

Estudio estadístico de los factores que afectan el proceso de lixiviación de elementos potencialmente tóxicos provenientes de jales mineros

Rubio Campos Nallely Yunuen¹, Cabello Meza Orfelina Haydeé², López Rodríguez Devany Valeria³, Ramírez Luna Carlos Alberto Jorge¹, Miramontes Espinoza Luis Daniel⁴, Sánchez Durán Alejandra⁵, Juárez Jasso Josué Giovanni¹, Ventura Ríos Dafne Erendira².

¹Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato. Colegio de Nivel Medio Superior. Universidad de Guanajuato. nrubio@gto.mx

²Escuela de Nivel Medio Superior de Pénjamo. Colegio de Nivel Medio Superior. Universidad de Guanajuato.

³Departamento de Derecho. División de Derecho, Política y Gobierno. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato.

⁴Departamento de Ingeniería Química. División de Ciencias Naturales y Exactas. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato.

⁵Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. División de Ingenierías. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio estadístico para evaluar el efecto de los factores que favorecen el proceso de lixiviación de: arsénico, cadmio, manganeso, plomo y zinc, a partir de datos experimentales. Los factores en estudio fueron tiempo de contacto y agente lixivante (medio de cultivo 9K y bacterias del tipo *Thiobacillus ferrooxidans*). Mediante el uso del software Minitab 18® se realizó un diseño factorial de 2 factores (tiempo y agente lixivante), con 6 niveles para el tiempo y 2 niveles de prueba para el agente lixivante, para cada uno de los elementos en estudio. La respuesta obtenida del análisis estadístico es la cantidad del elemento lixiviado por kilogramo de agente lixivante empleado.

Palabras clave: lixiviación; diseño de experimentos, EPT.

Introducción.

México cuenta con una extraordinaria diversidad biológica y como en otras partes del mundo, se encuentra amenazada por el crecimiento de la población humana y los sistemas de producción de satisfactores.

En la ciudad de Guanajuato desde el tiempo de la colonia, la industria minera ha sido uno de los principales productores de oro y plata, con ello ha generado gran cantidad de jales que son los desechos mineros, dando como consecuencia que exista un impacto ambiental en los alrededores. Estos materiales están constituidos de diferentes metales conocidos como elementos potencialmente tóxicos (EPT) que son metales pesados y contaminantes persistentes que se acumulan en el suelo y que causan daño al medio ambiente y en nuestro país, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por EPT", (Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, 2022).

En los residuos mineros pertenecientes a la mina del Monte de San Nicolás, localizado en el Distrito Minero de Guanajuato (Figura 1), se encuentran presentes los EPT, específicamente: el manganeso, el arsénico, el cadmio, el plomo y el zinc, que han servido para el estudio de la lixiviación por actividad microbiana (medio de cultivo y bacterias).

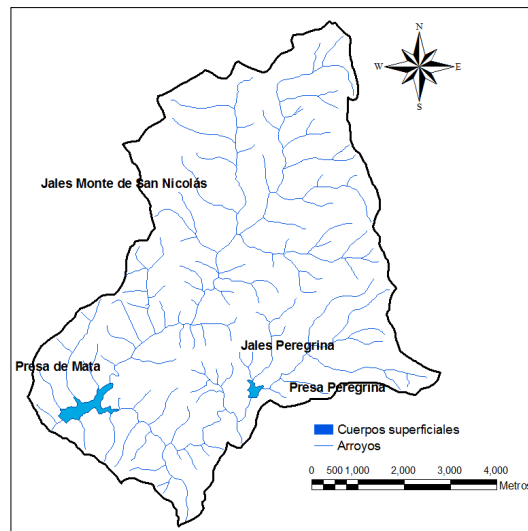


Figura 1. Localización de los jales del Monte de San Nicolás en el Distrito Minero de Guanajuato, (Rubio Campos, 2011).

La lixiviación, en este caso denominada correctamente como biolixiviación es la extracción de metales desde minerales o menas a través del uso de organismos vivos, generalmente microorganismos o bacterias. Estos microorganismos se alimentan principalmente de los EPT, para extraer del mineral para su limpieza. Es decir, las bacterias pueden oxidar a los compuestos que contienen azufre en ácido sulfúrico, entre otros (Biolixiviación, 2022).

