

# **Remoción de sulfatos y precipitación de metales en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) con microorganismos sulfato reductores**

## **Sulfate removal and metal precipitation in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with sulfate reducing microorganisms**

**Manuel José Leal-Gutiérrez, Gabriela Quiahua-Salvador, Marisela Bernal-González, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda**

Universidad Nacional Autónoma de México, Av Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México, teléfono: 56225300 a 02, mcduran@unam.mx

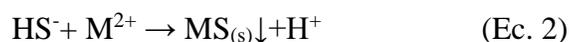
**Palabras clave:** Microorganismos sulfato reductores, precipitación, metales pesados, sulfato

**Key words:** Sulfate reducing microorganisms, precipitation, heavy metals, sulfate

### **Introducción**

En México, el sector minero-metalúrgico cumple un papel fundamental en la economía nacional generando más de 354,000 empleos (Subsecretaría de Minería, 2017) y contribuyendo con el 4 por ciento del Producto Interno Bruto (Secretaría de Economía, 2019). Esta actividad económica representa un fuerte impacto ambiental durante el proceso de extracción y recuperación de metales, por la generación de residuos, puesto que cerca del 95% del material procesado se desecha dentro de unas excavaciones con un dique de contención, denominadas presas de jales (Ojeda-Berra, 2008). A estas presas además del material sólido, llega el agua utilizada en el proceso y que contiene una concentración alta de metales disueltos en forma de sulfatos (Pacheco-Gutiérrez, 2006). Ante esta situación, se han evaluado diversas opciones que disminuyan el impacto ambiental causado por esta actividad industrial, entre ellas el tratamiento del agua residual a través de diversas tecnologías como son los tratamientos químicos de precipitación, resinas de intercambio iónico, membranas de electrodiálisis y ósmosis inversa, así como procesos biológicos pasivos, mediante humedales artificiales y de forma activa mediante bio-reactores. Entre estas opciones, se destacan los biorreactores con microorganismos sulfato-reductores, los cuales tienen la capacidad para degradar un sustrato carbonoso orgánico para obtener energía, utilizando los iones sulfato suspendidos como aceptor terminal de electrones, generando sulfuro de hidrógeno (Ec. 1, donde  $\text{CH}_2\text{O}$  representa una fuente de carbono

simple). Este sulfuro de hidrógeno reacciona con los iones metálicos, precipitando a los metales disueltos como sulfuros (Ec. 2, donde M representa un metal catiónico; por ejemplo:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ). Estos pueden, posteriormente, ser recuperados de la propia biomasa anaerobia (Ojeda-Berra, 2008; Schlegel, 1997). Con este fin, los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental del Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental del Conjunto E de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), han puesto en marcha un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio para el estudio del comportamiento del agua proveniente de la operación unitaria de flotación de una mina cooperante y el presente trabajo muestra los resultados obtenidos del RALLFA durante una operación estable de 20 semanas.



## Metodología

### *Influyente y efluente del RALLFA*

Diariamente se alimentan de manera intermitente 149 mL de agua proveniente de la operación unitaria de flotación de la mina cooperante, ubicada en el municipio de Zacazonapan, Estado de México, 1 mL de ácido láctico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ), como fuente de carbono y 0.4 g de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), como fuente de alcalinidad al sistema, a un RALLFA a escala de laboratorio (con dimensiones de 300 mm de altura y un diámetro externo de 120mm, teniendo un volumen total de 2.2 L y un volumen de trabajo de 1.9 L) (Ojeda-Berra, 2008; Ríos Vázquez, 2009). Para mantener el volumen de líquido constante dentro del reactor, es necesario retirar la misma cantidad de efluente.

### *Seguimiento del RALLFA*

Para el control de la operación del RALLFA se realiza diariamente la determinación del pH, conductividad eléctrica y, dos veces por semana, se lleva a cabo la determinación de sulfuros, sulfatos y metales, de acuerdo con las normas mexicanas vigentes, tanto para el influente como el efluente líquido del reactor.

## Resultados y Discusión

### *Transformación de sulfatos a sulfuros*

La Figura 1 presenta la concentración de sulfatos durante el periodo de seguimiento, donde se alcanza una degradación promedio del 84.9% de los sulfatos en el interior del RALLFA, la cual es atribuida a la acción de los MSR (Kaksonen y Puhakka, 2007) y tiene como resultado la generación de sulfuros al interior del mismo. De este compuesto se tiene una concentración promedio de 1.24 mg/L en el influente y una concentración de 104.85 mg/L en el efluente (Figura 2). Sin embargo, esta concentración no contabiliza la totalidad de

sulfuros generados por los MSR, puesto que una parte de estos reacciona con los iones metálicos presentes en el medio y otra parte abandona el reactor en la corriente gaseosa.

