

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



VII SIMPOSIO  
INTERNACIONAL DE  
QUÍMICA 2019  
XII CONFERENCIA  
“LA INGENIERÍA  
QUÍMICA:  
DESARROLLO,  
POTENCIALIDADES Y  
SUS RETOS”

**Bioconversión de sulfatos a sulfuros de un efluente de flotación minero  
usando un RALLFA**

*Bioconversion of sulfates to sulfides of a mine flotation effluent using a  
UASB reactor*

Marisela Bernal-González<sup>1</sup>, Andrei Moamet Castillo-Garduño<sup>2</sup>, Leonel Miguel Barrera-Mena<sup>3</sup>, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa<sup>4</sup>, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, 04510 Ciudad de México. México

*E-mails:* <sup>1</sup>marisela\_bernal2000@yahoo.com; <sup>2</sup>moametcg@gmail.com;

<sup>3</sup>leonelbmss@gmail.com; <sup>4</sup>mcduran@unam.mx, <sup>5</sup>erbr@unam.mx

**Resumen:** La explotación de minerales produce la descarga de aguas residuales que contienen altas concentraciones de metales pesados disueltos, así como de compuestos orgánicos e inorgánicos utilizados en las etapas de extracción y concentración. Una opción para reutilizar estos efluentes industriales es tratarlos. Los biológicos son económicos, eficientes, con altas tasas de remoción y pueden tratar grandes volúmenes de aguas residuales. El tratamiento biológico mediante un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) que contiene bacterias sulfato-reductoras permite reducir los sulfatos presentes en el agua residual proveniente del proceso de flotación de la industria minera a sulfuros, los cuales con las condiciones apropiadas de pH, se

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

precipitan como sulfuros metálicos, disminuyendo la concentración de sulfatos a la salida del sistema, así como de metales disueltos. El objetivo de esta investigación fue evaluar la transformación de sulfatos a sulfuros en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, a escala de laboratorio, variando el contenido de sustratos carbonosos inorgánicos y orgánicos medidos como demanda química de oxígeno con respecto de la cantidad de sulfatos presente en el influente ( $\text{DQO}:\text{SO}_4^{-2}$ ) suministrado al RALLFA. Los resultados obtenidos demuestran que conforme la relación  $\text{DQO}:\text{SO}_4^{-2}$  disminuye, la cantidad de sulfuros y de  $\text{H}_2\text{S}_{\text{ac}}$  se incrementa y, por lo tanto, el pH del sistema disminuye y la remoción de materia orgánica decae. Es importante encontrar la relación óptima  $\text{DQO}:\text{SO}_4^{-2}$  para lograr mejores resultados de depuración del agua para su reciclado al propio proceso.

**Abstract:** *Minerals extraction and concentration produces wastewaters containing dissolved heavy metals, as well as organic and inorganic compounds used for the extraction and concentration stages. An option to reuse these industrial effluents is to remove these compounds. Biological systems are low-cost, efficient, with high removal rates, and may handle great volumes of wastewaters. Biological treatment using an up-flow anaerobic sludge blanket reactors (UASB reactors) containing sulfate-reducing bacteria help to reduce sulfates dissolved in the wastewaters from the flotation step of a mine industry to sulfides. These sulfides at an appropriate pH may precipitate as metallic sulfides, reducing both sulfates concentrations as well as dissolved metals. The objective of this research was to evaluate the transformation of sulfates to sulfides in a UASB reactor at laboratory scale varying the contents of carbon substrates both organic and inorganic globally measured as chemical oxygen demand with respect to the amount of sulfates present in the influent ( $\text{COD}:\text{SO}_4^{-2}$ ) fed to the UASB reactor. Results obtained indicate that as the ratio  $\text{COD}:\text{SO}_4^{-2}$  is reduced, the amount of sulfides and  $\text{H}_2\text{S}_{\text{ac}}$  increases and, in consequence, system pH values decrease as well as organic and inorganic matter removal also diminishes. It is important to find the optimum ratio  $\text{COD}:\text{SO}_4^{-2}$  to find the best conditions to eliminate sulfates and dissolved metals from water to recycle it to the mine process.*

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

**Palabras Clave:** Sulfatos; Sulfuros; Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente RALLFA; Efluente de flotación; Mina de plomo-zinc-cobre

**Keywords:** *Sulfates; Sulfides; Up-flow anaerobic sludge blanket UASB reactors; Flotation effluent; Lead-zinc-copper mine*

## 1. Introducción

### 1.1. Problemática

Existen varios factores que exigen el reciclaje de agua en los procesos mineros, entre los que se destacan que el volumen de agua utilizado puede representar una porción importante de las fuentes locales y que el empleo de agua de un solo uso de fuentes alejadas, implicaría un incremento de costos para la industria (Bazúa-Rueda y col., 2019; Nedved y Jansz, 2006; Pacheco-Gutiérrez y Durán-de-Bazúa, 2006). Algunas empresas mineras han instalado sistemas para recuperar el agua residual del proceso de flotación después de separar el material sólido sedimentable en las presas de jales, bombeándola de regreso al proceso y, con ello, además de disminuir los costos de obtención de agua de un solo uso, se disminuye el volumen de descarga de las operaciones mineras (Dobson y Burgess, 2007; González-Sandoval, 2006). Sin embargo, el empleo del agua recirculada desde la presa de jales (palabra usada en México para designar a los materiales sólidos muy finos: del náhuatl *xalli*, arenas o partículas muy finas, ya que al no tener en español el sonido “sh” se usó la “x” del vasco y catalán, que después se transformó en “j”, aunque en la palabra México se conservó la “x” pero se pronuncia “j”, Cabrera, 2002), acarrea problemas de eficiencia en el proceso de concentración de los minerales. Esto se debe a la presencia de materiales orgánicos carbonosos en disolución en el agua retornada sin tratamiento, como: xantatos residuales y sus productos de oxidación (dixantógenos) que absorben en forma selectiva a la mayoría de los sulfatos y sulfuros residuales teniendo presencia de iones metálicos disueltos como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , que causan una activación indeseada y, finalmente, iones alcalinos que activan la ganga no sulfurosa, ocasionando efectos negativos en la eficiencia del proceso de flotación de los minerales valiosos, por el grado y porcentaje de especies disueltas (orgánicas e inorgánicas) que se acumulan durante

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

la operación (Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2007; Shengo et al., 2014). Para disminuir el consumo de agua de un solo uso de esta industria es necesario desarrollar un tren de tratamiento del agua de proceso y del agua presente en la presa de jales. Las tecnologías alternativas para el tratamiento son aquellas que se basan en procesos biológicos como el reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) los cuales utilizan microorganismos (entre los que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes solubles (Lettinga et al., 1980; McCartney y Oleszkiewicz, 1991, 1993; Obrequé-Contreras et al., 2015; Ojeda-Berra et al., 2010). En ellos se aprovecha la capacidad de los microorganismos para asimilar la materia orgánica y los nutrientes disueltos en la fase acuosa (carbono, nitrógeno y fósforo) para su propio desarrollo (Salgado-Bernal y col., 2012).

## 1.2. Objetivos

El objetivo general fue el de valorar la precipitación de sulfuros metálicos en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) alimentado con un efluente proveniente del proceso de flotación de una planta minera. Los objetivos particulares fueron los de caracterizar mediante algunos parámetros fisicoquímicos el agua proveniente del proceso de flotación de una planta minera cooperante, operar un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio, medir en el RALLFA de laboratorio algunos parámetros de operación y seguimiento como la demanda química de oxígeno (DQO), los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y los sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ), así como el pH, la alcalinidad y la temperatura (T), así como determinar la concentración de los metales Cu, Fe, Pb y Zn mediante espectrometría de absorción atómica (EAA).

## 2. Metodología

### 2.1. Sistema de tratamiento biológico

Se utilizó un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio que se presenta en la Fig. 2.1. Está construido de vidrio, con un diámetro externo de 120mm y una altura de 300mm, además cuenta con un serpentín, también de vidrio, para recircular agua y mantener el reactor a una temperatura constante. Tiene un separador de gases líquido-sólido-gas, conocido como campana, ubicado en la parte

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

superior del mismo. En este reactor la biomasa bacteriana está presente en forma de granos compactos (Fig. 2.2), que se desarrollan bajo condiciones de flujo ascendente continuo. Su volumen de trabajo es de 1.9L. El sistema es operado por lotes con el fin de reducir el tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 12.6 días, para alcanzar de esta manera condiciones de operación continua, dosificando diariamente 150 mL de agua proveniente del proceso de flotación de la mina cooperante (AP) (Fig. 2.3).



