



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA

AGLOMERACIÓN DE JALES PARA LA OBTENCION DE COBRE POR MEDIO DE LA LIXIVIACIÓN ÁCIDA.

Memoria de Prácticas Profesionales

Para obtener el título de:

INGENIERO METALÚRGICO

Presenta:

Liliana Violeta Romero Mejía

Hermosillo, Sonora

Octubre de 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importantes de mi formación profesional, por guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la fe.

A mi mamá Vicky que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos, principios y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles, gracias por sus consejos, apoyo, comprensión, y amor, por ser el principal pilar de mi vida a lo largo de este proceso.

A mi familia en general porque me brindó su apoyo, a mi hermano Carlos y mi hermana Paloma que siempre han estado junto a mí compartiendo los buenos y malos momentos.

A Jonathan mi compañero durante este proceso, por su apoyo incondicional en el transcurso de mi carrera universitaria, por compartir momentos de alegría, tristeza y demostrarme que siempre podré contar con él.

A mis maestros por compartirme su conocimiento, por su paciencia y gran motivación para culminar con mis estudios profesionales porque me ayudaron en asesorías y dudas presentadas, a mis compañeros por permitirme ser parte de su familia y por compartir buenos momentos.

A mi asesor de prácticas José Luis Amaya Ochoa por su dedicación y compromiso para poder llevar a cabo este proyecto y por brindarnos el tiempo necesario para hacerlo, así como también agradecer a mi compañero Damián Moreno por su colaboración en este proyecto.

A mina “La Caridad” por permitirme realizar este proyecto y darme las herramientas necesarias para poder llegar a mi objetivo.

INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	i
RESUMEN	vii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	iv
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Como se produce el Cobre.....	4
2.2 Proceso de aglomeracion.....	5
2.3 Tipos de aglomeracion	6
2.3.1 Aglomeracion por humedad.....	6
2.3.2 Aglomeracion por adherentes.....	6
2.4 Caracteristicas y factores de la aglomeracion	7
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	9
3.1 Muestreo de jales de flotacion.....	10
3.2 Selección de diferentes tipos de aglomerantes.....	13
3.3 Formacion de pellets.	13
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1 Prueba de resistencia.....	18
4.2 Prueba de permeabilidad.....	19
4.3 Formación de pellets.....	20
4.4 Armado de columnas.....	22
4.5 Resultados de la prueba de resistencia.....	24

4.6 Resultados de las pruebas de columnas.....	26
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
5.1 Conclusiones.....	33
5.2 Conclusión Personal	34
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía tomada al momento de la recolección de muestra en la presa de jales.....	10
Figura 2. Representación del proceso de secado de la muestra a temperatura ambiente proveniente la presa de jales de planta concentradora.....	11
Figura 3. Fotografía tomada al momento de realizar el cuarteo de la muestra seca de jales.....	11
Figura 4. Fotografías de las soluciones propuestas para aglomerar los jales. La figura A representa el ácido sulfúrico concentrado; la figura B representa la solución del biorreactor y solución colas respectivamente.....	12
Figura 5. Fotografía de la bentonita utilizada para aglomerar, proporcionada de la misma empresa minera.....	12
Figura 6. Representación de los pellets ya secos formados con la humedad propia de los jales.....	13
Figura 7. Fotografía representativa de la mezcla que se utilizó para la formación de pellets, la cual se obtuvo agregando jales secos y ácido sulfúrico concentrado.....	14
Figura 8. Fotografía de pellets formados con una mezcla de ácido sulfúrico y muestra seca de jales puestos sobre una superficie impermeable de vidrio para su proceso de secado a temperatura ambiente.....	15
Figura 9. Fotografía tomada a los pellets formados con solución colas y solución del biorreactor utilizados como aglomerante.....	16
Figura 10. Pellets formados con 2 y 3 % de Bentonita y solución de colas respectivamente, después de realizar la prueba de impacto. Como se observa en la figura B el pellet con 3% Bentonita no se partió tanto como el pellet de la imagen A.....	18
Figura 11. Representación de la prueba de permeabilidad, en donde se observan los pellets sumergidos en vasos de precipitado.....	19
Figura 12. Fotografía tomada después de terminar con la prueba de permeabilidad, en donde se observa el único pellet que no se desintegro por completo, el cual está compuesto por 3% de Bentonita y solución colas como	

aglomerante.....	20
Figura 13. Representación de los pellets formados con una mezcla del 3% de bentonita y solución colas como aglomerante en proceso de secado a temperatura ambiente para su posterior uso en la prueba de columnas.....	21
Figura 14. Representación esquemática de las columnas utilizadas para el proceso de lixiviación, en donde podemos observar de izquierda a derecha la columna 1 y 2 que serían regadas con solución colas mientras que la columna 3 y 4 se regaran con solución del biorreactor.....	21
Figura 15. La fotografía A representa las columnas totalmente cargadas, cabe mencionar que la cantidad de pellets entre una columna y otra varia, dos fue de 52 kg, la columna 3 56kg y la columna 4 52 kg. Por otro lado, la fotografía B nos representa el armado de la columna en la parte superior, donde se le adapto una especie de tapa la cual detuviera la manguera con la que sería regada la columna.....	23
Figura 16. Fotografía tomada al momento de medir el flujo, en donde se puede observar que con ayuda de una probeta se llega a los 4 ml en un minuto, esto con el fin de tener un flujo preciso para todas las columnas.....	23
Figura 17. Percolación de la solución rica de las columnas 2 y 4 respectivamente.....	26
Figura 18. Fotografía tomada a la columna tapada y desbordada, en donde se alcanza a distinguir la solución al borde de la columna.....	27
Figura 19. Muestras tomadas de solución lixiviada en la prueba de las cuatro columnas, las cuales se etiquetaron de acuerdo al día en el que fueron muestreadas.....	28
Figura 20. Representación esquemática de la prueba de columna a nivel laboratorio en donde podemos observar en la figura A la representación esquemática simulando las columnas y el bombeo, al igual que la solución cabeza, por otro lado en la figura B se muestra la probeta ya tapada y a punto de desbordarse.....	31

