



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**BIOLIXIVIACIÓN DE UN CONCENTRADO DE  $\text{MoS}_2$  CON  
BACTERIAS TERMÓFILAS EXTREMAS EN NUEVOS  
REACTORES BIOLÓGICOS**

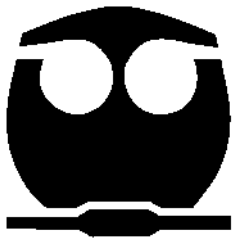
**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**FRANCISCO ARTURO LÓPEZ LÓPEZ**



---

**MÉXICO D.F.**

**2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: PROF. ANTONIO HUERTA CERDÁN

VOCAL: PROF. MARÍA ISABEL GRACIA MORA

SECRETARIO: PROF. ROSA ELVA RIVERA SANTILLÁN

1er. SUPLENTE: PROF. JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES

2° SUPLENTE: PROF. ALFONSO LÓPEZ JUÁREZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Universidad Nacional Autónoma de México.**

**Facultad de Química.**

**Departamento de Ingeniería Metalúrgica.**

**Laboratorio de Metalurgia Extractiva.**

**Edificio D.**

**ASESOR DEL TEMA:**

\_\_\_\_\_  
**DRA. ROSA ELVA RIVERA SANTILLÁN**

**SUSTENTANTE:**

\_\_\_\_\_  
**FRANCISCO ARTURO LÓPEZ LÓPEZ**





---

**Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines  
Académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y  
Cuándo se incluya la cita bibliográfica del documento.**







<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>OBJETIVOS</b> .....	9
<b>1.-JUSTIFICACIÓN</b> .....	10
<b>2.-INTRODUCCIÓN</b> .....	13
2.1.-MINERÍA EN MÉXICO.....	13
2.2.-PRINCIPALES MINERALES EN MÉXICO.....	17
2.3.-ZONAS MINERAS EN MÉXICO .....	18
2.4.-TIPOS DE MINERALES DE MOLIBDENO .....	20
2.5.-PRODUCCIÓN DE MOLIBDENO .....	24
2.6.- USOS DEL MOLIBDENO .....	27
<b>3.-BIOLIXIVIACIÓN</b> .....	30
3.1.-ASPECTOS MICROBIÓLOGICOS DE LA BIOLIXIVIACIÓN .....	32
3.2.- MICROORGANISMOS TERMÓFILOS EXTREMOS .....	35
3.3.- MECANISMOS DE BIOLIXIVIACIÓN .....	37
3.3.1- MECANISMO INDIRECTO.....	37
3.3.2- MECANISMO DIRECTO .....	38
3.3.3- MECANISMO COOPERATIVO .....	38
3.3.4- MECANISMO VÍA TIOSULFATO .....	39
3.3.5- CINÉTICA MICROBIANA .....	39





3.4.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOLIXIVIACIÓN .....	41
3.5- VENTAJAS DE LA BIOLIXIVIACIÓN .....	44
3.6- DESVENTAJAS DE LA BIOLIXIVIACIÓN .....	44
3.7.- BIOLIXIVIACIÓN EN EL MUNDO .....	45
3.8.- BIOLIXIVIACIÓN DE COBRE .....	48
3.9.- BIOLIXIVIACIÓN DE MOLIBDENO .....	50
<b>4.-DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>52</b>
4.1.- REACTIVOS Y EQUIPOS.....	52
4.2.- METODOLOGÍA .....	55
<b>5.-RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
<b>6.-ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>67</b>
<b>7.-CONCLUSIONES</b> .....	<b>95</b>
<b>8.-REFERENCIAS</b> .....	<b>97</b>
<b>9.-APÉNDICES</b> .....	<b>101</b>
<b>A.-BIORREACTORES</b> .....	<b>101</b>
<b>B.-DIAGRAMA DE POURBAIX</b> .....	<b>103</b>





## RESUMEN

Debido a la naturaleza refractaria de la molibdenita a los métodos convencionales de extracción hidrometalúrgica, además del alto costo de los reactivos lixiviantes, resulta necesario buscar nuevas alternativas para la extracción de molibdeno. El presente trabajo tiene como objetivo obtener una mayor extracción de molibdeno con microorganismos termófilos extremos, a temperatura constante de 65°C, en dos reactores (**RELVA-RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT** Y **RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**), a partir de un concentrado de molibdenita extraída del Complejo Minero Metalúrgico La Caridad, Sonora. En cada uno de los dos reactores biológicos utilizados se monitorearon periódicamente pH, Eh, Bacterias/ml, conductividad, densidad y molibdeno disuelto. La cuantificación de molibdeno disuelto se realizó midiendo la absorbancia del complejo formado de Mo con tiocianato de potasio en medio ácido,  $[\text{MoO}(\text{SCN})_5]$ . Los resultados obtenidos muestran que al mantener las condiciones idóneas de este tipo de microorganismos durante el proceso de biolixiviación, se acorta el tiempo de adaptación al mineral haciendo que la cepa se vuelva mucho más resistente a la toxicidad que el molibdeno representa para los microorganismos. El control de las condiciones del proceso de biolixiviación de molibdeno en ambos reactores biológicos, favorece la cinética de la extracción, la cual es la principal desventaja que tiene la biolixiviación, por lo cual muchas industrias no optan aun por éste método amigable con el medio ambiente. Después de 70 días de biolixiviación (1683 horas) se obtiene el 100% de extracción de molibdeno. Los reactores industriales existentes presentan baja eficiencia, dado que no están diseñados específicamente para su aplicación en biohidrometalurgia, por lo que con el diseño de estos nuevos reactores biológicos







---

se buscó encontrar las condiciones con las que los microorganismos se puedan desarrollar mejor, aumentando la actividad y alcanzando altas extracciones en un menor tiempo.

Los resultados obtenidos muestran que estos reactores (**RELVA –RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT Y RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**) en un futuro próximo podrían ser implementados en la industria minera debido a su alta eficiencia y bajo coste, ya que la biolixiviación al ser un proceso natural, es una alternativa ampliamente viable para la recuperación del molibdeno, es amigable con el medio ambiente y por tanto un proceso sustentable con el entorno industrial minero.





## OBJETIVOS

### Generales

- Incrementar la extracción de molibdeno mediante la biolixiviación como una nueva alternativa.
- Incrementar significativamente la cinética de extracción de molibdeno mediante el proceso de biolixiviación a un bajo costo y de manera amigable con el medio ambiente.

### Particulares

- Adaptar los microorganismos a una muestra de concentrado de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), para obtener una cepa resistente al Mo.
- Encontrar el pH óptimo de crecimiento de los microorganismos, así como las condiciones idóneas para la biolixiviación de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).
- Proponer nuevos reactores biológicos (**RELVA-RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT Y RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**), que permitan incrementar la cinética de extracción en la biolixiviación del molibdeno, para hacerlo un proceso económicamente rentable.
- Determinar la eficiencia de los biorreactores (**RELVA -RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT Y RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**) con respecto a la extracción del molibdeno y al crecimiento bacteriano.
- Demostrar la rentabilidad de los reactores biológicos (**RELVA -RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT Y RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**), en el proceso de extracción de valores metálicos.





## 1. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés económico en la extracción de molibdeno, dado sus múltiples aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, herramientas quirúrgicas, pantallas de LCD e incluso en la aplicación de rayos láser. Haciendo que la industria minera busque nuevos métodos para la obtención de este metal más eficientes que los tradicionales. Debido a que la biolixiviación tiene una cinética lenta, la industria minera utiliza otro tipo de métodos de recuperación de valores metálicos, como el de la pirometalurgia entre otros, estos procesos de extracción son más rápidos, pero se llevan a cabo sin importar el impacto que estos tengan en nuestro medio ambiente.

La obtención hidrometalúrgica de molibdeno presenta algunos problemas como alto consumo de reactivos y condiciones oxidantes bastante ácidas o alcalinas. Aunque la lixiviación con  $H_2SO_4$  no es eficiente, respecto a la disolución de los valores metálicos, usando como lixiviante  $HNO_3$  y mezclas con  $H_2SO_4$  se logra la solubilización completa del concentrado de  $MoS_2$  o el ataque selectivo de la calcopirita produciendo un concentrado de  $MoS_2$ , respectivamente. Sin embargo el método no es viable económicamente.

Lo anterior aunado al creciente interés en el cuidado del medio ambiente, apuesta por la aplicación de técnicas biológicas a la lixiviación de sulfuros metálicos. Con esto, la biolixiviación al ser un proceso natural de disolución de minerales realizado por microorganismos es un avance tecnológico, con respecto al cuidado del medio ambiente, así como la sustentabilidad.





Los pocos experimentos de biolixiviación realizados y los resultados de extracción de molibdeno tan bajos, son consecuencia de que no se cuenta con equipos diseñados específicamente para la biolixiviación, por lo que las pruebas de viabilidad se realizan en incubadores orbitales, los cuales como fueron diseñados para el campo de la biología farmacéutica, presentan varias deficiencias con respecto a las condiciones que las bacterias de la biominería requieren. No permiten obtener un crecimiento óptimo de las cepas de bacterias biolixivantes por ende los resultados de extracción de valores metálicos, como en este caso del molibdeno, no son los óptimos.

Es por esto que además de buscar aumentar la cinética de extracción de molibdeno, se plantea el uso de equipos fabricados para la biolixiviación de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), teniendo en cuenta las limitaciones que presenta el incubador orbital con las necesidades de la biolixiviación. Estos equipos fueron diseñados con el fin de subsanar las carencias que tiene el incubador orbital.

En la actualidad a nivel industrial, tampoco se cuenta con algún equipo diseñado para la biolixiviación de molibdenita, es por esto que se plantean nuevos equipos específicos para biolixiviar molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), de aquí la importancia que tienen estos nuevos reactores es que se puedan controlar todas las condiciones idóneas de crecimiento de la cepa bacteriana, así como algunas variantes del proceso de biolixiviación que no se pueden controlar en un incubador orbital.

Al controlar las condiciones idóneas del sistema se podrá aumentar la extracción en un menor tiempo, haciendo más eficiente el proceso, y así tener un camino





---

viable para la industria minera que busca eficiencia máxima en torno a la recuperación de los diferentes valores metálicos; ya que los microorganismos usados están asociados a la generación de drenajes ácidos de mina (DAM) o a los mismos minerales, recuperando así los metales de interés económico a través de la biolixiviación.

Es por todo esto que en el presente trabajo de investigación, se exponen los resultados del proceso de biolixiviación, de una muestra de concentrado de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) llevada a cabo en los equipos **RELVA –RBAL1<sup>®</sup> AIR LIFT** y **RELVA-RBP1<sup>®</sup> PROPELA**, con una cepa de bacterias termófilas extremas, con el fin de promover la implementación de la biolixiviación en la industria minera, tecnología de bajo costo, de alta eficiencia, fácil control, amigable con el medio ambiente y por tanto autosustentable.





## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1.- MINERÍA EN MÉXICO

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y fuente de la expansión regional desde la colonia. Un elemento importante de la minería prehispánica fue la explotación de piedras semipreciosas, los *chalchihuitl*, como jades, jaspes, ágatas y turquesas, de amplio mercado y que significaba un comercio muy intenso incluso con los pueblos de la Aridoamérica, como los indios Pueblo (Nuevo México), a través de tierras del estado de Zacatecas y del vasto norte, que se utilizaban en la elaboración de ornamentos<sup>[1]</sup>. En la época prehispánica se practicaba la actividad minera y la metalurgia en su mayor parte en zonas montañosas, áridas y las llanuras costeras que actualmente son conocidas como: Taxco, Guerrero; la Cuenca del Río Balsas, la Sierra de Querétaro, Oaxaca y Chiapas.

Con la llegada de Hernán Cortez a México en 1521 dio inicio al comercio de bienes minerales desde México hacia España. Históricamente, la explotación de minas por los españoles comienza aproximadamente en 1532 y ya para el siglo XVI, los metales preciosos representaban más del 80% de las exportaciones totales de México a la Nueva España. Las exportaciones de oro y plata registraron un descenso después de la firma de la independencia, fecha a partir de la cual, los metales preciosos son acumulados para ser acuñados como monedas<sup>[2]</sup>.

El auge minero de la Nueva España se inició al comenzar la segunda mitad del siglo XVI, con el descubrimiento de las minas en Zacatecas en 1546. A partir de ese momento, esta actividad se extendió por diversos rumbos donde se fueron





encontrando yacimientos, como Guanajuato, Pachuca y otras áreas del actual Zacatecas <sup>[3]</sup>. Estos hallazgos coincidieron con el descubrimiento de un nuevo sistema para el beneficio de los minerales, conocido como “beneficio de patio”, descubierto y desarrollado en Pachuca alrededor de 1555, para extraer la plata del mineral utilizando sal, calcopirita y azogue (mercurio), con muy buenos resultados ya que redujo el tiempo y el costo de producción. Sin embargo, el minero novohispano se enfrentó a muchos problemas y limitaciones; la primera dificultad consistió en la escasez de mano de obra, pues el trabajo en minas era el más duro y peligroso de todos.

El apogeo de la minería se registró en los dos últimos años del siglo XIX y primeros del XX, después de un largo periodo de estancamiento. En 1907, la crisis económica Norteamericana se extendió hasta México afectando especialmente a la minería.

En 1928 los extranjeros dominaban la minería mexicana: norteamericanos el 78% de la producción e ingleses 20% y la mayor parte de la producción se destinaba a la exportación. Por eso, durante la crisis de 1929 la producción minera mexicana decayó un promedio de 16.6% anual (entre 1930-32), pese a que en agosto de 1930 se publicó una nueva Ley Minera, dando atención a los pequeños mineros. El periodo 1933-38 es uno de los más significativos en la historia de la minería mexicana, porque el gobierno, en alianza con los mineros, hizo un intento de reorganización de esa industria.





En 1939 la producción minera disminuyó 12.6%, debido sobre todo, a la reducción del producto manufacturero norteamericano. Para evitar el colapso se publicó una nueva Ley de Impuestos (24/12/39), que redujo la carga fiscal, dio preferencia a minas rehabilitadas y combinó impuestos federales y estatales, para simplificar su pago, pero no fue suficiente. En 1934 se publica otra Ley Minera, una nueva Ley de Impuestos Mineros, un impuesto progresivo a la plata y al cobre, y se creó la Comisión de Fomento Minero.

La Segunda Guerra Mundial favoreció a la industria minera mexicana, pues estimuló la demanda externa de metales y productos industriales. Entre 1941-45 los presidentes Ávila Camacho y Roosevelt firmaron una serie de acuerdos comerciales para asegurar el suministro de minerales estratégicos para la industria bélica norteamericana. La economía mexicana sufrió una profunda reestructuración, por el desarrollo de la industria de la transformación, que relegó a la minería de exportación a un segundo plano. El gobierno adoptó una política laboral moderada, particularmente a raíz de la huelga general minera de 1944. Durante la recesión de 1958-61, el gobierno, entre otras medidas, mexicanizó la minería <sup>[4]</sup>.

Entre 1950-80 este sector vivió un proceso de modernización tecnológica, reorganización de sistemas de trabajo y modificaciones en la política laboral, caracterizada por la estrecha alianza entre el sindicalismo y el gobierno (corporativismo). Sin embargo, hasta 1980-81 el ritmo de crecimiento de la minería mexicana fue menor al de la economía nacional.







La minería ha contribuido al desarrollo industrial de México, pues los minerales se utilizan como materias primas en gran número de ramas industriales, entre las que destacan la petrolera, la siderúrgica, la química, la electrónica, la del vidrio, la cerámica y la de la construcción.

Si bien el sector minero (sin incluir hidrocarburos) genera tan sólo el 0.6% del PIB mexicano y absorbe una proporción todavía menor (0.3%) de la población total ocupada, su contribución económica trasciende la magnitud de esos datos, pues los minerales son insumos básicos de gran variedad de procesos productivos, porque suministran las materias primas indispensables para el funcionamiento de la industria.

Sin embargo el sector minero en México está concentrado y dominado por pocas empresas, nacionales y extranjeras, que son las beneficiarias de la riqueza de la industria. En un principio los trabajadores mineros, no eran tan afortunados, realizaban su labor en condiciones muy desfavorables de higiene y seguridad, con muy bajos salarios <sup>[5]</sup>. En la actualidad se ha implementado diversas acciones entre sus asociados que contribuyan a no bajar la guardia en materia de seguridad dentro de sus operaciones. Con un sólido compromiso por la seguridad, a la fecha se han incorporado 78 centros de trabajo al Programa de Autogestión en Seguridad y Salud en el Trabajo de la STPS y se han otorgado a 20 centros de trabajo 32 reconocimientos en alguno de los tres niveles de Empresa Segura.





## 2.2.- PRINCIPALES MINERALES EN MÉXICO

Nuestro país, en la actualidad, ocupa el primer lugar a nivel mundial en la producción de plata, segundo lugar a nivel mundial en la producción de bismuto y fluorita; destaca en la producción de arsénico, plomo, cadmio, antimonio, zinc, barita, grafito y yeso, entre otros. Durante 2011 el valor de la producción minera fue de 16,761 md, lo que representa un crecimiento de 46% respecto a 2010 (11,298 md) <sup>[6]</sup>. Se estima que el sector minero mexicano tendrá un crecimiento anual de 2% hasta 2014, el cual dependerá de la producción de cobre de Grupo México, la atracción de la inversión extranjera directa en el sector, así como del comportamiento de los precios de los metales <sup>[7]</sup>.

Tabla 1. México en la producción mundial de minerales (2012) INEGI

<b>Minerales metálicos</b>	<b>Producción</b>	<b>Lugar mundial</b>
Plata	366,114 (toneladas)	1°
Oro	7,673 (toneladas)	9°
<b>Fierro</b>	(millones de toneladas) 12	13°
<b>Plomo</b>	17,549	5°
<b>Zinc</b>	36,778	6°
<b>Manganeso</b>	170	8°
<b>Cobre</b>	35,854 ( toneladas)	11°
<b>Bismuto</b>	1 000	2°
<b>Molibdeno</b>	8 000	6°
<b>Cadmio</b>	1 300	6°
<b>Minerales no metálicos</b>	<b>Producción (miles de toneladas)</b>	<b>Lugar mundial</b>
<b>Fluorita</b>	103,972	2°
<b>Barita</b>	140	6°
<b>Grafito</b>	5	6°
<b>Yeso</b>	379,698	6°
<b>Feldespató</b>	440	11°
<b>Azufre</b>	77,818 (toneladas)	13°
<b>Diatomita</b>	120	5°

\*Nota: La producción puede medirse utilizando dos criterios distintos: por el volumen (como en este caso) o su valor.

FUENTE: INEGI. La minería en México.





### 2.3.- ZONAS MINERAS EN MÉXICO

México tiene un importante potencial minero no explotado que constituye una ventaja primordial para el desarrollo de un sector minero competitivo a nivel mundial. El territorio nacional cuenta con ricos depósitos de minerales metálicos: las regiones argentífera, comprenden parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato, las regiones con presencia de oro, cobre y molibdeno, abarcan los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit, la región rica en plomo, zinc y plata, cubre parte de los estados de Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Baja California Sur y San Luis Potosí; y, la región con importantes depósitos de hierro, se extiende por la Costa del Pacífico, en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Durango <sup>[8,9]</sup>.



# BASE AND PRECIOUS METALS MAJOR RESOURCES AND PROCESSING FACILITIES

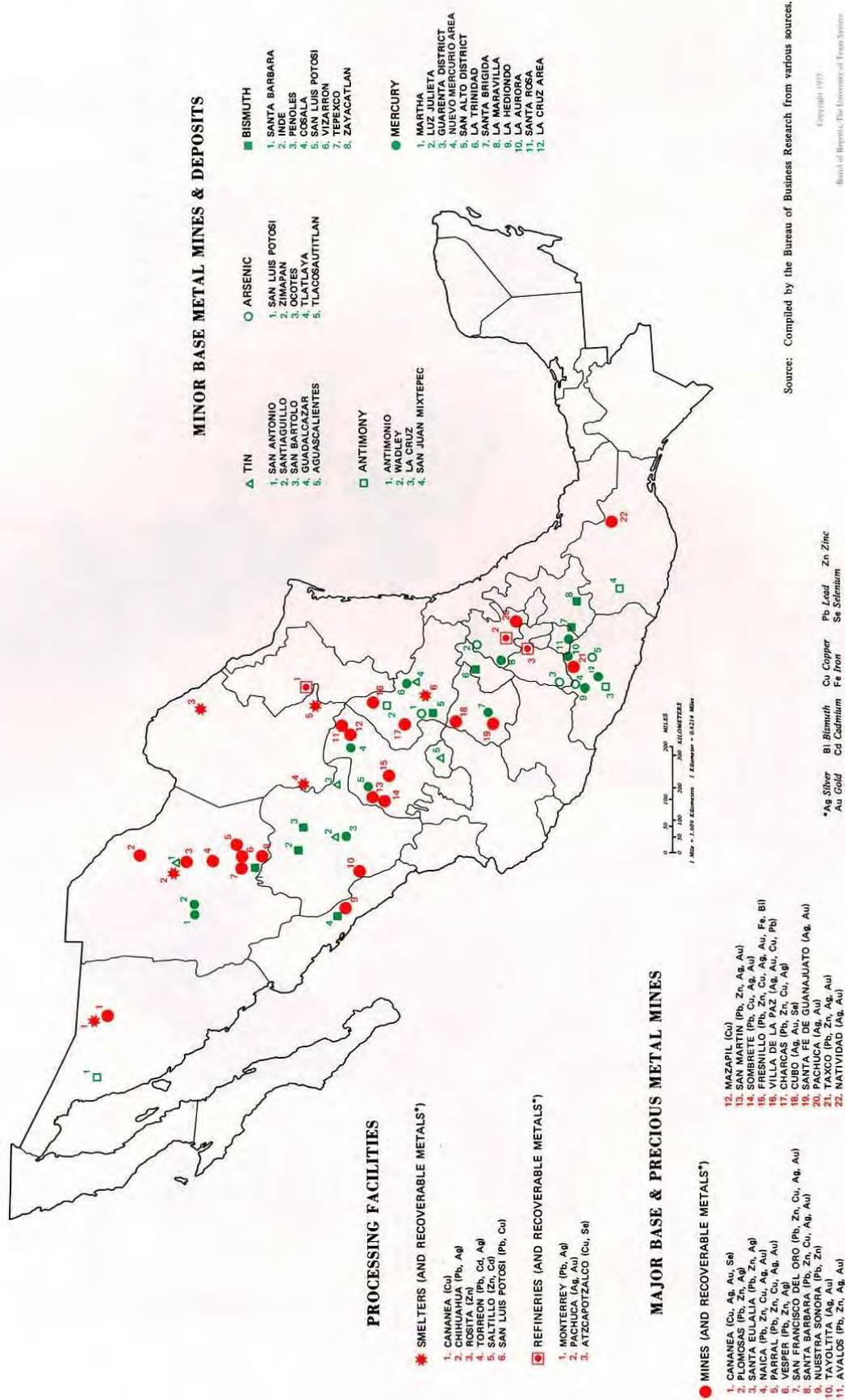


Figura 1. Zonas mineras de México. Fuente: Texas Libraries, The University of Texas at Austin.



## 2.4.- TIPOS DE MINERALES DE MOLIBDENO

Wulfenita ( $\text{PbMoO}_4$ ) <sup>[10]</sup>



Es un mineral secundario y escaso que se encuentra en forma de cristales finos tabulares de un brillante color rojo-naranja o naranja-amarillo. La wulfenita se halla en las zonas de oxidación de los filones de plomo.

Aparece asociado a minerales tales como:

- vanadinita ( $\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{VO}_4)_3$ )
- smithsonita ( $\text{ZnCO}_3$ )
- piromorfita ( $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ )
- mimetita ( $\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$ )
- limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )
- hemimorfita ( $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )
- fluorita ( $\text{CaF}_2$ )
- cerusita ( $\text{PbCO}_3$ )
- anglesita ( $\text{PbSO}_4$ )



**Figura 2. Wulfenita.** Fuente: <http://www.mineral-s.com>.





## Powellita ( $\text{CaMoO}_4$ )<sup>[10]</sup>

Es un mineral de formación secundaria raro, típicamente se forma en la zona de oxidación de los yacimientos hidrotermal de minerales del wolframio. También aparece, más raramente, en cavidades del basalto, en skarns y en rocas pegmatitas de tipo granito.