Fig. 2.1. Reactor tipo RALLFA (Poblete-Mier, 2015)



Fig. 2.2. RALLFA a escala de laboratorio instalado (Poblete-Mier, 2015)



Fig. 2.3. Sistema completo del RALLFA (Poblete-Mier, 2015)

## 2.2. Agua proveniente del proceso de flotación de la mina (AP)

Las muestras de agua se toman del proceso de flotación de una mina cooperante. Es transportada en contenedores de 19L de capacidad, desde la mina cooperante a los Laboratorios 301, 302 y 303 del Edificio E-3 del Conjunto E de la Facultad de Química de la UNAM sin refrigeración. Una vez en los laboratorios se mantienen en refrigeración a 4°C hasta su uso.

## 2.3. Alimentación del sistema

Diariamente se alimentaron 150 mL de influente. Este fue variando su composición para observar el efecto de distintas relaciones  $DQO:SO_4^{2-}$ , en el comportamiento del reactor. La alimentación estaba compuesta por agua proveniente del proceso de flotación adicionando

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

medio de cultivo general (MCG) (Vergara-Salgado, 2010), agua sintética (AS) (Orduña-Bustamante, 2012) y ácido láctico (AL). Las etapas de alimentación se presentan en la Tabla 2.1, donde se emplea el punto decimal (DOF, 2009). El sistema completo se presenta en la Fig. 2.4.



Fig. 2.4. Sistema completo del reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) instalado en el laboratorio

#### 2.4. Parámetros de seguimiento

Diariamente se alimentaron 150 mL de influente. Este fue variando su composición de acuerdo con la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Etapas de alimentación ( 150 mL/d) del RALLFA

Etapa	Semana	NaHCO <sub>3</sub> (g)	ARS (mL)	MCG (mL)	AL (mL)	AP (mL)	Relación DQO:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	1	0.25	4.87 <sub>(ARS1)</sub>	0	0	145.13	0.05
	2	0.125	4.87 <sub>(ARS1)</sub>	0	0	145.13	
	3 - 5	0	4.87 <sub>(ARS1)</sub>	0	0	145.13	
2	6 - 8	0	5.66 <sub>(ARS2)</sub>	0	0	144.34	0.10
3	9	1	14 <sub>(ARS3)</sub>	0	0	136	1.03
	10	0.5	14 <sub>(ARS3)</sub>	0	0	136	
	11	0.25	14 <sub>(ARS3)</sub>	0	0	136	
	12	0.125	14 <sub>(ARS3)</sub>	0	0	136	
	13	0.125	10 <sub>(ARS3)</sub>	0	0	140	
4	14	0.5	0	75	0	75	0.86
5	14	0.5	0	75	0	75	1.16

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**

Etapa	Semana	NaHCO <sub>3</sub> (g)	ARS (mL)	MCG (mL)	AL (mL)	AP (mL)	Relación DQO:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
6	15	0.3	0	37.5	0	112.5	0.60
7	16	0.2	0	18.75	0	131.25	0.23
8	17	2	0	0	1	149	1.16
	18	1.5	0	0	1	149	
	19	0.75	0	0	1	149	
	20	0.35	0	0	1	149	
	21	0.15	0	0	1	149	
	22 - 30	0	0	0	1	149	

**Agua del proceso de flotación=AP; Medio de cultivo general=MCG; Agua residual sintética=ARS; ARS<sub>1</sub> con 7.13g/L sacarosa; ARS<sub>2</sub> con 20.57g/L sacarosa; ARS<sub>3</sub> con 63.0g/L sacarosa; AL= Ácido láctico**

Los parámetros de operación y seguimiento evaluados fueron la demanda química de oxígeno, DQO (DOF, 2001a), los sulfatos, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (DOF, 1981) y los sulfuros, S<sup>2-</sup> (DOF, 1982), así como el pH (DOF, 2011), la alcalinidad (DOF, 2001b) y la temperatura, T (DOF, 2013), así como la concentración de los metales Cu, Fe, Pb y Zn mediante espectrometría de absorción atómica, EAA (DOF, 2001c; EPA 3005A, 1992). El análisis estadístico de los datos experimentales se realizó con el programa Statgraphics Centurion XVII. (2007). Para diferencias significativas (p<0.05) entre los datos obtenidos se utilizó el análisis de varianza de una vía (andeva), considerando que los datos cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza estimados por el método de Levene.

### **3. Resultados y discusión**

En la Tabla 3.1 se muestra la caracterización realizada al agua proveniente del proceso de flotación de la mina (AP), donde se puede observar la alta cantidad de sulfatos (5734.9 ± 278 mg/L), baja DQO (105.7 ± 16 mg/L), prácticamente sin sulfuros presentes, además de un pH muy ácido, alrededor de 2. Respecto a los metales pesados presentes se tiene un 0.18, 3.54, 7.0 y 1.90 mg/L de cobre, hierro, zinc y plomo, respectivamente. Los valores de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> son similares a los reportados por González-Sandoval (2010), pero no a Espinosa González (2014), lo cual puede deberse a la oxidación de los sulfuros presentes en el momento de ser expuestos al almacenamiento y el tiempo transcurrido antes de proceder al análisis. González-Sandoval reporta valores correspondientes a diferentes puntos de muestreo que van desde 3800 hasta 6140 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L en el cárcamo de bombeo, mientras

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

que en el tanques de reproceso la concentración de sulfatos es de 4280 y 5730 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L mínimo y máximo, respectivamente, dependiendo el mes.

Tabla 3.1. Caracterización del agua proveniente del proceso de flotación (AP)

Parámetro	Valor
Valor de pH	2.2±0.1
DQO (mg/L)	105.73 ±16.864
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	5734.90 ±278.372
S <sup>2-</sup> (mg/L)	0.00
Temperatura (°C)	28.13 ±0.184
Cu (mg/L)	0.18 ± 0.08
Fe (mg/L)	3.54 ± 2.29
Zn (mg/L)	7.0 ± 3.18
Pb (mg/L)	1.90 ± 0.15

Espinosa-González determinó la concentración de sulfatos en el AP obteniendo como valor mínimo 1320 y 1740 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L como máximo; con un valor de sulfuros de 90 mg/L. Los valores de cobre y hierro obtenidos por González-Sandoval (2010) se encuentran por debajo de los obtenidos en la presente investigación (0.098 y 1.236 mg/L, respectivamente). Mientras que el Pb se reporta en dicho trabajo con una concentración de 3.229 mg/L y el zinc con 19.98 mg/L en muestras provenientes de la presa de jales. Sin embargo la concentración de plomo reportado en el cárcamo de bombeo, fue similar al obtenido en esta investigación de 1.9 mg/L.

### 3.1. Determinación de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

La concentración de sulfatos presentes en el agua proveniente del proceso de flotación (AP), fue 6987 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L (Figura 3.1). La concentración del influente del RALLFA durante la primera etapa (semana 1 a 5) se encontró un valor promedio de 6570 ± 1100 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, para la segunda etapa fue de 6662± 952 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L debido al complemento que se utilizó para la alimentación con el ARS<sub>2</sub>. Durante la tercera etapa se obtuvo una concentración de 6497 ± 1192 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L promedio, donde el aumento de sacarosa en el ARS<sub>3</sub> aumentó la relación DQO/SO<sub>4</sub> a 0.65 como valor promedio en la etapa (según el punto 3.3.2). De la cuarta a la séptima etapa (semanas 13 a 16, respectivamente), la concentración de los sulfatos durante la semana 13 presentes en la alimentación fue de 5663.28 ± 555 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, adicionando 0.125g de bicarbonato de sodio. Sin embargo, la

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)



PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

acidificación del sistema debido a la acumulación de AGV y la poca degradación de los mismos, tuvo que ser contrarrestada con la mezcla en la alimentación del medio de cultivo general en la semana 14. Por tanto, los sulfatos disminuyeron a  $2411.35 \pm 123 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$  para la quinta etapa. En las siguientes dos etapas (sexta y séptima) el valor obtenido fue de  $3506.38 \pm 87$  y  $4087.94 \pm 79 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ , respectivamente. Con un 50, 25 y 12.75% de medio de cultivo general (MCG) en la alimentación del RALLFA para la 5, 6 y 7 etapa (ver Tabla 2.1). Por último, la etapa en la cual se adicione ácido láctico a la alimentación del RALLFA, estuvo conformada por 7 semanas, con un promedio de sulfatos presentes de  $5289.16 \pm 355 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$  y un máximo en porcentaje de remoción en la última semana (64%) mostrado en las Figuras 3.2 y 3.3.