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Condiciones utilizadas en las pruebas de columnas	22
Tabla II. Resultados obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 4 metros.	24
Tabla III. Resultados obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 3 metros.	25
Tabla IV. Datos obtenidos del análisis por Absorción atómica de la solución colas inicial (cabeza), utilizada para regar la columna 1 y 2.....	28
Tabla V. Datos obtenidos del análisis por Absorción atómica de la solución del biorreactor inicial (cabeza), utilizada para regar la columna 3 y 4.....	28
Tabla VI. Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 1.....	29
Tabla VII. Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 2.....	29
Tabla VIII. Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 3.....	30
Tabla IX. Resultados del análisis de solución de la columna.....	30

RESUMEN

Se realizaron pruebas prelimiaries en botellas a nivel laboratorio, a los jales de la planta concentradora del Grupo Mexico ubicado en el municipio de Nacozari de Garcia, Sonora, con el objetivo de recuperar valores de cobre. Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio en botella, se concluyo que no se recupera la cantidad requerida que pague el gasto invertido en este proceso, por lo que se busco un nuevo método para hacer posible esto, y es ahí en donde se pensó en la aglomeración de los jales para posteriormente lixiviar en columnas. Se realizaron diferentes pruebas de Aglomeración de partículas, el objetivo es la posible recuperación de los valores de cobre presentes utilizando el método de Lixivacion acida. Los jales tienen un tamaño de partícula aproximadamente de -200 mallas (0.074 mm), y el proceso de lixiviación a montones con este tamaño de partícula, es complicado debido a los problemas que pudieran presentarse durante la percolacion por la formacion de capas impermeables.

Se probaron diferentes parámetros para aglomerar entre ellos la resistencia y permeabilidad que tienen los pellets formados. Diferentes aglomerantes se usaron, la mejor relación que debe de existir entre la muestra de jales y la solución para aglomerar, siendo la de mejor resultado mezclando 250 ml de solución por cada kilogramo de jales. Una vez determinado el pellet más adecuado que se consideró pertinente para utilizarlo en la lixiviación, se hicieron aproximadamente 280 kilogramos de pellets los cuales se utilizaron para montar las pruebas en columnas. Las pruebas en columnas no se obtuvieron los resultados esperados y se concluyo que la idea planteada desde un principio es buena, sin embargo, es necesario realizar más pruebas con diferentes aglomerantes para poder producir un pellet con mejores cualidades.

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Cada día se generan miles de toneladas de jales proveniente de la planta concentradora que se considera material inservible o no rentable para tratarlo económicamente, por lo que se envía a una presa de jales, sin embargo, de acuerdo a los precios actuales de los metales, un estudio previo arrojó resultados en donde los jales de mina La Caridad contaban con la ley necesaria para poder tratarlos nuevamente para la recuperación del Cobre por lo que se planteó la idea de cómo hacerlo, ya que como bien se conoce el material que sale de concentradora se encuentra a -200 mallas por lo que es muy fino y es imposible lixiviarlo así como esta, debido a esto se consideró la idea de aglomerar los jales con diferentes aglomerantes y así encontrar el mejor que cumpliera con los requisitos que se necesitan para una buena aglomeración [1].

La idea de trabajar con estos jales, surge a partir de un análisis del área de hidrometalurgia, en donde se busca de todas las formas posibles la mejora continua y la oportunidad de hacerlo utilizando los jales que provenían de la planta de concentradora.

Con ayuda de diferentes maquinarias como la retroexcavadora, se realizó un muestro sistemático, se tomaron muestras representativas de diferentes áreas de la presa a una profundidad de aproximadamente 2 metros, las muestras se empacaron, se etiquetaron de acuerdo al punto correspondiente y se mandaron al laboratorio para su análisis.

Se llevó a cabo un secado de las muestras en donde se pusieron a la intemperie durante dos días. Posterior a ellos se realizó un cuarteo para después mandar una muestra representativa al laboratorio de ensayos para conocer la composición química. El proceso siguiente fue hacer una filtración el cual consistió en pasar la solución colas por un filtro de aproximadamente 0.20 μm y depositada en un contenedor de 1000 L para después ser utilizada en pruebas de lixiviación. Se analizó la solución filtrada y no filtrada para conocer el contenido de Cu y Fe en cada una de ellas.

Una vez obtenidos los resultados del laboratorio de ensayos se procede a la lixiviación en botellas utilizando como solución lixiviante solución colas y solución del biorreactor. Se dejaron durante varios días y a lo largo de ese tiempo se tomaron muestras a diferentes tiempos, obteniendo como resultado que la mejor técnica para un mayor porcentaje de extracción es por medio de la biolixiviación, es decir con solución del biorreactor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Obtención de cobre a partir de jales por medio de la lixiviación ácida utilizando la solución del biorreactor.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Encontrar los parámetros más adecuados que nos permitan utilizar el aglomerador más indicado en los jales, para la recuperación de cobre por medio de la lixiviación acida de los pellets formados.
- Aglomerar de tal manera que nos permita formar un terrero para así no tener problema alguno al momento de lixiviar.
- Obtener resultados satisfactorios en el método de aglomeración para la recuperación de Cobre.

ANTECEDENTES

2.1 Comó se produce el Cobre.

Los minerales de cobre pueden venir en forma de óxidos o sulfuros, y dependiendo la especie del cobre es el método de lixiviación. En general podemos hablar que para minerales con sulfuros de cobre se utiliza la flotación, en cambio para el mineral oxidado de cobre la lixiviación con ácido sulfúrico. En la lixiviación en pilas a diferencia de otros tipos de lixiviación, el mineral a lixiviar tiene una ley relativamente alta y por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento más complejo. Cuando se utiliza una granulometría más fina, entonces se hace necesario aglomerar los finos para restituir la permeabilidad de mineral que se va a lixiviar. Adicionalmente al agua, cuando se lixivian minerales de cobre, se aprovecha de agregar ácido concentrado, para efectuar el proceso [5].