Puede reemplazar a la molibdenita en los yacimientos de ésta, dando un material de apariencia foliada. También puede alterarse y convertirse en ferrimolibdenita.

Suele encontrarse asociado a otros minerales como:

- molibdenita ( $\text{MoS}_2$ )
- ferrimolibdenita ( $\text{Fe}_2^{3+}(\text{MoO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- estilbita-Ca ( $\text{NaCa}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ )
- laumontita ( $\text{Ca}(\text{Si}_4\text{Al}_2)\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- apofilita ( $(\text{K},\text{Na})\text{Ca}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )



**Figura 3. Powellita.** Fuente: <http://www.irocks.com>.





- Propiedades Físico – Químicas

Mineral muy blando (como el grafito), pesado, untuoso al tacto (similar al talco), de fractura séctil y exfoliación basal perfecta en láminas. Mineral opaco, de típico brillo metálico, raya de color gris verdoso y color gris plomo con tonos azulados. La molibdenita puede ser confundida, por su forma hexagonal y baja dureza, con el grafito, del que se diferencia porque el color de la raya es gris verdoso y el del grafito gris oscuro-negro.

La estructura de la molibdenita consiste en un apilamiento de láminas formadas por una capa de molibdeno entre dos capas de azufre y en donde los enlaces entre capas al ser mucho más fuertes que entre las láminas genera esa exfoliación perfecta entre dichas láminas.

- Yacimientos/Formación

La molibdenita suele ser un mineral escaso que parece como inclusiones en algunas rocas graníticas y sobre todo, en pegmatitas. Se asocia preferentemente con sheelita y wolframita en filones pneumatolíticos de alta temperatura. Menos frecuentes, pero interesantes son los depósitos asociados a un metamorfismo de contacto tipo skarn.





- Interés económico y aplicaciones industriales

### Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ )

La molibdenita, constituye la principal mena de molibdeno, metal utilizado en la fabricación de aleaciones especiales de acero, en la producción de lubricantes de alta temperatura (gracias a que posee una dureza muy baja y que es untuosa al tacto) o en la fabricación de componentes eléctricos (electrodos).



**Figura 4. Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).** Fuente: Autor de la fotografía. Ángel Luis Esteban. 2012, Estado de Arizona, EEUU.



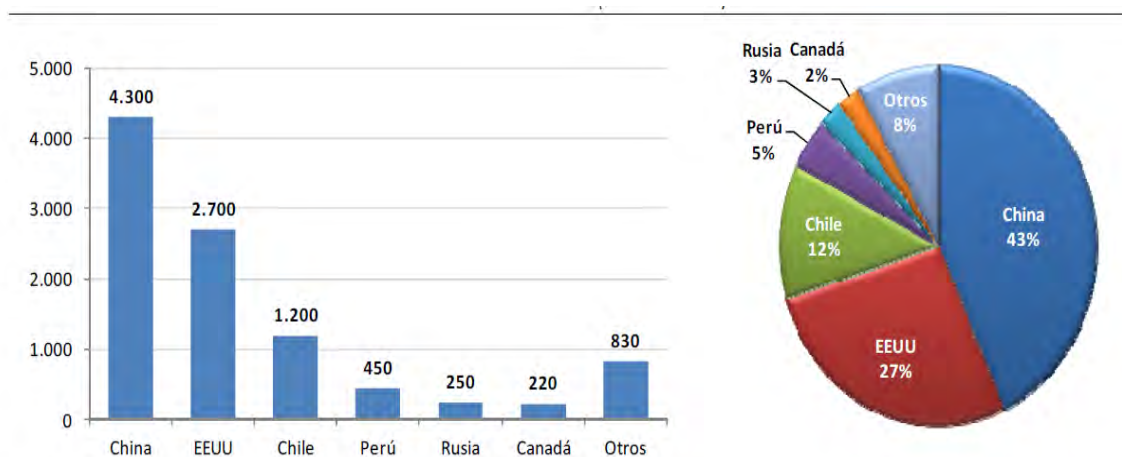




## 2.5.- PRODUCCIÓN DE MOLIBDENO

El molibdeno no se encuentra libre en la naturaleza, sino en forma de minerales, el más importante es la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ). El molibdeno se obtiene de dos fuentes: la producción de minas primarias, donde el molibdeno es el producto principal, y como subproducto de operaciones en las cuales este elemento se encuentra asociado a otros metales.

Las reservas de molibdeno a nivel mundial totalizaron 10 millones de toneladas métricas en 2011, según informe del United States Geological Survey (USGS). El 82% de las reservas conocidas se concentran en tres países, China (43%), EE.UU (27%) y Chile (12%) <sup>[11]</sup>.



**Figura 5. Principales países con reservas de molibdeno.** Fuente: United States Geological Survey 2012.

En relación con las reservas, de acuerdo con el USGS (United States Geological Survey) las reservas de molibdeno en el mundo ascienden a 8.600.000 TM. Aunque a nivel público no es mucho lo que se conoce del molibdeno, en el mundo minero este metal tiene un carácter estratégico. Más todavía cuando su precio





está en la cresta de la ola. Como ocurrió entre 2005 y 2008, en que su valor saltó explosivamente desde los 3 US\$ por libra a más de 30 US\$, provocando que muchas firmas se volcaran a extraer mineral con mayor contenido de este metal. El molibdeno se cotiza actualmente en la Bolsa de Metales de Londres (LME, según sus siglas en inglés) en torno a los 11 US\$ o 12 US\$ por libra, precio que ha venido cayendo sostenidamente en los últimos meses por un cambio importante en las condiciones del mercado, que varios expertos ya se atreven a describir como un nuevo ciclo, donde no se observarán precios como los vistos la década pasada.

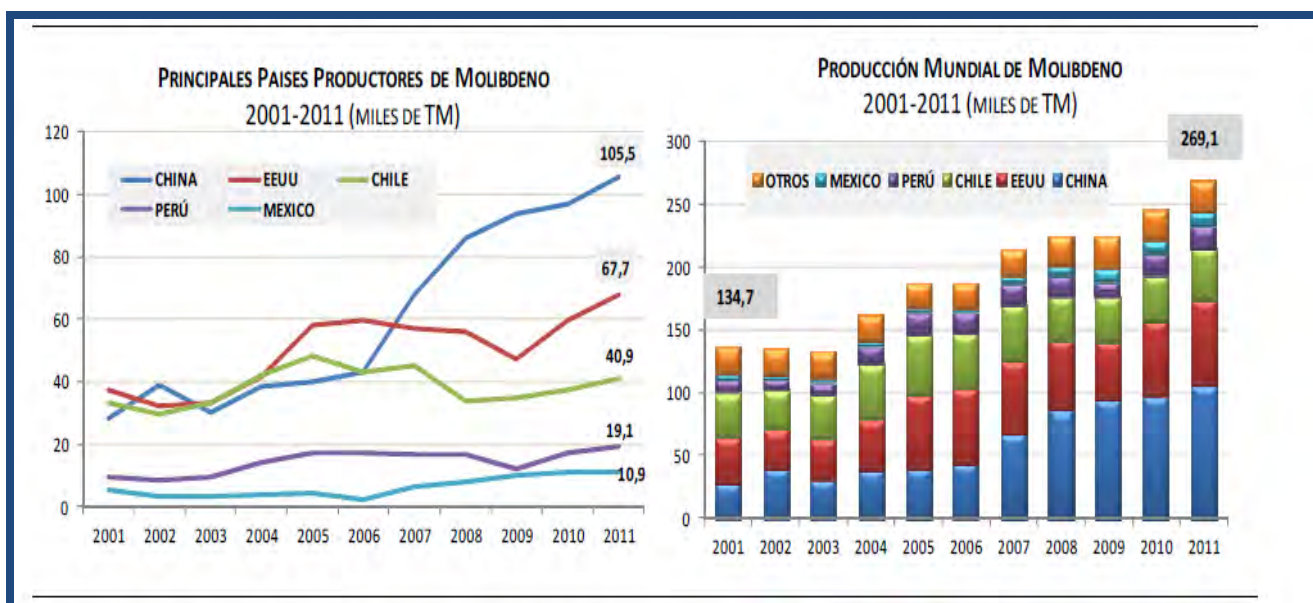


Figura 6. Molibdeno Producción mundial de molibdeno de mina-fuente primaria y secundaria Fuente: World Bureau of Metal Statistics 2011





La actividad minera en el estado de Sonora, durante los últimos años ha sido la más importante en el ámbito nacional, sus niveles de producción en los minerales metálicos, como el cobre y molibdeno y minerales no metálicos como grafito y wollastonita, lo colocan en el primer lugar nacional, así como el único productor, de molibdeno, grafito amorfo y wollastonita. En 2010 Sonora ocupó el primer lugar a nivel nacional <sup>[12]</sup>.

PERIODO	MOLIBDENO VOLUMEN ANUAL TONELADAS.	MOLIBDENO VALOR ANUAL MILLONES DE PESOS (MM\$)
2004	3,731	\$1,505.00
2005	4,245	\$3,178.00
2006	2,519	\$1,456.00
2007	6,491	\$4,667.40
2008	7,812	\$5,289.40
2009	10,167	\$3,293.80
2010	10,829	\$4,716.20
2011	10,787	\$4,534.60
2012	11,365	\$4,193.50
<b>2013</b>	<b>4,387</b>	<b>\$1,364.50</b>

**Tabla 2. Valor y producción de molibdeno.** Fuente: Secretaria de Economía.

Debido a que el estado de Sonora ha sido el único productor de molibdeno observándose una evolución favorable año con año, teniendo un nivel de producción para el 2006 de 19,268 toneladas, año a partir del cual se vio disminuida su producción llegando a 13,308 toneladas en el 2008, posterior a este año se empieza a tener una recuperación llegando en el año del 2011 a tener un volumen de 22,610 toneladas <sup>[13]</sup>.





## 2.6.- USO DEL MOLIBDENO

Sus características principales son durabilidad, resistencia y capacidad para soportar corrosión agresiva y altas temperaturas.

El molibdeno es un metal que se usa como materia prima para obtener aleaciones, entre la que destacan los aceros más resistentes. Alrededor de las dos terceras partes de este metal se usa para ese fin, conocido como acero inoxidable, con contenidos de hasta un 6%. El uso de aceros inoxidables con 6% de molibdeno minimiza los efectos de la corrosión provocada por altos niveles de cloro y constantes ciclos térmicos, a los que están expuestos los estanques utilizados en la industria química. El uso de aceros al carbono o aceros inoxidables sin contenido de Molibdeno en estas aplicaciones, resulta en un adelgazamiento de las paredes de los estanques y en el derrame de líquido por fisuramiento, lo que requiere un constante esfuerzo de reparación de grietas y recuperación de las paredes de los estanques<sup>[14]</sup>.

La aleación de acero soporta altas temperaturas y presiones siendo muy resistente, por lo que se utiliza en la construcción, para fabricar piezas de aviones y piezas forjadas de automóviles. El alambre de molibdeno se usa en tubos electrónicos, y el metal sirve también como electrodo en los hornos de vidrio.

El molibdeno, ya sea solo o en compañía de otros metales, soportado o no-soportado, es utilizado ampliamente como catalizador en la industria química para producir compuestos químicos<sup>[11]</sup>.





Catalizador	Aplicación	Importancia
Co-Mo Sulfurado sobre Alúmina	Hidrotratamientos, hidrodesulfurización	Refinación de petróleo, aceites, y productos de gasificación y licuefacción de carbón
Bi- Mo Oxidado	Oxidación selectiva de propeno, amoxidación	Síntesis de polímeros y plásticos, acrilonitrilo
Mo-V Oxidado	Oxidación de Acroleína	Síntesis de polímeros y plásticos
Fe- Mo Oxidado	Oxidación de Metanol	Síntesis de formaldehído
Mo Oxidado sobre Alúmina	Reacciones de metanización cuando existe Azufre	Síntesis de olefinas
Mo- Co- Fe	Conversión de gas natural a combustibles líquidos	GTL: producción de combustibles líquidos a partir de gas natural
Carburo de Mo	Producción de Hidrógeno	Hidrógeno a partir de Metano y en reacción de gas de agua

**Tabla 3. Reacciones catalizadas por el molibdeno.**

Además, es también utilizado en la fabricación de lubricantes con el fin de reducir el coeficiente de fricción (el disulfuro de molibdeno es resistente a altas temperaturas, reduce el desgaste y la fricción de las piezas de los motores, como se puede dar en los frenos de los automóviles), en la fabricación de revestimientos y solventes, en la industria química (pigmentos para plásticos, pinturas y compuestos de caucho) y en la electrónica (conductores eléctricos).

El molibdeno también es considerado un material estratégico y tiene múltiples aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, herramientas quirúrgicas, además de ser usado en la fabricación de filamento, pantallas de LCD.

En el futuro, la utilización de nano-compuestos de molibdeno en la industria puede marcar el desarrollo del mercado de éste. Algunas aplicaciones de estos nano-compuestos son:





- Nanotubos de disulfuro de molibdeno podrían ser una alternativa al uso de nanotubos de carbono, ya que los últimos presentan problemas de aplicación, como son el que tienden a pegarse entre ellos y la dificultad de aplicarles contactos eléctricos.
- Aleaciones de Mo son utilizadas en hornos para la industria del vidrio debido a la resistencia al desgaste y la corrosión provocados por el material fundido; dado que minimizan el desprendimiento de partículas, permiten que el vidrio mantenga la transparencia necesaria.
- La propiedad lubricante del disulfuro de molibdeno es mejorada al ser utilizado en su forma nano; esta propiedad ya está siendo explotada por la industria de lubricantes secos y sólidos en polvo para la industria automotriz y aeronáutica <sup>[15]</sup>.





### 3. BIOLIXIVIACIÓN

La biolixiviación, a pesar de ser una tecnología relativamente nueva, es un fenómeno que ha tenido lugar de forma natural desde que las bacterias y los minerales existen <sup>[16,17]</sup>. Remontándose a siglos atrás (100 a 200 a.c), mucho antes del descubrimiento de las bacterias, se encuentran algunos indicios de que la biolixiviación del cobre de menas minerales se practicaba en China, e igual en Europa durante el siglo II d.c.

En aquellos tiempos, el proceso se consideraba puramente empírico, sin llegar a asociar la acción bacteriana con la disolución de los minerales. Mucho después, a mediados del siglo XX, aparecieron los primeros artículos e informe que demostraron la aplicación de las bacterias para la recuperación del cobre, al reconocerse el papel de éstas en la formación de drenajes ácidos de mina <sup>[18]</sup>.

La lixiviación bacteriana, también conocida como biolixiviación, biohidrometalurgia o biooxidación de sulfuros, puede definirse como un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias, de modo que el microorganismo se sirve del mineral como combustible, lo utiliza para sobrevivir y liberar metales sin requerir una aplicación externa de energía <sup>[19]</sup>.

La biolixiviación es el proceso convencional de lixiviación, catalizado biológicamente pero aplicado a los minerales sulfurados, ante la necesidad de aumentar la cinética de su disolución.

De esta manera la biolixiviación es un proceso químico, mediado por el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico, mediado por microorganismos.





Durante mucho tiempo, se pensó que la disolución o lixiviación de metales era un proceso netamente químico, condicionado por agua y oxígeno atmosférico. El descubrimiento de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, ha sido primordial en la definición de la lixiviación como un proceso catalizado biológicamente.

Se puede señalar que la biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para lixiviar, o extraer, un metal de valor como uranio, cobre, zinc, níquel y cobalto presente en la menas o en un concentrado mineral. El producto final de la biolixiviación es una solución ácida que contiene un metal en su forma soluble <sup>[19]</sup>.

Los metales más importantes que se obtienen por biolixiviación son el cobre, el uranio y el oro. En el caso el cobre, se trata de un mineral muy demandado por diversas industrias y que es relativamente escaso, por lo que este proceso resulta muy rentable y efectivo, ya que se consigue recuperar entre el 50 y el 70% del que se perdería. El uranio suele extraerse *in situ* por la dificultad de trasladar el material, pero el proceso es similar, y además contribuye directamente a la producción de energía en las centrales nucleares.

Adicionalmente, la biolixiviación se emplea también para la extracción de oro de yacimientos geológicos profundos, donde el mineral está rodeado de pirita y calcopirita y es refractario a los procesos clásicos de lixiviación.

La biolixiviación comienza a tener una cierta importancia comercial, a mediados del siglo pasado, el interés por conocer que hay detrás del proceso ha originado







un gran número de trabajos experimentales tanto a nivel químico como biológico e incluso físico. Todo ello ha configurado un cuerpo de conocimientos que después de más de 50 años, lejos de aclarar el panorama, lo ha complicado, como es el caso del mecanismo o mecanismos de biolixiviación <sup>[20]</sup>.

### 3.1.- ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

Los microorganismos responsables de la disolución de los metales a partir de minerales son *Thiobacillus*, aunque no es la única especie.

De las especies *Thiobacillus* que se conocen las que más atención ha recibido es la *Thiobacillus ferrooxidans*, cuya presencia fue demostrada por Colmer y Hinkle, a comienzos de los años 50, en el drenaje de unas minas de carbón que reportaban altos contenidos de ácido y hierro <sup>[21]</sup>.

Los microorganismos involucrados en los procesos de biolixiviación corresponden a bacterias extremófilas, las que se caracterizan por desarrollarse en condiciones extremas tales como pH ácidos y concentraciones de elementos metálicos, y cuya principal fuente de energía está dada por la oxidación del ion ferroso a férrico y la de compuestos reducidos de azufre.

Estos microorganismos se aíslan generalmente de lugares donde ocurre la oxidación natural de minerales, tales como minas, aguas de manantiales ricas en azufre y en depósitos de carbón <sup>[22]</sup>.

La bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, ha sido la más estudiada para la biolixiviación y por consiguiente de la que existe mayor información, sin embargo





existen otros microorganismos identificados que solubilizan minerales sulfurados, como los que se encuentran en la tabla 4, a los cuales es posible clasificarlos de acuerdo tanto a la importancia comercial en operaciones bio-hidrometalúrgicas como también a aquellas que únicamente pueden ser exploradas en pruebas de laboratorio pero que parecen ser prometedoras a futuro [23,24].

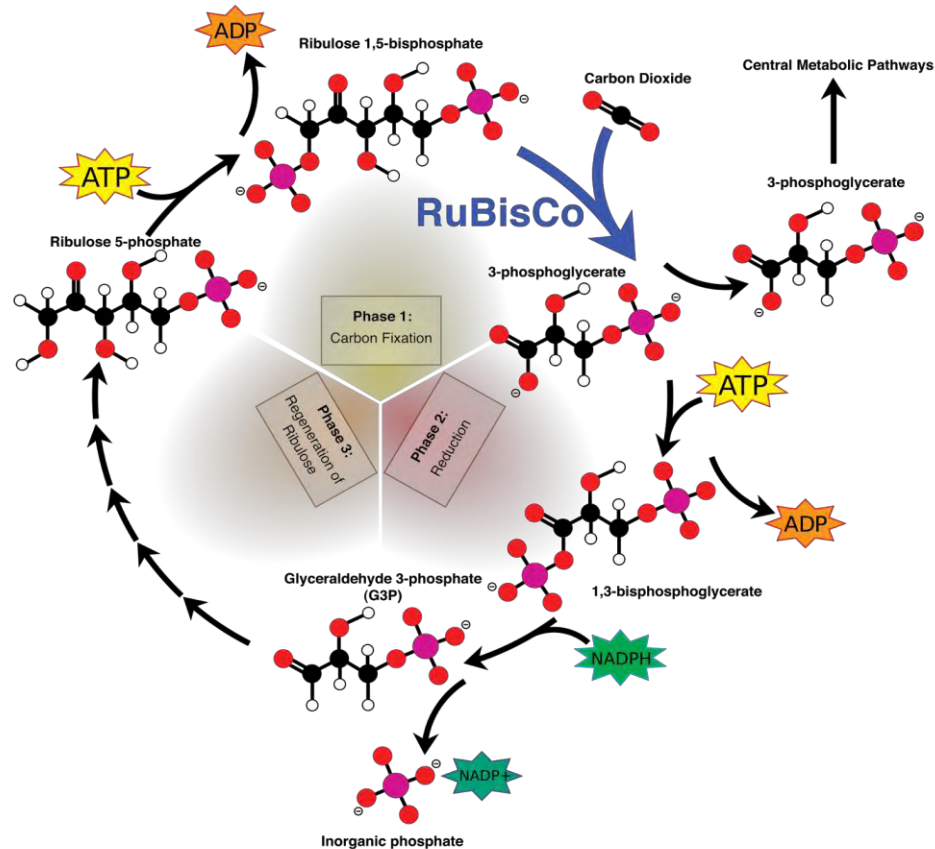
**Tabla 4. Listado de microorganismos biolixiviantes.**

Grupo	Nombre	Características fisiológicas	
Mesófilos	<i>Thiobacillus ferroxidans</i>	Oxida a $Fe^{2+}$ , $S^0$ , $S_2O_3^{2-}$ , $U^{4+}$ , sulfuros metálicos, etc.	
	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	Oxida a $H_2S$ , $S^0$ y $S_2O_3^{2-}$ a $H_2SO_4$ ; no oxida a sulfuros metálicos.	
	<i>Leptospirillum ferroxidans</i>	Oxida a $Fe^{2+}$ , pero no a $S^0$ .	
	Termófilos extremos	<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	Oxida a $Fe^{2+}$ y $S^0$ ; reduce al $Fe^{3+}$ anaeróbicamente.
<i>Acidianus brierleyi</i>		Oxida a $Fe^{2+}$ , $S^0$ , $MoS_2$ y $CuFeS_2$ . Reduce $MoS_2$ anaeróbicamente.	
<i>Sulfolobus solfataricus</i>		¿?	
Termófilos moderados		<i>Sulfolobus solfataricus</i>	Oxida a $Fe^{2+}$ y $S^0$ ; forma endoesporas
		<i>Sulfolobus thermosulfidooxidans</i>	Oxida a $Fe^{2+}$ y $S^0$ ; forma endoesporas

Estos microorganismos son aerobios (requieren de la captación libre de oxígeno), acidófilos (se desarrolla en rangos de pH que varían entre 1,5-3,0) y a temperaturas que oscilan de 25°C-90°C.

El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtienen de la fijación de  $CO_2$  del aire de manera similar a las plantas verdes (ciclo de Calvin-Benson figura 7).





**Figura 7. Ciclo de Calvin-Benson**

Durante la fase luminosa de la fotosíntesis, la energía lumínica ha sido almacenada en moléculas orgánicas sencillas e inestables (ATP), que aportarán energía para realizar el proceso y poder reductor, es decir, la capacidad de donar electrones (reducir) a otra molécula (dinucleótido de nicotinamida y adenina fosfato o  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ). En general, los compuestos bioquímicos más reducidos (es decir, los que tienen mayor cantidad electrones) almacenan más energía que los oxidados (con menos electrones) y son, por tanto, capaces de generar más trabajo (por ejemplo, aportar la energía necesaria para generar ATP en la fosforilación oxidativa). En el ciclo de Calvin se integran y convierten moléculas inorgánicas de dióxido de carbono en moléculas orgánicas sencillas a partir de las cuales se





formará el resto de los compuestos bioquímicos que constituyen los seres vivos. Este proceso también se puede, por tanto, denominar como de asimilación del carbono.

La primera enzima que interviene en el ciclo Calvin-Benson y que fija el CO<sub>2</sub> atmosférico uniéndolo a una molécula orgánica (ribulosa-1,5-bisfosfato) se denomina RuBisCO (por las siglas de Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa). La molécula que formará los carbohidratos será gliceraldehido 3 fosfato.

Para un total de 6 moléculas de CO<sub>2</sub> fijado, la estequiometría final del ciclo de Calvin se puede resumir en la ecuación:



que representaría la formación de una molécula de azúcar-fosfato de 6 átomos de carbono (hexosa) a partir de 6 moléculas de CO<sub>2</sub>.

