

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Evaluación hidrometalúrgica de la masicotita y la recuperación  
por cementación en Colpa - Tarma – 2019**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Metalurgista**

**Autor: Bach. Jaime Dennis ESPIRITU SOTO**

**Asesor: Mg. Marco Antonio HIDALGO SURICHAQUI**

**Cerro de Pasco – Perú – 2019**

# UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

## FACULTAD DE INGENIERIA

### ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA

#### METALÚRGICA



#### TESIS

**Evaluación hidrometalúrgica de la masicotita y la recuperación por  
cementación en Colpa - Tarma – 2019**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA**

**PRESIDENTE**

---

**Mg. Ramiro SIUCE BONIFACIO**

**MIEMBRO**

---

**Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ**

**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

A dios, a mis padres, a mi alma mater por  
su paciencia, apoyo, la vida y mi  
profesión.

Por esto y mucho más viviré eternamente  
agradecido

## **RECONOCIMIENTO**

La mejor herencia que nos puedan dejar los padres son los estudios, sin embargo, no creo que sea el único legado del cual yo particularmente me siento muy agradecido, mis padres me han permitido valerme por mi mismo. Ellos son mi mayor motivación en la vida, les dedico este trabajo de investigación. Gracias papito Florentino y mamita María. A mis hermanas y hermanos por creer en mí y apoyarme a conseguir esta meta tan importante, Espero algún día ser yo, quien les de las fuerzas para conseguir sus objetivos.

## RESUMEN

La existencia de importantes reservas de galena alterada a óxidos, depositadas en arcillas hidratadas que actuó como flujo hidrotermal de baja temperatura y actualmente se encuentra como material hospedante del plomo, presentándose en forma de bolsones, alojados en estratos calizos, tiene como objetivo desarrollar pruebas experimentales de lixiviación alcalina para extraer estos metales, los cuales no es posible su recuperación por flotación. Las muestras obtenidas, permite desarrollar pruebas combinadas de concentración gravimétrica por líquidos densos y lixiviación con NaOH a nivel laboratorio; se basa en la propiedad de las soluciones concentradas de NaOH de complejar metales como Pb, Zn, Al, As, Sb y Cu.

En la superficie de cada muestra se observa alta oxidación del plomo, presentándose como plumboso; pero cuanto mayor es el tamaño, al interior se observa galena altamente concentrada y con tendencia a plomo nativo; no se observa minerales de zinc y por esta razón se desarrolló pruebas de lixiviación a nivel laboratorio con NaOH a diversas concentraciones de solución, variando la granulometría, densidad de pulpa y velocidad de agitación.

Los valores metálicos presentes en la solución, fueron recuperadas por cementación con zinc, logrando altas recuperaciones en forma elemental.

**Palabras claves:** óxidos de plomo, hidróxido de sodio, cementación

## **ABSTRACT**

The existence of important reserves of galena altered to oxides, deposited in hydrated clays that acted as low temperature hydrothermal flow and is currently as a host material for lead, presenting itself in the form of pockets, housed in limestone strata, aims to develop experimental tests of alkaline leaching to extract these metals, which cannot be recovered by flotation. The samples obtained, allows to develop combined tests of gravimetric concentration by dense liquids and leaching with NaOH at the laboratory level; it is based on the property of concentrated NaOH solutions to complex metals such as Pb, Zn, Al, As, Sb and Cu.

On the surface of each sample, high oxidation of lead is observed, presenting itself as plumbous; but the larger the size, there is a highly concentrated galena inside and with a tendency to native lead; no zinc ores are observed and for this reason laboratory leaching tests with NaOH were developed at various concentrations of solution, varying the particle size, pulp density and agitation speed.

The metallic values present in the solution were recovered by zinc cementation, achieving high recoveries in element form.

**Keywords:** lead oxides, sodium hydroxide, cementation.

## INTRODUCCIÓN

La tesis es la prueba “de fuego” que demuestra las competencias requeridas para obtener el grado académico. Se espera de ella una evidencia indiscutible de las competencias de investigación aprendidas en las aulas universitarias y se aplique al campo profesional.

El presente proyecto, titulado “*Evaluación hidrometalúrgica de la masicotita y la recuperación por cementación en Colpa - Tarma – 2019*” es interesante porque se trata de un yacimiento en bolsones en estratos calizos y que requiere una explotación ecológica y sostenible, para el beneficio de los pobladores de la zona, siendo esta investigación el punto de partida para iniciar las exploraciones y seguidamente las explotaciones de estos minerales de plomo.

Los estudios desarrollados a través del muestreo y posterior tratamiento confirman que la recuperación de plomo es posible desarrollar por lixiviación básica y posterior cementación. Se encuentra dividido en cuatro capítulos; sigue una secuencia lógica propia de los proyectos de investigación, del siguiente modo:

CAPÍTULO I. Se determina la problemática, para formularlo en preguntas, sobre como caracterizar a la masicotita, con las sub preguntas que consisten en el diagnóstico y posterior lixiviación – cementación. Su objetivo está referido a demostrar el proceso de lixiviación con NaOH, justificando la presente investigación, dada la importancia que significa llevarlo a explotar el yacimiento en forma sostenible.

CAPÍTULO II. Se expone cuatro antecedentes referidos al tema, dos investigaciones nacionales y dos internacionales, plasmados en tesis, seguido de una descripción de las bases teóricas desde una perspectiva general a específica de la microscopía de minerales; hasta definir el promedio de disolución de plomo, para la respectiva valoración y rentabilidad de la mina; se plantea las hipótesis y se define las variables de operación.

CAPÍTULO III. Comprende el método de investigación: experimental; nivel experimental y tipo aplicativo, con diseño experimental, sobre una población que corresponde a una campaña media mensual y sobre ello diseñar el método de muestreo a seguir.

CAPÍTULO IV. Los cálculos procesados en el capítulo anterior se presentan en tablas y ecuaciones, para luego la hipótesis ser contrastada, demostrándose que el nivel de aceptación de los datos es correcto al rechazar la hipótesis nula.

CONCLUSIONES. Se concluye que el yacimiento es prometedor; las leyes de plomo existentes demostradas son altas y la etapa de lixiviación básica a nivel laboratorio sugieren que es posible lograr mejores recuperaciones.

El autor.