En el campo de la industria es frecuente realizar experimentos o pruebas con el propósito de resolver un problema o comprobar una idea (conjetura, hipótesis); por ejemplo, hacer algunos cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso, probar varias temperaturas en una máquina hasta encontrar la que da el mejor resultado o crear un nuevo material con la intención de lograr mejoras o eliminar algún problema (González, 2015).

Sin embargo, es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas. Algo similar ocurre con el análisis de los datos experimentales, donde más que hacer un análisis riguroso de toda la información obtenida y considerar la variación, se realiza un análisis informal, “intuitivo” (González, 2015).

Un diseño de experimentos ayuda a probar y corroborar estadísticamente como influye los factores tiempo y lixivantes en la lixiviación de los EPT, así como la interacción entre ambos, además apoya a ahorrar recursos al momento de la experimentación.

En esta investigación, se presenta un diseño de experimentos para el proceso de lixiviación por medio de actividad bacteriana, empleando el software computacional Minitab 18®, que es un paquete de programación de estadística, desarrollado en la Universidad del Estado de Pensilvania por investigadores como Barbara F. Ryan, Thomas A. Ryan, Jr. y Brian L. Joiner en 1972 y distribuido por Minitab Inc., una compañía de propiedad privada con sede en State College, Pennsylvania, (Gimas, 2011).

Materiales y métodos.

Se realizó la revisión bibliográfica para recopilar datos experimentalmente de estudios previos (Rubio Campos, 2011), con la finalidad de predecir la respuesta que tiene la interacción entre el factor tiempo (días) y el agente lixivante sobre la cantidad de EPT lixiviado.

Los EPT estudiados fueron: arsénico, cadmio, manganeso, plomo y zinc. Para el agente lixivante se utilizaron dos agentes lixivantes: uno llamado medio de cultivo y otro con bacterias del tipo *Thiobacillus ferroxidans*. El tiempo empleado para el proceso de lixiviación fueron 1, 3, 5, 7, 14 y 28 días.

Se realizó un diseño de experimentos del tipo “Diseño factorial: 2 factores (tiempo y agente lixivante), con 6 niveles para el tiempo y 2 niveles de prueba para el agente lixivante, para cada uno de los EPT en estudio. La respuesta obtenida del análisis estadístico es la cantidad de EPT lixiviado. En la Tabla 1, se muestra el Diseño factorial para el arsénico.

Tabla 1. Diseño factorial: 2 factores, 6 niveles para el tiempo y 2 niveles de prueba para el agente lixivante para el arsénico.

Tiempo (días)	Agente lixivante			
	Medio de cultivo 9K		Bacterias	
1	0.0323	0.032	0.3374	0.337
3	0.6402	0.6431	0.656	0.659
5	0.817	0.8165	0.6809	0.6805
7	0.993	0.995	0.865	0.875
14	1.676	1.672	1.006	1.009
28	2.878	2.888	1.177	1.171

Resultados y discusión

En las Figuras 2a y 2b se describen los principales efectos que tiene cada factor sobre la cantidad de EPT lixiviado por kilogramo de solución lixivante.