### 3.2.- MICROORGANISMOS TERMÓFILOS EXTREMOS

Dentro de los microorganismos que actúan en los procesos de biolixiviación es imprescindible hacer una mención especial a los microorganismos termófilos. Se caracterizan por vivir y reproducirse en ambientes ácidos, a temperaturas que se encuentran en un rango de 45°C a 90°C <sup>[22]</sup>.

Este tipo de bacterias fueron aisladas por primera vez por Brierley, a mediados de los años 60, en un manantial ácido en aguas termales en el Parque Nacional





Yellowstone (Wyoming, EE.UU). Los estudios demostraron que el microorganismo era mixotrófico y morfológicamente diferente al *Thiobacillus*, al carecer de una pared celular rígida, poseer pilis en vez de flagelos y tener forma esférica. Estas bacterias termófilas inicialmente recibieron el nombre de *Sulfolobus brierleyi*; posteriormente fueron reclasificadas dentro del género *Acidianus*, y actualmente son conocidas como *Acidianus brierleyi* <sup>[25]</sup>.

Los microorganismos termófilos extremos se presentan en ambientes con temperaturas entre los 55°C y 90°C, pueden crecer de forma autótrofa y heterótrofa. Bajo condiciones autótrofas catalizan la oxidación de azufre elemental, Fe<sup>+2</sup> y minerales de azufre reducido. Presentan velocidades de biolixiviación de sulfuros metálicos considerablemente altas, sobre todo cuando la concentración de sólidos o la densidad de pulpa son bajas; en caso contrario su acción se ve altamente restringida.

En general, los microorganismos termófilos extremos presentan como principal problema la gran sensibilidad de su membrana frente a fenómenos de atrición, lo que obliga a utilizarlos en los procesos de biolixiviación dinámica, tales como reactores, con densidades de pulpa menores que las utilizadas con microorganismos termófilos moderados. Es debido a lo anterior, que se ha implementado el uso de bacterias termófilas moderadas, ya que son resistentes a altas densidades de pulpa y a elevadas concentraciones de Fe<sup>2+</sup> <sup>[26]</sup>.





### 3.3.- MECANISMOS LA BIOLIXIVIACIÓN

Helmut Tributsh <sup>[27]</sup> propone la existencia de los siguientes tres mecanismos para la biolixiviación: indirecto, contacto y cooperativo. Asimismo indica que es necesario que las bacterias hagan contacto con el sulfuro a través de una capa de polímeros extracelulares, los que actúan como medio para la reacción de disolución del mineral.

#### 3.3.1.- MECANISMO INDIRECTO

El mecanismo indirecto considera la acción de iones férricos sobre minerales sulfurados mediante una disolución electroquímica, así por medio de esta reacción se producen ion ferroso y azufre elemental. Posteriormente, éstos son oxidados biológicamente a ion férrico e ion sulfato respectivamente. Los microorganismos que se encuentran en solución pueden oxidar el ion ferroso a férrico en presencia de oxígeno y protones, por medio de la siguiente reacción <sup>[20]</sup>:



El  $\text{Fe}^{3+}$  oxida los minerales sulfurados de acuerdo a la siguiente reacción:



Expresada formalmente como:



De esta forma, los microorganismos permiten la regeneración de ion férrico, a partir del ion ferroso, de tal manera que el primero esté disponible para la





lixiviación de los minerales sulfurados. Sin embargo, como esta reacción consume protones, el pH puede aumentar ocurriendo la precipitación de ion férrico, formando barreras difusionales que impiden el contacto directo entre éste y el sólido, lo que afecta negativamente la disolución biológica del mineral [20].

### 3.3.2.- MECANISMO DIRECTO

En el primero de los posibles mecanismos. En éste la bacteria ataca al sulfuro metálico de forma directa, mediante su adhesión a la superficie del mineral y posterior oxidación enzimática de éste por transporte de electrones desde la parte reducida del mineral, generalmente un sulfuro, al oxígeno disuelto.

La reacción general sería:



La adherencia de bacterias al mineral es, por tanto, un requisito del mecanismo directo y es la principal evidencia presentada en defensa del mismo.

### 3.3.3.- MECANISMO COOPERATIVO

Tributsch introduce el concepto de mecanismo cooperativo, en el que los microorganismos adheridos al mineral y los libres en solución cooperan entre sí. Las bacterias adheridas al sulfuro liberan especies metálicas oxidables como el ión ferroso, éste es oxidado por las bacterias en solución regenerando así el agente oxidante  $Fe^{3+}$ , el que ataca al mineral dando lugar a la lixiviación química [27].





### 3.3.4.- MECANISMO VÍA TIOSULFATO

Se presenta en disulfuros como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) y wolframita ( $\text{WS}_2$ ), en donde la banda de valencia no se deriva de los átomos de azufre sino de los orbitales d de los átomos del metal. Lo anterior impide que estos sulfuros sean solubles en ácido y por ello sólo son atacables por agentes oxidantes como el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). El hecho de que solamente bacterias con capacidad para oxidar al ion ferroso puedan disolver la pirita es uno de los pilares que sustentan la hipótesis de que el mecanismo indirecto es el más importante en el proceso de biolixiviación de este mineral <sup>[20]</sup>.

Los productos de oxidación de la pirita por este medio son iones de hierro ferroso hexahidratados y tiosulfato. Mientras que los primeros son oxidados posteriormente al estado férrico, el tiosulfato es oxidado a sulfato vía compuestos intermedios.

### 3.3.5.- CINÉTICA MICROBIANA

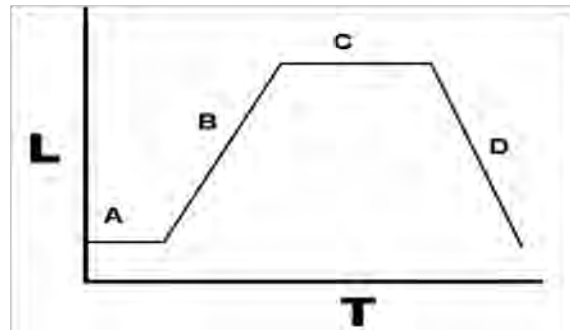
El mecanismo para cualquier reacción se puede obtener a partir de la ley de velocidad del proceso en cuestión. Esta ley es dependiente de la velocidad de reacción observada experimentalmente sobre tipo de variables que afectan dicha velocidad. Dentro de estas variables normalmente se encuentran las concentraciones de los reactantes y posiblemente las de los productos, las concentraciones de cualquier catalizador presente y el área de la superficie de los sólidos que participan en el proceso. Así mismo, la ley de la velocidad esencial es empírica y no puede ser deducida a partir de las ecuaciones estequiométricas que







representan el proceso total. Como todo proceso con células microbianas, el crecimiento bacteriano es representado a través de una curva que muestra las diferentes fases de crecimiento microbiano como se muestra.



**Figura 8. Curva de proliferación típica de una población bacteriana**

- La primera fase (A) indica la etapa en la cual el microorganismo se está adaptando a un ambiente nuevo y estructurando mecanismos de reacción para la construcción de moléculas para su mantenimiento y definición celular.
- La segunda fase exponencial o de crecimiento (B) representa el incremento exponencial de la población microbiana, conforme el microorganismo va generando características importantes entre las cuales se encuentra el tiempo de duplicación o generación, es decir, el tiempo que una determinada población requiere para duplicarse.
- La tercera fase estacionaria (C) representa una limitación en la velocidad de solubilización en virtud que el crecimiento cesa por carencia de uno o más nutrientes esenciales que componen al sustrato, pese a que la reproducción celular ha cesado las células permanecen viables hasta llegar hasta la





cuarta fase (D), la de la muerte, en las cuales las células entran en lisis y se desintegran <sup>[28]</sup>.

### 3.4.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOLIXIVIACIÓN

La efectividad del proceso de biolixiviación depende en gran medida de la eficiencia de los microorganismos y de la composición química y mineralógica del mineral que va a ser lixiviado, la concentración del sustrato y de los sólidos, la temperatura, el pH, la concentración de O<sub>2</sub> y el potencial redox.

- Nutrientes

Los microorganismos que se utilizan para la extracción de metales de los sulfuros son generalmente bacterias quimiolitioautótrofas, y por lo tanto sólo se requiere de compuestos inorgánicos para su crecimiento. En general, los nutrientes minerales se obtienen del ambiente y del material que va a ser lixiviado. Para un óptimo crecimiento, el hierro y los compuestos azufrados pueden ser suplementados con sales de amonio, fosfato y magnesio. El magnesio, es necesario para la fijación de CO<sub>2</sub> y el fósforo es requerido para el metabolismo energético <sup>[29]</sup>.

- O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

El suministro adecuado de oxígeno es un requisito para el buen crecimiento y la alta actividad de las bacterias lixivadoras. En el laboratorio puede ser alcanzado mediante aireación o agitación, mientras que en gran escala, principalmente en cúmulos o depósitos, el suministro adecuado de oxígeno se podría convertir en un problema. El CO<sub>2</sub> es la única fuente de carbón requerida, pero no es necesaria su adición al sistema <sup>[30]</sup>.





Debido a que la mayoría de las bacterias lixiviantes en la naturaleza son aeróbicas, necesitan un ambiente con oxígeno para sobrevivir. El aire aporta el oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) necesarios para la lixiviación, por lo que es importante asegurar la aireación independiente de la tecnología utilizada.

- pH

El ajuste del pH es una condición necesaria para el crecimiento de las bacterias lixivadoras y juega un papel decisivo en la solubilización de los metales. Ya que son bacterias acidófilas, es decir crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. El pH define que especies de bacterias se desarrollarán en el medio <sup>[31]</sup>.

- Temperatura

Los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el cual pueden sobrevivir. Así las mesófilas sobreviven en un rango óptimo de 30-40°C, las termófilas moderadas a una temperatura cercana a los 50°C, y las termófilas extremas sobre los 65°C. Si la temperatura del medio en que se encuentren los microorganismos es menor a 5°C, se vuelven inactivos volviendo a cumplir su función si aumenta la temperatura, pero si la temperatura del medio sobrepasa el óptimo, los microorganismos se mueren.

Es importante considerar que la reacción de oxidación de los minerales sulfurados es exotérmica, es decir libera calor al medio lo que produce el aumento de la temperatura. La posibilidad de controlar la temperatura dependerá del diseño de la tecnología de biolixiviación ocupada <sup>[32]</sup>.





- Potencial redox (Eh)

La oxidación de las especies reducidas depende del movimiento o transferencia de electrones, por lo tanto influye en el metabolismo de la bacteria. De esta manera, la medida del potencial es un indicador de la actividad microbiana, mientras mayor sea el potencial medido, mayor será la actividad microbiana <sup>[32]</sup>.

- Presencia de Inhibidores

Durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación, y en ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos. Estas concentraciones tóxicas se pueden disminuir al diluir la solución lixivante.

- Sustrato mineral

La composición mineralógica del sustrato a lixiviar es de suma importancia. A mayor concentración de carbonato, el pH aumentará y ocurrirá inhibición o incluso supresión total de la actividad bacteriana. Valores de pH bajo, necesarios para el crecimiento de las bacterias lixivadoras, pueden ser alcanzados mediante la adición externa de ácido, pero ésto podría causar la formación y precipitación de yeso y por ende afectaría el costo del proceso <sup>[30]</sup>.

- Luz

La luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de bacterias, pero el hierro ofrece alguna protección a los rayos visibles <sup>[30]</sup>.

- Tamaño de partícula

A menor tamaño de la partícula de mineral, mayor es el área de contacto que tiene el microorganismo, haciendo más efectiva la lixiviación <sup>[33]</sup>.





### 3.5.- VENTAJAS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

Requiere poca inversión de capital, ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas. Presenta bajos costos en las operaciones biohidrometalúrgicas, en comparación con los procesos convencionales.

No se emiten gases ni polvo, lo que produce un impacto ambiental varias veces inferior a la tecnología clásica de pirometalurgia, que genera emisiones con altos contenidos de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y arsénico (As), por el tratamiento de sulfuros en fundiciones. Permite ahorrar en tecnología de abatimiento, como sistemas o chimeneas de alto costo, al bajar los índices de azufre y arsénico asociados a hornos de fundición. Permite el tratamiento de los recursos y reservas crecientes de minerales con baja ley de cobre que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales. Se pueden tratar concentrados que contengan altos niveles de metales con efectos negativos para la fundición tanto de cobre como de zinc. Los microorganismos crecen y se reproducen sin la necesidad de adicionar una fuente de carbono, pues la obtienen del dióxido de carbono del aire.

### 3.6.- DESVENTAJAS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

A bajas temperaturas la acción de las bacterias disminuye y con ello la recuperación del metal. Sería necesario invertir en un sistema que pueda aumentar la temperatura en la matriz de mineral, para garantizar recuperaciones mayores del metal.

Los tiempos para una recuperación significativa de cobre, son más largos para las metodologías menos controladas, como la biolixiviación en botaderos.





Es importante controlar variables como la temperatura, aireación, pH, tamaño de partículas, para asegurar las condiciones óptimas de funcionamiento de las bacterias, pero esto resulta difícil en metodologías de mayor envergadura como los botaderos y las pilas.

### 3.7.- BIOLIXIVIACIÓN EN EL MUNDO

Los años 90 fueron una época muy fructífera para los procesos de biolixiviación, durante esta década, comenzaron a funcionar 14 de las 16 plantas comerciales existentes en la actualidad. Esta importante actividad comercial ha generado un gran auge en investigación y se han conseguido notables hallazgos en este campo, principalmente en lo que se refiere a la bioquímica de estos procesos, a aspectos moleculares y genéticos de los microorganismos participantes en ellos y al desarrollo del aspecto económico e ingenieril de la biolixiviación y biooxidación en pilas y reactores agitados <sup>[22]</sup>. La biolixiviación se aplica en países como México, Estados Unidos, Canadá, Chile, Australia, entre otros; y los procesos de biolixiviación patentados más conocidos pertenecen a transnacionales como BHP Billinton, Anglo American, Codelco y la Universidad de British Columbia. Los procesos industriales han tenido enorme aplicación, entre los que destacan: el proceso BIOX, de Gencor, y que tiene plantas como la de Ashanti en Colombia con capacidad para tratar hasta 1000 tpd (toneladas por día) de mineral.

En el Perú la tecnología es aplicada en el Proyecto Tamboraque de Minera Lizandro Proaño, para recuperar oro contenido en arsenopirita. Mintek, también ha desarrollado el proceso MINBAC, y Bactech de Australia ha desarrollado un proceso que emplea bacterias termófilas moderadas para el tratamiento de metales





---

preciosos y de metales base que se conoce como el proceso BACTECH. En 1998, Mintek y Bactech se asociaron para comercializar el proceso a nivel mundial.

Esta asociación ha dado sus primeros frutos y ya se ha iniciado la construcción de la planta que emplea esta tecnología en Tasmania para tratar el mineral aurífero refractario del proyecto Beaconsfield. Las evaluaciones preliminares han reportado una recuperación de hasta el 98% del oro contenido en el mineral <sup>[19]</sup>.

La Sociedad Minera Pidahuel (SMP) fue la primera en desarrollar un proceso de biolixiviación de cobre en pilas a escala industrial y la técnica que estos desarrollan en la Planta de Lo Aguirre (Chile) fue llamada Thin Layer Leaching <sup>[34-36]</sup>.

En cuanto a la biolixiviación de calcopirita en reactores, se han realizado numerosos esfuerzos para la investigación de un proceso comercialmente viable, logrando durante los últimos años algunos avances en cuanto al diseño de reactores y mejoras del proceso mediante el uso de bacterias termófilas moderadas.





<b>Proyecto, Ubicación</b>	<b>Tipo &amp; Tamaño</b>	<b>Tecnología Aplicada</b>	<b>Historia</b>
<b>Fairview, Sud Africa</b>	Oro, 35 tm/ día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1986, en operación
<b>Sao Bento, Brazil</b>	Oro, 150 tm/día	GENMIN, una fase de tanque agitado previo al autoclave	Construido en 1990, en operación
<b>Harbour Lights, Australia</b>	Oro, 40 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1992, paralizado en 1994
<b>Wiluna Mine, Australia</b>	Oro, 115 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1993, en operación
<b>Sansu, Ghana</b>	Oro, 1000 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1994, ampliado en 1995, en operación
<b>Youanmi, Australia</b>	Oro, 120 tm/día	BACTECH, tanque agitado	Construido en 1994, en operación
<b>Lo Aguirre, Chile</b>	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, bio- pilas	Iniciado en 1980, paralizado en 1996
<b>Cerro Colorado, Chile</b>	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1993, en operación
<b>Quebrada Blanca, Chile</b>	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1994, en operación
<b>Ivan-Zar, Chile</b>	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1994, en operación
<b>Mt, Leyshon, Australia</b>	Cu/Au, lixiviación en pilas	Biopila de capa delgada más cianuración	Construido en 1992, en cierre
<b>Girilambone, Australia</b>	Cu, lixiviación en pilas	Biopila	Construido en 1993, en operación







Proyecto, Ubicación	Tipo & Tamaño	Tecnología Aplicada	Historia
Ivan-Zar, Chile	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1994, en operación
Mt, Leyshon, Australia	Cu/Au, lixiviación en pilas	Biopila de capa delgada más cianuración	Construido en 1992, en cierre
Girilambone, Australia	Cu, lixiviación en pilas	Biopila	Construido en 1993, en operación
Newmont-Carlin, USA	Oro, lixiviación en pilas	Biopila y cianuración	Construido en 1995, en operación
Toquepala, Perú	Cu, lixiviación de	Dumps	Iniciado en 1996, en

**Tabla 5. Plantas comerciales de biolixiviación de minerales en el mundo.**

### 3.8.- BIOLIXIVIACIÓN DE COBRE

Cuando el material de un yacimiento cuprífero tiene menos de un 0,5% de cobre, el trabajo de refinamiento tradicional deja de ser rentable, una situación que impulsó a los investigadores a buscar nuevos procesos, más baratos y eficientes, que permitieran aprovechar las millones de toneladas de descarte amontonadas, lo que ha sido posible gracias a las bacterias lixiviantes, las que empezaron a ser experimentadas en 1986 en la mina Lo Aguirre, permitiendo separar el cobre de los minerales sólidos con los que se encontraba mezclado.

En el 70% de los casos en que se busca extraer el mineral rojo de la roca, se recurre a la pirometalurgia, proceso que consiste en que una vez separados físicamente el cobre de los compuestos a través de flotación realizar la fundición en hornos a 1.200°C, lo que produce que, al pasar al estado líquido, los elementos





más livianos queden en la parte superior del fundido, y los pesados, como el cobre, se concentren en la base. Esta metodología no sólo es inviable económicamente para minerales con bajo contenido en metal, sino que es altamente contaminante, ya que libera enormes cantidades de dióxido de azufre, que es uno de los gases involucrados en la llamada "lluvia ácida".

El otro método que se utiliza es la hidrometalurgia, proceso en el que a los minerales oxidados y sulfurados se les aplica una solución de ácido sulfúrico, que produce la lixiviación: la disolución selectiva del cobre, con lo cual se separa de los otros elementos. El inconveniente es que para los minerales sulfurados no basta una solución ácida, por fuerte que ésta sea, sino que también requiere un agente oxidante externo que ayude en el proceso, rol que asumen las bacterias como la "*Acidithiobacillus ferrooxidans*".

Estos microorganismos se alimentan principalmente de dos impurezas que hay que extraer del mineral para producir cobre: el azufre, que las bacterias pueden oxidar y convertir en ácido sulfúrico; y el hierro, el cual es precipitado sobre el mineral de descarte, lo que permite lograr una disolución más barata y simple.

A partir de una serie de experimentos que se desarrollaron en Sudáfrica se descubrió que si se conservan estas bacterias en agua con un bajo contenido de ácido y azufre a una temperatura de unos 75 grados centígrados, en cuatro días pueden convertir el mineral de cobre en una solución de 30 gramos de cobre puro por cada litro de agua, la cual es luego enviada a una refinería, donde se desarrollan las etapas de extracción por solventes y de electro-obtención.





Los avances en esta área han permitido que en la actualidad se generen en Chile alrededor de 450 mil toneladas de cobre a través de la biolixiviación en plantas como Chuquicamata, Quebrada Blanca, Cerro Colorado, Andacollo, Zaldívar y Dos amigos, con un costo de producción de 850 dólares por tonelada y sin que se produzcan emisiones de polvo, dióxido de azufre y arsénico <sup>[37]</sup>.

### 3.9.- BIOLIXIVIACIÓN DE MOLIBDENO

La molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) es extremadamente resistente al ataque bacteriano <sup>[38]</sup>; su biolixiviación se caracteriza como relativamente lenta e incompleta <sup>[39]</sup>. Las formas solubles de Mo son tóxicas para las bacterias de lixiviación de mineral que podrían adaptarse a Mo sólo parcialmente <sup>[40]</sup>. Estos primeros estudios llevaron a la conclusión de que la biolixiviación comercial de sulfuros de molibdeno no era práctico. Los microorganismos termófilos son más resistentes al Mo disuelto que las bacterias mesófilas tales como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, aunque hay reportes con microorganismo termófilos que extraen sólo el 3,3% al 13,3% de Mo de un concentrado después de 30 días de biolixiviación <sup>[41]</sup>.

Estos primeros estudios que concluyen que la biolixiviación de molibdenita es impráctico se reforzaron recientemente por Romano <sup>[42]</sup> quién encuentra muy bajas extracciones de Mo a partir de concentrados de molibdenita lixiviados con microorganismos mesófilos o termófilos.

Otros autores indican que el alto potencial redox necesario para la descomposición de molibdenita "es prácticamente imposible de alcanzar usando procesos de biolixiviación" <sup>[43]</sup>.





---

Para una biolixiviación exitosa de molibdeno se requiere de microorganismos resistentes o la manipulación de características de la solución de lixiviación para reducir así la toxicidad que presenta el molibdeno para los microorganismo el cual inhibe sus funciones, haciendo que el proceso sea más lento o no se lleve a cabo.





## 4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1.- REACTIVOS Y EQUIPOS

#### Mineral

El mineral utilizado proviene del complejo minero-metalúrgico La Caridad del estado de Sonora, único productor de molibdeno en el país, la producción ha incrementado debido a que a medida que se va profundizando el tajo de La Caridad, los contenidos este metal en el mineral son mayores. El concentrado de cobre que produce la planta de flotación de La Caridad tiene un 26-28% de cobre y de 5 a 8 kg/ton de molibdeno, que se separa del cobre en una planta de separación cobre-molibdeno, obteniéndose un concentrado de molibdeno con una ley de 53.52%.



Figura 9. Molibdenita. Unidad Minera Caridad. Sonora

#### Concentrado de molibdenita



En el presente trabajo se utilizó  $\text{MoS}_2$  (concentrado de molibdenita) en las pruebas en incubador orbital. Así como en los reactores **RELVA-RBAL1**<sup>®</sup> (Reactor air lift) y **RELVA-RBP1**<sup>®</sup> (Reactor propela), como objeto de estudio.

Figura 10. Concentrado Molibdenita. Unidad minera Caridad.

Sonora





## Material

1. Matraces Erlenmeyer de 250 mL.
2. Electrodo combinado para medir potencial redox con referencia interna de Ag/AgCl.
3. Electrodo combinado para medir pH con referencia interna de Ag/AgCl.
4. Celda conductimétrica TE100.
5. Cámara Neubauer.
6. Material de laboratorio común.

## Equipo

1. Incubador con Agitación Orbital marca Barnstead Lab-line, modelo SHKE4000.
2. Microscopio de Contraste de Fases marca Olympus.
3. Espectrofotómetro UV-Visible marca GBC, modelo Cintra 5.
4. Potenciómetro marca Cole-Parmer, modelo 05669-20.
5. **RELVA-RBAL1**<sup>®</sup> (Reactor air lift)
6. **RELVA-RBP1**<sup>®</sup> (Reactor propela)
7. Conductímetro Tacussel CDRV62
8. pHmetro Beckman I45.
9. Balanza Analítica Mettler 240A.





