH de los jales, encontrándose que las muestras de jales de San Nicolás se encuentran a pH neutro entre 7,13 a 7, 52 y las muestras de Peregrina se encuentran a pH medianamente alcalino, entre 8,17 a 8,57. La composición de minerales que contienen los residuos se determinó por DRX y se encontró que las muestras de Peregrina están compuestas de cuarzo (SiO<sub>2</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>), clinocloro [(Mg, Al, Fe)<sub>6</sub> (Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub> (OH)<sub>8</sub>] y sanidina-alta (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Para el sitio de San Nicolás, además de los compuestos anteriores, también se encontró moscovita [KAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>].

Las muestras de residuos analizadas por FRX muestran que los 2 sitios contienen en su mayoría óxidos de silicio como se muestra en la Tabla 1, además de una gran cantidad de óxidos de calcio de hasta un 20 % en Peregrina y 8 % en San Nicolás, también contienen grandes cantidades de aluminio, hierro, potasio y magnesio.

Se realizó la digestión total de las muestras encontrando altas concentraciones de Pb, Cd, Mn, Zn y As, este último de hasta 11,000 mg/kg y en menor proporción de Cr como se muestran en la Tabla 2. De acuerdo al estudio estadístico de análisis de varianza (ANOVA) (Montgomery, D., 2007) al 95 % de confianza, no se observan diferencias significativas entre las profundidades,

Tabla 1. Resultados de constituyentes mayores contenidos en los jales (%).

%	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
P2	56	0.06	4.4	1.2	0.12	0.5	20.1	0.32	1.2	0.02
P1	66	0.14	8.4	1.9	0.10	0.7	10.0	0.73	2.8	0.04
SN1	61	0.62	11.9	5.5	0.26	2.7	6.8	0.68	3.3	0.12
SN2	59	0.53	11.2	4.8	0.25	2.8	8.1	0.83	3.1	0.13

Tabla 2. Concentración total<sup>a</sup> de elementos en mg/kg.

Muestra	As	Cr	Zn	Pb	Mn	Cd
P1	6328.8 ± 156.4	6.1 ± 0.9	1668.1 ± 269.4	2758.8 ± 437.3	348.3 ± 67.3	1657.8 ± 234.8
P2	7056.8 ± 642.7	7.9 ± 2.1	2015.3 ± 130.5	3583.5 ± 384.2	386.6 ± 22.1	2045.3 ± 105.1
P3	6163.2 ± 450.0	5.2 ± 2.2	1593.4 ± 438.4	2810.1 ± 1071.5	362.7 ± 120.5	1489.4 ± 733.7
SN1	10201.1 ± 254.9	45.9 ± 0.7	2811.5 ± 240.0	4585.1 ± 139.4	716.0 ± 87.7	2620.1 ± 137.0
SN2	9186.2 ± 537.9	38.4 ± 3.7	2361.9 ± 432.1	3937.9 ± 502.3	558.6 ± 157.3	2131.3 ± 405.4
SN3	10844.2 ± 834.1	44.8 ± 5.8	3048.1 ± 125.0	4780.8 ± 199.9	647.8 ± 42.2	2673.2 ± 125.8
% CV <sup>b</sup>	(2.5-38.1)	(1.6-42.7)	(4.1-27.5)	(3.0-38.1)	(5.7-28.2)	(4.7-49.3)

<sup>a</sup> Media ± desviación estándar de n=3 réplicas analizadas por triplicado <sup>b</sup> %CV: intervalo de coeficiente de variación.

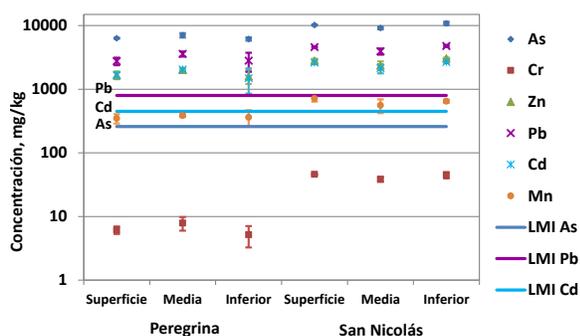


Figura 1. Concentración total de elementos. LMI: Límite máximo permisible en suelos para uso industrial (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

probablemente estos resultados sean influenciados por la heterogeneidad de los residuos. En la figura 1 se muestran con líneas continuas los límites máximos permisibles de As, Pb y Cd establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2004b) para suelos de uso industrial, en esta figura podemos observar que los tres elementos se encuentran por arriba de los límites que marca la norma.