## INDICE

DEDICATORIA	
RECONOCIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCION	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE GRÁFICOS	
INDICE DE ILUSTRACIONES	
CAPITULO I.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.....	3
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
CAPÍTULO II .....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	5
2.2. BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS .....	9
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	29
2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS .....	30
2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	31
2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES .....	32
CAPÍTULO III .....	33
3. METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	34
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	34
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	35
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	36
3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	37
3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO .....	39

3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN .....	39
3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA .....	40
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>41</b>
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	41
4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	41
4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS .....	50
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
<b>CONCLUSIONES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
<b>ANEXO</b>	

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Aleaciones de chatarra de aluminio.....	22
<b>Tabla 2:</b> Serie electromotriz de metales .....	24
<b>Tabla 3:</b> Variables e indicadores.....	32
<b>Tabla 4:</b> Tabla de técnicas e instrumentos .....	37
<b>Tabla 5:</b> Peso específico medio del mineral .....	42
<b>Tabla 6:</b> Análisis de mallas del compuesto .....	43
<b>Tabla 7:</b> Análisis químico promedio .....	44
<b>Tabla 8:</b> Recuperaciones de las pruebas de cementación con aluminio .....	50
<b>Tabla 9:</b> Prueba de la primera hipótesis específica .....	51
<b>Tabla 10:</b> Prueba de la segunda hipótesis específica.....	52
<b>Tabla 11:</b> Para el cálculo del peso específico medio .....	67
<b>Tabla 12:</b> Lixiviación de plomo en función del ratio mineral.....	67
<b>Tabla 13:</b> Lixiviación de plomo en función del tamaño del mineral.....	68
<b>Tabla 14:</b> Lixiviación de plomo en función a la concentración de la solución .....	68

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Esquema de producción de metales desde minerales o concentrados por hidrometalurgia.....	11
<b>Gráfico 2:</b> Proceso de cementación.....	27
<b>Gráfico 3:</b> Lixiviación de Pb en función a la granulometría.....	46
<b>Gráfico 4:</b> Lixiviación de Pb en función a la densidad de pulpa.....	47
<b>Gráfico 5:</b> Lixiviación de Pb en función a la concentración de NaOH.....	48
<b>Gráfico 6:</b> Lixiviación de Pb en función a la velocidad de agitación .....	49
<b>Gráfico 7:</b> Diagrama de Pourbaix del plomo .....	55

## INDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1:</b> Masicotita .....	44
<b>Ilustración 2:</b> Galena a 50 micrones .....	45
<b>Ilustración 3:</b> Galena a 600 micrones .....	45
<b>Ilustración 4:</b> Toma de muestras de mina.....	62
<b>Ilustración 5:</b> Determinando el peso específico del mineral.....	69
<b>Ilustración 6:</b> Preparando la solución de NaOH.....	70
<b>Ilustración 7:</b> Realizando el análisis granulométrico .....	70

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA**

En el anexo de Colpa, distrito de Acobamba, provincia de Tarma, región Junín, al observar muestras de plomo en superficie y existiendo frentes abiertos posiblemente hace años; después de tener la concesión minera y con el permiso social correspondiente se procedió a desarrollar la profundización en los dos frentes abiertos, uno a nivel del piso, hasta 35 metros y otro a 150 metros de altura hasta 86 metros lineales. Se encontró cuerpos mineralizados conteniendo arcillas con presencia de bentonitas y en medio de ellos el plomo oxidado como masicotita en forma de nódulos que van desde partículas muy pequeñas hasta bloques de 1,20 metros de diámetro; posiblemente se depositó posterior

al plegamiento y formación de los estratos calizos circundantes en toda la zona.

Estos nódulos de plomo en superficie están alterados formados óxidos y en el interior se observa la presencia de galena compacta y no se observa otros minerales que lo acompañan. La concentración de óxidos de plomo por flotación, se realiza sulfurizando la superficie de la partícula antes de agregar el colector en la etapa de acondicionamiento del mineral, con resultados variables; pero existen investigaciones desarrolladas donde demuestran que es posible la lixiviación de óxidos y sulfuros de plomo con NaOH con altas recuperaciones y a una velocidad rápida de reacción.

## **1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. Delimitación temporal**

El desarrollo del presente trabajo se ejecutará en una sola unidad económica administrativa en Colpa – Tarma.

### **1.2.2. Delimitación especial**

El trabajo de investigación comprende diez meses (enero – octubre del 2019).

## **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Por los considerandos antes mencionados, decimos ¿Cómo influye la lixiviación básica en la recuperación por cementación de galena altamente oxidada en Colpa – Tarma – 2019?

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo influye la lixiviación básica en la recuperación por cementación de plomo altamente oxidado en Colpa – Tarma – 2019?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019?
- ¿Cómo determinamos los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019?
- ¿Cómo se obtiene las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo en Colpa – Tarma – 2019?

## **1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar experimentalmente por lixiviación básica y cementación la recuperación de plomo de minerales oxidados en Colpa – Tarma – 2019.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019.

- Determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019.
- Determinar las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo en Colpa – Tarma – 2019.

### **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo pretende demostrar la posibilidad de recuperar plomo a partir del mineral oxidado en forma metálica, el cual permitirá hacer viable el prospecto, dado las reservas importantes y la formación tipo bolsones en mantos calizos.

Se justifica porque la mineralogía existente sugiere desarrollar la tecnología puntual para el yacimiento y que, si bien existe en el mundo algunas experiencias; en el país, será el primer caso desarrollarlo a nivel laboratorio para luego llevarlo a escala mayor.

### **1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

Las limitaciones que se presentó en la investigación son la falta de microscopía electrónica de barrido y espectrofotometría de absorción atómica, para analizar profundamente, todos los componentes existentes en el mineral de cobre.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Villar, R. (2009) en su tesis "*Lixiviación alcalina con hidróxido de sodio de un sulfuro Pb - Zn parcialmente oxidado y recuperación de los valores metálicos por cementación con aluminio*". Su objetivo central es: La presente investigación de lixiviación de minerales sulfurados de Pb y/o Zn, con NaOH concentrado, tiene el objetivo de aplicar la lixiviación alcalina para extraer estos metales, a partir de minerales provenientes de pequeños yacimientos, ampliamente distribuidos, no extraídos



por los procesos convencionales pirometalúrgico para Pb y de lixiviación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para Zn. El autor concluye:

- Es posible lixiviar minerales sulfurados o sulfurados-tostados de Pb-Zn con soluciones concentradas de NaOH.
- En NaOH = 2,5 M se pueden disolver por lo menos de 5,1 a 5,9 g/l de Pb y de 4 a 5,4 g/l de Zn.
- En NaOH = 4 M se pueden disolver 37,7 g/l de PbS y 29,6 g/l de Zn.
- La aplicación podría ser de gran interés ya que no disuelve minerales de Fe.
- Las extracciones de Pb y Zn son relativamente rápidas, menos de 2 horas.
- La cementación con aluminio parece ser el método más conveniente para recuperar Pb y Zn de las soluciones alcalinas cargadas.
- Sería apropiado encontrar la forma más funcional de proceso: lixiviación dinámica, en pilas, por percolación o en montón.