## Reactivos

1.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico).
2.  $\text{HCl}$  (ácido clorhídrico)
3.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (sulfato de amonio).
4.  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (fosfato de potasio dibásico).
5.  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de magnesio heptahidratado).
6.  $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (sulfato ferroso amoniacal).
7.  $\text{KSCN}$  (tiocianato de potasio).
8.  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (cloruro de estannoso).
9.  $\text{MoS}_2$  (concentrado de molibdenita).
10. Cepa disponible en el laboratorio, de bacterias termófilas extremas, mantenidas en refrigeración a  $4^\circ\text{C}$ .





## 4.2.-METODOLOGÍA

- **Medio nutriente MKM (medio Kelly modificado)**

La bacteria como, todo organismo vivo, debe obtener energía de elementos básicos para su nutrición de los microorganismos el cual debe ser en cantidades proporcionales a su composición celular en el medio de cultivo en forma de sales.

Los más importantes cuantitativamente, son el nitrógeno, generalmente como sal de amonio, el magnesio (sulfato de magnesio)

necesario para la fijación de CO<sub>2</sub>, el fósforo (fosfato ácido de potasio) para el metabolismo, es por esto que se prepara, el medio MKM con la siguiente composición:

Composición (g/L)	MKM
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.4
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.04
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.4

- **Incubador orbital**

Se prepara cultivos de molibdenita con un tamaño de partícula de 325 µm en medio nutriente MKM al 5% en sólidos, inoculados al 1%, con una cepa bacteriana termófila extrema disponible en el laboratorio. Periódicamente se monitorean pH, ORP y bacterias por campo.

- **Reactores**

Se coloca 1L del medio MKM en el recipiente inoculando 1% V/V, adicionando 5g del concentrado de MoS<sub>2</sub> con un tamaño de partícula de 325 µm y se prende el reactor a una temperatura constante de 65°C. Cada 4 horas se realiza el monitoreo del sistema (pH, potencial, bacterias por campo, conductividad). El pH, potencial y conductividad se miden tomando una muestra de 10 mL. Se ajusta el



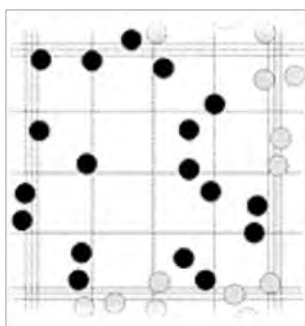




volumen del agua evaporada nuevamente a 1L con el medio MKM. El método para medir la densidad es el empleo de un picnómetro.

Para el conteo de bacterias por campo se usa la cámara Neubauer, tomando una pequeña muestra con una pipeta Pasteur. Se coloca sobre la cámara un cubreobjetos y se introduce la muestra; en caso de haber burbujas en el cubreobjetos o se haya movido se debe repetir la operación.

Posteriormente se coloca la cámara Neubauer en la platina del microscopio, se enciende y se enfoca el microscopio hasta que puedan ser nítidas las células y por lo tanto contables.



Conteo de células en la cámara Neubauer.

- Curva de calibración para determinación de molibdeno

Se usa la espectrofotometría UV-visible para la determinación de molibdeno que se encuentra en disolución. Para esto se realiza una curva de calibración, se prepara una solución madre de 100 ppm de  $\text{Mo}^{6+}$ . De esta solución madre que se prepara se toman alícuotas de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1mL colocándolas en matraces de 10mL. A cada uno de los matraces se les adiciona 1mL de sulfato ferroso amoniacal al 1%, 3mL de tiocianato de potasio al 10% y 3mL de cloruro estañoso al 35%, y se llevan al aforo con agua destilada.





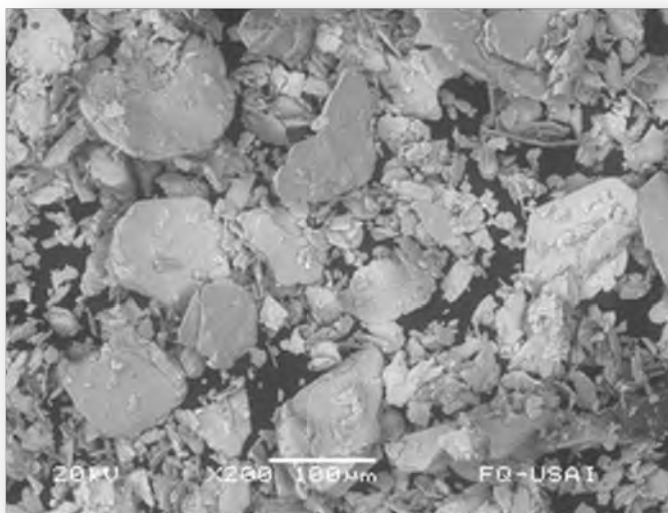
Después de haber preparado las muestras estándares se les mide la absorbancia a una longitud de onda de 500nm, al obtener las mediciones se procede a realizar la gráfica.

- Análisis de molibdeno en solución

Para cuantificar las muestras de biolixiviación se toma 1mL del cultivo, se filtra y se colecta en un matraz aforado de 10mL. Se le adicionan a cada una de las muestras realizadas sulfato ferroso amoniacal, tiocianato de potasio y cloruro estañoso en las proporciones antes mencionadas en las muestras estándares. Se mide la absorbancia a 500nm y se determina la concentración de  $\text{Mo}^{6+}$  por extrapolación en la curva de calibración.

- **MEB**

La técnica de caracterización por el estudio de microscopio electrónico de barrido (MEB) y microanálisis con  $e^-$  electrodispersados permite determinar la composición elemental y las especies minerales que presentan los elementos de interés y la morfología del mineral, esto nos suministra una información muy importante a pesar de la limitación que tiene esta técnica, la cual no es capaz de captar fases de bajas concentraciones sobre todo menor al 5% en peso, ya que el espectro de las demás crea una interferencia que traslapa a la especie de menor concentración.



**Figura 11. MEB.** Concentrado de molibdenita





- **DIAGRAMA DE FLUJO**

Caracterización del mineral ( $\text{MoS}_2$ )

-Química (MEB-EDS, DRX)

-Metalúrgica (Distribución granulométrica)



Selección de cepa.  
Preparación del medio nutriente MKM



Pruebas de viabilidad en incubador orbital a  $70^\circ\text{C}$ :

Monitoreo de parámetros

(pH, mV, Bac/mL,  $\mu\text{S}$ ,  $\rho$ , Mo en disolución).



Mantenimiento de la cepa



Pruebas de biolixiviación en los reactores **RELVA-RBAL1<sup>®</sup>** & **RELVA-RBP1<sup>®</sup>**:

Monitoreo de parámetros

(pH, mV, Bac/mL,  $\mu\text{S}$ ,  $\rho$ , Mo en disolución).



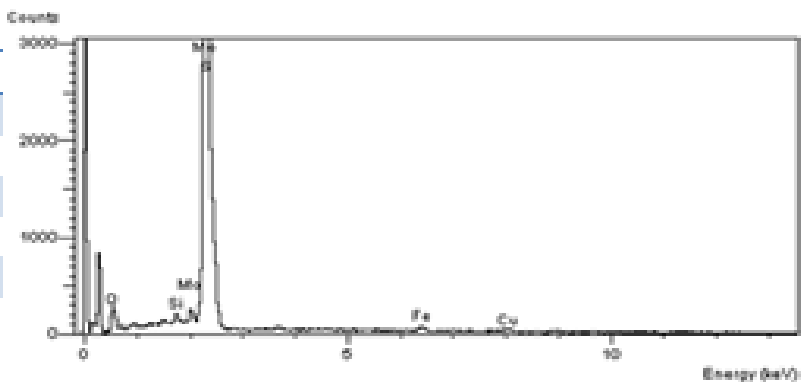


## 5.-RESULTADOS

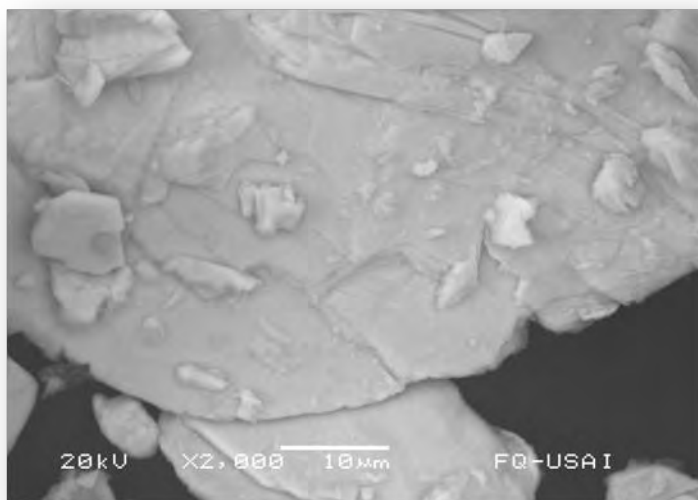
### 1. Caracterización de mineral

Resultados obtenidos en el análisis antes de someter el concentrado de molibdenita al proceso de biolixiviación:

Elemento	% de elemento
O	11.92
Si	0.48
S	31.68
Fe	1.35
Cu	1.05
Mo	53.52
Total	100.00



**Figura 12.** Resultados del microanálisis del concentrado



**Figura 13.** Micrografía electrónica de una partícula de molibdenita. Superficie inicial, antes de someterla al proceso de biolixiviación.

La micrografía electrónica de una muestra de un concentrado de  $\text{MoS}_2$  muestra una alta pureza y la morfología de la partícula.

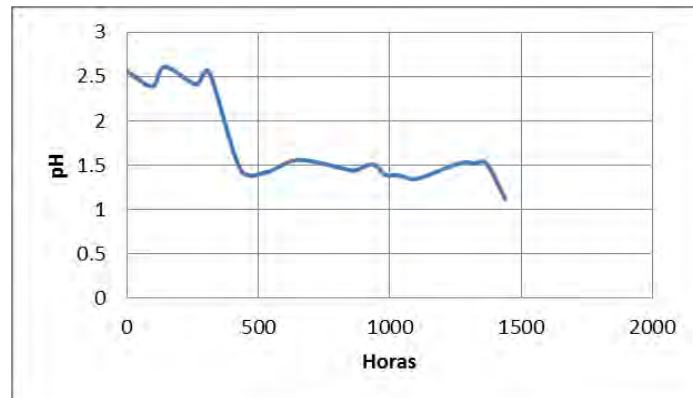




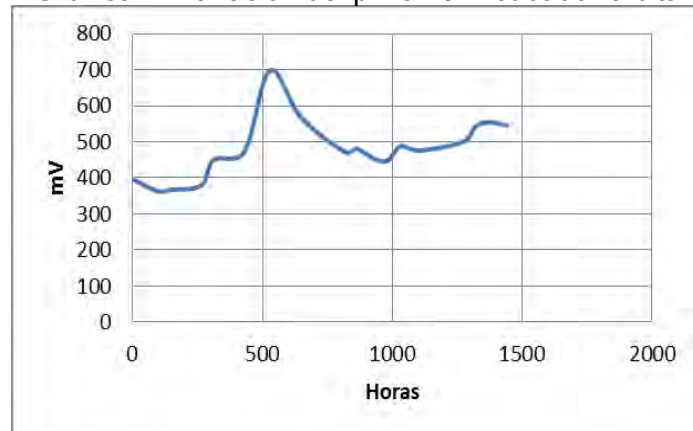
## 2. Resultados de la biolixiviación del concentrado de molibdenita en incubador orbital de 60 días.

Medición periódica de parámetros en la solución durante la experimentación.

Horas	pH	mV	B/mL
0	2.56	397	1.00E+06
96	2.39	363	1.00E+06
144	2.61	367	1.75E+06
264	2.41	379	1.75E+06
312	2.55	450	2.25E+06
432	1.45	475	6.25E+06
528	1.42	698	7.00E+06
648	1.56	568	7.50E+06
816	1.47	472	8.75E+06
864	1.44	481	9.75E+06
936	1.51	451	9.75E+06
984	1.39	449	9.75E+06
1032	1.39	488	9.75E+06
1104	1.35	476	1.00E+07
1272	1.53	500	1.43E+07
1320	1.52	542	1.98E+07
1368	1.52	555	1.98E+07
1440	1.12	546	1.98E+07



Gráfica 1. Variación del pH en el incubador orbital



Gráfica 2. Variación del mV en el incubador orbital



Gráfica 3. Variación de crecimiento bacteriano en el incubador orbital

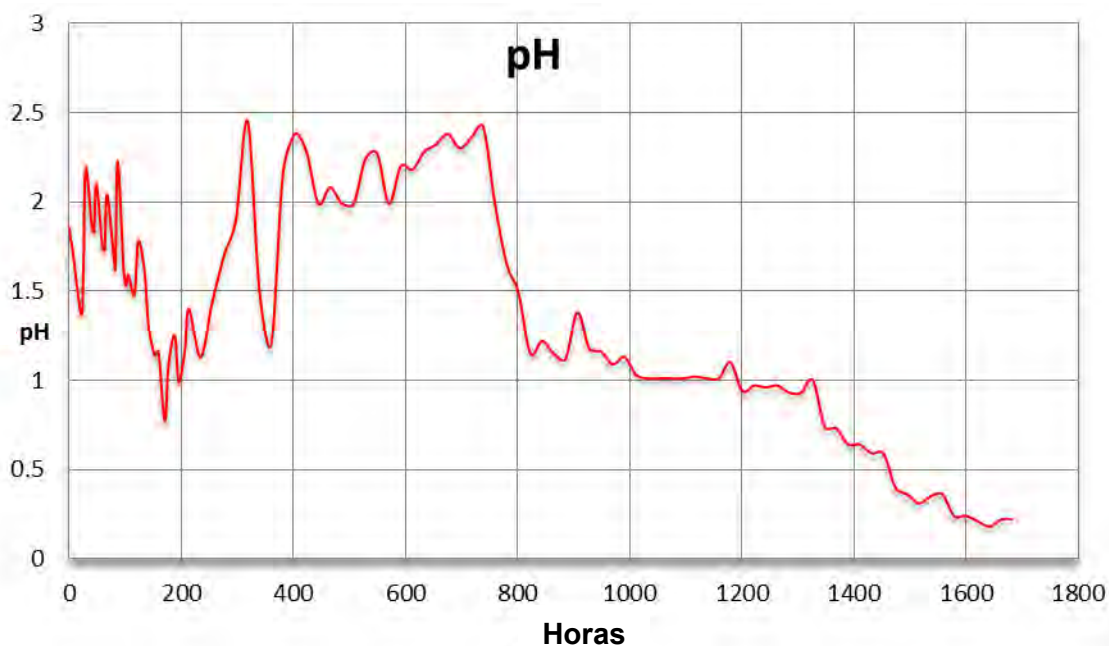




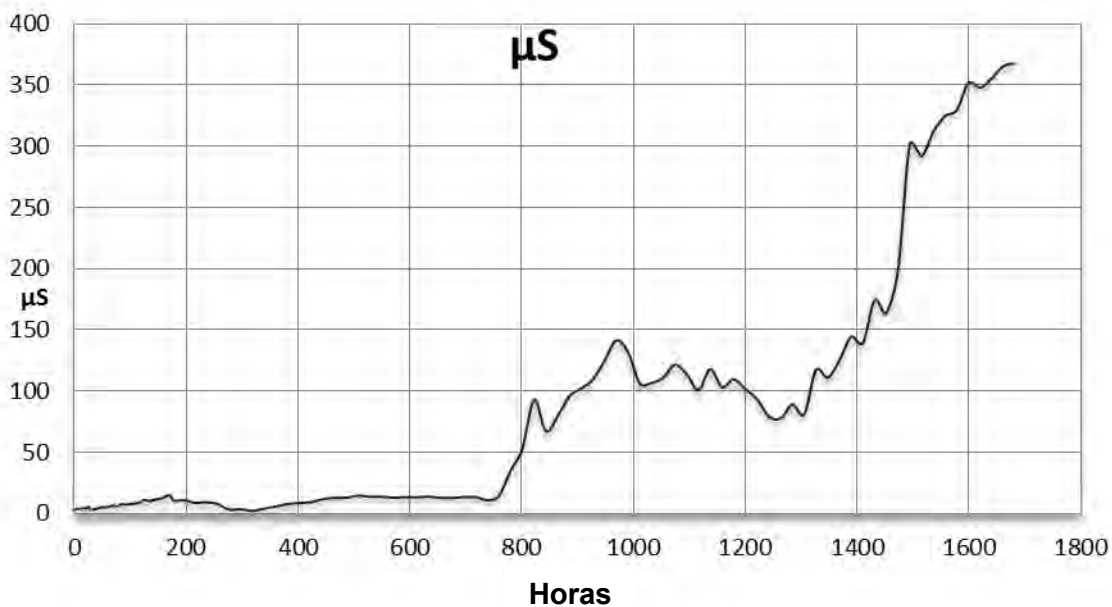
### 3. Resultados de la biolixiviación del concentrado de molibdenita en el reactor

#### **RELVA-RBAL1<sup>®</sup>** (Reactor air lift).

Datos obtenidos de la medición periódica de parámetros en solución reportados en horas:

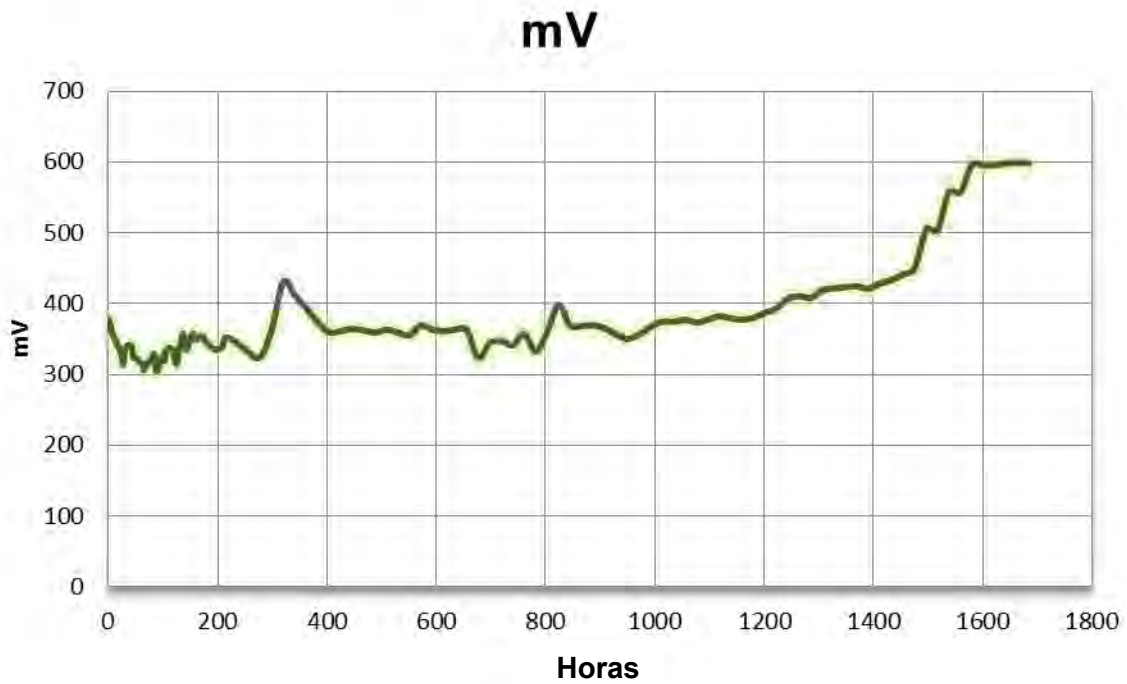


**Gráfica 4.** Variación del pH en el reactor RELVA-RBAL1<sup>®</sup>

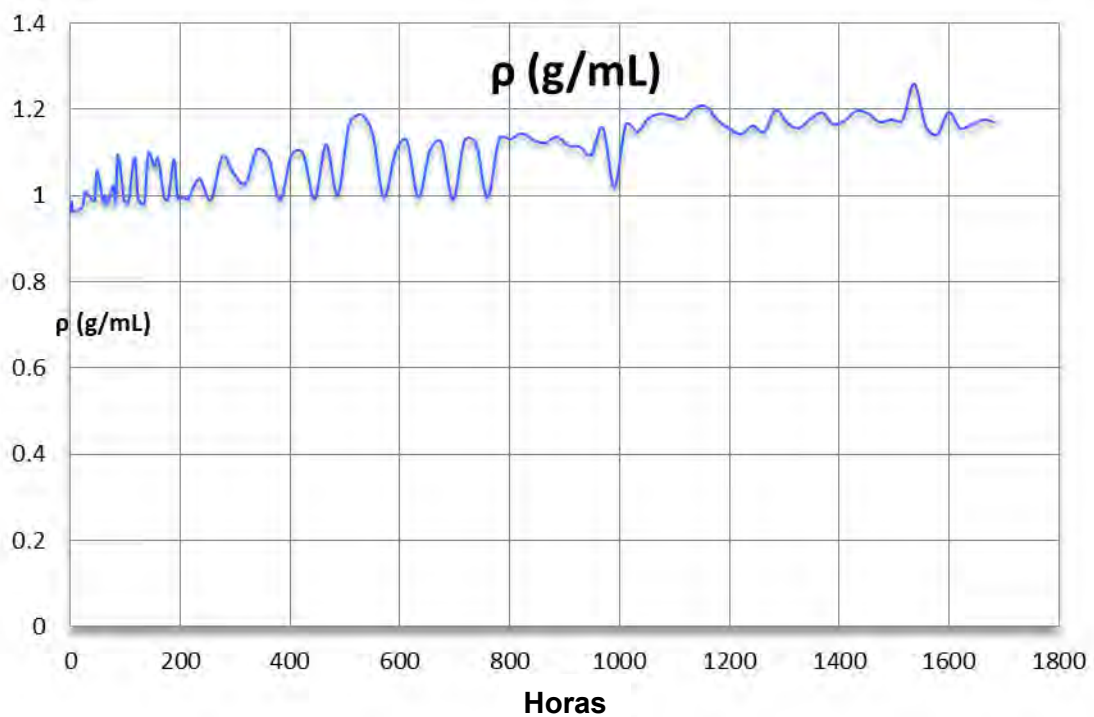


**Gráfica 5.** Variación de la conductividad en el reactor RELVA-RBAL1<sup>®</sup>



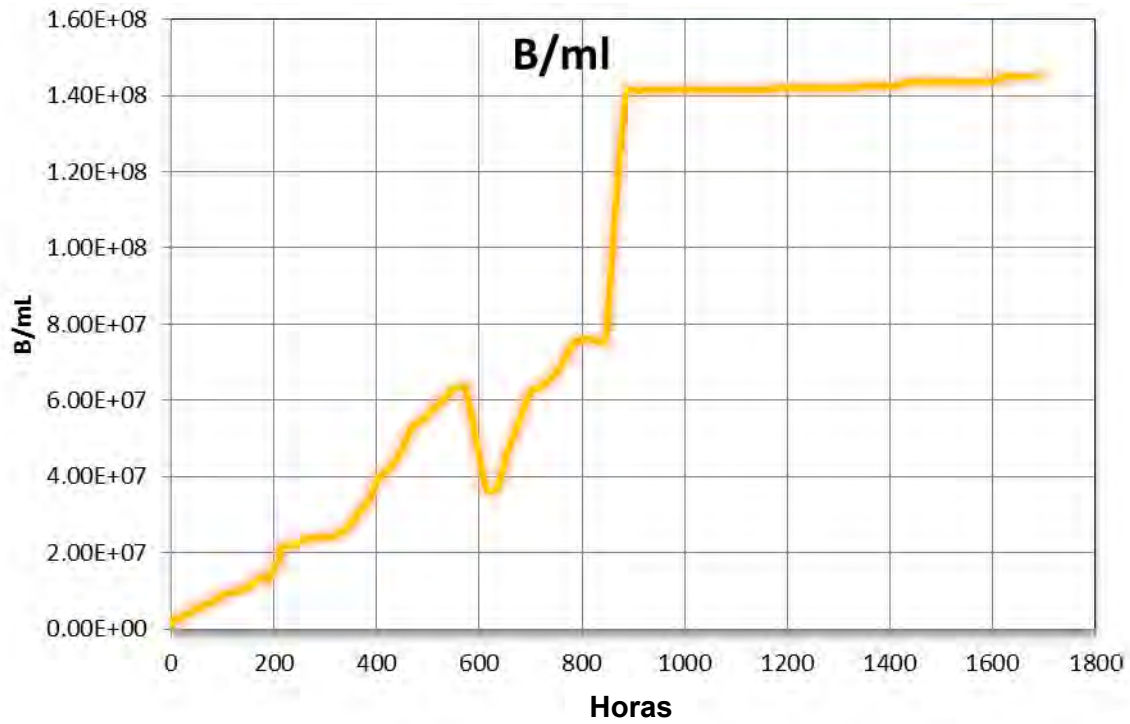


**Gráfica 6.** Variación del potencial redox en el reactor RELVA-RBAL1®

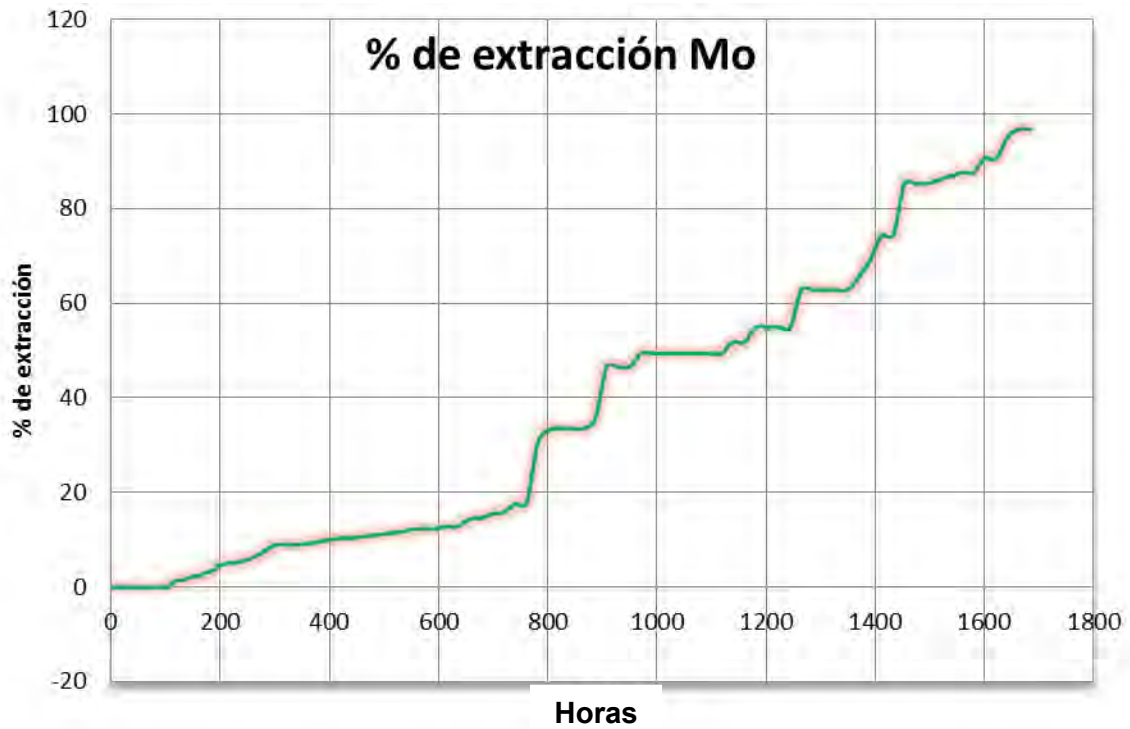


**Gráfica 7.** Variación de la densidad en el reactor RELVA-RBAL1®





**Gráfica 8.** Variación de crecimiento bacteriano en reactor RELVA-RBAL1®



**Gráfica 9.** Disolución de Mo en reactor RELVA-RBAL1®

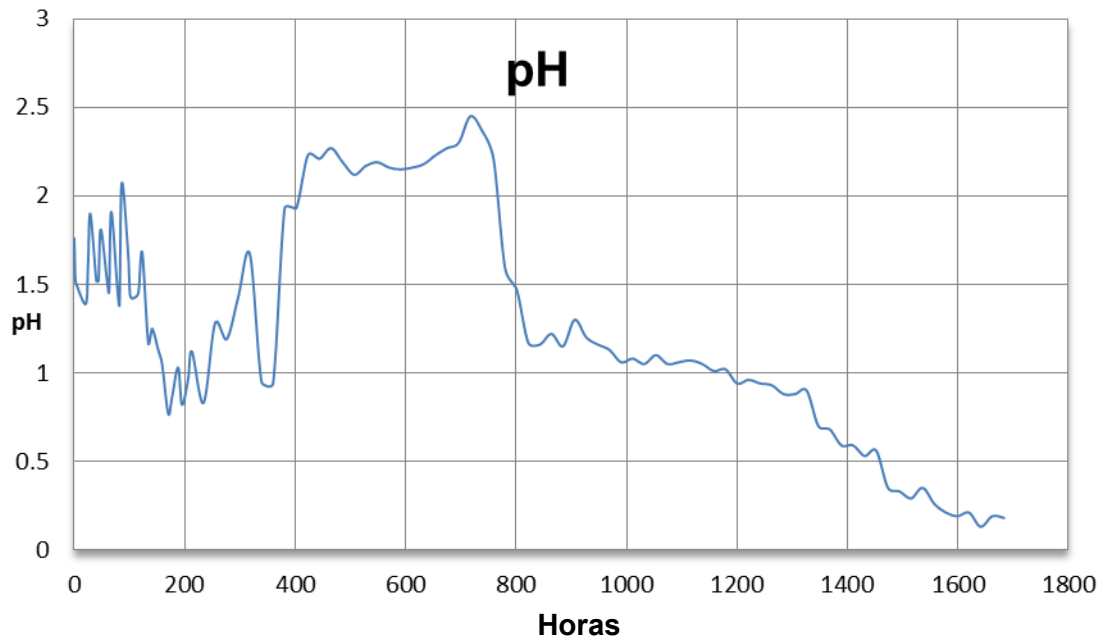




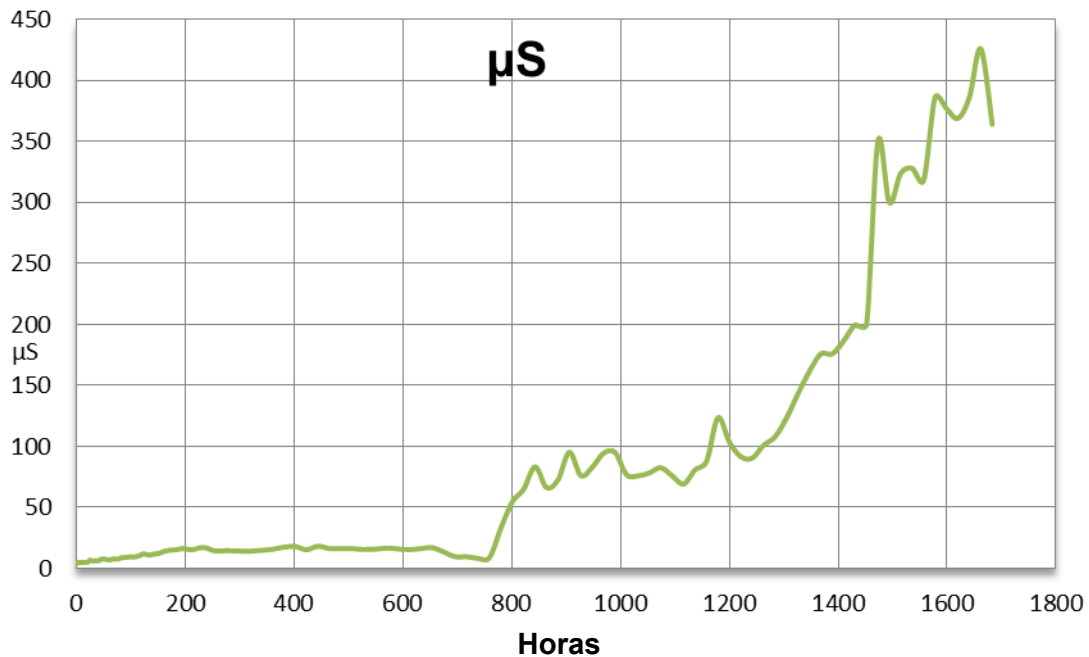


4. Resultados de la biolixiviación del concentrado de molibdenita en el reactor **RELVA-RBP1<sup>®</sup>** (Reactor de propela).

Datos obtenidos de la medición periódica de parámetros en solución reportados en horas:

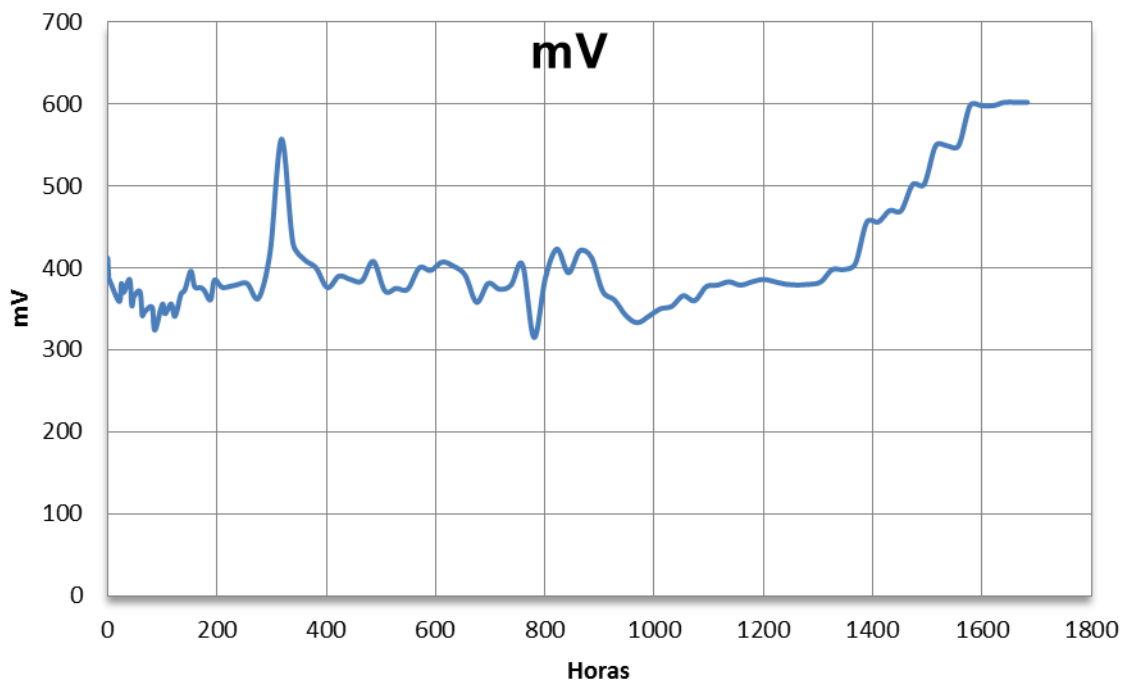


**Gráfica 10.** Variación del pH en el reactor RELVA-RBP1<sup>®</sup>

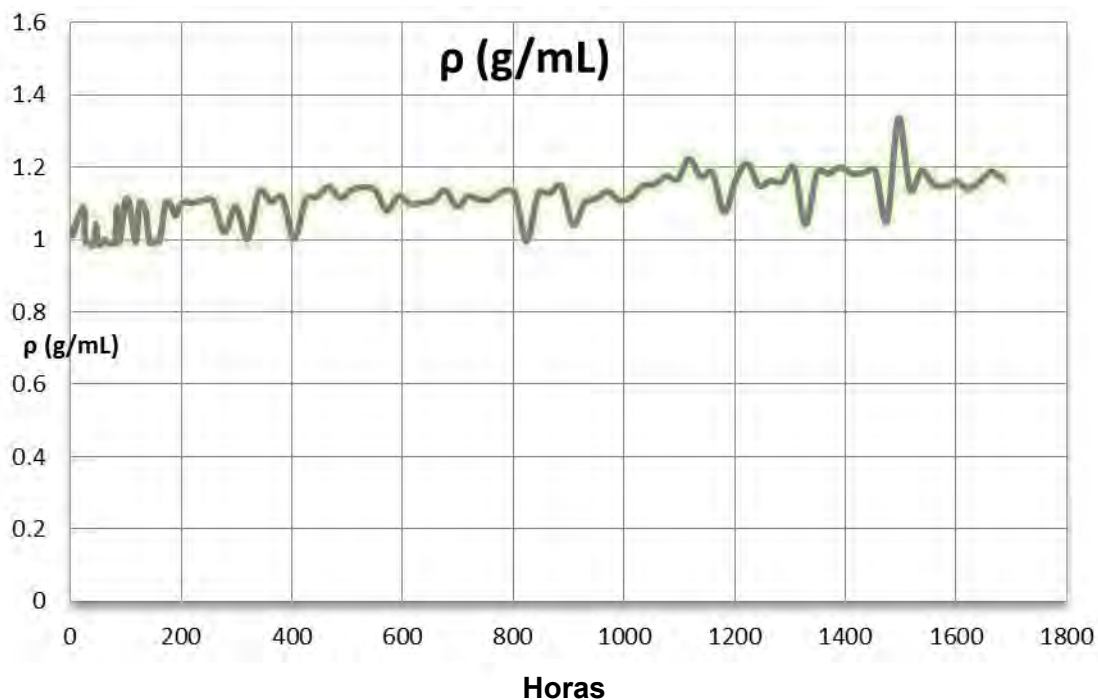


**Gráfica 11.** Variación de la conductividad en el reactor RELVA-RBP1<sup>®</sup>



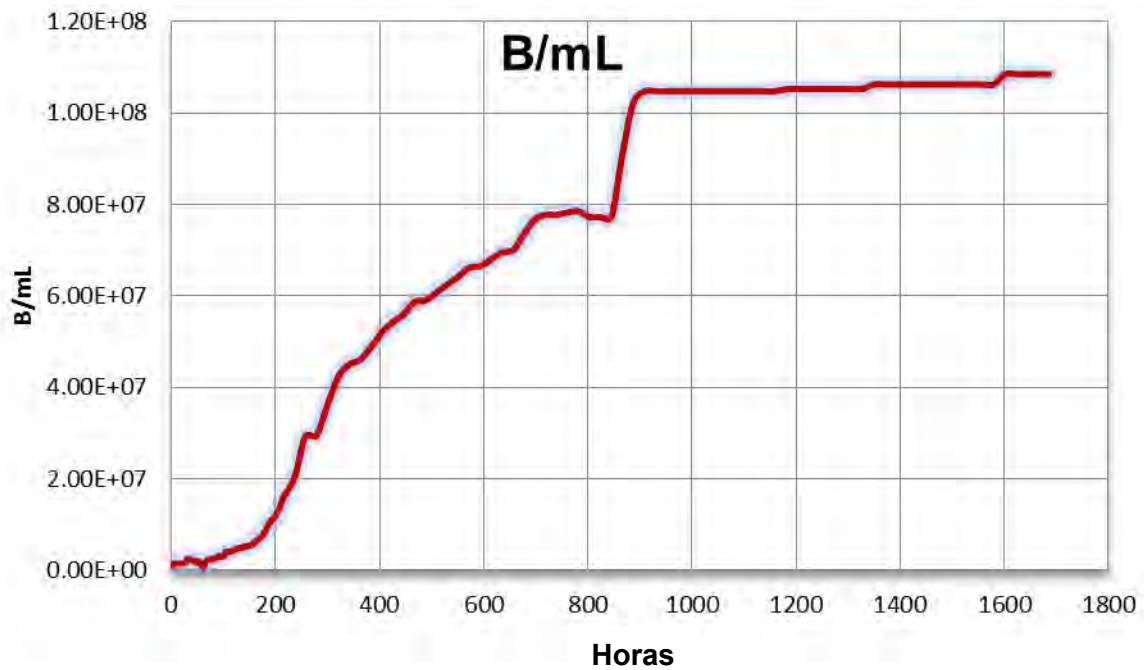


**Gráfica 12.** Variación del potencial redox en el reactor RELVA-RBP1®



**Gráfica 13.** Variación de la densidad en el reactor RELVA-RBP1®





**Gráfica 14.** Variación de crecimiento bacteriano en reactor RELVA-RBP1®



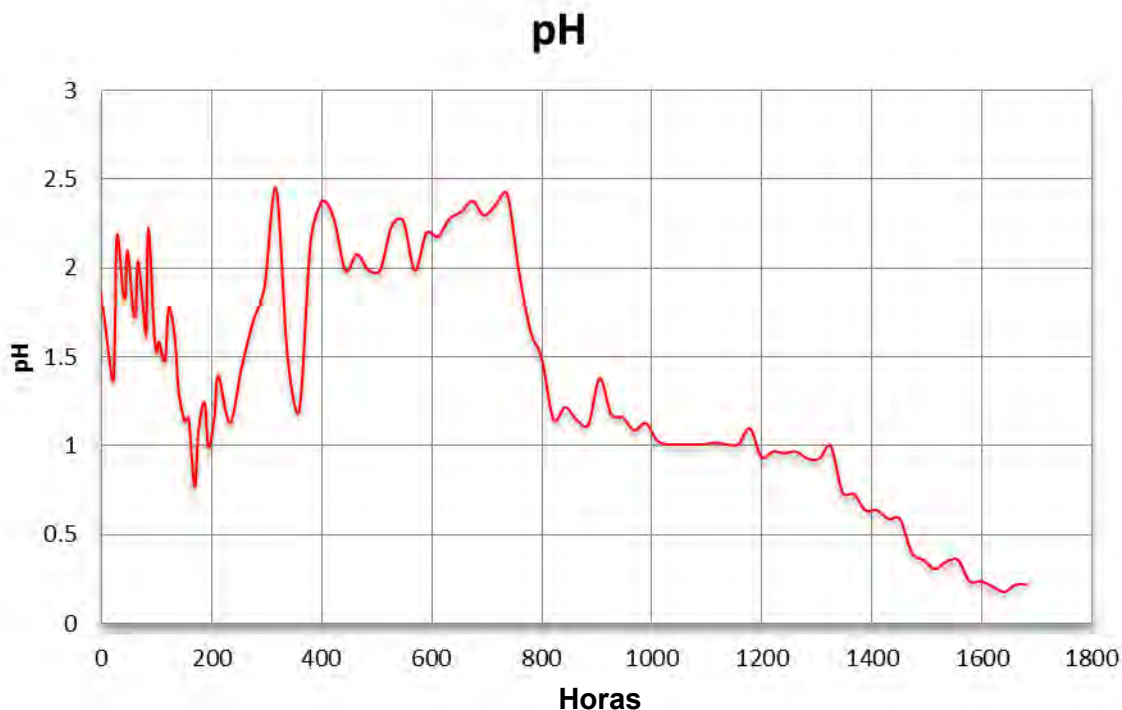
**Gráfica 15.** Disolución de Mo en reactor RELVA-RBP1®





## 6.-ANÁLISIS DE RESULTADOS

- I. Análisis de resultados de la biolixiviación del concentrado de molibdenita en el reactor **RELVA-RBAL1<sup>®</sup>** (Reactor air lift) después de 1683 horas de extracción.



**Gráfica 4.** Variación del pH en el reactor RELVA-RBAL1<sup>®</sup>

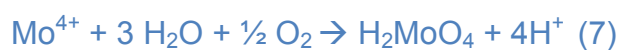
El pH inicial del medio es de 1.86, dentro de las 0 a las 200 horas el pH presenta una fluctuación debido a la posible formación del compuesto  $\text{Mo}^{4+} + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mo}(\text{OH})_4 + 4 \text{H}^+$ , en solución, es por esto la causa del aumento del pH en estas horas. A partir de las 170 a 350 horas se observa un decremento del pH, esto es debido a que este tipo de bacterias acidófilas aumentan considerablemente su actividad, como consecuencia de esta mayor actividad genera  $\text{H}^+$  y el pH disminuye. Pero a las 350 a 750 horas se observa un aumento del pH, la causa es la posible formación de compuesto  $\text{Mo}^{4+} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MoO}(\text{OH}) + 3 \text{H}^+$  en solución





el cual favorece el incremento del pH. A partir de las 750 horas se observa el descenso del pH esto es debido a la formación del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y el ácido molíbdico ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).

La reacción que se lleva a cabo en el reactor catalizada por la bacteria es la siguiente <sup>[44]</sup>:

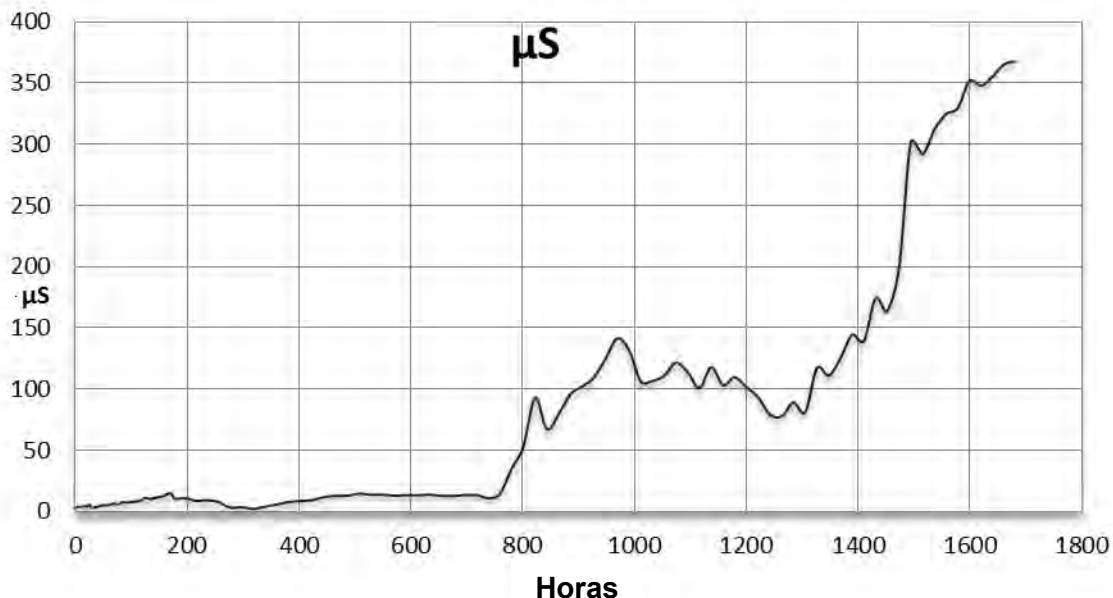


La reacción global



La reacción anterior explica la disminución importante de pH ya que además de la producción de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) debido a la oxidación bacteriana del ion  $\text{S}^{2-}$ , el molibdeno se solubiliza como ácido molíbdico ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).





**Gráfica 5.** Variación de la conductividad en el reactor RELVA-RBAL1®

La conductividad es un parámetro rutinario en muchas aplicaciones industriales y del medio ambiente debido a que es un método rápido, barato y fiable para poder medir el contenido iónico de las soluciones.

