

Simulación matemática del proceso de electroremediación de suelos contaminados con Pb y Cd del distrito minero de Zimapán

Laura García Hernández ¹, Marissa Vargas Ramírez ^{2*}, Víctor Esteban Reyes Cruz ².

¹ Doctorado en Ciencias de los Materiales, AACTYM, ICBI, UAEH.

² Profesor investigador nivel C de tiempo completo, adscrito al AACTYM, ICBI, UAEH.

Email ¹: lauragh09@yahoo.com.mx
 marissa_42093@yahoo.com

* Asesor

Categoría: Posgrado

Resumen:

En el presente trabajo se realizó el proceso de electroremediación en una celda cilíndrica de un suelo contaminado por residuos mineros (jales) del distrito minero de Zimapán, se analizó el suelo electroremediado por medios químicos y electroquímicos, los resultados se tomaron como base para fundamentar el modelo matemático del proceso. El modelo matemático en dos dimensiones se realizó utilizando un software comercial, basado en las ecuaciones de Darcy, Navier-Stokes, y Nernst-Planck para calcular las velocidades de flujo y el balance de masa dentro de la celda, los resultados mostraron que mediante la aplicación de un potencial eléctrico, la especie H^+ fluye a lo largo de la celda, y el OH^- se encuentra cercano a la región catódica.

Introducción:

La actividad minera ha sido un factor primordial en el desarrollo económico de México desde la época colonial hasta nuestros días. Sin embargo, el desarrollo de esta industria ha estado aunado a la producción de diferentes tipos de residuos. Los jales son el producto de la trituración y molienda del mineral una vez que se han recuperado los metales comerciales mediante procesos físicos y químicos. Consecuentemente, estos pueden contener cantidades variables de sulfuros, minerales de ganga y residuos de los reactivos utilizados en el proceso de beneficio. Los sulfuros metálicos de los jales al estar expuestos al intemperismo pueden oxidarse y liberar metales y metaloides tóxicos en el proceso conocido como drenaje ácido de minas, produciendo aguas con un bajo pH y elevadas concentraciones de sulfatos. La exposición no controlada a las condiciones climáticas prevalecientes en el sitio de disposición, puede dar lugar a una dispersión de contaminantes por medios físicos (erosión, transporte eólico y pluvial), o bien una alteración de los residuos con la consecuente movilidad química (disolución y transporte en medio acuoso) de elementos potencialmente tóxicos, (EPT's). Para el tratamiento de estos sitios contaminados en las últimas décadas se han propuesto diversas tecnologías, que uso depende además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante. Los tipos de tratamiento se divide en tres grupos, biológico, fisicoquímicos y térmicos. Dentro de los tratamientos fisicoquímicos, la remediación electrocinética también conocida como electroremediación, es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e iónicos, de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Debido al tiempo que involucra los procesos de electroremediación ya sea a nivel laboratorio o a escala piloto, y a los fenómenos fisicoquímicos que involucra dicho proceso, existen diferentes modelos matemáticos reportados en 1 o 2

dimensiones espaciales para la simulación de este tipo de proceso.

Materiales y Procedimientos:

- Muestras

El suelo para llevar a cabo el experimento fue obtenido de un muestreo de las principales zonas de exposición de riesgo en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo. El análisis químico de las muestras de suelos, se realizó por digestión ácida. De acuerdo con el análisis de textura de los suelos se clasifican como arenoso-franco, por lo que se toma una arena para ser utilizada como blanco y el suelo MCP38HS, con una concentración de plomo de aproximadamente 500 mgL^{-1} .

- Celda de electroremediación

Se realizaron los experimentos en una celda de electroremediación cilíndrica experimental, de 0.045 m de diámetro y 0.1 m. de longitud con dos electrodos funcionando como ánodo y cátodo, se empacó arena previamente contaminada con PbCO_3 , haciendo recircular acetato de amonio como anolito, y ácido acético como catolito, se aplicó una corriente de 0.5 mA durante 24 horas. Para el suelo MCP38HS, la corriente, el tiempo de duración, la recirculación de electrolitos en ánodo y cátodo, fueron los mismos que para el primer experimento. Terminados los experimentos se recuperó el suelo y se fraccionó en 5 secciones denominadas S1, S2, S3, S4 y S5, se analizó ICP para Pb y Cd, se determinó el pH y la conductividad eléctrica se analizó por Voltamperometría con electrodos de pasta de carbón.