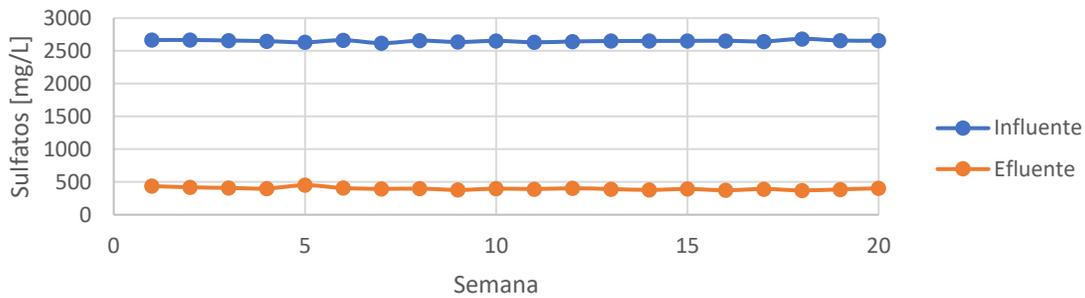


Figura 1. Comportamiento de los sulfatos en el biorreactor

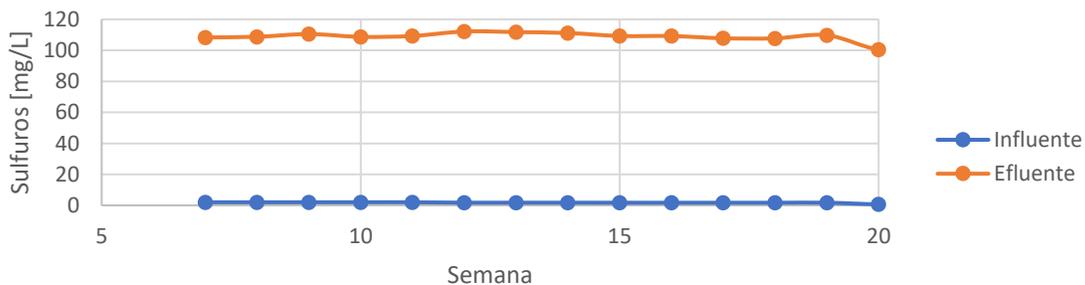


Figura 2. Comportamiento de los sulfuros en el biorreactor

### Valor del pH en el RALLFA

Además de la formación de sulfuros, la degradación de los sulfatos también genera iones bicarbonatos (Ec. 1), lo cual repercute de forma directa en el aumento del pH en el RALLFA. Durante el periodo de monitoreo se presentó un pH promedio de 3.01 en el influente y un pH promedio de 6.83 en el efluente.

### Precipitación de metales

En la Figura 3 se observan las concentraciones de cobre, zinc, hierro y plomo en el influente y efluente del RALLFA, durante el periodo de seguimiento, donde se alcanzó un porcentaje de remoción promedio del 52.8% del cobre, 84.5% del zinc, 62.3% del hierro y 46.4% del plomo. Esta diferencia quedó en fase sólida en el interior del reactor en forma de sulfuros que pudieran estar ocluidos en los gránulos de biomasa o separados en forma de precipitados (Paulo y col., 2015).

### Conclusiones

El tratamiento biológico con microorganismos sulfato reductores es una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales o de proceso con altos contenidos de sulfatos. La reacción de los metales disueltos en el agua con sulfuro de hidrógeno tiene un beneficio

doble en el proceso: la precipitación (y posterior remoción) de los metales, así como el consumo de una parte del sulfuro de hidrógeno el cual está asociado a problemas de corrosión.