La permeabilidad es función de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5–10 micrones) finos (granulometrías inferiores a 100–150 micrones) y gruesos, como también del método de formación de las pilas o depósitos [6].

Con proporciones del 10–20% de estos materiales finos, pueden generarse problemas de permeabilidad. Si no se asegura la permeabilidad en los terreros de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos se segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación. A su vez, ello favorece la compactación en la formación de las pilas, existiendo la posibilidad de que estas partículas se vayan al fondo de la pila, impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida.

De esta forma, los efectos de una proporción inadecuada de finos pueden influir en un aumento innecesario del tiempo de lixiviación y con ello aumentar el consumo de reactivos, provocando una menor extracción de soluciones mineralizadas, lo que podría incidir, incluso, en la viabilidad del proyecto.

Para solucionar estos inconvenientes y asegurar un buen proceso de lixiviación es recomendable la eliminación de finos. Para ello se puede proceder de la siguiente manera:

- Realizar un análisis granulométrico y químico del metal valioso por fracciones, realizando cortes teóricos a diferentes tamaños.
- Realizar la separación de tamaños finos y gruesos, efectuándose la lixiviación estática sólo en estos últimos, normalmente con leyes más bajas y la lixiviación dinámica con los finos, enriquecidos de forma normal. Existen casos en que el empleo de este sistema ha logrado una mayor y más rápida recuperación que por una íntegra lixiviación estática.
- Realizar una aglomeración, el procedimiento más empleado en la actualidad. En términos generales, la aglomeración permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

En la aglomeración ocurre la adhesión de las partículas finas a las gruesas, las que actúan como núcleos, a partir de la distribución de tamaños en la alimentación.

En ocasiones, puede tener lugar de manera natural al manipular los materiales con cierta humedad. Por ejemplo, en las bandas transportadoras, en el mezclado o, incluso, en el momento de la caída sobre la pila [6].

2.2 Proceso de aglomeración.

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación, garantizando un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

Un factor crítico que no ha sido lo suficientemente investigado y que en muchos casos ha inducido fallas e incluso el cierre de plantas en operación es la permeabilidad [9].

2.3 Tipos de aglomeración.

2.3.1 Aglomeración por humedad

Este es el proceso más simple de aglomeración y consiste en humedecer el material con líquido hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, de manera que, al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los gruesos. Esta aglomeración suele ser muy débil y sólo se emplea en casos fáciles, con bajo contenido de finos.

El procedimiento más sencillo de lograr la aglomeración por humedad es el riego, el que puede efectuarse de la siguiente manera:

-Sobre la superficie de las bandas que transportan el mineral a la pila, con la dificultad de mojar la banda. Al caer el material de la banda en la formación de la pila. Adaptando el riego a los tamaños más gruesos (mayor desviación en la caída) la aglomeración puede ser más selectiva.

-Sobre la superficie de la pila, conforme vayan formándose los lechos o capas de mineral. La práctica y la experiencia definirán la humedad óptima y el sistema de riego más apropiado. A veces, cuando el proceso en sí, se necesita de un medio alcalino (lixiviación de oro y plata por cianuración) se puede emplear como aglomerante la cal en solución [2].

2.3.2 Aglomeración por adherentes

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como en la operación de lixiviación. Estos materiales adherentes o aglomerantes han sido ampliamente estudiados, principalmente por el USBM (United States Bureau of Mines) de EE.UU., determinando experimentalmente tres parámetros principales del proceso:

- El tipo y cantidad de aglomerante añadido a la alimentación seca.
- La humedad necesaria en la mezcla mineral / aglomerante.
- El período de curado para favorecer los puentes de silicato cálcico.

Teóricamente, la aglomeración con aglutinantes es un proceso no bien definido. Al parecer, sería similar a la floculación, es decir, se forma una especie de coagulación por unión de las partículas arcillosas coloidales con los agentes y electrolitos en solución. De este modo, se generarían aglomerados porosos muy estables y resistentes a la manipulación y condiciones de lixiviación [4].

2.4 Características y factores de la aglomeración.

Para que el proceso de aglomeración sea efectivo, es necesario disponer de una serie de dispositivos y equipos, algunos de los cuales pueden formar parte de la propia planta. Es el caso de una trituración con una serie de bandas transportadoras, para descarga del producto triturado, en donde puede aplicarse la aglomeración en las transferencias son equipos adicionales.

Para que se realice una buena aglomeración, especialmente en los minerales de cobre, se deben considerar ciertas características del material mineralizado, entre las que se encuentran el tamaño y geometría de las partículas, granulometría, características geológicas, ley de cobre en la mena, condiciones ambientales, evaporación del agua, humedad del curado, tiempo de curado, entre otras [10].

La aglomeración se realiza principalmente por:

- 1- Uniones líquidas entre partículas que aparecen por fenómenos de tensión superficial.
- 2- Agentes enlazantes de alta viscosidad que al solidificarse cristalizan.
- 3- Uniones sólidas que establecen puentes entre partículas como por ejemplo: cristalización de sales, adhesión, crecimiento, fusión y cristalización del ligante.
- 4- Fuerzas del tipo vander walls.
- 5- Fuerzas electrostáticas.

6- Fuerzas coulumbicas.

7- Fuerzas de atracción magnética.

Los aglomerantes que se pueden usar en minería son: cal, cemento tipo II (cemento gris Portland más comúnmente utilizado en la industria de la construcción), magnesia, dolomita calcinada, cloruro de calcio, floculantes, estos últimos muy usados para aumentar la velocidad de sedimentación de partículas en concentrados minerales.

Los mejores aglomerantes son el cemento portland y la cal, no permitiendo la emigración de partículas finas con la solución lixiviante siendo el cemento el aglomerante que mejores resultados ha dado, formando aglomerados estables y fuertes que resisten las más severas condiciones de lixiviación en montón y en el tiempo [8].