### 3.2 Lixiviación estática

Se determinó la concentración de los elementos lixiviados por los tres métodos de extracción, a los cuales se realizaron pruebas estadísticas utilizando el análisis de varianza (ANOVA), al 95% de confianza ( $\alpha = 0.05$ ) para cada elemento, utilizando como variable el método de extracción para determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones de los elementos que dependan del método empleado.

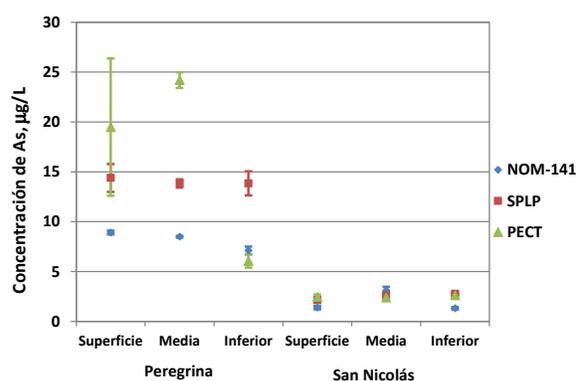


Figura 2. Concentración de arsénico en lixiviados.

Los resultados para cada elemento en estudio se presentan a continuación.

**Arsénico:** La liberación de arsénico en los residuos es mayor en el sitio Peregrina que en San Nicolás como se muestra en la Figura 2. En el sitio de San Nicolás, no se encontraron diferencias significativas entre extractantes por lo que para el As en este sitio es indistinto utilizar alguno de los 3 métodos de extracción. El arsénico se adsorbe preferentemente a los óxidos de hierro y manganeso, esta adsorción del As ocurre en los residuos de San Nicolás ya que presentan menor lixiviación por encontrarse más estables en estos óxidos. En el análisis de varianza realizado a los resultados de Peregrina, no se encontraron diferencias significativas en la concentración de As lixiviado por los diferentes extractantes como se observa en la figura 2. Esto puede deberse a la heterogeneidad encontrada con el método PECT, ya que también se observa que para este sitio la acidez del extractante influye en la liberación del As. En este caso el As liberado puede estar asociado a la calcita presente en las muestras, además de que estos residuos son más recientes y se encuentran menos estabilizados.

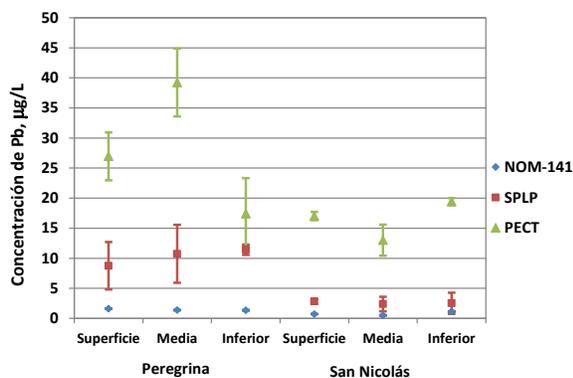


Figura 3. Concentración de plomo en los lixiviados.

Las concentraciones de arsénico en el lixiviante para los dos sitios, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles indicados en la NOM-052-SEMARNAT-2005 (DOF, 2006), por lo que de acuerdo a esta norma los residuos no se consideran peligrosos al no sobrepasar 5 mg/L de As.