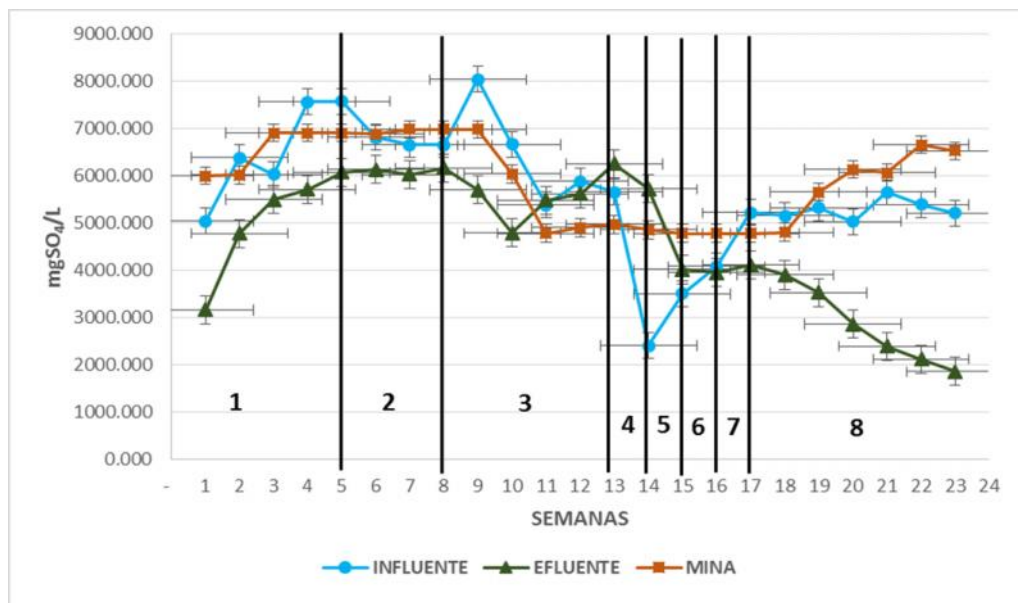


Fig. 3.1. Comportamiento de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en el RALLFA de la semana 1 a la 23 (MINA=Agua de proceso, AP)

Respecto a los porcentajes de remoción por etapa, claramente la octava etapa mostró mejores resultados con un 43.8% en general y una remoción nula para las etapas cuarta, quinta y sexta que corresponden a las semanas 13, 14 y 15, respectivamente. La máxima remoción fue de 64.27%, durante la semana 23, por lo tanto, se puede decir que la mejor alimentación sería con ácido láctico obteniendo una relación  $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$  de 0.78.

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

### 3.2. Determinación de sulfuros ( $S^{2-}$ )

La concentración de  $mg S^{2-}/L$  en el RALLFA fueron determinados en el AP, influente y efluente. El AP no cuenta con sulfuros presentes, esto puede deberse a la oxidación de estos a sulfatos debido a su exposición a las condiciones ambientales y al almacenamiento.

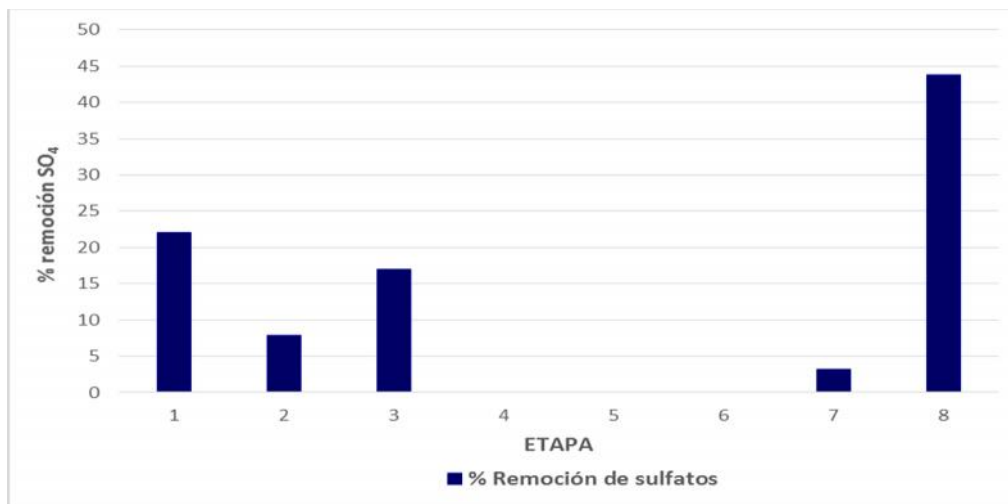


Fig. 3.2. Comportamiento del porcentajes de remoción de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) en el RALLFA por etapa

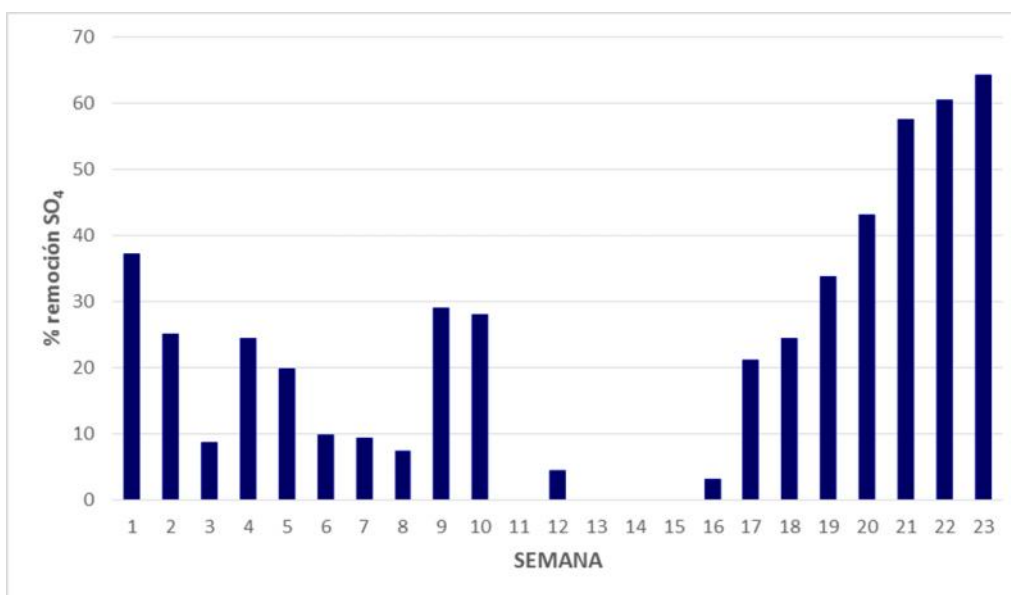


Fig. 3.3. Comportamiento del porcentaje de remoción de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) en el RALLFA por semana

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

Por lo tanto, el influente presentó valores bajos de  $0.92 \pm 1.12$ ,  $0.12 \pm 0.3$ ,  $1.32 \pm 1.4$  mg  $S^{2-}/L$  para las etapas 1, 2 y 3, respectivamente. En la cuarta etapa el valor fue de  $1.6 \pm 0.97$  mg  $S^{2-}/L$ , durante las etapas que comprenden el periodo de alimentación con MCG se tuvieron valores de  $1.28 \pm 0.44$ ,  $0.96 \pm 0.66$  y  $1.28 \pm 0.44$  mg  $S^{2-}/L$ , para las etapas 5, 6 y 7 respectivamente. La octava etapa presentó un aumento a  $4.34 \pm 3$  mg  $S^{2-}/L$  promedio, que puede ser a las interferencias presentadas por la cantidad de bicarbonato, sin embargo, el valor es mínimo y no afectó de manera significativa los sulfuros producidos en el reactor (Figura 3.4).