Rojas, B. (2017) en su tesis "*Precipitación y cementación de plomo desde una solución de acetato de plomo*", Universidad Nacional Autónoma de México, tiene como objetivo: Determinar experimentalmente los procesos de precipitación y cementación

alcalina con aluminio para la recuperación de plomo desde una solución de ácido acético. El autor concluye:

- Es factible obtener plomo de una solución de acetato por precipitación o cementación, siempre y cuando ésta se encuentre en un medio alcalino.
- La precipitación y cementación alcalinas de plomo permiten regenerar el residuo para la lixiviación (acetato de plomo).
- La recuperación de plomo por precipitación, a partir de una solución de acetato, permite su obtención en forma de hidróxido  $[\text{Pb}(\text{OH})_2]$ . Sin embargo, debe pasar por un proceso de calcinación y reducción para obtenerlo como elemento.
- En la precipitación, las condiciones idóneas para la recuperación de plomo son una mayor cantidad de NaOH y velocidad de agitación de 150 RPM
- En las pruebas experimentales se alcanzó una precipitación máxima del 88 % con las siguientes condiciones:
  - a. Masa de NaOH: 2.9 g
  - b. Sin velocidad de agitación
  - c. Temperatura: 25°C
- La cementación con aluminio desde solución de acetato permite la recuperación plomo metálico

directamente, sin embargo, se necesita de una mayor cantidad de NaOH para la alcalinización.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Delgado, G. (2016), en su tesis "*Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo-plata cobre de Sociedad Minera Corona S. A.*", Universidad Nacional San Agustín; concluye: El proceso de flotación por espumas tiene gran influencia en la metalurgia extractiva ya que sin él difícilmente hubiera podido desarrollarse sistemas posteriores, como los de tostación, conversión, fusión y refinación para obtener metales de consumo; y, en general, la minería no mostraría los niveles actuales de desarrollo, que permiten elevar el volumen de reservas minerales abriendo la posibilidad de flotar minerales de contenido químico valioso más bajo.

Para tener éxito en la flotación es necesario controlar desde la calidad del mineral en mina, el producto chancado a molienda, la liberación de los valiosos y posible aplicación de flotación flash, densidades de pulpa en las etapas de flotación, calidad y dosificación automática de reactivos, control de cargas circulantes y remolienda de medios de flotación, automatización de equipos en control de nivel de pulpa, control automático de pH y uso de analizadores químicos en línea.

Uñapillco, L. (2015) en su tesis "*Investigación para la cementación de plomo desde una solución alcalina con chatarra*

*de aluminio*”, Universidad Nacional San Agustín, sustenta como objetivo general: Llevar a cabo la experimentación de cementación de plomo desde una solución alcalina usando chatarra de aluminio.

Concluye: En la investigación ejecutada si se logró precipitar plomo con el cementante aluminio con buenos resultados.

Se pudo lograr recuperaciones de hasta 99,89% bajo las condiciones más favorables de masa de chatarra de aluminio de 3 g, superficie de chatarra de aluminio de (548,88 mm<sup>2</sup>), y un tiempo de 30 minutos.

## **2.2. BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS**

### **2.2.1. Lixiviación**

La lixiviación es la operación unitaria principal de la hidrometalurgia, tiene como objetivo disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él; el medio donde las reacciones se llevan a cabo puede ser agua o algún otro solvente.

En algunas ocasiones la lixiviación requiere de previo tratamiento del sólido (p. ej., conminución o tostación), los metales de valor en la solución de lixiviación se precipitan por

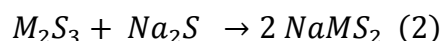
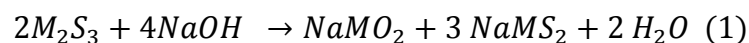
diferentes métodos en forma elemental o de compuestos, ver gráfico siguiente.

La lixiviación consiste en usar soluciones acuosas, con un agente químico que reacciona con el metal presente en el mineral, pueden ser ácidas, básicas o neutras. Normalmente el tipo y concentración del agente se controlan para lograr la selectividad del metal a recuperar. En la lixiviación el potencial de oxidación, la temperatura y el pH, son parámetros importantes que se regulan para optimizar la disolución del componente deseado en la fase acuosa.

La lixiviación comprende dos formas de proceso, en la primera se provoca que la solución percole a través de una cama de sólidos, de tal forma que sean humectados y, en la segunda las partículas de mineral se dispersan en la solución, para que se disuelvan los metales de interés.

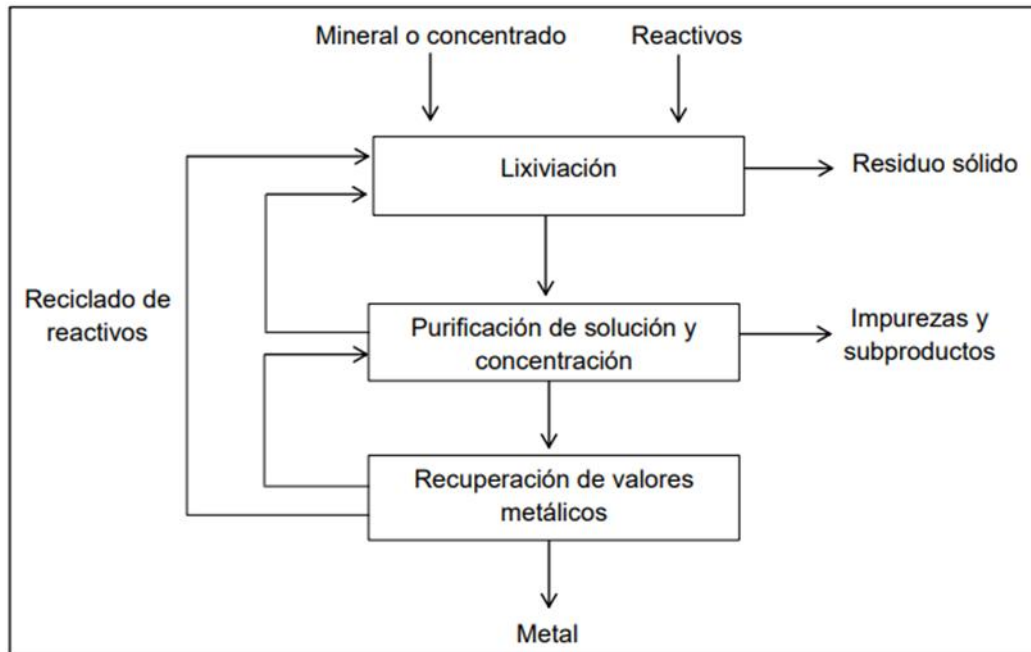
Después de la disolución, en cualquiera de las dos formas, prosigue una separación de la solución cargada y residuos sólidos.

Para el caso de la disolución de sulfuros metálicos, existen dos reacciones químicas generales que representan a la lixiviación, son:



Dónde: M representa Pb o Zn

**Gráfico 1:** Esquema de producción de metales desde minerales o concentrados por hidrometalurgia



Fuente: García, 2016.

Las etapas que conforman el método hidrometalúrgico para procesar los concentrados de plomo son:

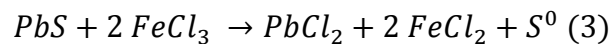
- Pre-tratamiento: El concentrado se prepara para que sea posible la disolución (no siempre es necesario).
- Disolución: Etapa en la que entran en contacto la solución y el mineral para que el metal de interés quede en solución.
- Tratamiento de la solución: Etapa en que se separan impurezas y/o se concentra la solución.
- Recuperación: Etapa de precipitación de plomo.