**Plomo:** La concentración de plomo en los lixiviados resultó ser mayor con el extracto PECT para los dos sitios como se presenta en la Figura 3, de acuerdo al perfil de lixiviación en función del pH, la solubilización del Pb se debe al ataque ácido, además de la afinidad con los ligandos orgánicos que forman complejos y hacen posible la disolución (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). El análisis estadístico indica que existen diferencias significativas entre los lixiviantes utilizados. Como podemos observar en la tabla 1, las muestras contienen óxidos de manganeso, estos óxidos tienen una gran capacidad de adsorción de Pb (Dixon y col., 1989) por lo que el plomo puede encontrarse asociado a la superficie de estos óxidos y por lo tanto disminuir su concentración en los lixiviados. Sin embargo la concentración de Pb en las muestras es aproximadamente el doble de la concentración de los óxidos de manganeso por lo que se asume que el Pb restante se encuentra como hidróxido, de acuerdo a las especies de Pb en función del pH, éste se encuentra más disponible en los residuos de Peregrina (pH 8.17-8.57), por tal motivo se lixivia mayor cantidad que en San Nicolás, debido a que al pH de las muestras de San Nicolás una parte del Pb se encuentra precipitado. La Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 establece como límite máximo permisible de Pb 5 mg/L en el lixiviado, por lo tanto el plomo se encuentra dentro de especificaciones.

**Manganeso:** Para el caso de manganeso, la mayor lixiviación resultó con el extracto PECT; en los dos sitios se liberó gran concentración de manganeso, de

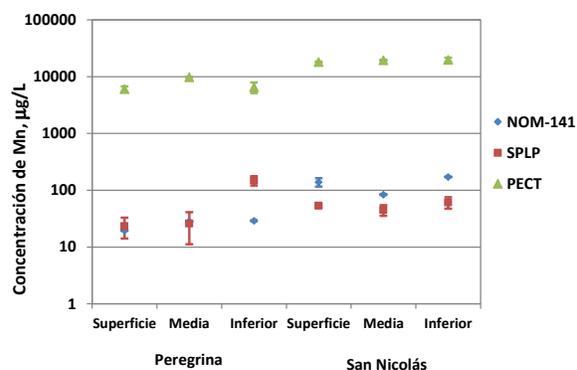


Figura 4. Concentración de manganeso en los lixiviados.

hasta 20 mg/L en las muestras de San Nicolás como se observa en la Figura 4. Para este elemento, si existen diferencias significativas entre los métodos. El manganeso al ser un catión se disuelve en mayor proporción a pH más ácido como es el caso del PECT, la protonación de las superficies del residuo aumenta la velocidad de disolución, ya que conduce a enlaces interatómicos que facilita la separación del grupo catiónico (Stumm y Morgan, 1996), sin embargo la capacidad del Mn para formar ligandos orgánicos puede contribuir a aumentar la solubilidad del Mn, incluso en el intervalo de pH alcalino (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). El Mn cuando se encuentra en forma de óxido se adsorbe el Pb, As y Zn en su superficie. El Mn no se encuentra en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 en el listado de elementos que hacen a un residuo peligroso, sin embargo la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000a), establece una concentración máxima permisible de 0.15 mg/L en agua potable, cabe destacar que el Instituto Nacional de Seguridad Ocupacional y Salud (NIOSH, 1994) de Estados Unidos, establece como exposición un límite máximo permisible de 5 mg de Mn/m<sup>3</sup>. La exposición al Mn puede ocasionar daño en el sistema respiratorio, renal y en el sistema nervioso central (OSHA, 2004).

**Zinc:** La mayor lixiviación de Zn se encontró en el extracto PECT, se encontraron diferencias entre métodos originadas por el método PECT, ya que en las otras dos metodologías no se observa diferencia. Cabe mencionar que el Zn puede encontrarse adsorbido a los óxidos de manganeso presentes en la muestra, así como en la calcita, por lo tanto la lixiviación del Zn se puede atribuir a que la calcita presenta alta solubilidad a pH ácidos (Dixon, 1989). El Zn no se encuentra incluido en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 entre los elementos que hacen a un

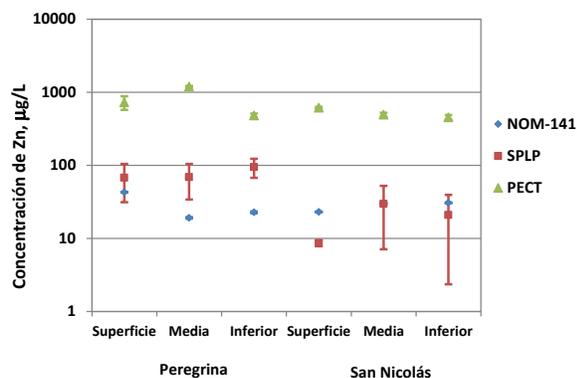


Figura 5. Concentración de zinc en los lixiviados.