La aglomeración se puede efectuar tanto en medio ácido como en medio alcalino (básico), con las particularidades que se describen a continuación:

-Medio ácido: Este medio es típico de la lixiviación de minerales de cobre y uranio, el mismo lixiviante ácido se puede emplear como aglomerante. Por lo general, se utiliza ácido sulfúrico concentrado. Se ha propuesto también el empleo de aglomerantes ácidos sólidos, como los sulfatos (yeso), pero ello no es lo usual. A su vez, presenta efectos perniciosos como las posibles incrustaciones por precipitación posterior en pilas y tuberías.

-Medio alcalino: El caso más típico es la aglomeración de minerales de oro y plata. Con este sistema, los aglomerantes son normalmente cemento y cal. El cianuro en forma líquida y a una alta concentración, se emplea más bien como agente de humedecimiento durante la aglomeración [3].

El método de pruebas por columna está diseñado para simular el proceso de recuperación de metales preciosos por lixiviación en pilas [7].

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Muestreo de Jales de flotacion

La selección de material se llevó acabo en la presa de jales provenientes de planta concentradora en donde se tomò una muestra de tres diferentes puntos, esto con el fin de hacerla un poco mas representativa. Con ayuda de una retroexcavadora se perforo el suelo como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Fotografía tomada al momento de la recolección de muestra en la presa de jales.

La muestra de jales se lleva al laboratorio y se pone a secar a temperatura ambiente, sobre una superficie impermeable de vidrio como se muestra en la figura 2, esto con el fin de tener una muestra completamente seca al momento de agregar algún aglomerante. El tiempo promedio de de secado fue de 3–4 dias.



Figura 2. Representación del proceso de secado de la muestra a temperatura ambiente proveniente la presa de jales de planta concentradora.



Figura 3. Fotografía tomada al momento de realizar el cuarteo de la muestra seca de jales.

La Figura 3 señala el cuarteo que se realizó a la muestra ya seca de los jales, esto se realizó con el fin de corroborar la ley contenida en estos jales y tomar las muestras representativas.



Figura 4. Fotografías de las soluciones propuestas para aglomerar los jales. La Figura (a) representa el ácido sulfúrico concentrado; Figura (b) representa la solución del biorreactor y solución colas respectivamente.



Figura 5. Fotografía de la bentonita utilizada para aglomerar, proporcionada de la misma empresa minera.

3.2 Selección de diferentes tipos de aglomerantes.

Se utilizó diferentes tipos de aglomerantes, entre ellos se propuso aglomerar con la misma humedad que tenían los jales, aglomerar con ácido sulfúrico concentrado (98%), solución del biorreactor utilizada para biolixiviar, solución de colas proveniente del proceso de extracción por solventes y la bentonita como se muestra en las Figura 4 y 5.



Figura 6. Representación de los pellets ya secos formados con la humedad propia de los jales.

3.3 Formación de pellets.

Primeramente antes de realizar los pellets formados con los aglomerantes, se optó por realizar pellets con los jales tal cual se recolectaron de la presa, es decir, con la humedad que tenían, esto con el fin de descartar cualquier posibilidad al momento de lixiviar los jales. Para llevar a cabo la formación de los primeros pellets se tomaron 500 gr de muestra y se realizaron alrededor de 5-6 pellets con un diámetro de 2 pulgadas de forma manual, se consideró este diámetro ya que las columnas en las cuales se realizarían las pruebas eran de 6 pulgadas, de acuerdo a la literatura el diámetro de la columna debe ser de 4-6 veces mayor que el pellet y se decidió por

esos distintos tamaños. Los pellets formados se pusieron a secar a temperatura ambiente aproximadamente dos días, Figura 6.



Figura 7. Fotografía representativa de la mezcla que se utilizó para la formación de pellets, la cual se obtuvo agregando jales secos y ácido sulfúrico concentrado.

Para la formación de los demás pellets de las otras pruebas en columna, se utilizaron los aglomerantes propuestos y el material seco, se utilizó 1 kilogramo de jales con 125 ml de ácido sulfúrico concentrado los cuales fueron mezclados en un recipiente de aluminio para la posterior formación de pellets como se observa en la Figura 7. Otra prueba que se realizó fue aglomerar utilizando bentonita a diferentes concentraciones (1, 2, 3, 4 y 5%) con las mismas soluciones del biorreactor y solución colas.

En la figura 8 que se presenta los pellets formados y puestos sobre una superficie de vidrio para su posterior proceso de secado, el cual sería a temperatura ambiente, con un tiempo promedio de 3 a 4 días.



Figura 8. Fotografía de pellets formados con una mezcla de ácido sulfúrico y muestra seca de jales puestos sobre una superficie impermeable de vidrio secado a temperatura ambiente, tiempo de 3-4 días.

Como se puede apreciar en la figura anterior, los pellets formados con ácido sulfúrico aun sin estar secos por completo se puede decir que no serían una buena opción para utilizarlos en las pruebas de columnas y lixiviar ya que sin secarse ya se estaban cuartando y esto no es un buen resultado.

Una vez terminando con la formación de pellets utilizando el ácido sulfúrico concentrado como aglomerante, se realizaron los demás pellets con la misma cantidad de muestra de 1 kilogramo y 125 mililitros de solución, pero en esta ocasión se utilizaron la solución colas, solución del biorreactor y bentonita. Al igual que con los pellets de ácido sulfúrico se pusieron a secar, solo que en esta ocasión estos sí se secaron y se acomodaron de acuerdo a su composición, esto se muestra en la figura 9.