- Equipos y Procedimientos

Para los estudios electroquímicos, se utilizó una celda típica de tres electrodos a temperatura ambiente, con atmósfera inerte. Como contra-electrodo una barra sólida de grafito, electrodo sulfatos como referencia. Los electrodos de trabajo son de grafito, suelo y aceite de silicón. El electrolito usado es semejante a la solución lixivante de los jales mineros.

- Modelo matemático

En el software COMSOL 3.2, se calculó de las velocidades de Darcy en un medio poroso homogéneo, movimiento del electrolito mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. El flujo electrocinético mediante la ecuación de Nernst-Planck. Se trabajó a un tiempo de 86400 segundos a intervalos de 60 segundos considerando un factor de escala de 1 y 9875 nodos de mallado.

Resultados:

La figura 1 muestra la respuesta voltamperométrica del suelo MCP38HS cuando se concentra los productos de oxidación de los sulfuros en la interfase del electrodo de pasta de carbón.

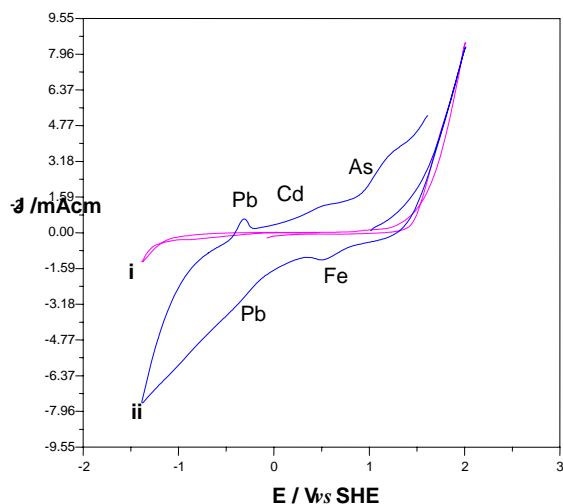


Figura 1. Voltamperogramas de la reducción y oxidación de suelo MCP38HS cuando se concentran aplicando un potencial de oxidación durante 600 segundos.

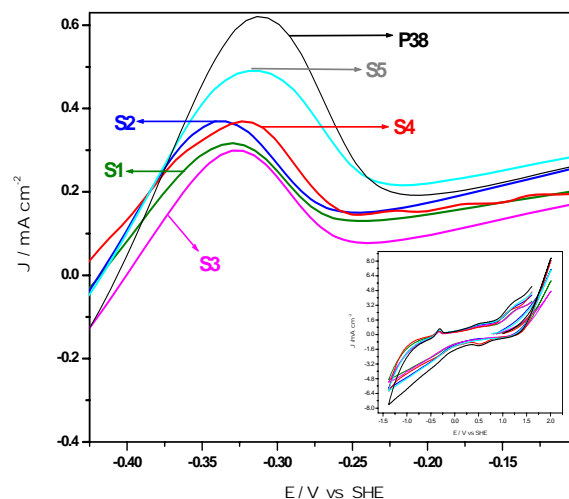


Figura 2. Voltamperogramas de el suelo MCP38HS y de cada fracción después de la electroremediación en celda.

Los resultados del voltamperograma de este trabajo muestran la movilidad del plomo en el suelos y cuya respuestas de oxidación se encuentra en el intervalo de potencial de -0.5 a 1.0 V. La figura 2, se muestra la respuesta voltamperométrica de las secciones del suelo MCP38HS después un proceso de electroremediación al imponer una corriente de 0.5 mv durante 24 horas. En la figura 3, se muestra el análisis químico de cada fracción de suelo comparando con cada fracción de arena.

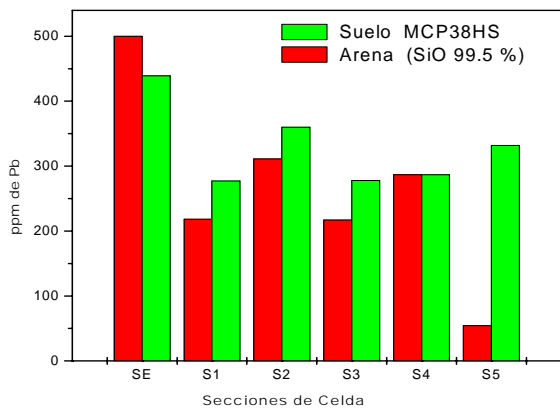


Figura3. Análisis químico de cada fracción de arena y suelo MCP38HS.