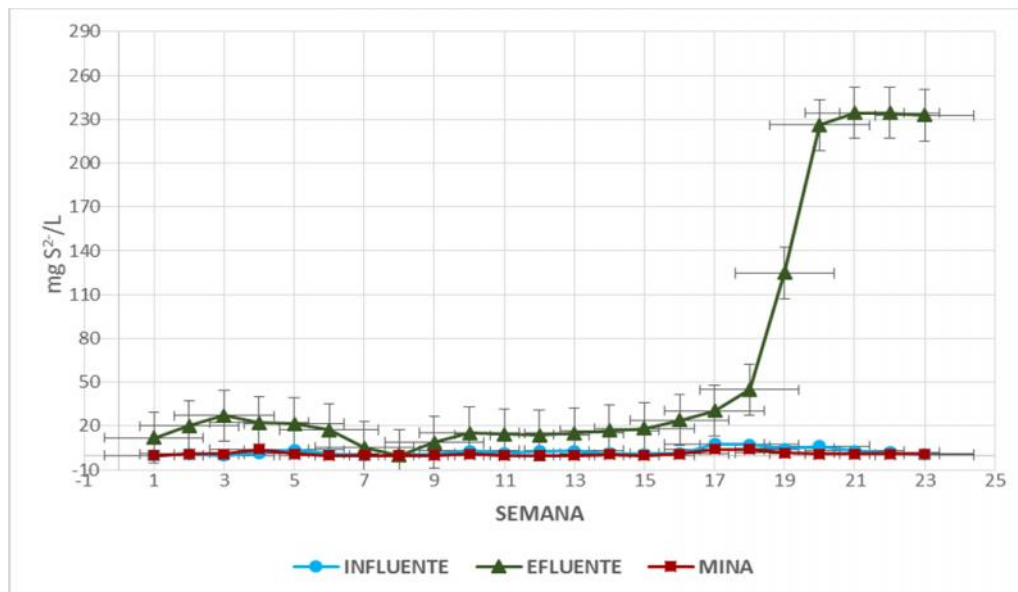


Fig. 3.4. Comportamiento de sulfuros ( $S^{2-}$ ) en el RALLFA de la semana 1 a la 23 (MINA=Agua de proceso, AP)

Por el contrario, la producción de sulfuros se vio reflejada en el aumento de la concentración en el efluente del RALLFA a lo largo de las 23 semanas (Figura 3.5). En la primera etapa, se produjeron  $20.47 \pm 7$  mg  $S^{2-}/L$  promedio y 32.8 mg sulfuro como máximo en la tercer semana. La segunda etapa tuvo un descenso a  $2.77 \pm 5.74$  y un máximo de 20 mg  $S^{2-}/L$  pero no suficiente, todo esto debido a la acidificación. En cuanto a la tercera etapa, la producción se elevó a  $13 \pm 3.86$  mg  $S^{2-}/L$  que pudo ser por el cambio de ARS con mayor sacarosa ya que la cuarta etapa 4 presentó una cantidad similar,  $13.6 \pm 5.36$  mg  $S^{2-}/L$ , pero distinta relación DQO/ $SO_4$  0.65 y 0.56, respectivamente (Figura 3.5).

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

Para las etapas conformadas con un porcentaje de medio de cultivo general MCG, correspondiente a la etapa 5, 6 y 7, los sulfuros producidos en el RALLFA aumentaron gradualmente (Figura 3.5) a  $16 \pm 4$ ,  $18.4 \pm 5.36$  y  $24 \pm 7.48$  mg S<sup>2-</sup>/L, respectivamente, y en forma notable para la octava etapa, donde se determinó un máximo de 288 mg S<sup>2-</sup>/L en la última semana. Además, el reactor se continúa operando actualmente, y se obtuvieron valores aún más altos de remoción de sulfatos, DQO y producción de sulfuros, por lo que, definitivamente la etapa que corresponde a la alimentación con el ácido láctico es considerada la mejor. Los valores reportados se refieren a los promedios semanales y por etapas, por lo tanto, se mencionan algunos valores máximos obtenidos en la experimentación.

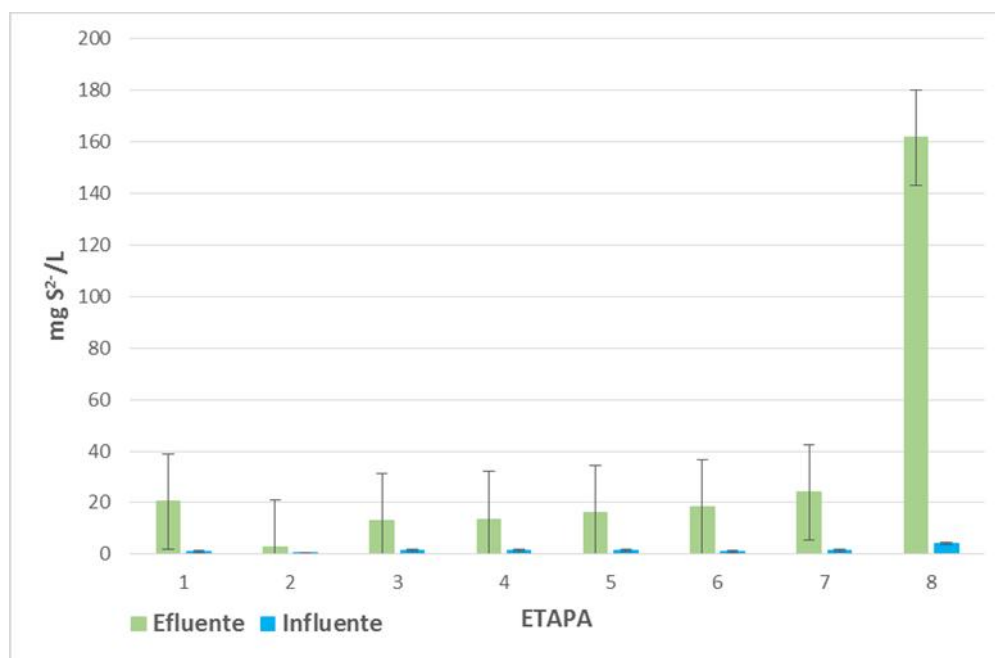


Fig. 3.5. Comportamiento de sulfuros (S<sup>2-</sup>) producidos en el RALLFA por etapa

### 3.3. Contenidos de metales: cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb)

#### 3.3.1. Cobre

El valor del cobre en el AP fue el más bajo de los cuatro metales; la concentración en el **influyente** para la primera etapa fue  $0.1324 \pm 0.006$  mg Cu/L, durante la segunda etapa el valor aumentó ligeramente a  $0.1692 \pm 0.015$  mg Cu/L, mientras que la máxima

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

concentración se presentó en la tercera etapa con  $0.2023 \pm 0.024$  mg Cu/L, esto fue debido al tipo de alimentación proporcionada al RALLFA (Figura 3.6).

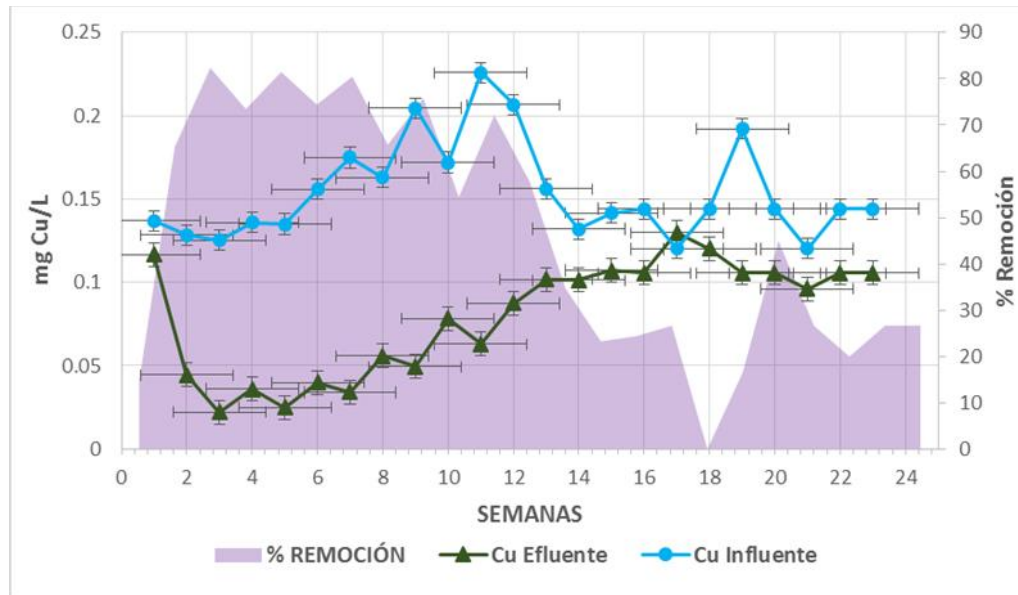


Fig. 3.6. Comportamiento del cobre (Cu) en el RALLFA de la semana 1 a la 23

En la última semana de la cuarta etapa (semana 13) en la que se alimentó ARS, el valor de cobre obtenido fue 0.1561 mg/L, logrando un porcentaje de remoción de 34.7%. Para el periodo en el cual el RALLFA fue alimentado con MCG, el cobre en el influente disminuyó a 0.1321, 0.1417 y 0.1441 mg Cu/L en la quinta, sexta y séptima etapas, respectivamente. Durante la octava etapa la concentración en el influente fue de  $0.1441 \pm 0.023$  mg Cu/L con un valor máximo de 0.1922, no se presentó remoción en la primera semana, esto pudo deberse al periodo de crecimiento de la ecología microbiana, por lo que, el sistema se encontraba en una fase de transición. Mientras que la remoción en promedio de esta etapa fue de 23.8%. El efluente alcanzó concentraciones de 0.0221 mg Cu/L en la tercer semana, lo cual se reflejó en porcentajes de remoción de 82.35 como máximo y 64.3% promedio para la primer etapa. En la segunda etapa, los valores a la salida fueron menores a 0.05 mgCu/L, con remociones alrededor del 73% promedio. En la tercera etapa, la acidificación del sistema aumentó la concentración de cobre a  $0.0695 \pm 0.0197$  mg Cu/L promedio y máximo de 0.098 mgCu/L. Una vez que se alcanzó el valor alrededor de 0.1 mgCu/L en la cuarta etapa, se mantuvo hasta el final de la experimentación,