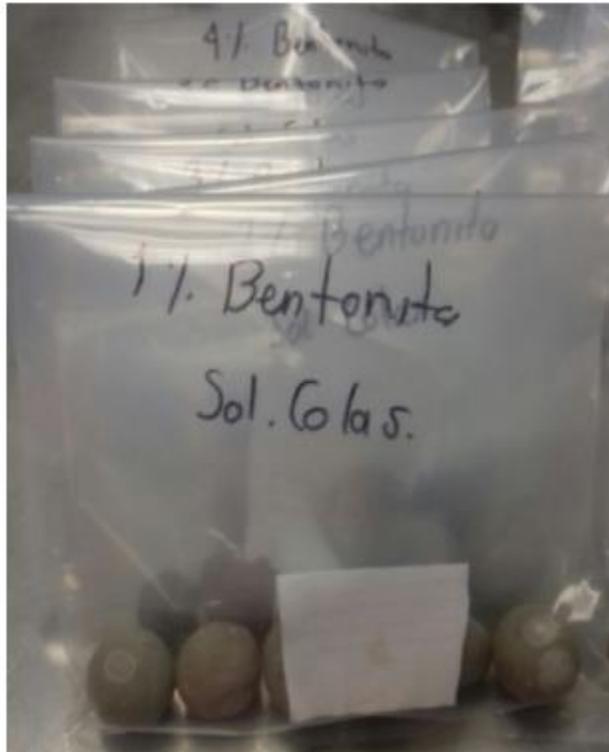


Figura 9. Fotografía tomada a los pellets formados con solución colas y solución del biorreactor utilizados como aglomerante.

Una vez que se tenían los pellets secos y etiquetados de acuerdo a su composición se prosiguió a la prueba de resistencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Prueba de resistencia

La prueba se realizó para conocer qué tan resistentes eran los pellets formados, se dejó caer cada uno de los pellets de una altura que simularía la altura de las columnas, en este caso fue de 3 metros teniendo mucho cuidado de que cada pellet se dejara caer del mismo lugar siempre, esto para que no influyera la distancia.

Al observar cada uno de los comportamientos que había en los pellets al momento de dejarse caer se observó que la mayoría de ellos se quebraban, sin embargo los pellets formados con 2 y 3% de bentonita, utilizando solución colas tenía un comportamiento un poco más resistente que los demás ya que solo se partían en 2 o 3 pedazos, por tal motivo se concluyó que estos pellets eran los de mejor resistencia al impacto lo cual se representa en la Figura 10, (a y b), como se observa en estas imágenes los pellets aunque se hayan quebrado no se deshicieron del todo.

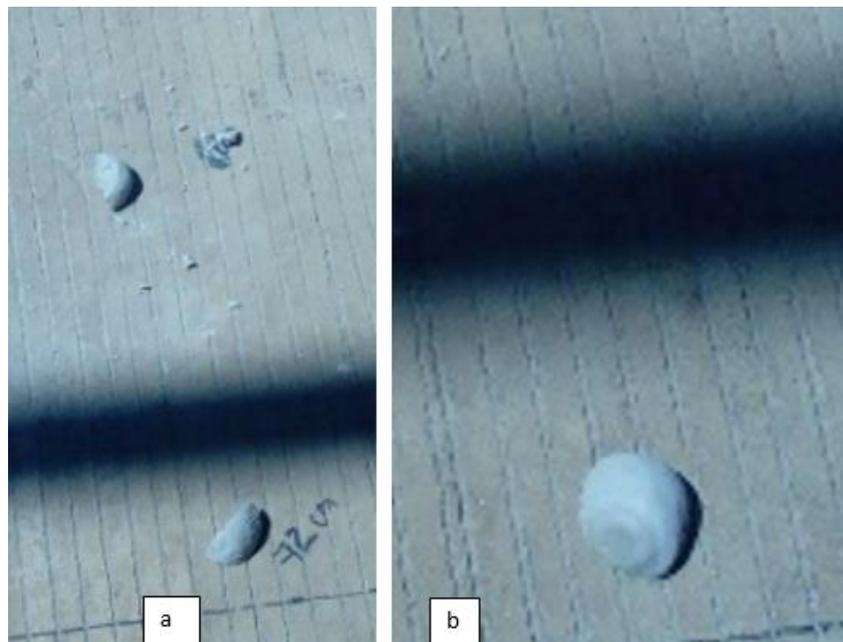


Figura 10. Pellets formados con 2 y 3% de Bentonita y solución de colas respectivamente, después de realizar la prueba de impacto.

4.2 Prueba de Permeabilidad.

Después de haber elegido los pellets con una mejor resistencia se prosiguió a realizarles una prueba de permeabilidad, lo que se busca es demostrar que los pellets aun estando duros como roca tenían permeabilidad. La prueba consistía en sumergir los pellets formados en solución en un vaso de precipitado y después de un tiempo de 24 horas observar lo que sucedía dentro del pellet, esto se representa en la Figura 11.



Figura 11. Representación de la prueba de permeabilidad, en donde se observan los pellets sumergidos en vasos de precipitado.

Al pasar el tiempo de prueba los pellets se desintegraron y solo uno quedo casi igual que al inicio y este fue el pellet hecho con 3% de Bentonita y solución colas, el cual se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Fotografía tomada después de terminar con la prueba de permeabilidad, en donde se observa el único pellet que no se desintegro por completo, el cual está compuesto por 3% de Bentonita y solución colas como aglomerante.

4.3 Formación de Pellets.

Una vez que se tiene definido el pellet con el que se trabajaría y el compuesto con una mezcla del 3% de bentonita y solución colas como aglomerante se prosiguió a la elaboración de los pellets los suficientes para poder cargar las 4 columnas con las que se trabajaría.

Con la muestra de jales seca por completo y con ayuda del equipo de seguridad necesaria se realizó la mezcla para poder formar los pellets. Todos los pellets fueron hechos de manera manual, calculando que todos tuvieran un diámetro de 2 pulgadas. Para tener la cantidad necesaria de pellets se ocuparon alrededor de 12 a 14 días en secarse por completo a temperatura ambiente. La Figura 13 representa los pellets formados y puestos a secar para posteriormente ser utilizados en la prueba de columnas.



Figura 13. Fotografía de los pellets formados con una mezcla del 3% de bentonita y solución colas como aglomerante en proceso de secado a temperatura ambiente para su posterior uso en la prueba de columnas.



Figura 14. Representación esquemática de las columnas utilizadas para el proceso de lixiviación.