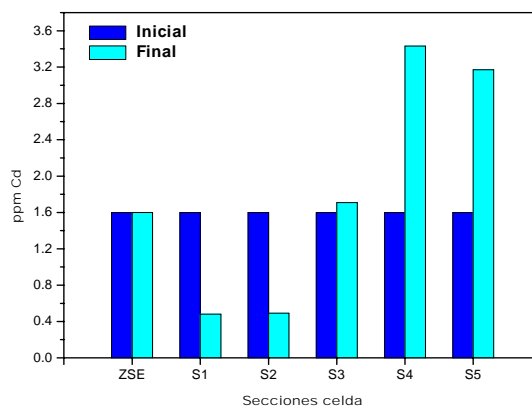


Figura 4. Análisis por ICP de cadmio para cada fracción de suelo MCP38HS.

En la figura3, se puede observar la variación de la concentración de Pb dentro de la celda. La tendencia de estos resultados concuerda con la caracterización electroquímica de la figura 2. Mientras que el comportamiento de la arena tomada como blanco presenta comportamiento similar, excepto en la S5 ya que en este experimento se observa un depósito blanco sobre la superficie del cátodo, lo que se puede atribuir a la acumulación de Pb en la sección 5. Es importante resaltar que la máxima disminución de Pb en el suelos es 37 % y en la arena 89.11 %. En la figura 4 se presenta la variación del Cd en el suelo MCP38HS, donde se observa que el Cd(II) se va acumulando cerca de la región catódica.

Resultados del Modelo Matemático:

La figura 5, muestra el movimiento del fluido, donde se observa que las velocidades correspondientes a un flujo laminar, por lo que no hay contribución al movimiento del fluido,

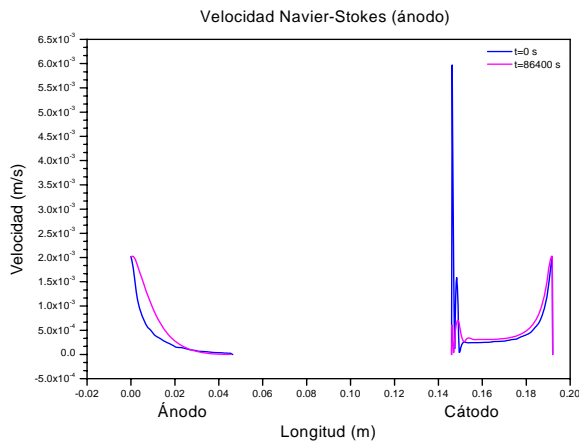


Figura 5. Representación gráfica a tiempo 0 y a 86400 segundos, de las velocidades calculadas por medio de la ecuación de Navier-Stokes dentro del compartimiento anódico y catódico.

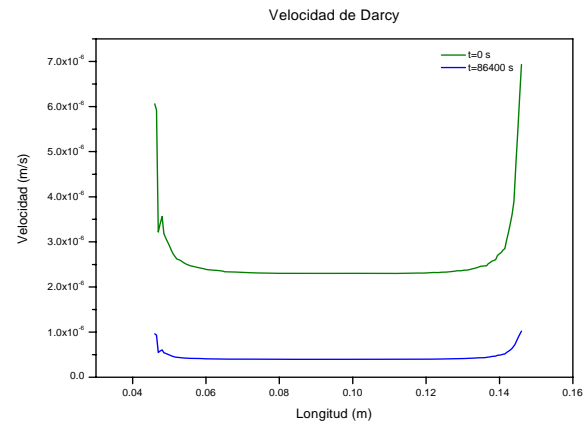


Figura 6. Representación (a) esquemática y (b) gráfica a tiempo 0 y a 86400 s de las velocidades calculadas para el fluido en un medio poroso a través de la ecuación de Darcy.

En la figura 6, se muestra las velocidades de Darcy, son de magnitud pequeña, por lo que la contribución al movimiento del fluido es despreciable, y se considera que las contribuciones por presión hidráulica, son mínimas, para el movimiento de las especies dentro de la celda.

En la figura 7, se muestra la distribución de potencial en un medio conductor, considerando al suelo humedecido como este medio, al aplicar una corriente constante durante las 24 horas, se puede apreciar que la distribución del potencial es constante a lo largo de toda la celda, y este no varía con respecto al tiempo.