A pesar de que se han realizado estudios para lixiviar galena con diferentes reactivos, aún no se aplica en un proceso de forma industrial. Los procesos de potencial lixiviación para plomo que a continuación se mencionan son estudios de investigación a nivel laboratorio.

### **2.2.2. Procesos de lixiviación de minerales de plomo**

#### **a. Lixiviación de galena con cloruro férrico**

Aguilar, González, & Morales (1997) estudiaron la lixiviación de sulfuro de plomo con cloruro férrico, la cual no requiere de pretratamiento y transcurre de acuerdo a la siguiente reacción:



La solubilidad del cloruro de plomo es baja, la disolución debe realizarse a temperatura  $\geq 100$  °C para que se logre disolver 99% del Plomo.

La solución de lixiviación que contiene  $FeCl_3$  se saturada con  $NaCl$  para disolver el  $PbCl_2$ , como residuo quedan sólidos de la ganga y azufre elemental.

Con este método se reducen las emisiones de plomo a la atmósfera y se elimina la generación de  $SO_2$ .

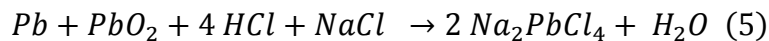
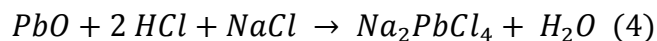
Esto se debe a que en presencia de cloruro férrico el PbS reacciona para formar azufre elemental y no ocurre el desprendimiento de gases como el SO<sub>2</sub>.

Luego la solución pasa a una filtración en caliente y se enfría para cristalizar PbCl<sub>2</sub>, el cual pasa a un proceso de electrólisis de sales fundidas para producir Pb y Cl<sub>2</sub>; este último se usa para regenerar el agente de lixiviación.

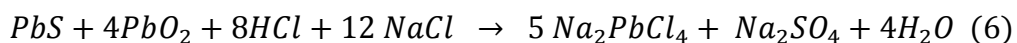
#### **b. Lixiviación de galena con ácido clorhídrico**

La lixiviación con ácido clorhídrico se realiza colocando el concentrado de Pb tostado en un reactor en el que se agrega el ácido diluido en salmuera (solución de agua con NaCl), la eficiencia de disolución de plomo es alta, alcanzando 99.7%.

Las reacciones que se producen son las siguientes:

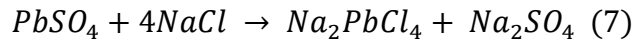


También se puede lixiviar la galena sin tostar, utilizando un agente oxidante como se observa en la siguiente ecuación:



Sí se tiene sulfato de plomo el azufre se encuentra oxidado por lo que se puede lixiviar únicamente por NaCl como se observa en la reacción siguiente.





El ácido clorhídrico puede ser regenerado posteriormente en la celda electrolítica utilizada una electrodeposición (Paz, 2015).

### **c. Lixiviación a presión con ácido nítrico**

Se trata de la lixiviación de un concentrado de plomo-plata en soluciones de  $NaNO_3$ , trabajando arriba del punto de fusión de azufre ( $119^\circ C$ ) para aglomerarlo y evitar la formación de iones.

El reactivo que se utiliza es ácido nítrico concentrado, ya que tiene efecto favorable en la disolución de plomo y plata. Los experimentos se realizan en autoclave.

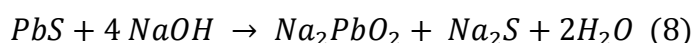
Como resultado del estudio se obtuvo que con la lixiviación se logra una solubilidad de 60% del plomo, el resto precipita como anglesita (Zárate, 2010).

Una desventaja de la lixiviación con ácido nítrico es la oxidación de los sulfuros a azufre elemental y a sulfato, resultando en un aumento en el consumo de reactivo y la necesidad de separar el sulfato, incrementando el costo del tratamiento y regeneración de la solución (Pashkov, Mikhlina, Kholmogorov , & Mikhlin, 2002).

### **d. Lixiviación de plomo con hidróxido de sodio**

Para estudiar la lixiviación con hidróxido de sodio, (Villar, 2009) utilizó concentrado sulfurado de plomo-zinc. Analizó el efecto de la concentración de NaOH, agitación, granulometría, temperatura y dilución de pulpa. Encontró más recuperación a mayor concentración de NaOH, a una agitación intermedia de 800 rpm; a la menor granulometría de -100 #, a mayor dilución de pulpa, a menor temperatura, por la naturaleza de la reacción.

Las reacciones que describen este proceso son:



Con base en los resultados se corrobora que la lixiviación de Pb con hidróxido de sodio es posible y se pueden obtener recuperaciones hasta de 98% cuidando los parámetros de operación del proceso.

#### **e. Lixiviación de plomo con ácidos orgánicos**

La lixiviación con ácidos orgánicos adquiere cada día mayor atención por su posible menor impacto al ambiente, en recientes fechas se han realizado estudios sobre estas alternativas para la obtención del plomo, ya que la ruta clásica produce considerables contaminantes.

Con los ácidos orgánicos podrían formarse residuos menos agresivos.

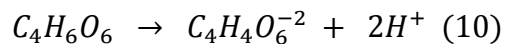
A continuación, se mencionan ejemplos de estudios a nivel laboratorio sobre la lixiviación de plomo con ácidos orgánicos.

#### **f. Lixiviación con ácido tartárico**

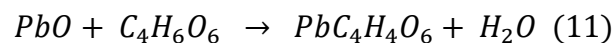
Penso (2009) realizó un estudio con el que pretendía lixiviar ZnO y PbO desde polvo sintético de acería, empleando disoluciones de ácido tartárico con concentraciones típicas de los productos de la fermentación de carbohidratos.

En lo que respecta al plomo, considera la posibilidad de generar tartrato de plomo a partir del contacto del ácido tartárico con el óxido de plomo.

En primer lugar, se tiene la disociación del ácido tartárico dada por:



Luego la asociación del plomo por el lixiviante viene dada por:



En la primera parte estudió por separado la lixiviación de los óxidos, variando la concentración del ácido y la temperatura de lixiviación.

Con la concentración de ácido 4 g/l se logró lixiviar 85% de ZnO en 4 horas y sólo 9.8% de PbO a la hora, por la insolubilidad de compuestos insolubles de plomo.

En la segunda etapa se estudió la lixiviación de la mezcla de óxidos, con 2 g/l de ácido tartárico y de temperatura 25 °C se obtuvo una máxima lixiviación para el plomo de 42.75 % y 47 % para zinc, durante la primera media hora, después los porcentajes disminuyeron gradualmente.

**g. Lixiviación con ácido Etilendiaminotetra acético (EDTA)**

Se han utilizado soluciones de EDTA (ácido etilendiamintetra acético) para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, debido a la alta afinidad de este complejante por gran número de metales.