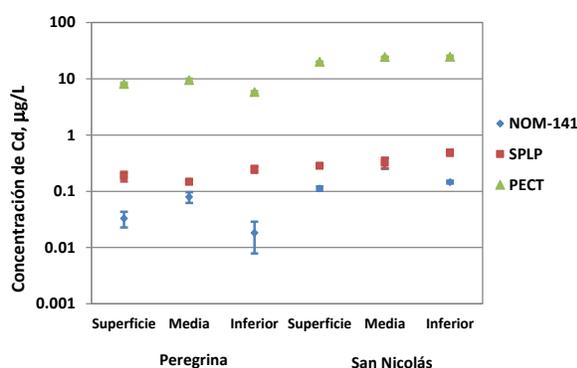


Figura 6. Concentración de cadmio en los lixiviados.

residuo peligroso. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece una concentración máxima permisible de 5 mg/L en agua de bebida, por lo que incluso los lixiviados se encuentran dentro de especificación. Cabe mencionar que la alta exposición a los óxidos de zinc afecta el sistema respiratorio (OSHA, 2004).

**Cadmio:** La lixiviación de Cd, se observa que presenta una mayor cantidad en el extracto PECT, para este elemento, se encontraron diferencias significativas entre las pruebas de lixiviación, principalmente se con el extracto PECT como se muestra en la Figura 6. También se puede observar que la lixiviación de Cd se debe al pH del extractante. De acuerdo al pH que tienen las muestras el Cd se encuentra adsorbido a los oxidos de aluminio, por lo tanto presenta una baja lixiviación (Dixon, 1989), esto es consistente con los resultados de DRX presentados en la tabla 1, los cuales muestran una mayor cantidad de oxidos de aluminio presente en las muestras de San Nicolás. El límite máximo permisible en el lixiviado para el cadmio, es de 1 mg/L en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo que

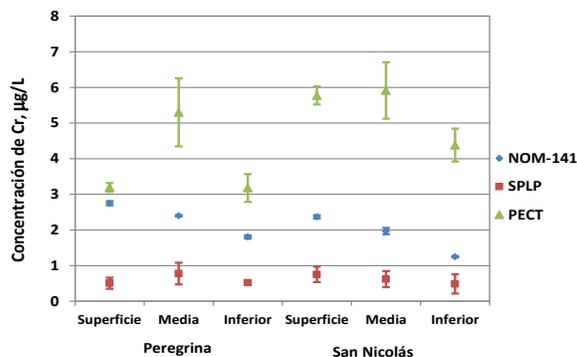


Figura 7. Concentración de cromo en los lixiviados.

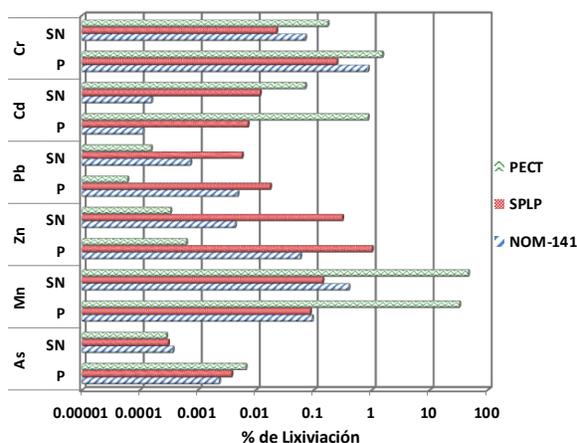


Figura 8. Porcentajes de lixiviación de los elementos en los diferentes lixiviantes.

el residuo se encuentra dentro de la concentración establecida.