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

independientemente del cambio de alimentaciones y estabilidad del reactor y dando como resultado remociones variadas y no muy elevadas respecto a las iniciales. El mayor porcentaje de remoción de cobre fue de 82.35% como ya se mencionó, en la etapa alimentada con ARS correspondiente a la menor cantidad de sacarosa.

### 3.3.2. Hierro

Como se puede observar en la Figura 3.7, el comportamiento del hierro en el influente y efluente fue muy similar durante la mayoría del experimento. Por ejemplo, las primeras 9 semanas, prácticamente no hubo remoción de este metal. Es en la semana 10 (Etapa 3), donde el porcentaje de remoción fue de 47.3%. La siguiente semana de 64.25%, con un valor de 2.67 y 0.9558 mg Fe/L en alimentación y efluente, respectivamente. Sin embargo, la cuarta y quinta etapa, nuevamente no se presentó remoción de hierro. El efluente, se comporta de la misma manera que la alimentación, con valores cercanos a 3 mg Fe/L en ambos periodos.

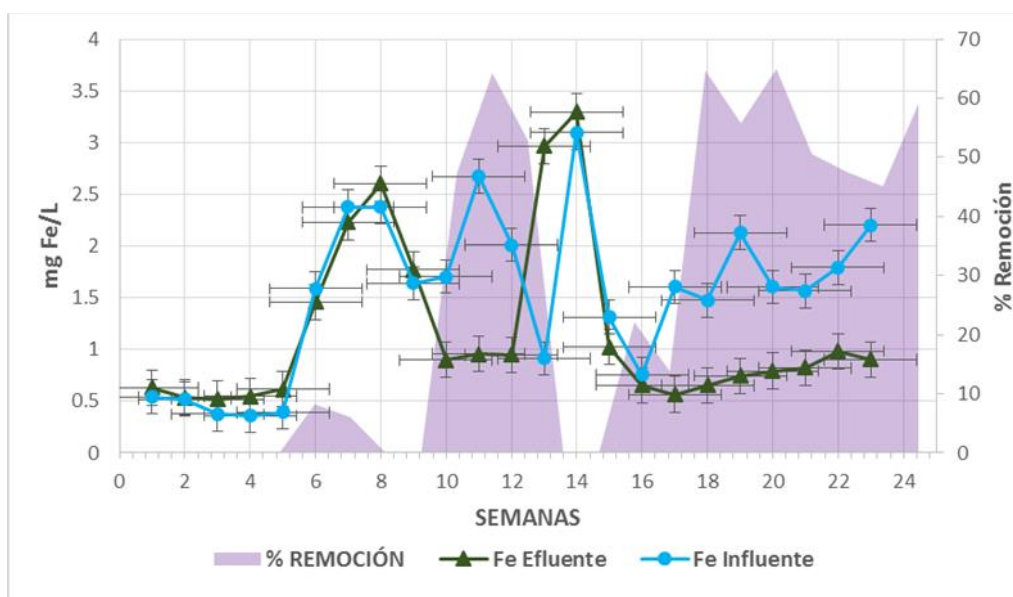


Figura 3.7. Comportamiento del hierro (Fe) en el RALLFA de la semana 1 a la 23

A partir de la semana 15, se presentan remociones de hierro, ya que el reactor se estabilizó, evitando la solubilidad del hierro a pH más bajos. La acción del MCG ayudó a reducir la cantidad de hierro en la salida del reactor, ya que durante la última fase el valor del

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

influyente fue de  $1.7669 \pm 0.271$  mg Fe/L mientras que en el efluente se logró obtener  $0.6538 \pm 0.049$  mg Fe/L, permitiendo que durante la octava etapa se presentara una remoción del 55%, con un máximo de 65% en la semana 19.

### 3.3.3. Determinación de zinc (Zn)

La remoción del zinc se mantuvo más estable durante toda la experimentación, pues solamente en 2 semanas no se presentó remoción (Figura 3.8). El influente manejó un valor de  $3.0787 \pm 1.135$  mg Zn/L en la primera etapa. El segundo periodo registró un aumento a  $4.8934 \pm 2.108$  mg Zn/L en la alimentación. Para la tercera etapa el promedio fue de  $5.9614 \pm 1.7589$  mg Zn/L, con un valor máximo de 7.778 mg Zn/L en la semana 11. Los porcentajes de remoción en las primeras 3 etapas fueron de 37.27, 78.94 y 89.24%, respectivamente. Valores considerablemente altos, respecto al Fe y Cu. La cuarta etapa mostró una concentración de 3.7131 mg Zn/L en el influente, que significó la reducción casi a la mitad respecto a la etapa anterior. El efluente rondó el valor de 1 mg Zn/L, con un porcentaje de remoción de 71.90%.

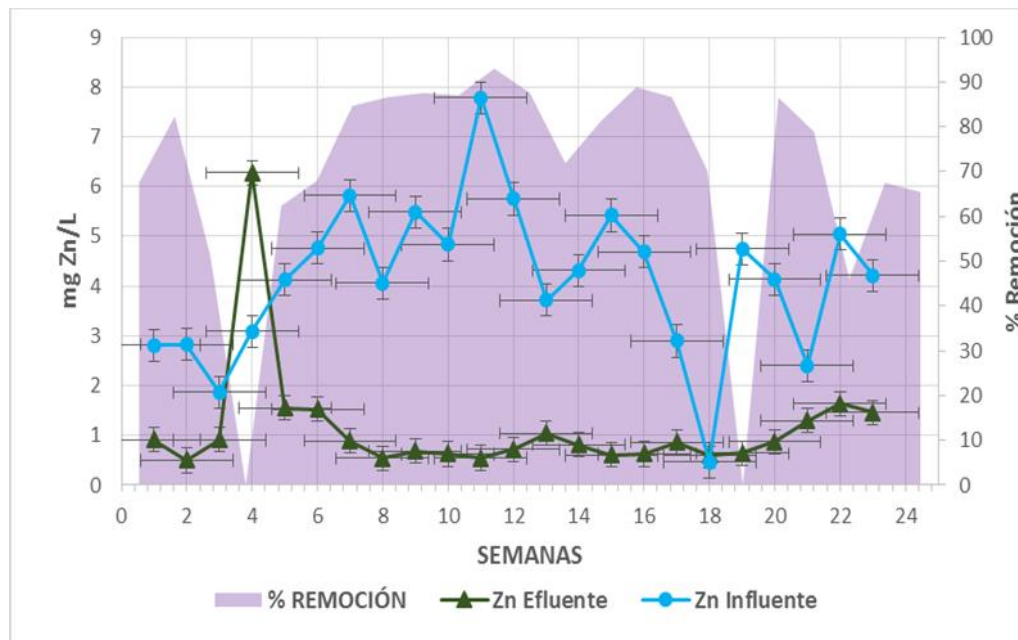


Fig. 3.8. Comportamiento del zinc (Zn) en el RALLFA de la semana 1 a la 23

El periodo alimentado con MCG constó de 4.3155, 5.4180 y 4.684 mg Zn/L, respectivamente. Con una salida de  $0.8078 \pm 0.119$ ,  $0.6034 \pm 0.1044$  y  $0.6256 \pm 0.116$

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

mg/L de zinc en las etapas 5, 6 y 7, respectivamente. En cuanto a los porcentajes de remoción, fueron 81.28 en la quinta etapa, sexta contó con el máximo de 88.86 y 86.64% en la séptima etapa. Finalmente, en la octava etapa alimentada con un porcentaje de ácido láctico tuvo un promedio general de  $3.4131 \pm 1.5141$  mg Zn/L. Con una concentración máxima de 5 mg Zn/L aproximadamente en la semana 22. El efluente se mantuvo en  $1.0510 \pm 0.4879$  mg/L del metal. Con la mínima concentración en la semana 18 de 0.6014 ppm. La semana 23 terminó con una concentración de 1.4532 mg/L, valor ligeramente mayor al promedio. La remoción comenzó en 70%, después subió a 86.53% y con un 65% aproximadamente para las últimas dos semanas de la etapa.