En la gráfica 5 de conductividad se observa que dentro de las 0 a las 759 horas, el valor de la conductividad es muy bajo, esto se asocia a que los microorganismos están en la fase de adaptación al medio y crecimiento, dejando como tarea secundaria la lixiviación del molibdeno. Pero a partir de las 800 horas, cuando la bacteria pasa la fase de adaptación y crecimiento, ésta incrementa su actividad haciendo que el medio sea más ácido debido a la oxidación del  $S^{2-}$  a  $H_2SO_4$  en el reactor, favoreciendo a una mayor disolución de iones  $MoO_4^{2-}$  en el medio, es decir, entre mayor sea la cantidad  $MoO_4^{2-}$  disuelto, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución alcanza una concentración en la que la interacción entre los iones limitan libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, esto ocurren de las 1011 a



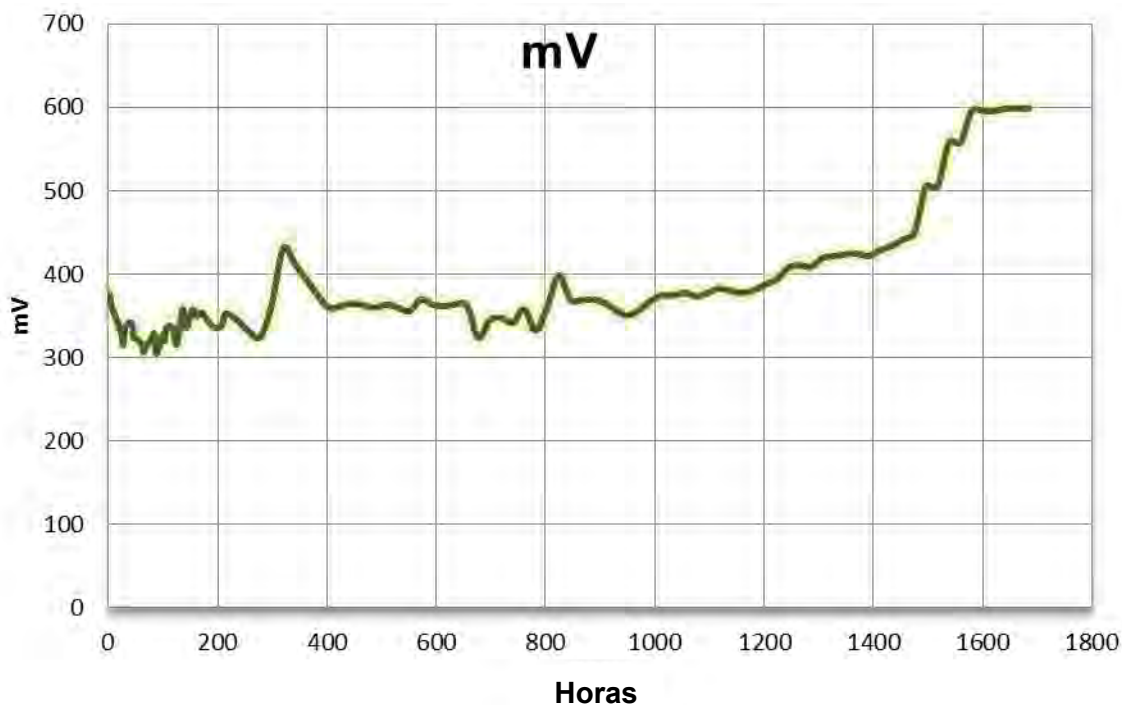


las 1305 horas cuando la conductividad disminuye. Debido a lo anterior para poder seguir tomando las lecturas de conductividad se diluyen las muestras 1:10, esto se realiza a la hora 1347, donde se observa en la gráfica que la actividad bacteriana se encuentra en su mayor fase de extracción, explicando la alta concentración de los iones disueltos en la solución.



Conforme aumenta la actividad bacteriana, la conductividad aumentara debido a la presencia de más iones en la solución. El aumento en ésta es importante debido a que el ion  $\text{H}^+$  es el de mayor conductividad iónica.





**Gráfica 6.** Variación del potencial redox en el reactor RELVA-RBAL1®

La medición del potencial redox constituye una herramienta útil para evaluar la actividad bacteriana, cuando el potencial redox aumenta se asocia a una mayor actividad bacteriana en el medio.

Se parte de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) en la que el Mo presenta un estado de oxidación de  $4^+$  con un potencial reportado teórico para la reacción correspondiente  $\text{MoO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HMoO}_4^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  de 429 mV, y al compararlo con el inicio del experimento es un poco bajo (378 mV) esto puede ser por los microorganismos aún estén en la fase de adaptación al mineral, la cual hace que presente una baja actividad, lo cual se apreciará en el bajo potencial inicial.

En la gráfica 6 se observa que a partir de las 800 horas hay un crecimiento en el potencial redox (400 mV), esto es debido a la formación del  $\text{Mo}^{5+}$  el cual tiene un potencial teórico reportado por la reacción correspondiente  $\text{Mo}^{\text{IV}} \rightarrow \text{Mo}^{\text{V}} + \text{e}^-$  de



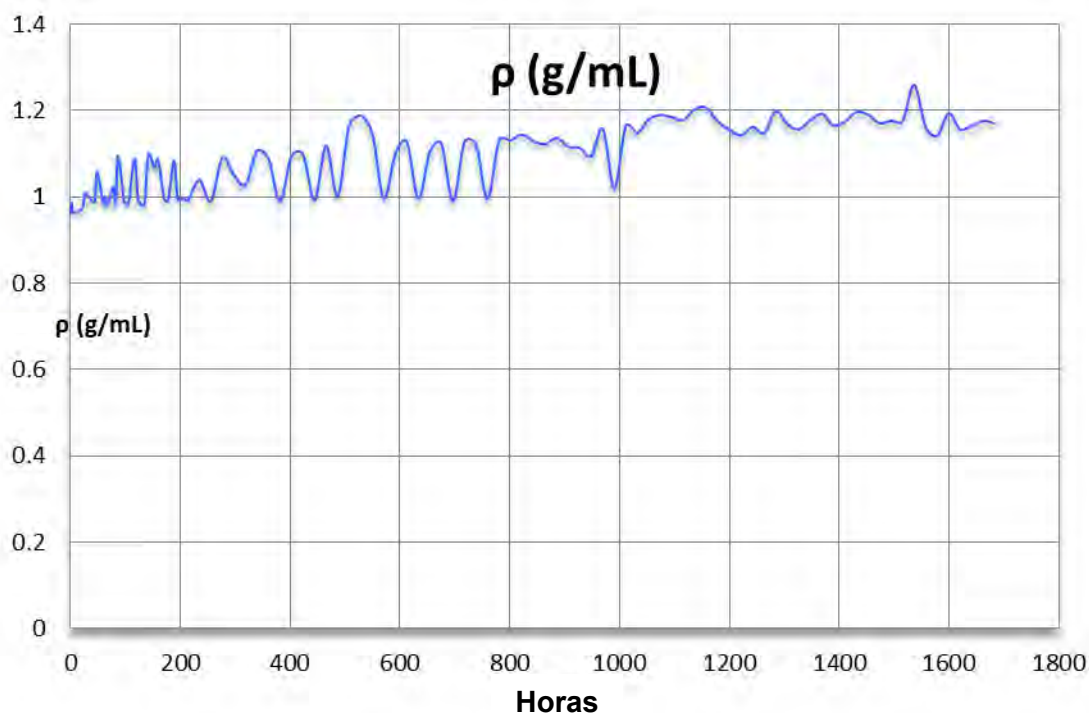




430 mV, donde se puede observar que es muy corta la etapa donde se forma, esto sucede por la baja estabilidad que presenta ya que se oxida fácilmente por el aire y es susceptible a descomponerse en compuestos de molibdeno hexavalentes ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).

El potencial redox reportado para  $\text{Mo}^{6+}$  esta dado por la siguiente reacción  $\text{MoO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MoO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  de 606 mV, y a las 1600 horas se obtiene un potencial de 600 mV el cual es un indicativo de la oxidación del mineral debido a la acción bacteriana, que genera iones molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) en la solución. Con los resultados obtenidos se pueden afirmar dos condiciones, la primera es que se alcanza el objetivo de obtener molibdeno en la disolución y segundo que se tiene una buena actividad bacteriana la cual hace que se pueda lograr una óptima extracción de molibdeno.

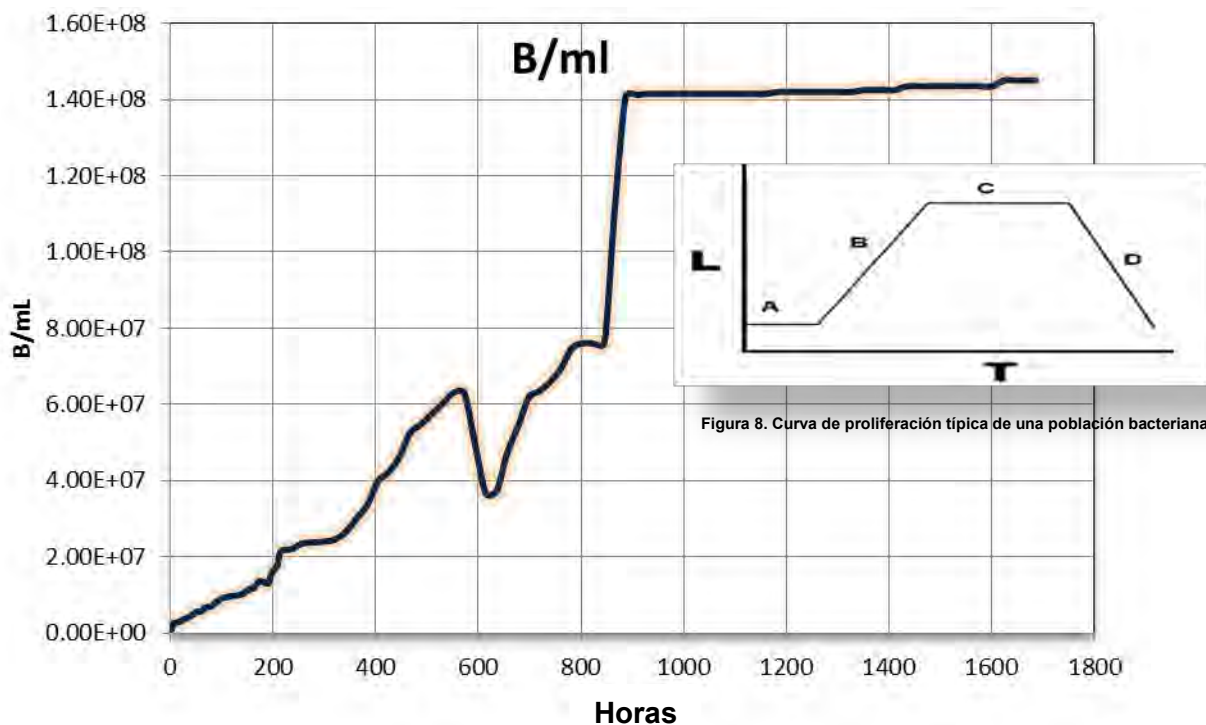




**Gráfica 7.** Variación de la densidad en el reactor RELVA-RBAL1<sup>®</sup>

En la gráfica 7 se observa que el sistema presenta variaciones en la densidad esto va de las 0 a las 800 horas aproximadamente, es decir el sistema se presenta inestable, durante la fase de adaptación de los microorganismos. Después de las 800 horas el sistema tiende a ser más estable, esto debido a que en esta fase inicia la extracción importante de molibdeno. La medición de este parámetro en la experimentación se usa con frecuencia para poder describir el comportamiento del sistema así, se observará a partir de qué tiempo el sistema se volverá homogéneo, y con esto la mayor extracción de molibdeno por medio de la biolixiviación.





**Gráfica 8.** Variación del crecimiento bacteriano en reactor RELVA-RBAL1®

El llevar a cabo el control de crecimiento bacteriano, se emplea para conocer si las condiciones con las que cuenta el reactor son las óptimas para que la cepa se pueda adaptar y llevar a cabo el proceso de extracción del molibdeno.

En la gráfica 8, se puede observar que de 0 a 200 horas el proceso de crecimiento es lento ya que las bacterias individuales están madurando y no tienen la posibilidad de dividirse, esto sucede a la fase de adaptación (A) figura 8, donde la bacteria se ajusta a las condiciones del medio.

De las 300 a las 600 horas sucede la fase exponencial (B) figura 8, este un período caracterizado por la duplicación celular, donde el número de nuevas bacterias que aparecen por unidad de tiempo es proporcional a la población actual. Si el crecimiento no se limita, la duplicación continuará a un ritmo constante. Pero el crecimiento exponencial no puede continuar indefinidamente



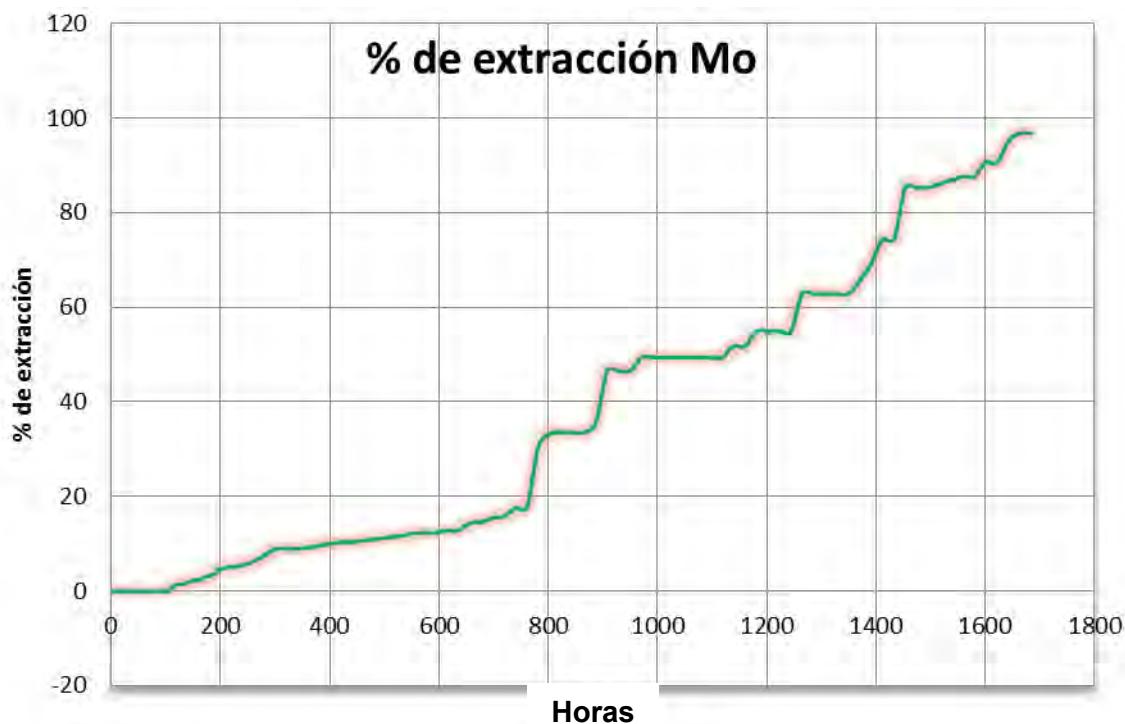


---

como se observa en el periodo de las 570 a las 696 horas, una caída o fase de muerte exponencial (D) figura 8, porque el medio llega pronto al agotamiento de nutrientes o acumulación de metabolitos inhibidores (ya que durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación, y en ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos. Estas concentraciones tóxicas se pueden disminuir al diluir la solución lixivante).

A partir de las 885 a las 1683 horas inicia la fase estacionaria (C) figura 8, donde la velocidad de crecimiento comenzara a disminuir equilibrando el número de células nuevas con el número de células que mueren, en esta fase se presenta por agotamiento del suministro de algún nutriente esencial o por acumulación de productos metabólicos que sean tóxicos.





**Gráfica 9.** Disolución de Mo en reactor RELVA-RBAL1®

En la gráfica 9 se observa que en el intervalo de las 0 a las 100 horas la extracción de molibdeno es nula, se debe a que las bacterias pudieran estar lixiviando algún otro metal que se encuentre en el concentrado de la molibdenita o simplemente se encuentre en la fase de adaptación que requiere la cepa bacteriana ya que las bacterias individuales que se encuentran en el medio están madurando y no tienen la posibilidad de dividirse.

A las 800 horas comienza la mayor actividad de los microorganismos, esto sucede porque al tener una temperatura de 65°C constante, así como varios parámetros controlados del sistema, la bacteria se pueda desarrollar con mayor rapidez, y por consiguiente se logra mejorar por mucho la cinética de la reacción la cual representa una dificultad de este método.



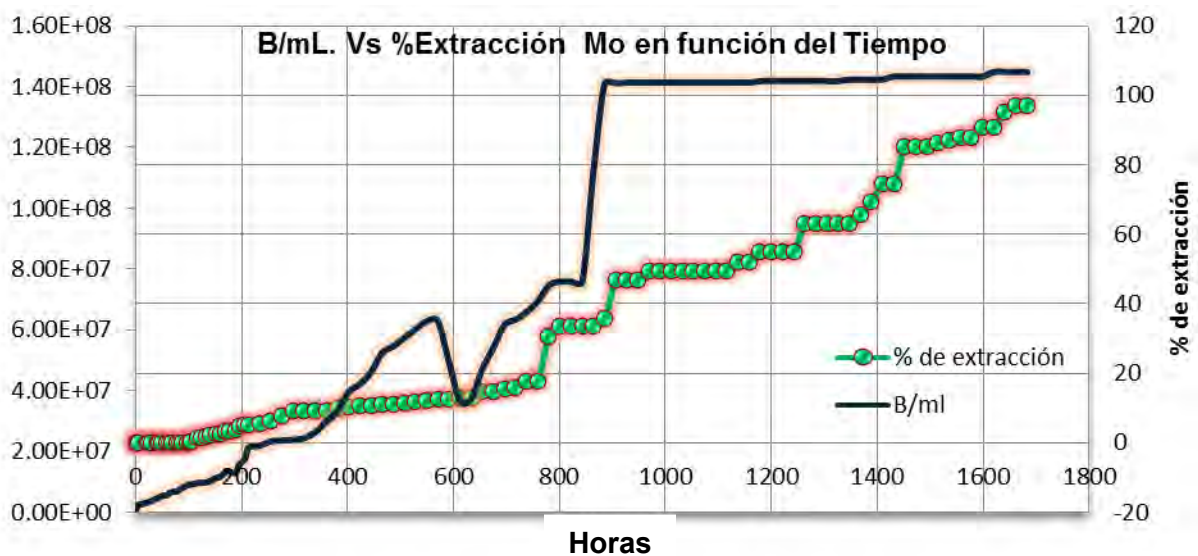


---

En el artículo de “biolixiviación de molibdenita” escrito por Gregory J. Olson éste hace referencia a que la extracción de molibdeno es del 50% en un mes, pero después se desacelera a partir de ese momento llegando a un 85% aproximadamente en 6 meses de experimentación, lo cual al hacer la comparación con el experimento realizado sucede lo contrario dentro de las primeras 800 horas que representan un mes se tiene una extracción baja, pero después de las 900 horas se obtuvo una mayor actividad, alcanzando así una extracción del 96.86% en dos meses y diez días, esto sucede a las condiciones con las cuales funciona el reactor lo cual facilita aún más la mayor actividad bacteriana manteniendo homogéneo el medio y a una temperatura constante de 65°C.

Lo anterior muestra que este reactor sea muy viable para su aplicación en la industria para la extracción de los valores metálicos.





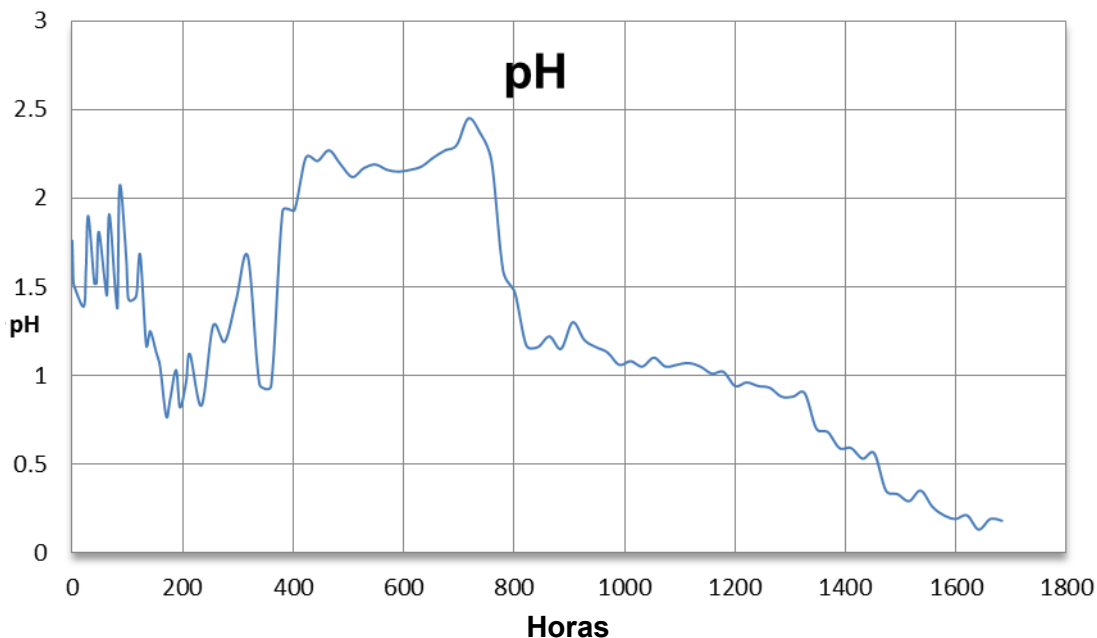
**Gráfica 16.** Variación del crecimiento bacteriano. Vs disolución de Mo en función del Tiempo. Reactor RELVA-RBAL1®

En la gráfica 16 observamos, el crecimiento bacteriano dentro de las 0 a las 400 horas en el reactor, la extracción de Mo es lenta, esto se debe a que la bacteria está madurando y no se puede dividir, haciendo que el proceso de biolixiviación en esta etapa sea lento. A las 612 horas se observa que la cepa comienza a morir pero esto no afecta que la extracción se efectúe. De las 654 a 864 horas la velocidad de extracción aumenta, esto sucede a que la cepa comienza a crecer y con esto creando una cepa más dinámica. Este crecimiento contribuye a que la extracción de molibdeno se acelere acortando el tiempo considerablemente. De las 900 horas hasta el final del experimento se puede observar que las bacterias ya no crecen de una manera exponencial, debido a que realizan la máxima actividad de extracción de molibdeno.





- II. Análisis de resultados de la biolixiviación del concentrado de molibdenita en el reactor **RELVA-RBP1**<sup>®</sup> (Reactor propela) después de 1683 horas de extracción.



**Gráfica 10.** Variación del pH en el reactor **RELVA-RBP1**<sup>®</sup>

La gráfica 10 muestra el pH inicial del medio fue de 1.76, dentro de las 0 a las 200 horas se puede observar un comportamiento similar al reactor **RELVA-RBAL1**<sup>®</sup> (air lift), debido a la formación del posible compuesto dada la siguiente reacción  $\text{Mo}^{4+} + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mo}(\text{OH})_4 + 4 \text{H}^+$ , en solución, es por esto la causa del aumento del pH en estas horas. A partir de las 170 a las 380 horas se observa un decremento del pH, esto es debido a que este tipo de bacterias acidófilas aumentan considerablemente su actividad, como consecuencia de esta mayor actividad genera  $\text{H}^+$  y el pH disminuye. Pero a las 400 a 700 horas se observa un aumento del pH, la causa es la formación del posible compuesto dada la siguiente reacción  $\text{Mo}^{4+} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MoO}(\text{OH}) + 3 \text{H}^+$  en solución el cual favorece el

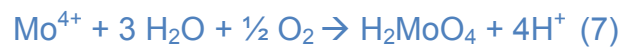






incremento del pH. A partir de las 750 horas se observa el descenso del pH esto es debido a la formación del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y el ácido molibídico ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).