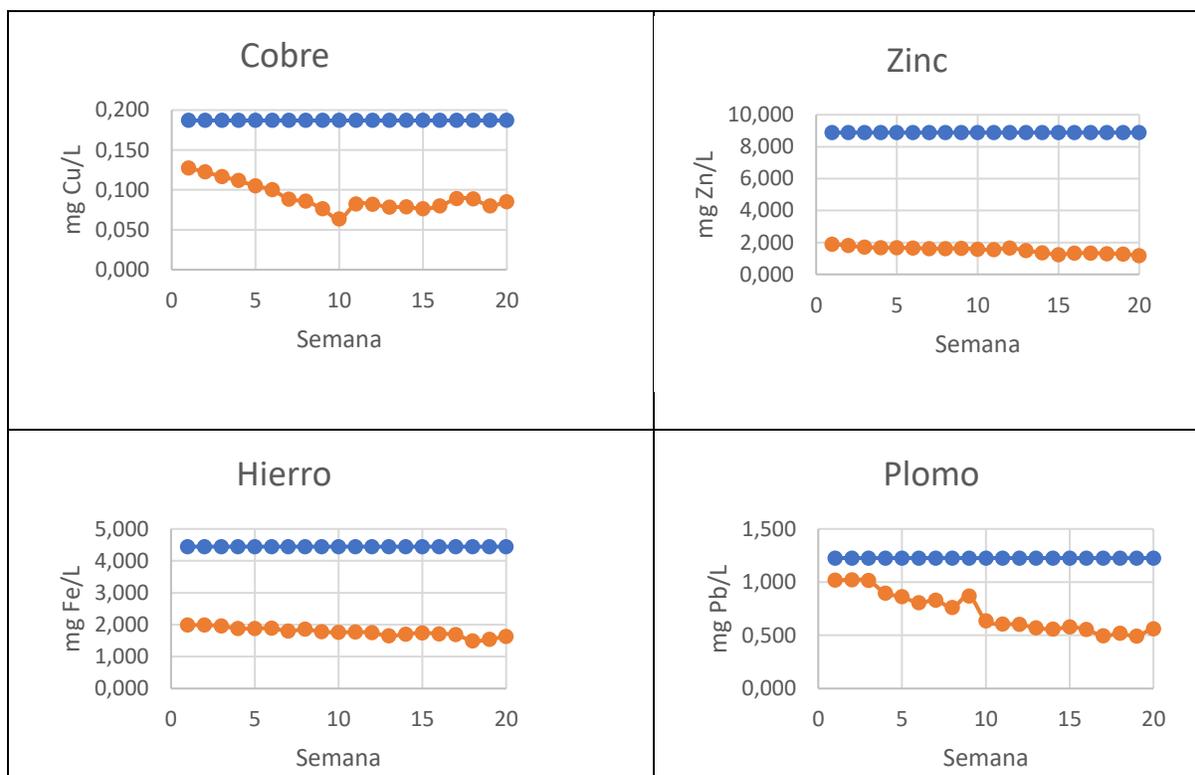


Figura 4. Comportamiento del cobre, zinc, hierro y plomo en el proceso (Azul: Influyente, Naranja: Efluente)

Una vez sin estos componentes disueltos en ella puede reciclarse al proceso sin crear problemas en la planta y sin tener que usar tanta agua de manantiales para el proceso minero que pueden ser aprovechados por las poblaciones aledañas.

## Bibliografía

- Kaksonen, A.H., Puhakka, J.A. (2007). *Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals*. Engineering in LifeSciences. 7(6):541-564.
- Ojeda-Berra, L. (2008). *Modelo matemático de un reactor anaerobio con bacterias sulfatorreductoras para el tratamiento del efluente del proceso de flotación de una planta minera*. Tesis de maestría en Ingeniería Química (Procesos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México. 132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0632235/Index.html
- Pacheco-Gutiérrez, L.A. (2006). *Propuesta de aprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando sistemas biológicos anaerobios*. Tesis de maestría en Ingeniería Química (Procesos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México. 132.248.9.195/pd2006/0606818/Index.html
- Paulo, L.M., Stams, A., Sousa, D.Z. (2015). *Methanogens, sulphate and heavy metals: a complex system*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology. 14(4):537-553.
- Ríos-Vázquez, J.L. (2009). *Diseño, construcción y arranque de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente para el estudio de la precipitación de metales de efluentes de la industria minera*. Tesis profesional de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México. 132.248.9.195/ptd2009/marzo/0641028/Index.html
- Schlegel, H.G. (1997). *Microbiología general*. Ediciones Omega. PP 343-349. 7ma edición., Barcelona, España.
- Secretaría de Economía. (2019). *Minería*. Dirección electrónica: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Subsecretaría de Minería. (2017). *Prontuario industria minero-metalúrgica*. Dirección electrónica: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227657/Prontuario\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227657/Prontuario_2017.pdf)