4.4 Armado de Columnas.

Una vez que se tuvo la cantidad suficiente de pellets para cargar las columnas se prosiguió llenarlas. En la Figura 14 se observa las columnas utilizadas, con un diámetro de 6 pulgadas y una altura de 3 metros. De izquierda a derecha la columna 1 y 2 que serían regadas con solución colas mientras que la columna 3 y 4 se regaran con solución del biorreactor. En la Tabla I se presentan las condiciones utilizadas en las pruebas de columnas. Todos los pellets fueron hechos con la misma muestra, la cual fue de 3% de bentonita y 250 ml de solución colas por cada kilogramo. Asimismo, la columna 1 y 2 se regaron con solución colas, mientras que la 3 y 4 se regaron con solución del biorreactor.

Tabla I. Condiciones utilizadas en las pruebas de columnas.

	Solución utilizada para regar	Flujo ml/min	Mezcla utilizada para la formación de pellets	Peso total puesto en las columnas
Columna 1	Sol. Colas	4 ml/min	3% bentonita, solución colas	54 Kg
Columna 2	Sol. colas	4 ml/min	3% bentonita, solución colas	52 kg
Columna 3	Sol. Biorreactor	4 ml/min	3% bentonita, solución colas	56 kg
Columna 4	Sol. Biorreactor	4 ml/min	3% bentonita, solución colas	52 kg

Ya cargadas las columnas y todo el quipo necesario para poder realizar las pruebas con los pellets, se continuo con el llenado de las columnas como se muestra en la figura 15. La fotografía (a) representa las columnas totalmente cargadas, la cantidad de pellets entre una columna y otra varia, en la columna 1 se tuvo un total de 54 kg mientras que en la columna dos fue de 52 kg, la columna 3 se agregi 56 kg y la columna 4 son 52 kg. En la fotografía (b) nos representa el armado de la columna en la parte superior, donde se le adapto una tapa la para detener la manguera con la que sería regada la columna. El flujo utilizado para regar las columnas, es de 4

ml/min, que representa a escala industrial del flujo que se tiene en las pruebas de lixiviación de la mina.



Figura 15. La fotografía (a y b) representa las columnas cargadas.

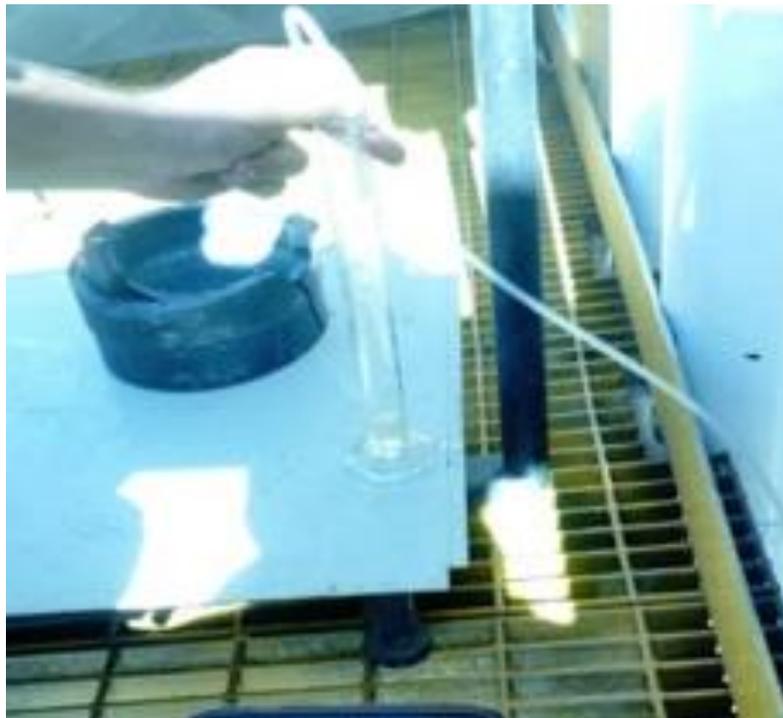


Figura 16. Fotografía que muestra la medición del flujo equivalente a 4 ml/min para la columna de 6 pulgadas de diámetro.

La figura 16 nos representa como se realizo esta medición, en donde podemos observar que con ayuda de una probeta, obtuvimos el flujo deseado.

4.5 Resultados de la prueba de Resistencia.

En las tablas II se presentan los datos obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 5.5 metros y un diámetro de particula de los pellets de 2 pulgadas. De acuerdo a los datos presentados en la tabla se llevo a la conclusión de que el pellet mas adecuado para ser utilizado en las pruebas de columnas, seria el compuesto por 3% de bentonita y solución colas y solución del biorreactor como aglomerante, ya que si bien también se partio al momento de caer al suelo, no fue tanto como los demás pellets.

Tabla II . Resultados obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 4 metros.

Prueba (4.5 m)	Diámetro de pellets (plg)	Resistencia
Pellet con solo humedad	2	Muy frágil
Pellet con H ₂ SO ₄	2	Muy frágil
Pellet con Colas	2	Frágil
Pellet con bio 8	2	Frágil
Pellet con colas y 1% bentonita	2	Poco resistente
Pellet con colas y 2% bentonita	2	Resistente
Pellet con colas y 3% bentonita	2	Resistente
Pellet con colas y 4% bentonita	2	Frágil
Pellet con colas y 5% bentonita	2	Frágil
Pellet con sol. Bio y 1% bentonita	2	Poco resistente
Pellet con sol. Bio y 2% bentonita	2	Resistente
Pellet con sol. Bio y 3% bentonita	2	Resistente
Pellet con sol. Bio y 4% bentonita	2	Frágil
Pellet con sol. Bio y 5% bentonita	2	Frágil

En la tabla III se presentan los resultados obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 3 metros, al igual que la anterior se concluye que que el pellet mas adecuado para ser utilizado en las pruebas de columnas, seria el compuesto por 3% de bentonita y solución colas y solución del biorreactor como aglomerante.

Tabla III. Resultados obtenidos de la prueba de resistencia al lanzar los pellets de una altura de 3 metros.