### 3.3.4. Plomo

El plomo tuvo un comportamiento variable durante el transcurso de las 23 semanas. El único porcentaje nulo fue en la segunda semana, donde el valor en el influente y efluente fueron de 0.9422 y 1.0986 mg Pb/L, respectivamente (Figura 3.9).

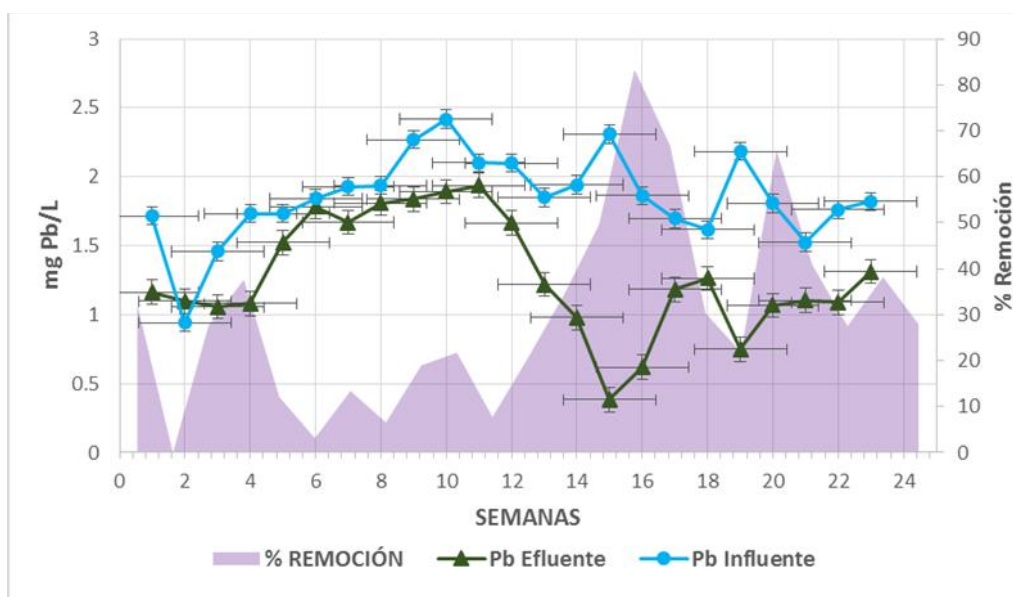


Fig. 3.9. Comportamiento del plomo (Pb) en el RALLFA de la semana 1 a la 23

Este metal, fue el segundo de menor presencia en el sistema y solubilidad, después del cobre. En la primera etapa el RALLFA fue alimentado con  $1.532 \pm 0.399$  mg/L de plomo en promedio, con una salida de  $1.2213 \pm 0.221$  mg Pb/L y una remoción del 20.28%. En la

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)



PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

semana 6, el influente presentó valores cercanos al efluente (1.8428 y 1.7842 mg Pb/L, respectivamente), y así se mantuvieron los valores hasta la onceava semana 2.100 mg Pb/L (Influente) y 1.9374 mg Pb/L (Efluente), presentando un máximo de 2.4172 mg Pb/L (Influente). Por otro lado, la remoción presentó porcentaje del 3% en la sexta semana y 7% al final de la onceava, con una remoción máxima en la semana diez del 22% aproximadamente. Al final de la tercera etapa, el promedio de remoción fue de 17.48%. La cuarta etapa en general, tuvo un 34.11% de remoción con concentraciones 1.85 mg Pb/L (Influente) y 1.219 mg Pb/L (Efluente). Durante la semana 14 la remoción tuvo un aumento a 49.56% contando con 1.9415 mg Pb/L (Influente) que estaba conformada con el 50% de MCG. La segunda semana que el sistema fue alimentado con MCG, se logró una mayor remoción de hasta el 83.32% dentro de la sexta etapa, el influente contenía 2.3077 mg Pb/L y el efluente presentó valores de  $0.3848 \pm 0.1435$  mg Pb/L. En la última semana alimentada con MCG, la alimentación se mantuvo en 1.8623 mg Pb/L y el efluente presentó valores de  $0.6177 \pm 0.451$  mg Pb/L; alcanzado 66.83% de remoción finalizando la séptima etapa. Para la octava etapa, se manejó un influente con una concentración 1.5236 mg Pb/L como concentración mínima y 2.1840 mg Pb/L como máxima. El valor promedio fue de  $1.7727 \pm 0.197$  mg/L de Pb. En cuanto al efluente, la concentración mínima y máxima fue de 0.7499 y 1.3121 mg Pb/L, respectivamente; además un promedio de  $1.1095 \pm 0.219$  mg/L Pb. También se obtuvo el máximo porcentaje de remoción en la octava etapa alcanzando 65.66 y un mínimo de 21.84%. El promedio de remoción se encontró alrededor de 37.41%.

### 3.4. Análisis estadístico

#### 3.4.1. Resumen estadístico del pH, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ )

En la Tabla 3.2 se muestra el resumen estadístico para cada una de las variables pH, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ), tanto del influente como del efluente únicamente de la octava etapa, ya que, se considera la más estable. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del intervalo de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**

procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. En este caso, ninguna de las variables muestra valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del intervalo esperado.

**Tabla 3.2. Resumen estadístico**

	pH(i)	Sulfatos (i)	Sulfuros (i)	pH (e)	Sulfatos (e)	Sulfuros (e)
Recuento	35	35	35	35	35	35
Promedio	3.69489	5289.16	4.34286	7.08649	2971.23	161.714
Desviación estándar	2.01185	355.727	3.02016	0.207758	888.652	92.5217
Coficiente de variación	54.4497%	6.72558%	69.5431%	2.93175%	29.9086%	57.2131%
Mínimo	1.807	4556.03	0	6.764	1619.86	20.0
Máximo	7.071	6272.34	12.0	7.502	4385.82	288.0
Rango	5.264	1716.31	12.0	0.738	2765.96	268.0
Sesgo estandarizado	1.71685	0.712932	1.66525	0.330105	0.100959	-1.04537
Curtosis estandarizada	-1.4836	0.966387	0.631919	-0.844599	-1.64225	-1.80058

(i): influente; (e): efluente

### 3.4.2. Análisis de los metales en el efluente

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Cu(e) y 6 variables independientes. La ecuación Ec. 3.1 del modelo ajustado es:

$$\text{Cu}(e) = 0.14432 - 0.00154556 \cdot \text{pH}(i) + 0.000662687 \cdot \text{pH}(e) + 6.81534 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Sulfatos}(i) + 0.00000206196 \cdot \text{Sulfatos}(e) - 0.00012709 \cdot \text{Sulfuros}(e) - 0.134697 \cdot \text{Cu}(i) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Puesto que el valor-P del modelo en la Tabla 3.3 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 3.3. Análisis de varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.00395193	6	0.000658656	4.14	0.0043
Residuo	0.00445802	28	0.000159215		
Total (Corr.)	0.00840995	34			

Gl Grados de libertad

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Fe (e) y 6 variables independientes. La ecuación 3.2 del modelo ajustado es:

$$\text{Fe}(e) = 2.29782 - 0.0678229 \cdot \text{pH}(i) - 0.353139 \cdot \text{pH}(e) + 0.000134646 \cdot \text{Sulfatos}(i) + 0.000122789 \cdot \text{Sulfatos}(e) + 0.000589164 \cdot \text{Sulfuros}(e) + 0.0804587 \cdot \text{Fe}(i) \quad \text{Ec. 3.2.}$$

Puesto que el valor-P del modelo en la Tabla 3.4, el andeva (ANOVA, en inglés) es menor

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**

que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 3.4. Análisis de varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0.676365	6	0.112727	3.49	0.0105
Residuo	0.903991	28	0.0322854		
Total (Corr.)	1.58036	34			