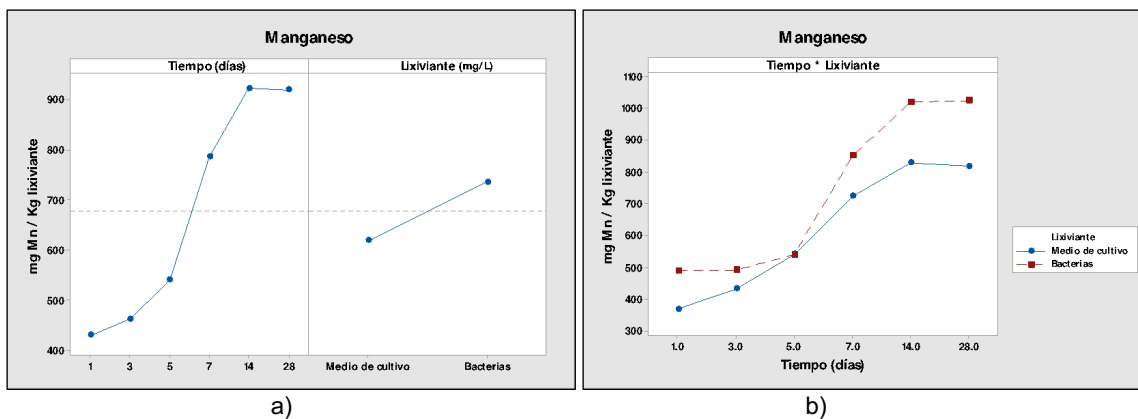
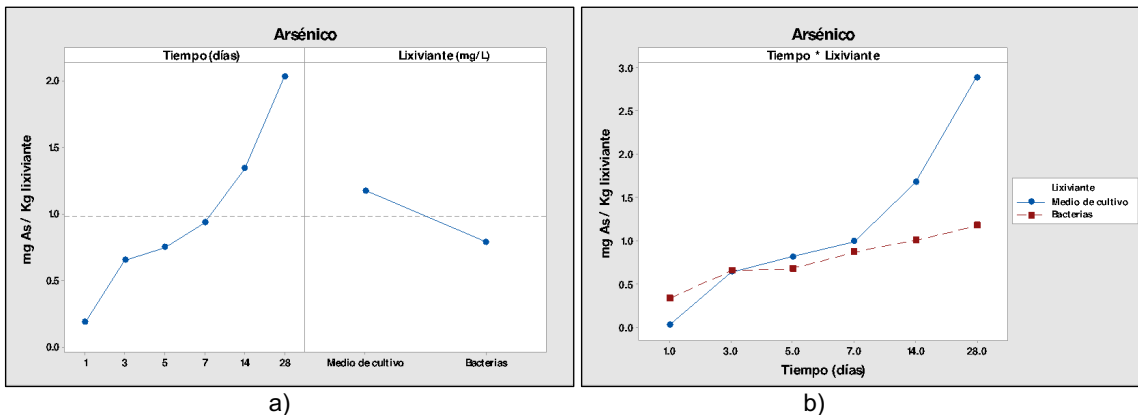


Figura 2. Efectos principales sobre los factores tiempo y lixivante para el manganeso.
a) Análisis por cada factor. b) Interacción de ambos factores.

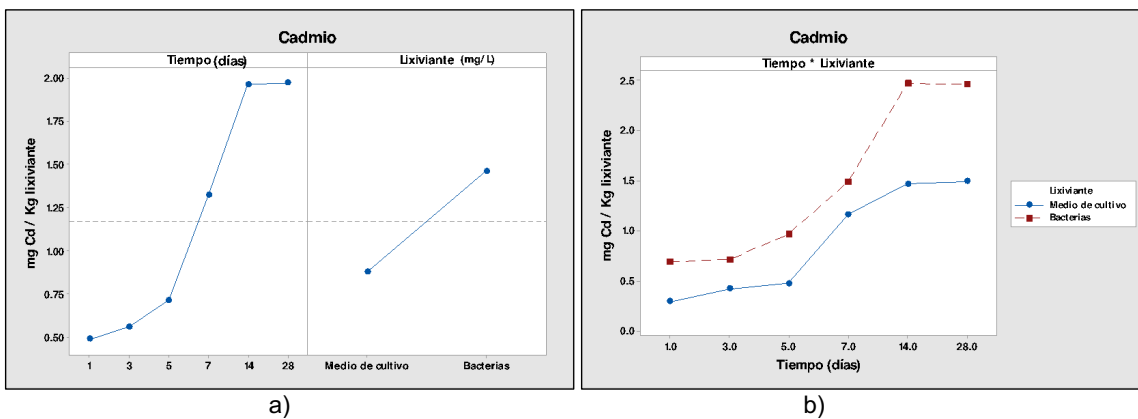
En la Figura 2a, se puede observar que la cantidad de manganeso lixiviado se favorece hasta el día 14 y tiene una mejor capacidad de lixiviación, utilizando las bacterias del tipo *Thiobacillus ferrooxidans*. Mientras que en la Figura 2b, indica la interacción entre los dos factores que son tiempo y lixivante donde se muestra que las bacterias favorecen el proceso de lixiviación entre los días 7 y 14.