**Cromo:** Nuevamente el extracto PECT provoca una mayor lixiviación de Cr como se observa en la Figura 7. Para este elemento, se encontraron diferencias significativas entre las diferentes pruebas. Cabe destacar que el cromo puede estar adsorbido a los oxidos de manganeso, presentando una baja lixiviación (Dixon, 1989), estos elementos se lixivian en mayor proporción en el sitio de San Nicolás de acuerdo al siguiente orden de extractantes PECT > NOM-141 > SPLP. Para el caso del Cr, la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 establece que 5 mg/L que es el límite máximo permisible, por lo que la concentración de los residuos se encuentran dentro de especificaciones para este elemento.

El carácter anfótero del arsénico es la posible causa de que no existan diferencias significativas entre los métodos utilizados. La liberación de Pb

y Cd en función del pH de los lixiviantes denota que la solubilización de estos elementos se produce principalmente debido al ataque ácido. De igual forma se atribuye esta solubilización para el As en el sitio Peregrina. En el caso del Zn y Cr, la liberación dependerá del grado de adsorción de estos elementos a los óxidos de manganeso. Los ligandos orgánicos facilitan el desprendimiento de los iones metálicos centrales y mejoran la disolución, ya que los ligandos cambian la densidad electrónica hacia el ion metálico (Stumm y Morgan, 1996), por lo tanto también influyen en la obtención de mayor solubilización de los elementos con el extracto PECT. Para este tipo de residuos estudiados, los cuales contienen altas concentraciones de carbonatos de calcio, los métodos SPLP y NOM-141 podrían representar de la mejor manera la lixiviación generada por la lluvia.

En la figura 8 se muestra el porcentaje lixiviado de los elementos que es menor del 1% para la mayoría de los elementos, solamente el Mn presenta una lixiviación mayor en los dos sitios, de hasta el 45 %, por lo que las formas oxidadas en las que se encuentra el Mn son muy solubles. Las concentraciones totales de Mn son más altas en el sitio de San Nicolás, aunque el porcentaje de lixiviación es mayor en Peregrina por lo tanto este sitio se debe considerar más peligroso debido a que los elementos se encuentran más disponibles.

## Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede determinar que:

No existen diferencias significativas entre las concentraciones totales encontradas a las diferentes profundidades muestreadas, por lo que se puede considerar que la columna de residuos es homogénea.

El extracto PECT es el que utiliza un pH de 2.88, este extracto es el que lixivia mayor concentración de los elementos, excepto para el arsénico en el sitio de San Nicolás, donde no se observan diferencias significativas entre el uso de extractantes a diferente pH. Se puede deducir que la solubilidad del Pb y Cd dependen de la acidez de los extractantes.

La mayor lixiviación con el extracto PECT también pudo estar influenciada por tratarse de un ligando orgánico que atrapa más fácilmente a los iones metálicos.

A pesar de que el sitio de San Nicolás contiene concentraciones más altas de elementos totales, no es el más peligroso, ya que el sitio Peregrina lixivia

mayor porcentaje de elementos disponibles en el ambiente.

El mayor porcentaje de concentración lixiviada de los elementos se encuentra principalmente en el sitio de Peregrina, el residuo de este sitio es más joven que San Nicolás, esta diferencia puede deberse a que el sitio de Monte de San Nicolás es más antiguo y se puede considerar más estable.

Es importante hacer notar que una normativa que establezca un método de lixiviación estática podría subestimar la lixiviación de algunos elementos ya que los grados de adsorción de los elementos dependerá de cada tipo de residuo. El método de la NOM-141 y el método SPLP podrían ser los más adecuados para evaluar la lixiviación de los residuos estudiados, ya que se encuentran en zonas áridas con altos contenidos de calizas.

## Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca No. 165201 otorgada para cursar el doctorado en Ciencias Químicas dentro del programa de doctorado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Agradecimiento al M. en C. Marcos Loredo Tovías por el apoyo en el análisis de elementos totales.