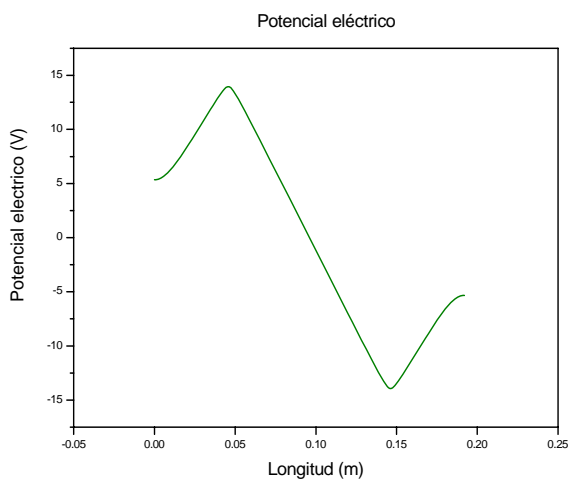


Figura 7. Representación de la distribución del potencial eléctrico dentro de toda la celda calculada por medio de la ecuación para medios conductores.

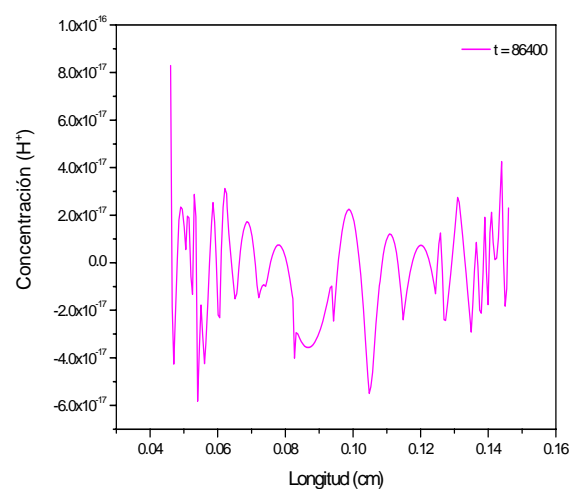


Figura 8. Representación esquemática, al tiempo final de la concentración del H⁺ generado dentro de la celda.

En la figura 8, se representa la distribución de la concentración final del H^+ , generado dentro de la celda debido a la reacción de electrolisis.

Se observa que al inicio del experimento se encuentra una concentración constante de la especie H^+ , considerando la constante de ionización del agua como concentración inicial, y factores como permeabilidad, tortuosidad, gradientes de presión y el potencial eléctrico generado entre los electrodos, se aprecia que al tiempo final se presenta una disminución en la concentración del H^+ , lo que representa una migración de ánodo a cátodo de la especie a lo largo de la celda.

Conclusiones:

- La celda de electroremediación no se alteran las propiedades físicas del suelo.
- Es posible caracterizar por medio de electrodos de pasta de carbono las fracciones de suelo electroremediado.
- El modelo matemático indica la migración del frente ácido a lo largo de la celda, el incremento del pH cerca de la región catódica y el comportamiento de este a través del tiempo.
- Los resultados del modelo matemático proporcionan el comportamiento de las diferentes variables que intervienen en el proceso de electroremediación, y las contribuciones para el balance de masa.
- Los resultados del modelo pueden servir de base para un futuro escalamiento del proceso de electroremediación.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al CONACYT y a la UAEH, por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

Referencias:

1. Armienta M.A, Villaseñor G, Romero FM, XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, México, 2005.
2. Ritcey G.M., *Tailings Management*, Elsevier, Amsterdam, 1989.
3. USEPA, Technical Document. Acid mine drainage prediction. EPA 530-R-94-036, NTIS PB94-201829, Environmental Protection Agency, USA, 1994.
4. Gray N.F., *Environmental Geology*, 1997 v. 30: 62-71.
5. Younger P.L., *The Science of the Total Environment*, 2000, v. 194-195, p 457-466.
6. Volke ST, Velasco JA. *Tecnologías de Remediación para suelos contaminados*. INE-SEMARNAT. 2002, México
7. Acar YB, Hamed JT, Alshawabkeh AN, Gale RJ, *Geotechnique*. 1994.
8. Ashawabkeh AN, Yeung AT, Brick MR, *J Environmental Engineering*. 1999. (125) 1:27-35
9. Acar YB, Gale JR, Putnam GA, Hamed J, Wong RL, *J Environ Sci Health*; 1990. A25 (6):687-714.
10. Jacobs RA, PhD Thesis. Two-dimensional modeling of the removal of contaminants from soils by electric fields. Massachusetts Institute of Technology. 1995.
11. Teutli-Leon MM, Oropeza MT, González I, and Soria A. *Journal American Institute of Chemical Engineers*. 2005. (51) 6:1822-1832.