La reacción que se lleva a cabo en el reactor catalizada por la bacteria es la siguiente <sup>[44]</sup>:

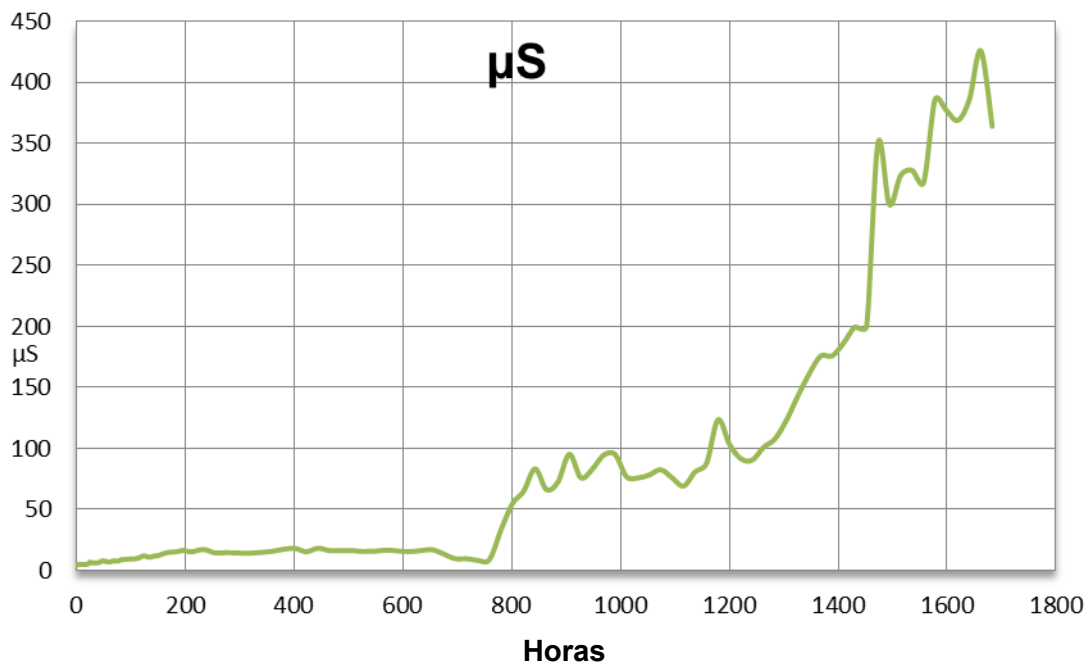


La reacción global



La reacción anterior explica la disminución importante de pH ya que además de la producción de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) debido a la oxidación bacteriana del ion  $\text{S}^{2-}$ , el molibdeno se solubiliza como ácido molibídico ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).





**Gráfica 11.** Variación de la conductividad en el reactor RELVA-RBP1®

En la gráfica 11 se observa la conductividad que dentro de las 0 a las 759 horas, el valor de la conductividad es muy bajo, esto se asocia a que los microorganismos están en la fase de adaptación al medio y crecimiento, dejando como tarea secundaria la lixiviación del molibdeno. Pero a partir de las 800 horas, cuando la bacteria pasa la fase de adaptación y crecimiento, ésta incrementa su actividad haciendo que el medio sea más ácido debido a la oxidación del  $\text{S}^{2-}$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en el reactor, favoreciendo una mayor disolución de iones  $\text{MoO}_4^{2-}$  en el medio.

En la solución acuosa, entre mayor sea la cantidad  $\text{MoO}_4^{2-}$  disuelto, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución alcanza una concentración en la que la interacción entre los iones limitan libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, esto ocurren



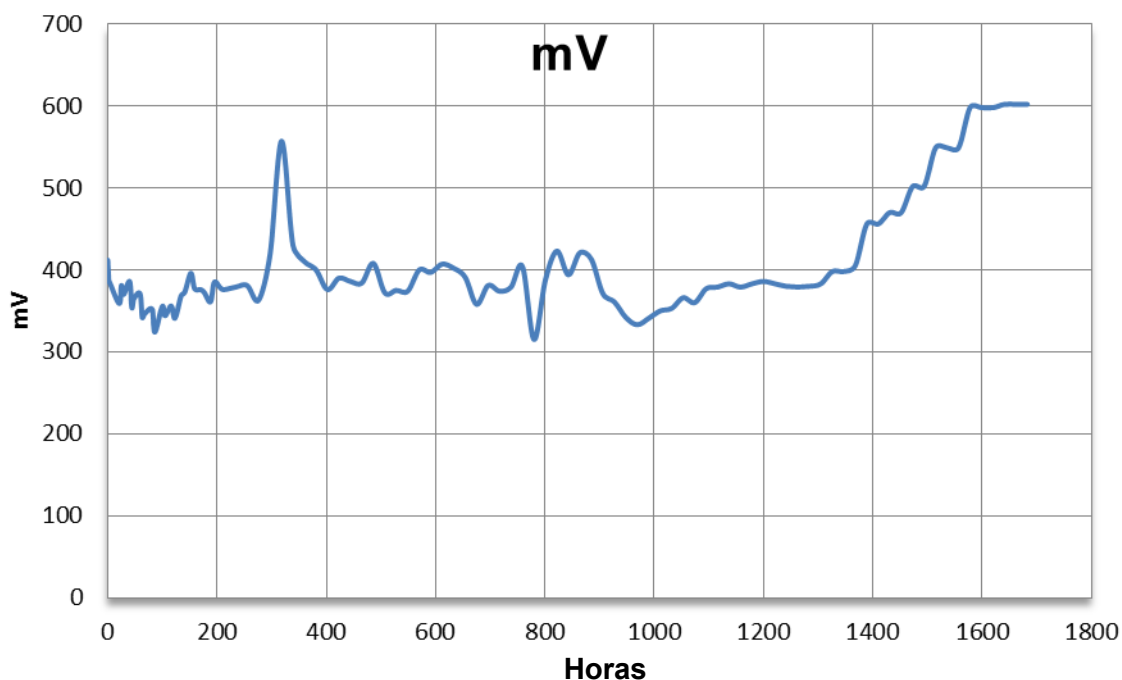


de las 1011 a las 1158 horas cuando la conductividad disminuye. Debido a lo anterior para poder seguir tomando las lecturas de conductividad se diluyen las muestras 1:10, esto se realiza a la hora 1179, donde se observa en la gráfica 11 que la actividad bacteriana se encuentra en su mayor fase de extracción aumentando así los iones disueltos en la solución.



Conforme aumenta la actividad bacteriana, la conductividad aumentara debido a la presencia de más iones en la solución. El aumento en ésta es importante debido a que el ion  $\text{H}^+$  es el de mayor conductividad iónica.





**Gráfica 12.** Variación del potencial redox en el reactor RELVA-RBP1®

Se parte de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) en la que el Mo presenta un estado de oxidación de  $4^+$  con un potencial reportado teórico para la reacción correspondiente  $\text{MoO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HMoO}_4^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  de 429 mV, y al compararlo con el inicio del experimento es un poco bajo (412 mV) esto puede ser por los microorganismos aún estén en la fase de adaptación al mineral, la cual hace que presente una baja actividad, lo cual se apreciará en el bajo potencial inicial.

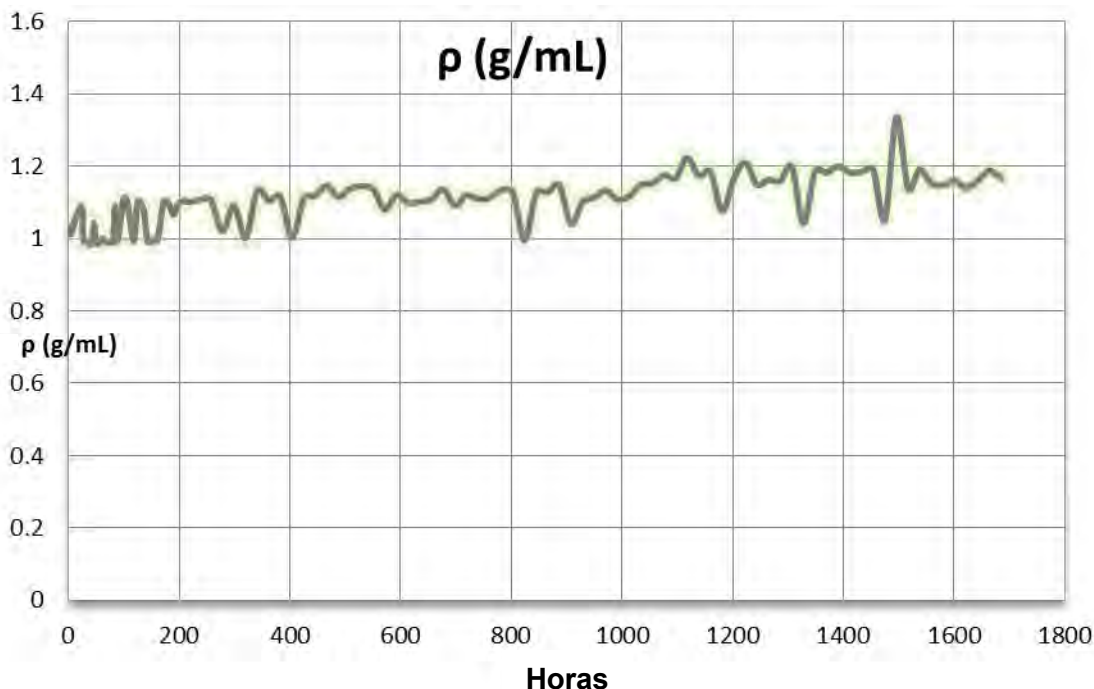
A partir de las 800 a las 900 horas hay un crecimiento en el potencial redox horas hay un crecimiento en el potencial redox (423 mV), esto es debido a la formación del  $\text{Mo}^{5+}$  el cual tiene un potencial teórico reportado por la reacción correspondiente  $\text{Mo}^{\text{IV}} \rightarrow \text{Mo}^{\text{V}} + \text{e}^-$  de 430 mV, donde se puede observar que es muy corta la etapa donde se forma, esto sucede por la baja estabilidad que presenta ya que se oxida fácilmente por el aire y es susceptible a descomponerse en compuestos de molibdeno hexavalentes ( $\text{H}_2\text{MoO}_4$ ).





El potencial redox reportado para  $\text{Mo}^{6+}$  está dado por la siguiente reacción  $\text{MoO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MoO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  de 606 mV, y a partir de las 1600 horas se obtiene un potencial de 604 mV el cual es un indicativo de la oxidación del mineral debido a la acción bacteriana, para la obtención de iones molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) en la solución. Con los resultados obtenidos se pueden afirmar dos condiciones, la primera es que se alcanza el objetivo de obtener molibdeno en la disolución y segundo que se tiene una buena actividad bacteriana la cual hace que se pueda lograr una óptima extracción de molibdeno.

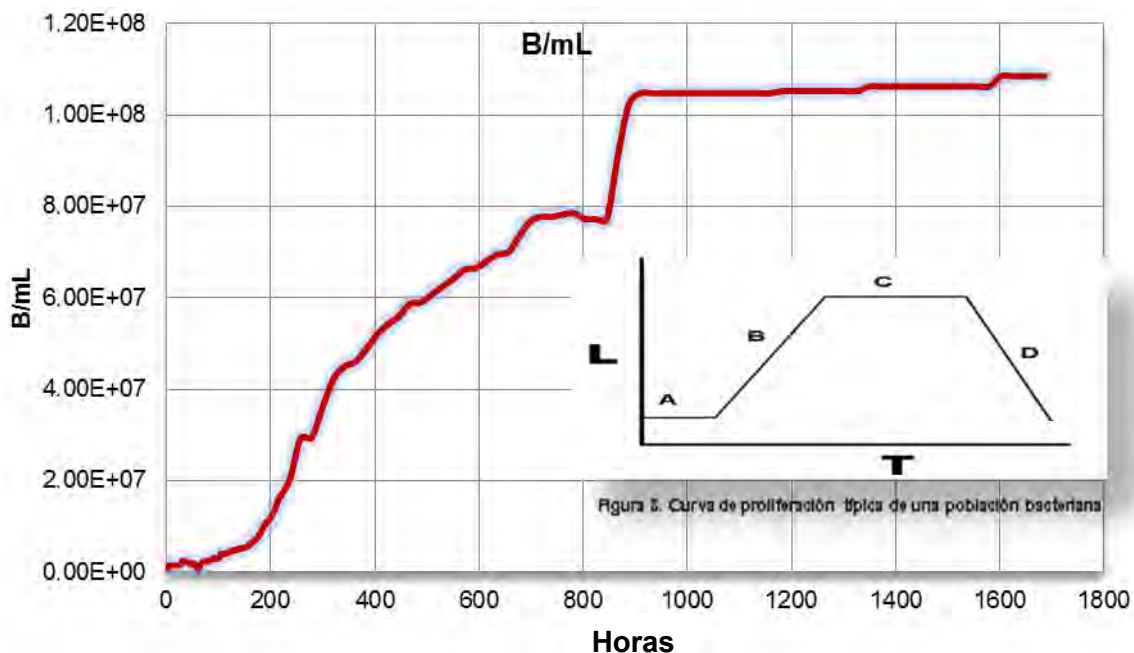




**Gráfica 13.** Variación de la densidad en el reactor RELVA-RBP1®

En la gráfica 13 se observa que el sistema presenta variaciones en la densidad esto va de las 0 a las 800 horas aproximadamente, es decir el sistema se presenta inestable, durante la fase de adaptación de los microorganismos. Después de las 800 horas el sistema tiende a ser más estable, esto debido a que en esta fase inicia la extracción importante de molibdeno. La medición de este parámetro en la experimentación se usa con frecuencia para poder describir el comportamiento del sistema así, se observará a partir de qué tiempo el sistema se volverá homogéneo, y con esto la mayor extracción de molibdeno por medio de la biolixiviación.





**Gráfica 14.** Variación del crecimiento bacteriano en reactor RELVA-RBP1®

El llevar a cabo el control de crecimiento bacteriano, se emplea para conocer si el ambiente con el que cuenta el reactor son las condiciones óptimas para que la cepa se pueda adaptar y poder llevar a cabo el proceso de extracción del molibdeno.

En la gráfica 14, se puede observar que de 0 a 200 horas el proceso de crecimiento es lento ya que las bacterias individuales están madurando y no tienen la posibilidad de dividirse, esto sucede a la fase de adaptación (A) figura 8, donde la bacteria se ajusta a las condiciones del medio.

De las 200 a las 800 horas sucede la fase exponencial (B) figura 8, este un período caracterizado por la duplicación celular, donde el número de nuevas bacterias que aparecen por unidad de tiempo es proporcional a la población actual. Si el crecimiento no se limita, la duplicación continuará a un ritmo constante. Pero el crecimiento exponencial no puede continuar indefinidamente





---

como se observa en el periodo de las 801 a las 843 horas, una caída o fase de muerte exponencial (D) figura 8, porque el medio llega pronto al agotamiento de nutrientes o acumulación de metabolitos inhibidores (ya que durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación, y en ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos. Estas concentraciones tóxicas se pueden disminuir al diluir la solución lixivante).

A partir de las 843 a las 1683 horas inicia la fase estacionaria (C) figura 8, donde la velocidad de crecimiento comenzará a disminuir equilibrando el número de células nuevas con el número de células que mueren, en esta fase se presenta por agotamiento del suministro de algún nutriente esencial o por acumulación de productos metabólicos que sean tóxicos.







**Gráfica 15.** Disolución de Mo en reactor RELVA-RBP1®

En la gráfica 15 se observa que dentro de las 0 a las 400 horas la extracción de molibdeno es un poco mayor comparada con la del reactor **RELVA-RBAL1® (air lift)**, esto se debe a que las bacterias se adecúan con mayor facilidad en el reactor **RELVA-RBP1® (propela)** aunque se encuentren en menor proporción que en el reactor **RELVA-RBAL1® (air lift)**, por lo que las bacterias que se encuentran en el medio son más eficientes para acelerar el proceso de lixiviación de molibdenita y por ende que la cinética de extracción de molibdeno sea mayor.

De las 600 a las 1242 horas la cinética de extracción de molibdeno se vuelve lenta, lo cual ya había sido reportado en el artículo de “biolixiviación de molibdenita” el cual hace referencia que la extracción de molibdeno al alcanzar el 50% de extracción se desacelera y no aumenta la cinética, esto se debe a que la cepa bacteriana dominante pierde actividad para lixiviar al molibdeno que existía

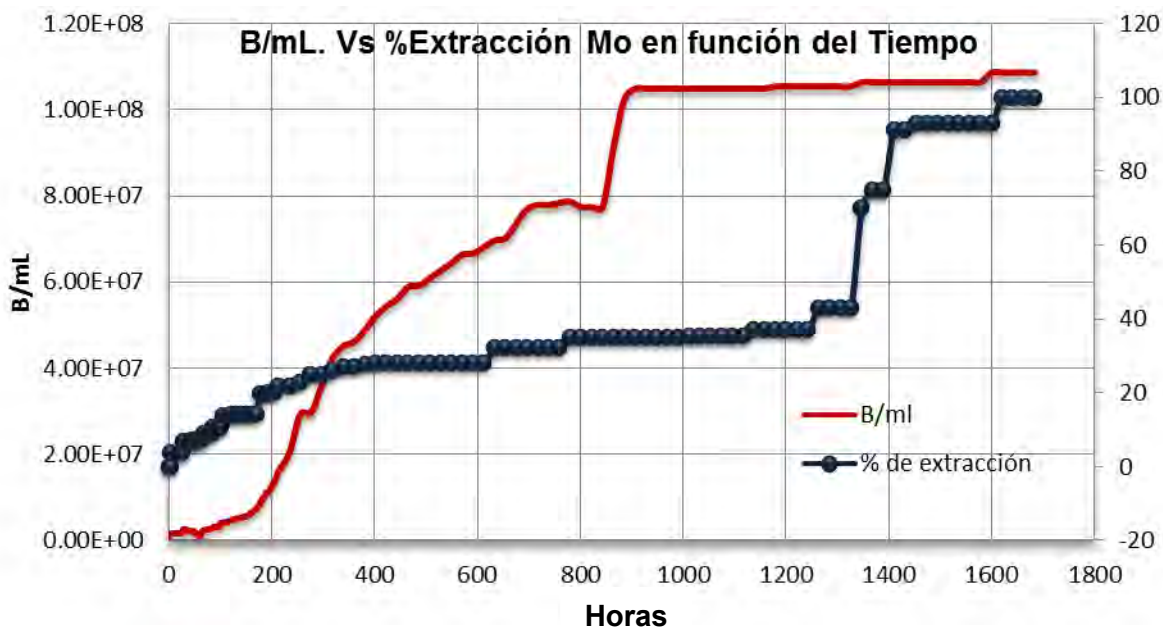




---

en la fase anterior de extracción, para poder hacer una cepa más resistente y la cual acelere la extracción. Pero a partir de las 1242 horas la cepa se renueva, retomando nuevamente la alta cinética de extracción de molibdeno que tenía al principio del experimento esto sucede debido a que la bacteria se hace más eficiente, debido al movimiento sutil que presenta el reactor **RELVA-RBP1<sup>®</sup>** (**propela**) evitando así el corte de la bacteria, además de mantener homogéneo el medio y a una temperatura constante de 65°C, lo cual facilita aún más la mayor actividad bacteriana.





**Gráfica 17.** Variación del crecimiento bacteriano Vs Disolución de Mo en función del Tiempo. RELVA-RBP1®

En la gráfica 17 observamos que dentro de las 0 a las 200 horas las bacterias se están adaptando con mayor rapidez a las condiciones del medio, debido a los resultados observados en la disolución de Mo, haciendo que la cinética de la extracción se lleve a cabo con mayor rapidez que el reactor **RELVA-RBAL1® (air lift)**.

De las 200 a las 800 horas el crecimiento comienza a ser exponencial debido a la duplicación celular esto se ve asociado con el porcentaje de extracción el cual va aumentando conforme el crecimiento bacteriano, haciendo que el proceso sea más rápido.

A partir de las 800 a las 840 horas se observa que la extracción de molibdeno comienza a ser constante esto debido se observa un decaimiento de crecimiento de los microorganismos y por consecuencia la cinética de extracción de molibdeno





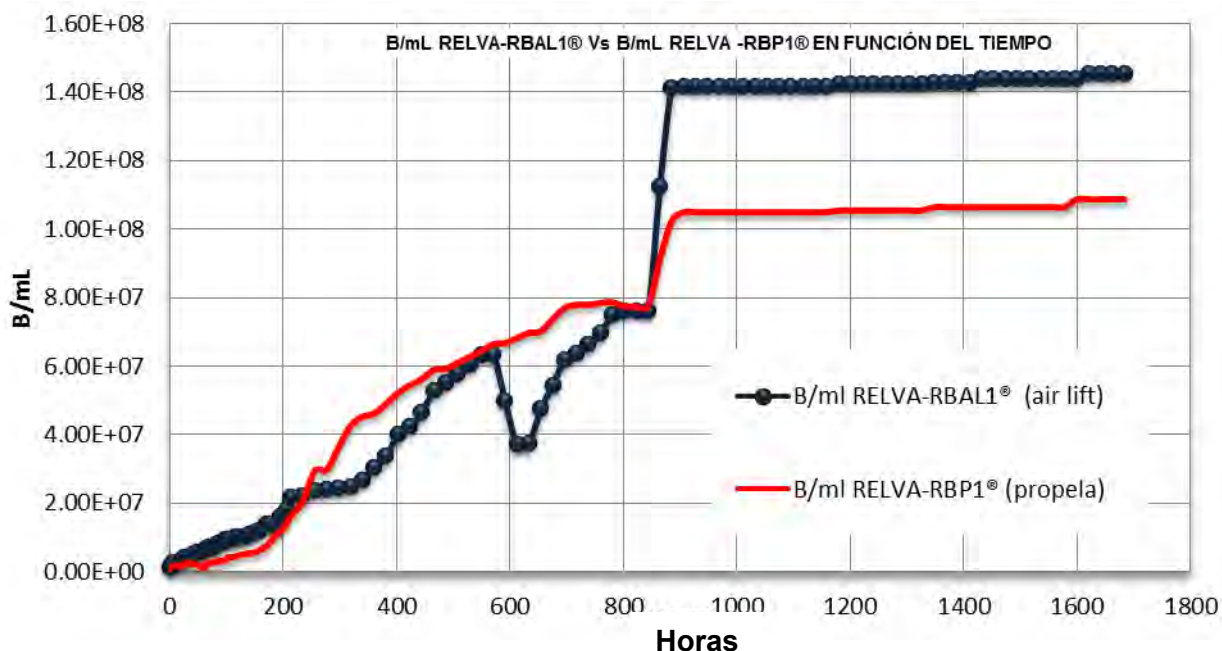
---

se ve afectada haciendo que el proceso se lleve a cabo con lentitud en estas horas.

Pero a partir de las 1300 horas en adelante cuando el crecimiento bacteriano comienza a ser constante, es cuando la cepa bacteriana realiza la máxima actividad de extracción de molibdeno, observando que el proceso nuevamente tiene una cinética rápida, con una buena eficiencia en la extracción de molibdeno.

Con esto se puede observar que este tipo de reactor **RELVA-RBP1<sup>®</sup> (propela)** cubre los requerimientos suficientes para poder aumentar la cinética de extracción de molibdeno dado que las condiciones de movimiento son las idóneas.