Es uno de los más usados en el caso del plomo en suelos, debido a que se forman complejos altamente estables ( $\log K=19.8$  para 21 la especie  $Pb_2 + EDTA^{-2}$ ), no obstante, lo anterior, uno de los inconvenientes de su uso es la baja selectividad, esta elevada estabilidad hace que la separación del plomo a partir de las soluciones lixiviantes sea difícil y costosa. (Park, Jung, Díaz, & Yoo, 2013)

**h. Lixiviación con ácido cítrico**

Alvarado, Alonso, & Lapidus (2012) realizaron un estudio para utilizar ácido cítrico como agente para extraer plomo de desechos del análisis de oro y plata por vía seca,

con base en experimentos de laboratorio, variaron las condiciones lixiviantes, las pruebas fueron a temperatura de 25 °C y presión atmosférica.

Se lixiviaron los crisoles y escorias de copelación entre -80 y +100 mallas Tyler, para disolver el plomo como citrato, las soluciones utilizadas fueron de ácido cítrico a diferentes valores de pH.

Las pruebas se realizaron poniendo en contacto 20 g de sólido (copela o escoria) con 200 ml de solución y agitando magnéticamente. Para ello, se tomaron muestras a tiempos regulares durante 6 horas.

En la primera hora se logró lixiviar 85% de plomo desde las escorias y 98% desde las copelas a pH de 4.

#### **i. Lixiviación con ácido acético**

La prueba para conocer el contenido de plomo presente en alfarería, cerámica y porcelana vidriadas, aparece en normas técnicas oficiales de cada país, artículos de alfarería vidriada, cerámica vidriada y porcelana.

Límites de plomo y cadmio solubles. Método de ensayo.” es un antecedente de la lixiviación con ácido acético, la norma señala el método de ensaye para extraer plomo y cadmio por lixiviación con ácido acético al 4%, se cuantifican por espectrofotometría de absorción atómica (AA) con

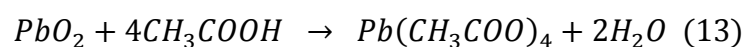
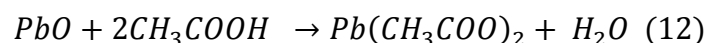
lámparas de cátodo hueco o de descarga sin electrodos o por Plasma Inductivamente Acoplado (ICP).

Además (Márquez & Ruíz, 2003) trabajaron con desechos que contienen plomo, derivados del proceso de ensaye al fuego empleado para el análisis de oro y plata, para separarlo de los residuos.

Se determinó la ley de plomo 39,6% (cabezas), 90% de éste se encuentra en la copela, el resto en el crisol y la escoria.

La máxima extracción del plomo con el ácido fue de 86% en el caso de las copelas y de 81% para los crisoles en 48 horas de agitación a 30 rpm, granulometría a -14 mallas Tyler, dilución de pulpa de 25% de sólidos, pH 1.4 y temperatura ambiente.

Cabe mencionar que el ácido acético tiene afinidad hacia el plomo, pero cuando éste se encuentra en forma de sulfuro se debe oxidar previo a la lixiviación para que se forme acetato de plomo soluble, como se observa en las siguientes reacciones:



Lo anterior da pie a la posibilidad de utilizar el ácido acético como agente lixivante para minerales o concentrados de plomo, con las ventajas económico-técnico operativas.

### **2.2.3. Cementación con chatarra de aluminio**

Materia prima destinada a la venta o a la industria, constituida principalmente por aluminio y/o aleaciones de aluminio, se llama chatarra a los residuos o trozos de perfiles, tubos, pistones, cables, latas, etc.

- "Aluminium": Elemento químico de la tabla periódica.
- Símbolo: Al
- Aleaciones comunes: con cobre, silicio, cinc, magnesio... etc.
- Aleaciones especiales: con níquel, cobalto, plata, litio, vanadio, circonio, plomo, estaño, cadmio... etc.

### **Subproductos**

- Perfil lacado
- Perfil anodizado 1 natural
- Perfil obra o demolición
- Recorte de chapa anodizado
- Recorte de chapa lacado
- Viruta de aluminio
- Offset o imprenta
- Radiador

- Cárter
- Persiana

La utilización industrial del aluminio ha hecho de este metal uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos, siendo hoy un material polivalente que se aplica en ámbitos económicos muy diversos y que resulta estratégico en situaciones de conflicto. Actualmente, tan sólo superado por el hierro o el acero.

El aluminio se usa en forma pura, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos. En estado puro se aprovechan sus propiedades ópticas para fabricar espejos domésticos e industriales, como pueden ser los de los telescopios reflectores.

Su uso más popular, sin embargo, es como papel aluminio, que consiste en láminas de material con un espesor tan pequeño que resulta fácilmente maleable y apto por tanto para embalaje alimentario. También se usa en la fabricación de latas y tetrabriks.

Por sus propiedades eléctricas es un buen conductor, capaz de competir en coste y prestaciones con el cobre tradicional. Dado que, a igual longitud y masa, el conductor de aluminio tiene más conductividad, resulta un componente útil para utilidades donde el exceso de peso es importante. Es el



caso de la aeronáutica y de los tendidos eléctricos donde el menor peso implica en un caso menos gasto de combustible y mayor autonomía, y en el otro la posibilidad de separar las torres de alta tensión.

Además de eso, aleado con otros metales, se utiliza para la creación de estructuras portantes en la arquitectura y para fabricar piezas industriales de todo tipo de vehículos y calderería.

También está presente en enseres domésticos tales como utensilios de cocina y herramientas. Se utiliza asimismo en la soldadura aluminotérmica y como combustible químico y explosivo por su alta reactividad.

El precio del aluminio por kilo varía dependiendo del tipo de aluminio que se recicle. La composición de elementos en la chatarra es la siguiente

**Tabla 1:** Aleaciones de chatarra de aluminio

%	Sí	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cr	Al
Max	0.8	0.7	3.5	1	0.5	1.5	0.1	90.6

Fuente: Fundición de aluminio y u bronces

- **Cementación**

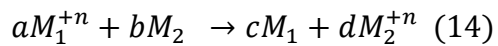
La cementación de un metal a partir de una solución, depende de una reacción de desplazamiento.

Para seleccionar el metal M1 se utiliza la serie electromotriz, en la cual el metal más activo M2 reduce los iones

del metal por precipitar al estado metálico; este último sale de la solución, al ser reemplazado por los iones del metal más activo que al encontrarse en su forma elemental, ya no es soluble y precipita, mientras que el metal más activo al encontrarse como un ion queda en la fase acuosa.

El metal utilizado como cementante debe presentar un potencial de electrodo en la serie electromotriz inferior al del potencial del metal que se desea precipitar.

De manera general, la reacción de cementación es la siguiente:



La reacción se produce en la superficie del metal cementante, que comúnmente se agrega en forma de polvo a la solución cargada con el metal de interés. Para alcanzar velocidades de cementación aceptables de metales a baja concentración en solución impura se utiliza cementante en exceso; lo cual produce cementos impuros.

Además, estos precipitados contienen metales, más nobles que el cementante, lo cual obliga a que se tengan que purificar las soluciones antes de la reducción.