En la Figuras 3a y 3b se presenta el comportamiento para el arsénico. Como se observa en la Figura 3a que el grado de lixiviación se alcanza hasta el día 28 y que el mejor lixivante es el medio de cultivo. Mientras que en la gráfica de la Figura 3b corresponde a la interacción entre los dos factores, presentándose un incremento de metal lixiviado por kilogramo de agente lixivante con respecto al tiempo.



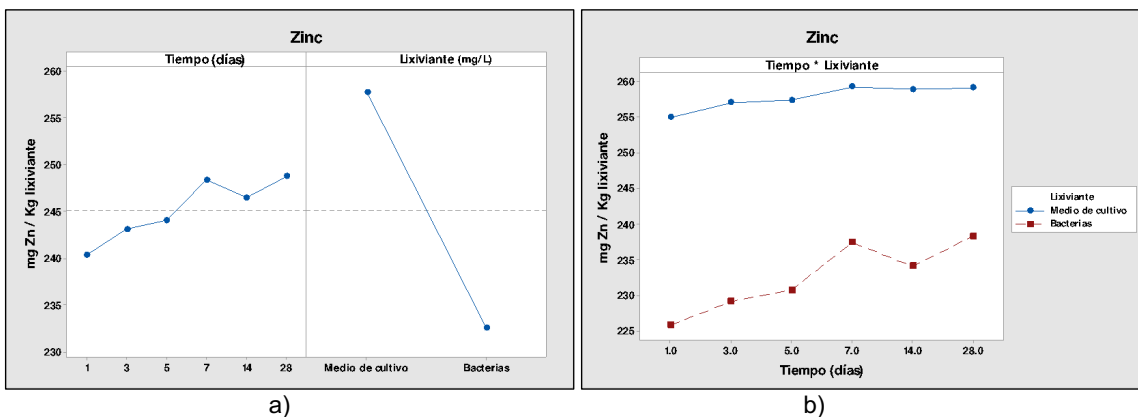
a) b)
Figura 3. Efectos principales sobre los factores tiempo y lixivante para el arsénico.
a) Análisis por cada factor. b) Interacción de ambos factores.

Para el cadmio, la gráfica de la Figura 4a corresponde al análisis por cada factor de manera e individual y en la Figura 4b la interacción de ambos factores. Como se muestra en las Figuras, la mayor cantidad de elemento lixiviado se alcanza en el día 14 y el mejor agente lixivante son las bacterias.



a) b)
Figura 4. Efectos principales sobre los factores tiempo y lixivante para el cadmio.
a) Análisis por cada factor. b) Interacción de ambos factores.

Para el zinc, el proceso de lixiviación se favorece empleando medio de cultivo a tiempos cortos de reacción, lo cual es una alternativa de obtención del metal en solución.



a) b)
Figura 5. Efectos principales sobre los factores tiempo y lixivante para el zinc.
a) Análisis por cada factor. b) Interacción de ambos factores.

Para el caso del plomo, las Figuras 6a y 6b, muestran los efectos principales sobre los factores en estudio (tiempo y agente lixivante), de manera individual y la interacción de ambos, respectivamente. Como puede observarse, utilizando medio de cultivo 9K y bacterias *Thiobacillus ferrooxidans*, la cantidad del elemento es baja con respecto al plomo disponible en los jales mineros.