Prueba (3 m)	Diámetro de pellets (plg)	Resistencia
Pellet con H ₂ SO ₄	2	Muy frágil
Pellet con Colas	2	Poco resistente
Pellet con bio 8	2	Poco resistente
Pellet con colas y 1% bentonita	2	Poco resistente
Pellet con colas y 2% bentonita	2	Resistente
Pellet con colas y 3% bentonita	2	Resistente
Pellet con colas y 4% bentonita	2	Frágil
Pellet con colas y 5% bentonita	2	Frágil
Pellet con sol. Bio y 1% bentonita	2	Poco resistente
Pellet con sol. Bio y 2% bentonita	2	Resistente
Pellet con sol. Bio y 3% bentonita	2	Resistente
Pellet con sol. Bio y 4% bentonita	2	Frágil
Pellet con sol. Bio y 5 % bentonita	2	Frágil

Como se puede ver en las dos tablas anteriores, la mayoría de los pellets no tuvo una resistencia buena, la mayoría presentaron resistencia fagil o muy fragil, se concluyo que los pellets mas adecuados serian los compuestos por 2 y 3% de bentonita aglomerados con solución colas y solución del biorreactor.

4.6 Resultado de la prueba de columnas.

Las columnas con los pellets (Figura 12), se empezó a regar con solución de la biolixiviación, es decir con solución del biorreactor y solución colas inicial del proceso. La solución empezó a fluir por las columnas lentamente, el primer día después de poner a regar las columnas no se obtuvo nada de solución lixiviada, esto pudo haber sido porque los pellets apenas estaban siendo mojados por la solución. Al día dos de haber dado inicio a la prueba de columnas se obtuvo una pequeña cantidad de solución lixiviada en las columnas 2 y 4 lo que se representa en la siguiente figura 17.



Figura 17. Percolación de la solución rica de las columnas 2 y 4 respectivamente, alimentadas con solución del biorreactor.

Como se muestra en la Figura anterior, solo la columna 2 y 4 tuvieron una percolación, que si bien no fue mucha se obtuvo algo que podría tomarse como muestra para mandar a analizar. No se sabe con exactitud porque las otras dos columnas no tuvieron nada de solución percolada, ya que todas habían sido puestas bajo las mismas condiciones, una respuesta posible a esto podría ser que aun no había entrado la suficiente cantidad para tener solución lixiviada o que muy probablemente los pellets empezaran a desintegrarse y empezar a tapar las columnas.

En el siguiente día las cuatro columnas tuvieron solución percolada de la cual obtuvimos la muestra necesaria para mandarlas a analizar por medio del método de Absorción Atómica para leer la cantidad de Cu, Fe⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, Fe Total y pH. Al cuarto día las columnas se taparon y la solución ya no percoló, se desbordaron dos de las columnas con las que se estaba trabajando por lo que se pararon las pruebas (Figura 18).



Figura 18. Fotografía tomada a la columna tapada y desbordada.

En vista del resultado obtenido se concluye que los pellets se deshicieron en el interior de la columna formando capas impermeables lo que impidió el paso de la solución lixivante. La Figura 19 representa las soluciones obtenidas de las columnas, es analizada para conocer los valores en colas de. Asimismo se manda analizar la solución lixivante del bioreactor (cabeza) y solución colas inicial (cabezas), por medio de Absorción Atómica y poder tener una referencia para comparar los datos obtenidos de la solución recolectada en las pruebas de columna. Las tablas IV y V presentan estos resultados.



Figura 19. Muestras tomadas de solución lixiviada en las pruebas de las cuatro columnas, las cuales se etiquetaron de acuerdo al día en el que fueron muestreadas.

Se hace la aclaración que la ley inicial con la que fueron comparados los resultados de Absorción Atómica fue un dato que por cuestiones de confidencialidad hacia la mina no nos dejó compartirlo ni se tuvo acceso.

Tabla IV. Datos obtenidos del análisis por Absorción atómica de la solución colas inicial (cabeza), utilizada para regar la columna 1 y 2.

Cu G/L	Fe g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
0.1648	1.14	0.1	1.04	1.65

Tabla V. Datos obtenidos del análisis por Absorción atómica de la solución del biorreactor inicial (cabeza), utilizada para regar la columna 3 y 4.

Cu G/L	Fe g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
0.0675	8.789	2.2	6.589	1.60

Una vez tenido todas las muestras recolectadas se disolvieron, esto para facilitar la lectura en el método de absorción atómica, los resultados obtenidos se presentan a continuación en las tablas VI, VII, VIII y IX.

Tabla VI. Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 1.

Tpo. días	Cu g/L	Fe _t g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
1	-	-	-	-	-
2	0.25	1.270	0.2	1.07	1.5
3	-	-	-	-	-

Como se comentó el primer día no se obtuvo nada de solución percolada, por tal motivo no hay datos existentes, el día 2 aunque ya se obtuvo solución, la cantidad de cobre obtenida que es el elemento que nos interesa en esta ocasión, fue muy poca en relación a la ley inicial con la que se tenía y el día 3 ya definitivamente no salió nada porque la columna se tapó. Se observa un aumento de 0.16 a 0.25 g/L de cobre, con leve disminución del pH.

Tabla VII. Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 2.

Tpo. días	Cu g/L	Fe _t g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
1	-	-	-	-	-
2	0.9519	2.292	0.3	1.992	1.47
3	0.3199	1.545	0.2	1.345	1.79

Los resultados obtenidos de la columna 2 podemos decir que se obtuvo una mayor recuperación de cobre el día 2 ya que el día 3 disminuyó casi 1/3 en comparación

del día 2. Por otro lado el pH aumento de un día para otro y uno de los factores que pudo haber ocasionado esto pudo haber sido algún contenido de los jales, ya que como sabemos son de una presa de la planta concentradora.

TablaVIII . Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 3.

Tpo. días	Cu g/L	Fe _t g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
1	-	-	-	-	-
2	0.0218	0.2155	.2	0.0155	1.47
3	-	-	-	-	-

Los resultados de la columna 3 no fueron muy buenos ya que la obtención de cobre en el día dos, que fue el único en el que percolo solución, fue casi insignificante el contenido de cobre que se recuperó.