También la cementación es apropiada para purificar soluciones, cargadas con metales de interés; el metal más conveniente para cementar las impurezas de una solución

regularmente es el mismo que se desea recuperar a partir de esta; así no se añade otra impureza extra a la solución.

Ejemplo, se puede mencionar el desplazamiento de Cd y Cu, presentes en soluciones de lixiviación de concentrados tostados de Zn con  $H_2SO_4$ , los cuales se cementan con polvo de Zn. la cementación puede aplicarse a soluciones acidas como en la cementación de Cu con Fe, ampliamente usada, a soluciones básicas como la cementación de Ni-Cu por  $H_2$ , o la cementación de Au-Ag por Zn desde soluciones de cianuro alcalinas; también es posible la cementación en medio neutro de Cu con Fe o Zn.

**Tabla 2:** Serie electromotriz de metales

Serie electromotriz	
Elemento	E°V
Al	-1.66
Pb	-0.13
Fe	-0.44
Zn	-0.76
Cu	0.34
Ag	0.79
Au	1.43

Fuente: Wikipedia

La precipitación de metales a partir de una solución acuosa de sus sales por otro metal se realiza debido a que el metal precipitado cementa sobre el metal añadido, el proceso se puede predecir en función de los potenciales de electrodo, el metal con el potencial de oxidación más positiva, pasara a la

solución y desplazara a un metal con un potencial menos positivo.

Los interferentes que puede tener la cementación son algunos factores que presentan problemas para que la cementación se realice de forma adecuada bajando su rendimiento, como:

- La presencia de oxígeno ( $O_2$ ) ya que su potencial de reducción es +1,2 V, superior al de la mayoría de metales y debe ser eliminado en lo posible de la solución.
- Los iones  $H^+$  pueden reducirse y formar  $H_2$ , (excepto en el caso del Au y Ag, en el resto de metales es una interferencia real). Para prevenir este fenómeno lo que se hace es disminuir la concentración de protones, es decir, aumentar el pH, aunque ello conduce a formación de hidróxidos y con ello a la disminución de la velocidad de reducción.
- Las reacciones de pasivación, habituales en el aluminio, a pesar de tener muy altas diferencias de potencial con muchos metales, su oxidación conduce a la formación de una capa de alúmina (óxido de aluminio) en su superficie impidiendo el progreso de la reacción de oxidación.

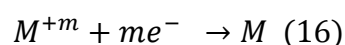
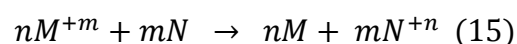
#### **2.2.4. Físicoquímica de la cementación**

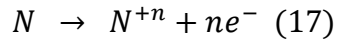
Se entiende el proceso de cementación como una serie de etapas, comenzando con la transferencia de los iones que se van a reducir a través de la disolución hasta la interface superficie

catódica/disolución, seguida por una transferencia a través de la capa de Helmholtz, de los iones metálicos seguida por la reducción catódica y la incorporación de los átomos metálicos en la red, simultáneamente la reacción anódica del cementante con transferencia a la disolución de iones, previo paso a través de la doble capa de Helmholtz, y por último también de forma simultánea el paso continuo de electrones desde las zonas anódicas a las zonas catódicas, continuando con el transporte de los iones metálicos formados a partir del precipitante, por los poros del metal precipitado y hasta la interface deposito/disolución y finalizado con el transporte de los iones metálicos formados por oxidación del cementante, desde la interface deposito/disolución hasta el seno de la disolución.

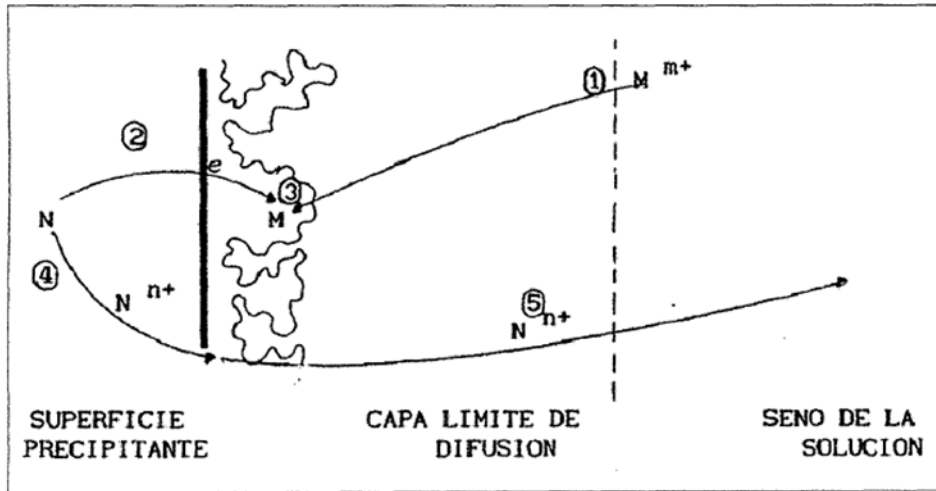
### 2.2.5. Termodinámica de la cementación

La cementación es un proceso mediante el cual un metal es precipitado a partir de una solución conteniendo sus sales por otro más electropositivo, el proceso se puede representar como una reacción de desplazamiento que consta de dos semi reacciones fundamentales, una reacción catódica y una reacción anódica donde la especie metálica  $M^{m+}$  puede ser un catión simple, un complejo o un anión y N es una especie en su estado metálico.





**Gráfico 2:** Proceso de cementación



Fuente: Hidrometalurgia; (Habashi, 2004)

Las etapas descritas en el gráfico son:

1. De los iones del metal depositante ( $M^{m+}$ ) hacia la interface deposito-solución desde el seno de la solución.
2. Transferencia de electrones del metal (N) al ion  $M^{m+}$  difundiendo a través del depósito.
3. Incorporación de los átomos del metal (M) en una red cristalina.
4. transferencia de  $N^{n+}$  iones a la vecindad de la interface deposito-solución a través de la capa depositada.
5. Difusión de N iones hacia el seno de la solución.

Se engloban múltiples reacciones simultaneas que tienen lugar sobre el sólido, produciendo micropilas electrolíticas cortocircuitadas resultando que N se disuelve anódicamente y el

ion metálico M se descarga catódicamente por lo tanto se trata de una reacción electroquímica.

La elección del metal cementante con respecto al metal en disolución está marcada por su posición en la serie electromotriz de tensiones, los metales que se encuentran en posiciones superiores en la serie son más activos y pueden desplazar (reducir) a los metales menos activos o más nobles, estos se encuentran en las partes bajas de la serie. Cuanto más grande sea la diferencia de potencial entre los pares electroquímicos mayor será la fuerza impulsora que se produzca en la reacción de precipitación.

#### **2.2.6. Cinética de la cementación**

Después de una inmersión del metal precipitante en la disolución, se desarrollan pequeñas diferencias de potencial a lo largo de la superficie. Las áreas de potencial negativo son las anódicas cuya tendencia es a disolverse mientras que el resto de la superficie del sólido se comporta catódicamente.