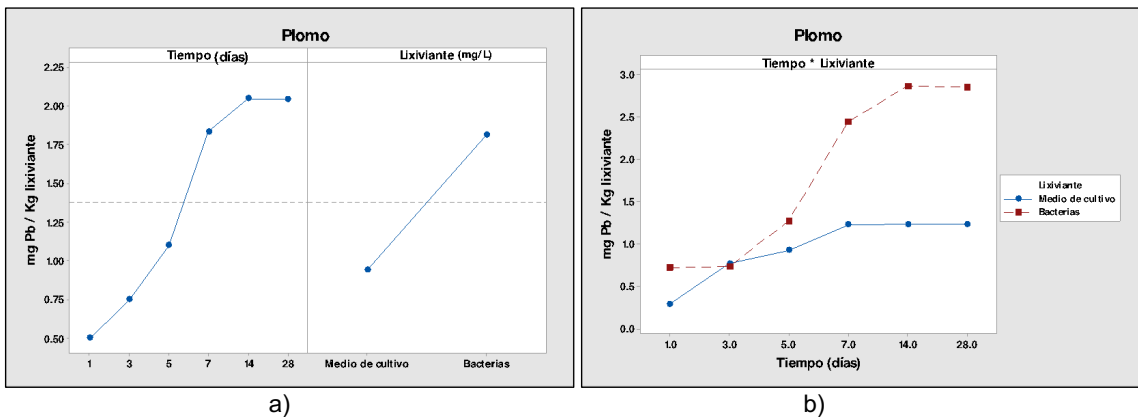


Figura 6. Efectos principales sobre los factores tiempo y lixivante para el plomo.
a) Análisis por cada factor. b) Interacción de ambos factores.

Conclusiones

Mediante el diseño de experimentos se pudieron clarificar los aspectos que favorecieron el proceso de lixiviación de EPT empleando dos agentes lixiviantes.

Con el uso del software Minitab 18®, se determinó el diseño factorial para evaluar el efecto de los factores (tiempo y agente lixivante) que afectan sobre la cantidad de EPT lixiviado por kilogramo de solución lixivante.

Para los EPT: manganeso, cadmio y plomo presentaron un comportamiento similar empleando bacterias del tipo *Thiobacillus ferrooxidans* y para un tiempo entre 7 y 14 días, mientras que para el arsénico el medio de cultivo es el mejor agente lixivante, donde la cantidad lixiviada del elemento se incrementa con respecto al tiempo. Utilizando medio de cultivo 9K, se favorece la lixiviación de zinc, obteniéndose cantidades elevadas del elemento, lo cual, se considera como una buena alternativa de recuperación del metal en solución para tiempos cortos de reacción.

Agradecimientos

A las profesoras Nallely y Orfelina por liderar este proyecto de trabajo en el verano de la ciencia. Así como a la Dra. Beatriz Eugenia Rubio Campos por apoyar la realización de esta redacción sin la cual no podría haberse concluido de manera exitosa el cierre del trabajo de investigación. A los directores de las escuelas de nivel medio superior de Guanajuato y Pénjamo: Psic. Karina Alejandra Rodríguez Valdivia y MCD. Gerardo Fuentes Cordera; respectivamente, por las facilidades otorgadas para el cumplimiento y realización del proyecto. A nuestra máxima casa de estudios por darnos la oportunidad de realizar este tipo de estancias para la formación integral en bien del estudiante.

Referencias

- Jimas, P. (2011). *Estadística con Minitab: Aplicaciones para el control y la mejora de la calidad*. Ciudad de México: Pearson Educación.

- González, J. F. (2015). *Diseño de experimentos para la posterior estabilización/solidificación de residuos mineros*. Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión ambiental, A.C. AMICA. Obtenido de <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/106.pdf>
- Gutiérrez, S. R. (2008). *Análisis y Diseño de experimentos*. Ciudad de México: Mc Graw Hill, Interamericana.
- Gutierrez-Ruiz, M. E.-G.-G. (2009). *Elaboración de una mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final. SNIBCONABIO proyecto No. GS002.
- La Biolixiviación: ¿Qué es y cómo mejora los procesos? Conoce más de esta alternativa de recuperación de minerales*. (junio de 27 de 2021). Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/biolixiviacion-metodo-obtener-mayor-cantidad-metal/>
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. (27 de Junio de 2022). *Que establece criterios para determinar las concentración de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Obtenido de https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Rubio Campos, B. E. (2011). *Contaminación de sistemas acuosos superficiales por elemento potencialmente tóxicos de jales: simulación del transporte de arsénico*. Tesis. Universidad de Guanajuato.
- Rubio Campos, N. Y. (2021). *Estudio de recuperación de cobre a partir de residuos electrónicos*. Tesis. Universidad de Guanajuato.
- Sánchez-Nieto, J. A.-C.-C.-M. (2018). Desarrollo de habilidades digitales mediante el uso de Minitab. *Jóvenes en la ciencia*, 4(1), 2857-2861. Obtenido de <https://www.jovenesenenciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenenciencia/article/view/2754>