Gl Grados de libertad

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Zn (e) y 6 variables independientes. La ecuación 3.3 del modelo ajustado es:

$$\text{Zn (e)} = 6.41222 - 0.113752 \cdot \text{pH(i)} - 0.975619 \cdot \text{pH (e)} + 0.000329256 \cdot \text{Sulfatos (i)} + 0.000074781 \cdot \text{Sulfatos (e)} + 0.000599866 \cdot \text{Sulfuros (e)} - 0.0257421 \cdot \text{Zn (i)} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Puesto que el valor-P del modelo en la Tabla 3.5 el andeva (ANOVA, en inglés) es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 3.5. Análisis de varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3.85892	6	0.643153	4.25	0.0036
Residuo	4.23649	28	0.151303		
Total (Corr.)	8.09541	34			

Gl Grados de libertad

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Pb (e) y 6 variables independientes. La ecuación 3.4 del modelo ajustado es

$$\text{Pb (e)} = 2.65655 + 0.109209 \cdot \text{pH(i)} - 0.207606 \cdot \text{pH (e)} - 0.00000111638 \cdot \text{Sulfatos (i)} - 0.000134809 \cdot \text{Sulfatos (e)} + 0.000949515 \cdot \text{Sulfuros (e)} - 0.128309 \cdot \text{Pb (i)} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Puesto que el valor-P en la tabla del análisis de varianza, andeva, es mayor o igual que 0.05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 3.6. Análisis de varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0.298362	6	0.049727	1.04	0.4191
Residuo	1.33469	28	0.0476675		
Total (Corr.)	1.63305	34			

Gl Grados de libertad

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

### 3.5. Discusión final

De acuerdo con los datos obtenidos de la biotransformación de los sulfatos a sulfuros y de la precipitación de los metales de interés con respecto de las ocho etapas en estudio (Tabla 3.7) puede decirse que, de manera interesante, los valores mayores de la Relación DQO:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan como resultado una mejor transformación de los sulfatos a sulfuros pero no precipitan los metales en disolución de la misma manera.

Esto plantea una estrategia diferente que permita alcanzar los tres fines del tratamiento: precipitar los compuestos azufrados preferentemente co-precipitándolos con los metales disueltos y reducir las sustancias carbonosas para, con todo ello, mejorar la operación de flotación empleando agua reciclada.

Tabla 3.7. Biotransformación de sulfatos a sulfuros y de eliminación de metales de la fase líquida

Etapas	Semana	Relación DQO:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfuros (mg/L)	Cobre (% de eliminación)	Hierro (% de eliminación)	Zinc (% de eliminación)	Plomo (% de eliminación)
1	1-5	0.05	20.47±7	78.62	0	21.48	21.45
2	6-8	0.10	2.77±5	73.87	0	78.94	11.15
3	9-12	1.03	13±3	65.61	4.5	89.24	18.97
4	13	0.86	13±5	2.9	3.7	3.7	2.9
5	14	1.16	16±4	23.27	0	81.28	47.95
6	15	0.60	18±5	24.40	22.14	88.86	83.32
7	16	0.23	24±7.48	26.66	13.8	86.64	66.83
8	17-21	1.16	132±92	23.07	4.29	71.01	39.5
	22-30		233±31	25.9	0	65.7	31.5

### 4. Conclusiones

Considerando el objetivo general se concluye que:

- ✓ La producción de sulfuros alcanzó más de 200 mg/L en la etapa final del experimento
- ✓ Se logró remover del efluente acuoso hasta 69%, 55.8%, 37% y 23.8% para el Zn, Fe, Pb y Cu en promedio, respectivamente
- ✓ La última etapa (cuya fuente de carbono fue ácido láctico), permitió tratar 149 mL de AP con 1 mL AL, con un correcto funcionamiento del sistema, donde se mantuvo una estabilidad y producción constante de sulfuros, así como de remoción de metales.

De acuerdo con los objetivos particulares, se concluye lo siguiente:

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

- ✓ La caracterización del agua de proceso indicó que, aunque han transcurrido varios años, sigue teniendo características relativamente homogéneas indicando que no ha habido cambios sustantivos en el proceso
- ✓ Se operó el sistema de tratamiento exitosamente, durante 23 semanas, que consistió de 8 etapas de distinta duración, debido al tipo de influente, en las que se varió la relación DQO/SO<sub>4</sub> buscando una que fuera idónea
- ✓ Los sulfuros producidos por el RALLFA indican que el sistema permite la proliferación de una microbiota que puede reducir parte de los sulfatos correctamente
- ✓ Se logra también la precipitación de una fracción de los metales de interés con éxito
- ✓ El porcentaje de remoción de sulfatos presentes máximo alcanzado fue de 64.27% por semana, de 43.82% por etapa, siendo la etapa ocho donde mejor se disminuyó la concentración de este compuesto. Los sulfuros producidos, también alcanzaron su mejor nivel en esta etapa, llegando a tener un alta producción, de 288 mg S<sup>2-</sup>/L
- ✓ Las condiciones para la medición por EAA de metales pesados presentes en las muestras del reactor, se lograron montar exitosamente con apoyo del equipo de trabajo, de los laboratorios donde se desarrolló esta investigación, por lo que es posible continuar con esta investigación, tomando en cuenta que el reactor funciona correctamente. La eficiencia de remoción de metales pesados es susceptible de mejorarse considerando que las condiciones para la precipitación de sulfuros metálicos es un tema sensible a factores como pH, temperatura, tipo de microorganismos o ecología del reactor, etc. Por esta razón, los resultados obtenidos son satisfactorios y ofrecen un buen margen de trabajo para investigaciones futuras.

Debido a que la mejor remoción de sulfatos y producción de sulfuros se llevó a cabo en la etapa con ácido láctico, AL, se recomienda profundizar en las características de ésta, para mejorar los porcentajes de remoción de metales (Visser, 1995; Visser et al., 1993).

Cabe señalar, que aún después de se dio por terminada la fase experimental, se continuó con el análisis del contenido de sulfuros, llegando a obtener un valor de casi 400 mg/L de sulfuros y habría que determinar el contenido de metales removidos para este lote de muestras para complementar esto (Okabe et al., 1992).

En investigaciones futuras deben priorizarse las condiciones del metal deseado a remover,

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

debido a que las propiedades son distintas entre ellos, así como su comportamiento dentro del sistema (Fu y Wang, 2011; Kaksonen et al., 2007; Kieu et al., 2011; Sani et al., 2001; Singh et al., 2011; Utgikar et al., 2001).

También debe continuar el proceso de tratamiento con una etapa de reacción aerobia para oxidar hasta azufre los sulfuros presentes que no lograron precipitar como sulfuros metálicos; ya que cuando se alcance la etapa óptima, la producción de sulfuros llegaría a ser tóxica para los microorganismos y nuevamente decaería la eficiencia del tratamiento (Koster et al., 1986).

Asimismo, debe investigarse la manera de remover los sulfuros precipitados porque también disminuyen la capacidad de degradación de los consorcios bacterianos, una vez que las capas externas son recubiertas con éstos compuestos e impiden su correcto funcionamiento (Isa et al., 1986).

Algo interesante será comparar un nuevo lote de agua de del proceso de flotación, AP, con éste ya que su periodo de almacenamiento a temperatura de refrigeración pudo haber propiciado la oxidación de los sulfuros presentes y aumentado los sulfatos reales con respecto de los encontrados en la presa de jales que es a donde se envía el agua del proceso de flotación, AP (Lens et al., 1998; Martins et al., 2009).

Finalmente, sería interesante realizar experimentos en serie de RALLFA seguido de un humedal artificial (Ruiz-López et al., 2010), considerando que las márgenes de la presa de jales pudieran sembrarse de plantas acuáticas para mejorar aún más la calidad del agua de esas presas.