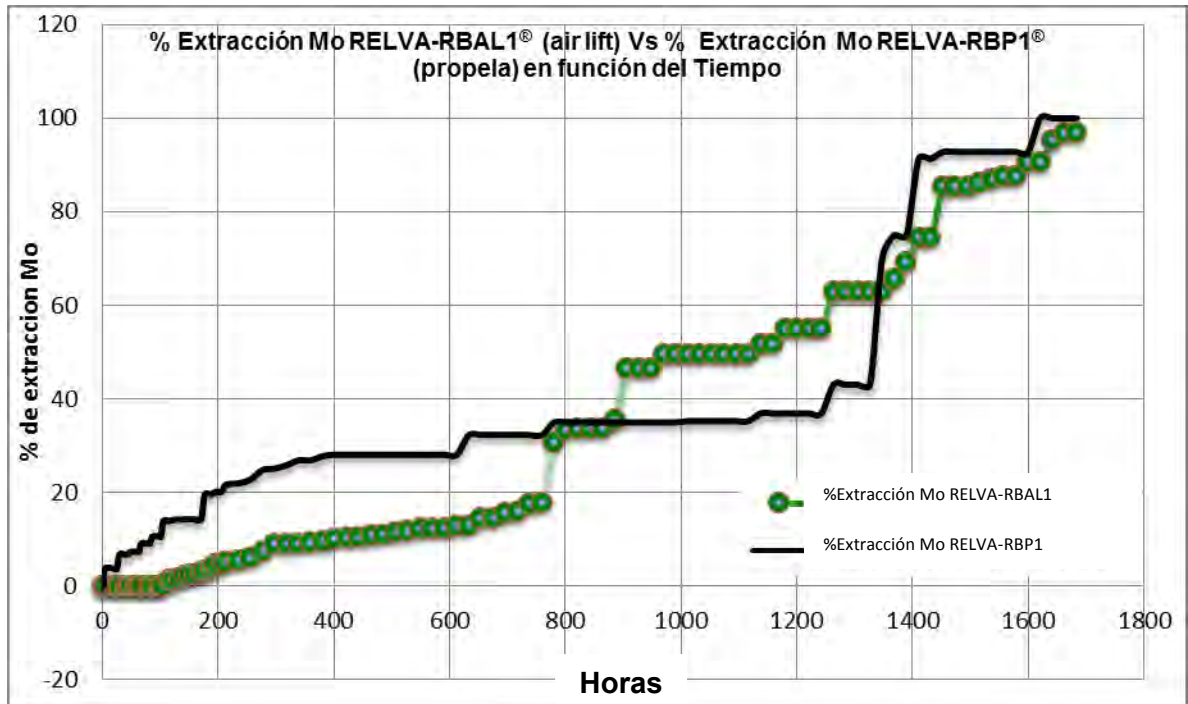


**Gráfica 18.** Variación del crecimiento bacteriano de los reactores RELVA-RBAL1®

y RELVA-RBP1® En función del Tiempo.

Al realizar la cuantificación del molibdeno en cada uno de los reactores **RELVA-RBAL1® (air lift)** & **RELVA-RBP1 (propela)®** implementados en esta experimentación, se puede determinar lo siguiente: el reactor **RELVA -RBAL1® (air lift)**, tiene una mayor aplicación para el crecimiento bacteriano ya que al observar la gráfica 9 de extracción de Mo, dentro de las 0 a 200 horas el porcentaje de molibdeno en el medio es nulo y la cinética de extracción más lenta que la del reactor **RELVA-RBP1®(propela)**. Sin embargo en el reactor **RELVA-RBP1® (propela)**, se observa que las bacterias se adaptan con mayor rapidez al medio (mayor extracción de Mo), pero a diferencia del **RELVA -RBAL1® (air lift)**, éstas presentan un crecimiento bacteriano menor, es decir, que las bacterias que se encuentran en el medio son lo suficientemente bien adaptadas al molibdeno que incluso aceleran la cinética de extracción.





**Gráfica 19.** Disolución de Mo en los reactores RELVA-RBAL1® y RELVA-RBG1 En función del Tiempo.

En la gráfica 19, se compara la eficiencia del reactor **RELVA-RBAL1® (air lift)** & **RELVA-RBP1 (propela)®**. Se observa que el reactor **RELVA-RBP1 (propela)®** acorta el tiempo de adaptación de la cepa bacteriana ya que dentro de las 0 a las 200 horas comienza la fase de extracción de molibdeno, mientras que en el reactor **RELVA-RBAL1® (air lift)** se observa que dentro de las 0 a las 200 horas la extracción de molibdeno es nula, esto se debe a que la fase de adaptación de la bacteria lleva un poco más de tiempo, haciendo que el proceso de extracción de molibdeno sea más lento.

De las 200 a las 600 horas la extracción en el reactor **RELVA-RBP1 (propela)®** indicando que las pocas bacterias que se encuentran en el medio tienen una





buena actividad lixiviando el 28.10% del Mo, mientras que en el reactor **RELVA-RBAL1<sup>®</sup> (air lift)** la extracción es lenta debido a que las bacterias que están en el medio tienen como función principal el crecimiento bacteriano dejando en segundo plano la extracción del molibdeno que alcanza un 12.85%.

A partir de las 800 a las 1200 horas en el reactor **RELVA-RBP1 (propela)<sup>®</sup>** la extracción de molibdeno se hace invariable lo cual es debido a que la cepa dominante que existía en la primera fase de extracción pierde actividad, esto sucede debido a que la cepa bacteriana se renueva, mientras que en el **RELVA-RBAL1<sup>®</sup> (air lift)** de las 800 a las 1200 horas la cepa se hizo más dinámica siendo que presentaba una mayor extracción de molibdeno.

Después de las 1200 horas en el reactor **RELVA-RBP1 (propela)<sup>®</sup>** nuevamente se observa que se acelera la cinética de la extracción haciendo que este reactor **RELVA-RBP1 (propela)<sup>®</sup>** alcance el 100% de extracción antes que el reactor **RELVA-RBAL1<sup>®</sup> (air lift)**, al cual le lleva unas horas extra para poder llegar al 100% de extracción de molibdeno.





## 7.-CONCLUSIONES.

La biolixiviación de molibdenita requiere que los microorganismos tengan las condiciones adecuadas y los nutrientes necesarios para adaptarse al medio y hacerse resistentes al mismo, así como tener un control más cercano de las variables del proceso para lograr aumentar la cinética de extracción.

Mediante la aplicación de los nuevos reactores **RELVA-RBAL1<sup>®</sup> (air lift) & RELVA-RBP1<sup>®</sup> (propela)** al proceso de biolixiviación:

- Se supera la extracción de molibdeno reportada en la literatura la cual es menor al 1% después de un mes de experimentación o del 85% después de 6 meses de biolixiviación.
- Se logró hacer eficiente el proceso de extracción de molibdeno, alcanzando el 100% de disolución después de 70 días de experimentación, como resultado del incremento de la cinética de extracción Mo.
- Se acortan el tiempo de adaptación y de tolerancia del microorganismo al metal.
- Las bacterias se adaptan en menor tiempo por lo que el pH tiende a disminuir rápidamente, favoreciéndose la solubilización del molibdeno en el medio.
- Al tener los nutrientes necesarios el crecimiento de los microorganismos es exponencial hasta llegar a un máximo correspondiente a la fase de mayor extracción.







- La principal ventaja de estos equipos yace en su simplicidad, en sus fáciles condiciones de operación, en sus bajos costos capitales, en su bajo consumo energético y en su capacidad de ser amigable con el medioambiente.

El proceso de biolixiviación de la molibdenita es una alternativa económicamente viable para la industria minero-metalúrgica, su implementación implica la aplicación de nuevas tecnologías más limpias y más eficientes, no sólo para molibdeno, sino también de otros valores metálicos.





## 8.-REFERENCIAS

- [1] Weigand, C. Phil. (1997), La turquesa, Rocas y minerales del México antiguo, Volumen V, Editorial Raíces S.A. de C.V. pp. 26-33.
- [2] Coll-Hurtado, Atlántida, Sánchez-Salazar, María Teresa y Josefina Morales (2002), *La minería en México*, Instituto de Geografía, UNAM, pp. 25-30.
- [3] Delgado de Cantú, Gloria M. (2008), Historia de México: Legado histórico y pasado reciente, 3 ed., México, Pearson, pp. 51-76.
- [4] Ramírez Marín, Juan. (2012) Inexistente la seguridad Industrial minera en México, 26/07/2013, [http://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/camara/2012/septiembre/revista/index.php?option=com\\_content&view=article&id=330&Itemid=242](http://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/camara/2012/septiembre/revista/index.php?option=com_content&view=article&id=330&Itemid=242)
- [5] Esquivel, Eduardo. (2013) La minería en México, un negocio para pocos, 26/07/2013, <http://www.sdpnoticias.com/columnas/2013/05/08/la-mineria-en-mexico-un-negocio-para-pocos>
- [6]<http://www.marketresearch.com/Heavy-Industry-c1595/Energy-Resources-c82/General-Mining-c402/>, 21/09/2013
- [7] <http://www.cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/> 30/07/2013
- [8] Muro Ruiz, Eliseo. (2005) La minería mexicana su evolución retos y perspectivas, Congreso Internacional de Derecho Comparado, 4 al 6 de octubre, Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM ,disponible en: [http://www.juridicas.unam.mx/sisjur/dercomp\\_a/pdf/2-103s.pdf](http://www.juridicas.unam.mx/sisjur/dercomp_a/pdf/2-103s.pdf)
- [9] Ojeda-Hidalgo, J. F. (2012), La dimensión humana en las minas, un acercamiento desde la responsabilidad social, Ide@s COCYTEG, 7 (81), pp. 342-356.
- [10] Instituto Tecnológico Geominero, Minas y minerales de Iberoamérica, España, 1ª edición, 1993, pp.250.
- [11] Amestica, Luis. (2010), Molibdeno, propiedades, aplicaciones, mercado, Chile, Difusión de tecnologías, Aplicaciones y desafíos del molibdeno para la industria e investigadores a nivel nacional. [http://www.cimat.cl/seminario\\_molibdeno/Sitio/publicacion.pdf](http://www.cimat.cl/seminario_molibdeno/Sitio/publicacion.pdf) 16/11/2013





- [12] Panorama Minero del Estado de Sonora (2011), Servicio Geológico Mexicano, <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf> 16/11/2013
- [13] La minería en Sonora 2006-2012, Delegación Federal en Sonora, Secretaría de Economía, [http://www.economia.gob.mx/files/transparencia/informe\\_APF/delegaciones/sonora.pdf](http://www.economia.gob.mx/files/transparencia/informe_APF/delegaciones/sonora.pdf) 14/11/2013
- [14] <http://www.molymet.cl/es/productos/20-usos-del-molibdeno.html> 9/11/2013
- [15] [http://www.imoa.info/moly\\_uses/moly\\_chemistry\\_uses/molybdenum\\_chemistry\\_us.es.php](http://www.imoa.info/moly_uses/moly_chemistry_uses/molybdenum_chemistry_us.es.php) 30/09/2013
- [16] E.C. Perkins y F. Novielli, Bacterial Leaching of manganese ores, Report of Investigations N° 6.102, Bureau of Mines, Dept. Interior EE.UU., Washington DC, 1962.
- [17] A.E. Torma, (1977), Role of Thiobacillus ferrooxidans in hydrometallurgical processes, Adv. Biochem. Eng. 6, pp.1-37.
- [18] Rossi, G., (1990), Biohydrometallurgy. McGraw-Hill, Hamburg.
- [19] Guerrero Rojas, J.J., (1998), Biotecnología en la disolución y recuperación de los metales, Presentado en el Primer Congreso Peruano de Biotecnología y Bioingeniería, Trujillo, Perú, pp. 103-160.
- [20] Acevedo B. Fernando, Fundamentos y Perspectivas de Tecnologías Biominaeras, Chile, Ediciones Universitarias Valparaíso, 2005, pp. 9-23.
- [21] A.R. Colmer , M.E. Hinkle, (1947), The Role of Microorganisms in Acid Mine Drainage: A Preliminary Report. Science. pp. 253-256.
- [22] Rodriguez Y., Ballester A., (2001), La biolixiviación al comienzo del siglo XX, Revista de metalurgia, 616-627.
- [23] Olson, G. J.; Kelly, R. M., (1986). *Microbiological metal transformations: Biotechnological applications and potential*. Biotechnol. Progress. 2(1): pp. 1-15.
- [24] Gentina, J. C.; F. C. Acevedo, (1992), *Lixiviación Bacteriana de Minerales*. En: IV Curso Latinoamericano de Biotecnología , Chile.
- [25] Brierley, C.L. y Brierley, J.A., (1973) A chemoautotrophic and thermophilic microorganism isolated from an acid hot spring, Can. J. Microbiol. 19, pp. 183-198.





- [26] Norris, P.R. y Owen, J.P, (1992), Mineral sulphide oxidation by enrichment cultures of novel thermoacidophilic bacteria, *Harnessing Biotechnology for the 21<sup>st</sup> Century*, American Chemical Society, pp. 445-458.
- [27] Tributsch H. (2001) Direct versus indirect bioleaching. *Hydrometallurgy* 59, pp. 177–185.
- [28] Brock, T. & M. Madigan. (1993). *Microbiología*. 6ta Edición. Prentice Hall Hispanoamérica S. A. México.
- [29] Silverman M., (1959), Studies on the Chemoautotrophic Iron bacterium *ferrobacillus ferrooxidans*. *Journal of Bacteriology*, 77, pp. 642-647.
- [30] Brierley C., (1978), *CRC Critical Reviews in Microbiology*, pp.205-262.
- [31] Touniven O., (1973), Studies on the growth of *thiobacillus ferrooxidans* I. Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable numbers and comparison with <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> – fixation and iron oxidation as measures of growth. *Arch. Microbiology*, 88, pp. 285-298.
- [32] Bosecker K., (1997), Bioleaching: metal solubilization by microorganisms, *Microbiology* 20, pp. 591-604.
- [33] Torma A., (1982), Bacterial leaching, *Progress in industrial microbiology*, Edit. M. Bull, Holanda, Elsevier, pp. 77-120.
- [34] Burger J.R, (1985), Mercur is Getty's First Gold Mine, *Engineering and Mining Journal* Vol. 185, pp. 48-51.
- [35] Bustos S, Castro S, Montealegre S (1993) The Sociedad Mineral Pudahuel bacterial thin-layer leaching process at Lo Aguirre, *FEMS Microbiol. Rev.* 11, pp. 231-243.
- [37] [http://www.infoindustriaperu.com/articulos\\_pdf/mineria/metalurgia/008.pdf](http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/metalurgia/008.pdf)  
16/11/2013
- [38] Kelley, B.C., 1986. Biological contributions to mineral cycling in nature with reference to molybdenum. *Polyhedron* 5, pp. 597–606.
- [39] Bryner, L.C., Anderson, R., 1957. Microorganisms in leaching sulfide minerals. *Ind. Eng. Chem.* 49, pp. 1721–1724.





- [40] Duncan, D.W., Walden, C.C., Trussell, P.C., Lowe, E.A., 1967. Recent advances in the microbiological leaching of sulfides. AIME Transactions 238, pp. 122–128.
- [41] Brierley, C.L., Murr, L.E., 1973. Leaching: use of a thermophilic chemoautotrophic microbe. Science. pp. 179, 488.
- [42] Romano, P., Blazquez, M.L., Ballester, A., Gonzalez, F., Alguacil, F.J., 2001b. Reactivity of a molybdenite concentrate against chemical or bacterial attack. Miner. Eng. 14, 987–996.
- [43] Askari Zamani, (2005), Bioleaching of Sarcheshmeh molybdenite concentrate for extraction of rhenium, Volume 80, Issues 1–2, pp. 23-31.
- [44] E. M. Domic M., Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones, 1<sup>a</sup> Edición, Chile, 2001, pp. 283-285
- [45] Y. Chisti, Airlift reactors: current technology, in: Y. Chisti (Ed.), Airlift Bioreactors, First ed, Elsevier, Essex, 1989. pp. 33-86.
- [46] Pourbaix, Marcel, Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, 2<sup>nd</sup> English ed. Houston, National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- [47] Ikumapayi Fatai Kolawole, (2008), Purification of Molybdenite Concentrates, Master Thesis, Luleå University of Technology, Chemical Engineering and Geosciences, pp. 24-31.





## 9.-APÉNDICES

### A.-BIORREACTORES

Los biorreactores se definen como aquel dispositivo que proporciona un medio ambiente controlado que permite el crecimiento eficaz de los microorganismos y la formación de un producto. El medio ambiente adecuado que proporciona un biorreactor, tiene que tener niveles óptimos de temperatura, pH, sustrato, etc.

La instrumentación y control del biorreactor requiere de sensores que midan las variables del proceso, y sistemas que ajusten el equipo a un punto óptimo de operación.

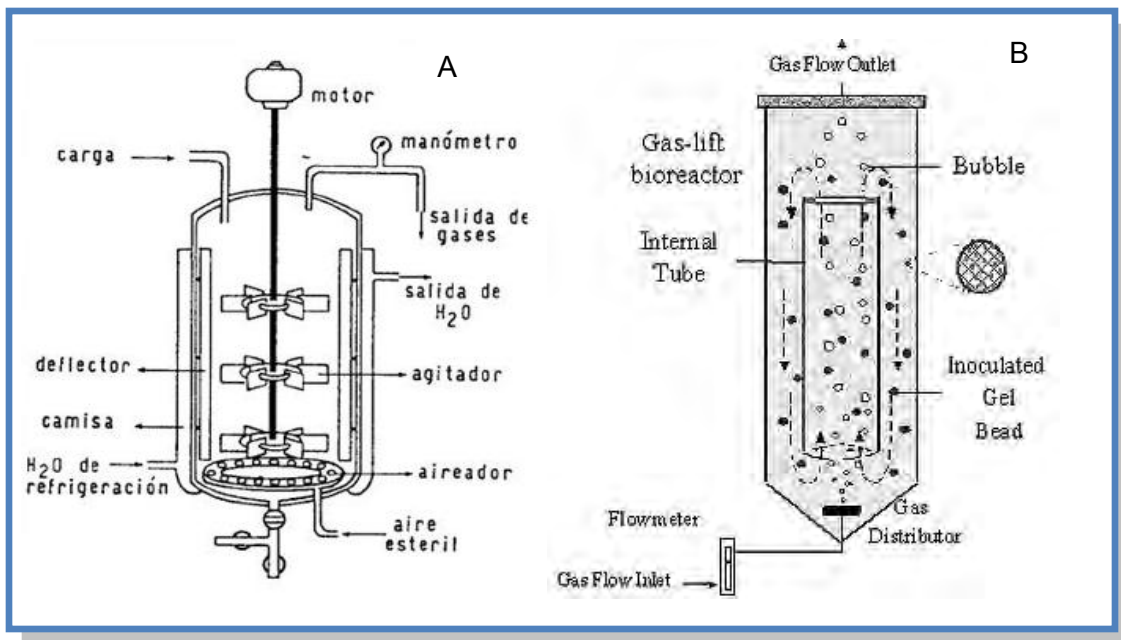
Un biorreactor airlift (BAL) es un equipo agitado neumáticamente que se caracteriza porque el suministro de energía para mantener homogeneidad en su interior tiene lugar mediante la expansión isotérmica de la fase gaseosa introducida <sup>[43]</sup>. En los BAL se observan importantes ventajas sobre otro tipo de biorreactores. En bioprocesos, la principal ventaja de los BAL sobre los biorreactores de columna de burbujas y los tanques agitados es que producen un menor daño celular, aceptan mayores tasas de aireación y menores costos energéticos. En los BAL, la fluidización de sólidos no es una consecuencia directa del burbujeo del gas sino que es, más bien, debida a la circulación del líquido dentro del biorreactor. Debido a lo anterior, estos equipos ofrecen la posibilidad de una fluidización de sólidos muy simple, de alta eficiencia y permiten establecer ambientes internos con esfuerzos de corte aproximadamente constantes en todo el contenido del biorreactor.





Los reactores de propela son un tipo de reactores donde se consigue homogenizar la mezcla contenida en él, haciendo que todas las variables, concentración, temperatura, pH, sean iguales para cualquier punto del medio contenido en el tanque. La concentración final, o de salida debe ser igual a la concentración de la mezcla de dentro del reactor.

El sistema de agitación se completa con cuatro o seis deflectores que tienen por finalidad cortar o romper el movimiento circular que imprimen las turbinas al líquido, generando de este modo mayor turbulencia y mejor mezclado. El tanque está rodeado por una camisa por la que circula agua, lo que permite controlar la temperatura <sup>[44]</sup>.



**(A) Diagrama de un biorreactor de propela.**

**(B) Diagrama de un biorreactor airlift.**





## B.-DIAGRAMA DE POURBAIX

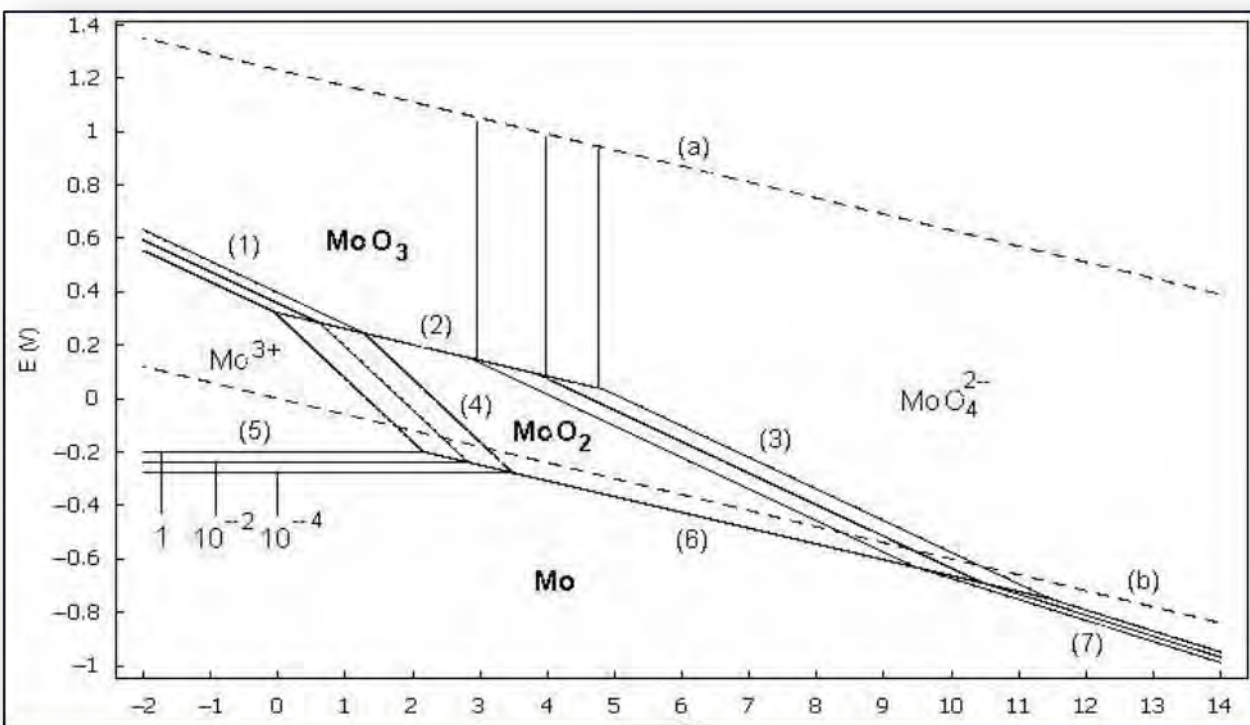


Diagrama de Pourbaix del sistema Mo-H<sub>2</sub>O.

Teóricamente el molibdeno elemental puede reducirse por el agua en todo el margen de pH; sin embargo, baja diferencia de potencial entre el sistema H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> y los sistemas en los que participa el Mo metal, así como el fenómeno de pasivación, hace que el metal sea bastante estable. Los ácidos no oxidantes prácticamente no lo atacan; el ácido sulfúrico concentrado y caliente lo disuelve con facilidad. El ácido nítrico diluido lo ataca apreciablemente, pero el ácido nítrico concentrado lo pasiva por oxidarlo a MoO<sub>3</sub> insoluble. En medio alcalino el Mo prácticamente no se disuelve, pero fácilmente es transformado en MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, soluble, por fusión alcalina. El Mo(VI) es muy poco oxidante en todo el margen de pH. Dependiendo del medio es reducido normalmente a Mo (V) ó mezclas de Mo (V) y







Mo (VI), denominadas azul de molibdeno a Mo(III). El estado de oxidación (VI) es el que proporciona los compuestos más importantes y estables. Debido al gran valor de la relación carga/radio para este estado de oxidación, en medio acuoso no se encuentran cationes elementales libres. En medio muy ácido se han identificado los cationes  $\text{MoO}_2^{2+}$ ,  $\text{MoO}_4^+$ ,  $\text{HMo}_2\text{O}_6^+$ , incoloros; más solubles son las formas aniónicas, monómeras o más frecuentemente, polímeras y las formas neutras solubles o precipitadas. Los estados de oxidación inferiores (III) y (IV) pueden obtenerse en solución acuosa mediante procedimientos apropiados, pero, como en todos los casos, las especies son complejas y sensibles a la acción de aire. Puede afirmarse que no existe una química catiónica de este elemento <sup>[46-47]</sup>.