Para una reducción eficaz del metal a cementar, el sobre voltaje del reductor debe ser lo suficientemente grande como para producir un cambio en el potencial hacia valores más negativos que el de deposición del metal correspondiente, en algunos casos un aumento de pH es muy útil, aunque se corra el riesgo de producir hidrólisis del metal en disolución, con disminución de la velocidad en la cementación.

La velocidad de reducción metálica es baja en los primeros momentos de la cementación, pero una vez que al pasar el tiempo en el proceso de cementación las áreas catódicas aumentan por la acumulación del metal cementado y como resultado de la velocidad de precipitación aumenta, dicho aumento está asociado a un incremento en la rugosidad de la superficie de reacción debido al metal depositado.

La velocidad global del proceso de cementación está controlada por la etapa más lenta, aunque en ciertos casos puede haber dos etapas involucradas. En la mayoría de los sistemas de cementación (y en la mayoría de condiciones) la cinética de la reacción está controlada por la transferencia de masa (transferencia de los iones que se van a reducir a través de la disolución hasta la interface, superficie catódica/disolución), lo que ocurre por un gradiente de concentración, migración eléctrica debida a una diferencia de potencial, convección debido a diferentes densidades en el líquido.

Cuando una reacción es controlada por la transferencia de masa, un incremento en la agitación del reactor deriva en un incremento de la velocidad de reacción, no así para las reacciones controladas químicamente (Peters, 1973).

### **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

- Lixiviación: Proceso metalúrgico que consiste en disolver el mineral a recuperar por reactivo químico.



- Merrill Crowe: Proceso desarrollado por Crowe, que permite extraer el metal disuelto en la solución por intercambio iónico con otro metal (Zn).
- Lodos anódicos: Remanente de los procesos de electro refinación del cobre y plomo, de los cuales se recupera oro y plata.
- Cementación: Proceso que permite el intercambio de iones presentes en la solución, con las partículas alimentadas; debido a la diferencia de potencial.

## **2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Si desarrollamos pruebas experimentales de lixiviación básica y cementación entonces será posible recuperar plomo de minerales oxidados en Colpa – Tarma – 2019.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- Si determinamos las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo entonces será posible disolver con NaOH en Colpa – Tarma – 2019.
- Si determinamos los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo entonces será posible obtener los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019.

- Si determinamos las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo entonces será posible optimizar el proceso en Colpa – Tarma – 2019.

## **2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **2.5.1. Variable dependiente**

% de recuperación de plomo

### **2.5.2. Variables independientes**

- Evaluación Hidrometalurgica

### **2.5.3. Variables interdependientes u operativas**

- PH
- % NaOH
- Tiempo de lixiviación
- RPM agitación
- Granulometria del mineral
- Ratio del mineral

## 2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

**Tabla 3:** Variables e indicadores

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
<b>Dependiente:</b> Recuperación de plomo	Resultado de enriquecer el contenido de plomo a través del proceso de lixiviación - cementación	Proceso por el cual una mena extraído de la mina es concentrado para obtener elementos con mayores leyes químicas en su composición	Volumen de concentrados	TM
			Elementos valiosos existentes en el cemento de Pb	%
<b>Independiente:</b> <b>Evaluación hidrometalúrgica de masicotita</b>	Diagnóstico a los minerales de Pb extraídos de mina, para determinar su disolución por lixiviación.	Diversas etapas de lixiviación – cementación para recuperar plomo	Análisis químico	% de cada elemento
			Análisis macroscópico del mineral	Composición mineralógica
			Lixiviación - cementación	% de recuperación Pb

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

“El tipo de investigación del presente estudio es Explicativo “La investigación explicativa” se realiza con el objetivo de ayudar a los investigadores a estudiar el problema con mayor profundidad y entender el fenómeno de forma eficiente. La investigación explicativa no solo describe el problema o fenómeno, sino que busca explicar las causas que originaron la situación analizada, es la interpretación de una realidad o la explicación del por qué y para que, del objeto de estudio, estableciendo conclusiones y explicaciones para enriquecer o esclarecer las teorías, confirmando o no la investigación inicial” (Mario Tamayo – 2012).

### **3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

En el presente trabajo de investigación el método utilizado es el **Científico**, El método científico como tal es en sí un procedimiento encaminado a un objetivo, el intentar lograrlo lleva implícita una dinámica que para el caso del método científico se inicia con la fase de la observación, donde el sujeto conocedor (científico) entra en contacto con el fenómeno, y sabe de algo, algo que induce a continuar buscando; en un segundo gran momento, supone de ese fenómeno cierto nivel de verdad, esto es, en segunda fase, o fase del Planteamiento de la hipótesis, que fundamentada en conocimientos previos y en los datos por recoger, podría ser demostrada; por ultimo tenemos la fase de comprobación, la cual depende del grado de generalidad y sistematicidad de la hipótesis. Las evidencias que comprueban o desaprueban son igualmente estimables (Ramon Ruiz – 2007).

### **3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

“Diseño de investigación se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio. Esta consiste en señalar con toda claridad y precisión el rumbo y la meta. Así que precisar el campo al que pertenece el problema sería en principio el primer paso: determinar con todas sus características el problema a resolver; sería el segundo paso; fijar el objetivo que se busca alcanzar, o mejor dicho establecer cual será el fin que se pretende alcanzar con la investigación; para esto se deberán definir los procedimientos, esto es, la metodología y todo tipo de

requerimientos que permitirán obtener la información mediante los procesos si ese fuera el caso”. (Ramon Ruiz – 2007). En la presente investigación es experimental.

### **3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.4.1. Población**

Según (Tamayo – 1997) “la población se define conjunto de todas las cosas que concuerdan con una serie determinada de especificaciones a estudiar donde las unidades de la población poseen características comunes la cual se estudia y da origen a los datos de investigación”.

La población está representada por el mineral que se extrae de los 2 frentes o niveles en actividad, con contenidos de masicotita.

#### **3.4.2. Muestra**

Para determinar la muestra representativa se procedió a realizar el muestreo aleatorio simple, donde cada muestra tiene una probabilidad de inclusión igual y conocida de  $n/N$  y que representa la producción de cada frente; cabe recalcar que los trabajos de explotación minera se realiza por campañas de 30 días, con una producción media de 450 toneladas de mineral extraído y luego después de acopiar en cancha de almacenamiento por el método de redes se obtuvo una muestra

representativa de 50 kilos para realizar las pruebas experimentales.

### **3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para la recolección de datos se realizó las siguientes actividades:

Fase I: Identificación de las características físicas de las muestras representativas del mineral y son:

- Calculo del peso específico.
- Dureza del mineral.
- Molienda
- Análisis de mallas.
- Caracterización de la liberación mineral.
- Análisis cuantitativo.
- Evaluación microscópica del mineral.

Fase II: Pruebas de lixiviación del siguiente modo:

- A diferentes granulometrías.
- A diferentes densidades de pulpa.
- A diferentes concentraciones de NaOH.
- A diferentes velocidades de agitación.