Tabla IX Resultados del análisis de soluciones obtenidas de la columna 4.

Tpo. días	Cu g/L	Fe _t g/L	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	pH
1	-	-	-	-	-
2	0.5351	13.16	3.2	9.96	1.55
3	0.4611	12.96	3.1	9.86	1.66

De las cuatro columnas que se pusieron, la columna cuatro fue de la que se obtuvieron mejores resultados, ya que los dos días de riego hubo mayor recuperación de cobre y el pH se mantuvo un poco mas estable que en las otras columnas.

En una comparación entre la columna 2 y 4 que fueron de las que se obtuvo más solución lixiviada se podría decir que estuvieron muy iguales ya que la recuperación de cobre en las dos fue regular, mejor que en la columna 1 y 3, pero aun así no convendría instalar unas columnas ya de forma definitiva o realizar a nivel industrial, ya que en solo dos días de los 60 que se tenía pensado correr las columnas, se tuvo problemas.

Al no obtener los resultados esperados de las pruebas de columnas, se optó por realizar un experimento a nivel laboratorio simulando las columnas con una probeta de 1 litro. Desafortunadamente la prueba no funcionó y la probeta se tapó de igual manera que las columnas como se representa en la figura 20.



Figura 20. Representación esquemática de la prueba de columna a nivel laboratorio en donde podemos observar en la Figura (a) la representación esquemática simulando las columnas y el bombeo, al igual que la solución cabeza, por otro lado en la Figura (b) se muestra la probeta ya tapada y a punto de desbordarse.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones Generales

A partir de los resultados obtenidos se concluye en este trabajo experimental, que la bentonita como aglomerante podría ser buena utilizando un porcentaje más adecuado por arriba del 3% que fue el que se utilizó en este trabajo, utilizando una cantidad un poco más alta podría resultar y dar mejores resultados que los obtenidos en este trabajo, sin dejar a lado que debe de ser costeable y que se deben de recuperar los gastos de inversión.

Una recomendación que se podría hacer sería realizar el mismo experimento pero utilizando otros aglomerantes, como pudiera ser la Zeolita o algún otro material que resulte viable para este proceso.

Se concluyó también que si bien una de las mejores pruebas de resistencia sería utilizar ácido como aglomerador. Otro punto importante que se debe mencionar, es el cambio en el pH de las soluciones ya lixiviadas, ya que como se muestra en la tabla IV las columnas que fueron lixiviadas con solución colas su pH aumento, y una posible respuesta del porque sucedió esto, podría ser algún compuesto que contengan los jales los cuales como bien sabemos ya han tenido un proceso previo, en donde se pusieron en contacto con algunos químicos en el proceso de flotación. Respecto a lo que se concluye relacionado con la prueba a nivel laboratorio (Figura 20), los resultados obtenidos confirman lo obtenido en las pruebas en columnas, los pellets se deshicieron y la columna se tapó, por tal motivo la solución ya no percoló y comenzó a derramarse.

Podemos concluir que los datos obtenidos pueden servir de base en la programación para pruebas futuras, buscando otras alternativas o en otros procesos.

5.2 Conclusión Personal

Más allá de aplicar mis conocimientos adquiridos a lo largo de mi estancia en la Universidad de Sonora y mi capacidad de poder desenvolverme en un entorno de trabajo en el sector productivo, también me sirvió para obtener nuevos conocimientos que personalmente son indispensables para el debido desarrollo de cualquier profesionista sin importar el ramo en el que se desempeñe. Entre algunos de estos conocimientos puedo mencionar el tener buena iniciativa y disposición al momento de realizar cualquier trabajo, por más fácil que parezca y siempre hacer y dar lo mejor en cada cosa que hagamos. Por otro lado, la puntualidad es otro punto importante a remarcar ya que la puntualidad de manera personal dice mucho de nosotros y de nuestro compromiso que tenemos hacia nuestro trabajo. Por último y no menos importante la comunicación y relación con nuestros compañeros de trabajo también es muy importante ya que el mantener el respeto debido entre nosotros hará más fácil poder llevar un entorno de trabajo tranquilo y sano para un buen desempeño laboral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Álvarez, M. S. Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de cobre. Obtenido de Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de cobre. (2012). http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1355/1/surco_am.pdf.
- [2] Carvajal, G. prezi. Obtenido de prezi: (16 de enero de 2015). <https://prezi.com/w0wowosymomb/proceso-de-aglomeracion>.
- [3] Chase., M. L. Coldeco educa: (2001). https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_procesoaglomeracion.asp
- [4] Cuadra, P. Coldeco educa. Obtenido de Coldeco educa,(2008). https://www.codelcoeduca.cl/Movil/pr_lixivacion.asp.
- [5] Escalona, L. M. (01 de Julio de 2007). metsolver.com. Obtenido de metsolver.com: <http://www.metsolver.com/Papers/dt3.pdf>
- [6] Lastra, M. (6 de enero de 2013). coldeco educa. Obtenido de coldeco educa: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_procesoaglomeracion.asp
- [7] Maher, B. J. (19 de mayo de 2015). ppx mining corp. Obtenido de ppx mining corp: <http://ppxmining.com/pruebas-metalurgicas-realizadas-en-muestras-de-igor-arrojan-88-recuperacion-de-oro-mediante-molienda-y-74-76-recuperacion-de-oro-a-traves-de-lixivacion-en-columna/>
- [8] Ortiz, A. A. (07 de Junio de 2007). revista del instituto de la investigación de la facultad de metalurgia. Obtenido de revista del instituto de la investigación de la facultad de metalurgia: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v03_n5/extracc_lixiv.htm
- [9] Peres, j. (3 de Diciembre de 2014). Evalc. Obtenido de Evalc: <http://www.evalc.cl/en-que-consiste-el-proceso-de-lixivacion>

[10] Alfaro, e. J. (2012). Permeabilidad de materia depositado en pilas de lixiviacion. Santiago de chile.