## 5. Referencias bibliográficas

1. Bazúa-Rueda, E.R., Bernal-González, M., Amábilis-Sosa, L.E., Cano-Rodríguez, M.I., García-Gómez, R.S., Ramírez-Burgos, L.I., Salgado-Bernal, I., Sánchez-Tovar, S.A., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2019. Mining: Water and Society: Recycling of Mining Effluents as a Social Solution to the Use of Water in Mexico. En Water Availability and Management in Mexico. E.M. Otazo-Sánchez, Enrique Navarro-Frómata, Vijay P. Singh, Eds. Chapter 19. Springer Verlag. Water Science and Technology Library. Heidelberg-Berlin. In press.
2. Cabrera, L. 2002. Diccionario de aztequismos. Revisión y puesta en orden: J. Ignacio Dávila-Garibi. Términos nahuas: Luis Reyes-García. Términos latinos (clasificaciones botánicas y zoológicas): Esteban Inciarte. 5ª edición. ISBN 968-867-038-3. Ed. Colofón S.A. México, D.F., México.
3. Dobson, R.S, Burgess, J.E. 2007. Biological treatment of precious metal refinery wastewater: A review. Minerals Engineering. 20(6), 519-532.
4. DOF. 1981. Análisis de aguas- Determinación del ión sulfato - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-074-SFCI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**



**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**

- Mexicanos.
5. DOF. 1982. Análisis de aguas- Determinación de sulfuros - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-084-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos
  6. DOF. 2001a. Análisis de aguas-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-030-SFCI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
  7. DOF. 2001b. Análisis de aguas-Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-036-SFCI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
  8. DOF. 2001c. Análisis de agua- determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- método de prueba Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001, Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
  9. DOF. 2009. DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal. El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (·). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación. Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México, D.F., México.
  10. DOF. 2011. Análisis de agua- Determinación del pH- Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-008-SFCI-2013. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
  11. DOF. 2013. Análisis de agua- Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-007-SFCI-2013. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal Estados Unidos Mexicanos.
  12. EPA. 1992. Método 3005A. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EE.UU.
  13. Espinosa-González, T. 2015. Reducción del contenido de sulfatos en aguas residuales usando un sistema de laboratorio que simula un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA). Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: Enero 9. México, D.F., México.
  14. Fu, F., Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 92(3), 407-418.
  15. González-Sandoval, M.R. 2006. Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en piritita. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Sustancias y Residuos Peligrosos). UNAM. Defensa: Septiembre 25. México, D.F., México.
  16. Isa, Z., Grusenmeyer, S., Verstraete, W. 1986. Sulfate reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: microbiological aspects. *Appl. Environ. Microbiol.* 51(3), 580-587.
  17. Kaksonen, A.H., Puhakka, J.A. 2007. Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals. *Eng. Life Sci.* 7(6):541-564.
  18. Kieu, H.T., Müller, E., Horn, H. 2011. Heavy metal removal in anaerobic semi-continuous stirred tank reactors by a consortium of sulfate-reducing bacteria. *Water Research*. 45(13), 3863-3870.
  19. Koster, I. W., Rinzema, A., De Vegt, A. L., Lettinga, G. 1986. Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH-levels. *Water Research*. 20(12), 1561-1567.
  20. Lens, P.N.L., Visser, A., Jansen, A.J.H., Hulshoff Pol, L.W., Lettinga, G. 1998. Biotechnological treatment of sulfate rich wastewater. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 28(1):41-88.
  21. Lettinga, G.A.F.M., Van Velsen, A.F.M., Hobma, S.D., De Zeeuw, W., Klapwijk, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*. 22(4), 699-734.
  22. Martins, M., Faleiro, M.L., Barros, R.J., Veríssimo, A.R., Barreiros, M.A., Costa, M.C. 2009. Characterization and activity studies of highly heavy metal resistant sulphate-reducing bacteria to be used in acid mine drainage decontamination. *Journal of Hazardous Materials*. 166(2-3), 706-713.

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

23. McCartney, D.M., Oleszkiewicz, J.A. 1993. Competition between methanogens and sulfate reducers: effect of COD:sulfate ratio and acclimation. *Water Environment Research*. 65(5), 655-664.
24. McCartney, D.M., Oleszkiewicz, J.A. 1991. Sulfide inhibition of anaerobic degradation of lactate and acetate. *Water Research*. 25(2), 203-209.
25. Nedved, M, Jansz, J. 2006. Waste water pollution control in the Australian mining industry. *Journal of Cleaner Production*. 14(12), 1118-1120.
26. Obreque-Contreras, J, Pérez-Flores, D, Gutiérrez, P, Chávez-Crooker, P. 2015. Acid mine drainage in Chile: An opportunity to apply bioremediation technology. *Hydrol. Curr. Res*. 6(3), 1-8.
27. Ojeda-Berra, L., Bazúa-Rueda, E.R., Durán-de-Bazúa, C. 2010. Simulación computacional de reactores anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales / *Computational simulation of anaerobic reactors for the treatment of industrial effluents. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ, México)*. 25(2), 69-85.
28. Okabe, S., Nielsen, P. H., Characklis, W. G. (1992). Factors affecting microbial sulfate reduction by *Desulfovibrio desulfuricans* in continuous culture: limiting nutrients and sulfide concentration. *Biotechnology and Bioengineering*. 40(6), 725-734.
29. Orduña-Bustamante, M.A. 2012. Efecto de la relación nitrógeno:potasio en la eficiencia de remoción de contaminantes carbonosos y nitrogenados en agua en sistemas de laboratorio que simulan humedales artificiales. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Agua). UNAM. Defensa: Marzo 5, 2012. México D.F., México-
30. Pacheco-Gutiérrez, L.A., Durán-de-Bazúa, C. 2006. El agua en la industria minera mexicana. Parte 1. Balances de materia en una empresa cooperante. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 21(2), 96-102.
31. Pacheco-Gutiérrez, L.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2007. Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar agua de proceso. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 22(1), 5-29.
32. Poblete-Mier, C.A. 2015. Arranque y operación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso de flotación de una planta minera. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. UNAM. Defensa: Noviembre 30. México D.F., México.
33. Ruiz-López, V., González-Sandoval, M.R., Barrera-Godínez, J.A., Moeller-Chávez, G., Ramírez-Camperos, E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2010. Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de una empresa minera usando humedades artificiales / *Cadmium and zinc removal from a mining reprocessing aqueous stream using artificial wetlands. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ, México)*. 25(1), 27-34.
34. Salgado-Bernal, I., Carballo-Valdés, M.E., Martínez-Sardiñas, A., Cruz-Arias, M., Durán-Domínguez, C. 2012. Interacción de aislados bacterianos rizosféricos con metales de importancia ambiental. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*. 3(3), 83-95.
35. Sani, R.K., Peyton, B.M., Brown, L.T. 2001. Copper-induced inhibition of growth of *Desulfovibrio desulfuricans* G20: assessment of its toxicity and correlation with those of zinc and lead. *Appl. Environ. Microbiol.* 67(10), 4765-4772.
36. Shengo, L.M., Gaydardzhiev, S., Kalenga, N.M. 2014. Assessment of water quality effects on flotation of copper-cobalt oxide ore. *Minerals Engineering*. 65, 145-148.
37. Singh, R., Kumar, A., Kirrolia, A., Kumar, R., Yadav, N., Bishnoi, N.R., Lohchab, R.K. 2011. Removal of sulphate, COD and Cr (VI) in simulated and real wastewater by sulphate reducing bacteria enrichment in small bioreactor and FTIR study. *Bioresource Technology*. 102(2), 677-682.
38. Statgraphics Centurion XVII. (2007). <http://www.statgraphics.com/download-statgraphics-centurion-xvii>
39. Utgikar, V.P., Chen, B.Y., Chaudhary, N., Tabak, H.H., Haines, J.R., Govind, R. 2001. Acute toxicity of heavy metals to acetate-utilizing mixed cultures of sulfate-reducing bacteria: EC100 and EC50. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*. 20(12), 2662-2669.
40. Vergara-Salgado, S. 2010. Identificación de bacterias metanogénicas y sulfatorreductoras en tres reactores de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional (Biología), FESZ, UNAM. México, D.F., México. 108 p.
41. Visser, A. 1995. The anaerobic treatment of sulfate-containing wastewater. Tesis Doctoral en Ciencias Agrícolas y Ambientales. Wageningen Agricultural University. Países Bajos. 145 p.
42. Visser, A., Beeksmma, I., van der Zee, F., Stams, A.J.M., Lettinga, G. 1993. Anaerobic degradation of

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)



**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS  
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.  
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



volatile fatty acids at different sulphate concentrations. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 40, 549-556.

**Reconocimientos**

Los autores agradecen a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM: Los reactivos, consumibles y materiales empleados en esta investigación ya que fueron adquiridos con el apoyo financiero parcial del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) “Tratamiento de un efluente proveniente del proceso de flotación de una planta minera mediante un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA)” Clave IN115118, así como a través de los Programas de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, (PAPIME) con Claves PE100514, EN103704 y PE101709. También contribuyeron con recursos financieros parciales el Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Claves 50009067 y 50009065. El tercer autor agradece la beca de posgrado otorgada por el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos a través de su Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Información de contacto  
[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)  
[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)