## Referencias

- CAMIMEX. (2010). Cámara Minera de México. Informe Anual 2010. LXXIII Asamblea General Ordinaria.
- Catalan, Lionel J. J. y Yin, Cuohong. (2003). Comparison of calcite to quicklime for amending partially oxidized sulfidic mine tailings before flooding. *Environmental Science & Technology* **37**, 7, 1408-1413.
- Dixon, J.B. y Weed, S.B. (1989). *Minerals in soil environments*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series, no. 1., Second Edition, ISBN 0-89118-787-1.
- DOCE. (2009). Decisión de la comisión de 30 de abril de 2009 por la que se completan los requisitos técnicos para la caracterización de los residuos establecidos en la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. Diario Oficial de la Unión Europea, 01 de mayo de 2009.

- DOF. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, Méx., 5 de octubre de 1993.
- DOF. (2000a). Modificación a la 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, Méx., 20 de octubre de 2000.
- DOF. (2000b). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, 31 de diciembre de 2002.
- DOF. (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, 13 de septiembre de 2004.
- DOF. (2004b). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- DOF. (2006). 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, Méx., 23 de junio de 2006.
- EPA. (1989). Environmental Monitoring Systems Laboratory, *Performance Testing of Method 1312; QA Support for RCRA Testing: Project Report*. EPA/600/489/022. EPA Contract 68-03-3249 to Lockheed Engineering and Sciences Company, June 1989.
- EPA. (1995). Applicability of the toxicity characteristic leaching procedure to mineral processing wastes. Technical background document supporting the supplemental proposed rule applying phase IV land disposal restrictions to newly identified mineral processing wastes. *Office of Solid Waste. U. S. Environmental Protection Agency*, December 1995.
- INEGI (2012). La Minería en México. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Serie Estadística Sectorial, Número 26.
- Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A. B. (2007). *Trace Elements from Soil to Human*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Kalbe, U., Berger, W., Eckardt, J., Simon, F. (2008). Evaluation of leaching and extraction procedures for soil and waste. *Waste Management* **28**, 1027-1038.
- Kosson, D.S., van der Sloot, H. A., Sanchez, F., Garrabrants, A.C. (2002). An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. *Environmental Engineering Science* **19**, 159-204.
- Mathieu C., Pieltain F. (1998). *Analyse physique des sols. Méthodes choisies*. Ed., Lavoisier TEC & DOC. Paris, ISBN 2-7430-0620-X.
- Montgomery, D. C. (2007). *Diseño y análisis de experimentos*. Ed. Limusa Wiley, 2ª edición. ISBN 13: 978-968-18-6156-8
- NIOSH. (1994). The National Institute for Occupational Safety and Health. Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/7439965.html>
- OSHA, (2004). Seguridad Ocupacional y Administración de la Salud. Disponible en: [http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH\\_250200.html](http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_250200.html) <http://www.osha.gov/SLTC/healthguidelines/zinc/oxide/recognition.html>
- Souhail R. Al-Abed, Jegadeesan, G., Purandare, J. y Allen, D. (2008). Leaching behavior of mineral processing waste: Comparison of batch and column investigations. *Journal of Hazardous Materials* **153**, 1088-1092.

- Stumm, W y Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry*. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. Third Edition. New York, Wiley-Interscience.
- Townsend, T.G., Jang, Y.C. y Tolaymat, T. (2002). Leaching tests for evaluating risk in solid waste management decision making. Report #04-0332007. State University System of Florida, *Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management*, Gainesville.
- van der Sloot H. A., Heasman L. y Quevauviller, P. (1997). Harmonization of leaching/extraction test. *Studies in Environmental Science, Elsevier Science*, Amsterdam, Volume 70, 292 pp.
- van der Sloot, H. A. (1998). Quick Techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: *Netherlands Energy Research Foundation ECN*, Research Report ECN-R-97-002, The Netherlands.
- van der Sloot, H. A. (1999). Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized waste with different waste loading for long-term environmental assessment. *Netherlands Energy Research Foundation ECN*, ECN-RX-99-015, April, 1-11.
- van der Sloot, H. A., van Zomeren, V., Seignette, P.F.A.B., Dijkstra, J.J., Comans, R.N.J., Meeussen, J.c.L., Kosson, D.S. y Hjelmar, O. (2003). Evaluation of environmental aspects of alternative materials using an integrated approach assisted by a database/expert system. To be published in the proceedings of the International Symposium. *Advances in Waste Management and Recycling*, in Dundee, Scotland.