Fase III: Pruebas de cementación.

- Con adición de aluminio en granallas.

Para el acopio de información se desarrolló las siguientes técnicas e instrumentos siguientes:

**Tabla 4:** Tabla de técnicas e instrumentos

N°	Actividad	Técnica	Instrumentos
1	Recolección de muestra	Cono y cuarteado	Palas, envases
2	Cálculo del peso específico	Método del picnómetro	Picnómetro Balanza
3	Cálculo de la dureza del mineral	Reconocimiento experimental	Escala de campo
4	Liberación del mineral	Molienda	Molino de bolas Balanza Balde
5	Reconocimiento mineralógico	Análisis microscópico	Microscopio de opacos Briquetas
6	Análisis cuantitativo	Análisis químico	Equipo de absorción atómica
7	Disolución de plomo	Lixiviación básica	Celda de lixiviación Reactivos diversos Cronómetro Accesorios
8	Cementación	Intercambio iónico	Vaso de precipitados Agitador neumático

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

- **Recolección de muestra**

Para la recolección de la muestra representativa, se obtuvo bajo el sistema de cono y cuarteado.

- **Cálculo del peso específico del mineral**

Para determinar el peso específico promedio de la muestra representativa se empleó la siguiente ecuación:



$$G = \frac{M - P}{W + (M - P) - S} \quad (18)$$

Donde:

$M - P$  = Peso de muestra

$W$  = Picnómetro + agua contenida

$S$  = Muestra + picnómetro + agua no desplazada

$W + (M - P) - S$  = Peso del agua desplazada por la muestra.

- **Cálculo de la dureza del mineral**

Utilizando la escala de campo, se determinó experimentalmente la dureza del mineral.

- **Liberación del mineral**

Para determinar el grado de liberación del mineral se procedió a moler por 20 minutos la muestra representativa, obteniéndose una muestra representativa que debe luego fue tamizado.

- **Análisis cuantitativo**

Para llevar a cabo el análisis químico, se seleccionó los elementos más representativos y son cobre, plomo, zinc, hierro, sílice y plata de cinco muestras representativas del mineral compósito, por vía clásica, encargado a terceros.

- **Reconocimiento mineralógico**

Para el análisis al microscopio petrográfico se preparó briquetas con las técnicas convencionales.

- **Lixiviación de masicotita**

- ✓ Reactivos

- NaOH: 4, 6 y 8 mol/l

- ✓ Pruebas experimentales

- A diferentes granulometrías (mallas: -25, -50 y -100 de la serie Tyler).
- A diferentes densidades de pulpa (Relación mineral: solución: 1:5; 1:4; 1:6)
- A diferentes concentraciones de NaOH (4, 6, 8 Mol/l)
- A diferentes velocidades de agitación (400, 800, 1200 rpm).

- **Cementación**

A la solución enriquecida se añadió 1,2 g de granallas de aluminio, se dejó cementar por 24 horas para luego lavar con agua, filtrar y secar a 40°C y por diferencia de pesadas se determina el contenido de plomo.

### **3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO**

El tratamiento estadístico de los datos se desarrolló con la asistencia del software *SPSS 22*.

### **3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN**

- ✓ **Selección de instrumentos de investigación**

La selección de los instrumentos de investigación se realizó desarrollando los procesos convencionales para cada etapa y con las técnicas aprendidas en los claustros universitarios.

- ✓ **Validación**

La validación de la investigación, estarán dadas por el análisis químico y la caracterización del mineral correcta que se otorga a cada muestra a experimentar.

✓ **Confiabilidad.**

La confiabilidad de los resultados, se basa en la experiencia del personal del laboratorio químico al cual se confió los ensayos y a la correcta toma de muestras, realizadas con el mayor cuidado posible por todos los que realizamos este trabajo.

### **3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA**

La aprobación o la desaprobación se basa en la aceptabilidad ética de la investigación, incluyendo su valor tecnológico y su validez científica, un índice aceptable de beneficios potenciales frente a los riesgos de daño, la minimización de los riesgos, los procedimientos adecuados de consentimiento informado (incluyendo la adecuación cultural y los mecanismos para garantizar la voluntariedad), los procedimientos justos para la selección de las variables, y la consideración de la repercusión de la investigación sobre la empresa de donde procede el mineral, tanto durante la investigación como después de que esta finalice. La revisión tiene en cuenta la revisión científica previa y las leyes aplicables.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO**

Los trabajos de campo realizados se abocó a la toma de muestras diariamente del mineral extraído de mina y luego después de sucesivas etapas de reducción de la muestra a través del método de cono y cuarteado, se fue obteniendo la muestra representativa que permitió, desarrollar las pruebas experimentales.

#### **4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

- **Recolección de muestra**

Para la recolección de la muestra representativa, se obtuvo una muestra de 5 kilos por día de extracción de mina, bajo el sistema de

cono y cuarteado; en forma similar se realizó para obtener la muestra compósito de toda la campaña, obteniéndose 50 kilos con los cuales se realizó las pruebas experimentales siguientes.

- **Cálculo del peso específico del mineral**

Utilizando el método del picnómetro, se determinó el peso específico del mineral, de diez muestras y se procedió a obtener el promedio representativo.

**Tabla 5:** Peso específico medio del mineral

Muestra	Peso específico
	(gr/cm <sup>3</sup> )
1	5,40
2	5,85
3	6,20
4	5,73
5	5,50
6	5,48
7	5,87
8	5,67
9	5,90
10	5,30
Sumatoria	56,90
Promedio	5,69

*Fuente:* Elaboración propia.

- **Cálculo de la dureza del mineral**

Utilizando la escala de campo, el mineral logró rayarse con un clavo de acero que otorga una dureza de 3,2.

- **Liberación del mineral**

Para determinar el grado de liberación del mineral se procedió a moler por 20 minutos la muestra representativa, obteniéndose el siguiente resultado:

**Tabla 6:** Análisis de mallas del compuesto

Malla Tyler	Abertura (mm)	Mineral Retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Mineral Retenido	% Mineral que pasa
4	4,76	0	0	0	99,98
6	3,36	1,5	1,5	1,49	98,49
10	1,68	2	3,5	1,97	96,52
20	0,841	5	8,5	4,92	91,60
28	0,595	6	14,5	5,91	85,69
35	0,420	11	25,5	10,83	74,86
48	0,297	8	33,5	7,88	66,98
65	0,210	12	45,5	11,82	55,16
100	0,149	17	62,5	16,74	38,42
200	0,074	27	89,5	26,60	11,82
-200		12	101,5	11,82	0
TOTAL		101,5		99,98	

Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis cuantitativo**

Para llevar a cabo el análisis por elementos del mineral compósito se procedió a evaluar cinco muestras representativas con el siguiente resultado:

**Tabla 7:** Análisis químico promedio

<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>S</b>	<b>Fe</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>
<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28,85	1,07	18,3	2,3	22,2	27,28

*Fuente: Quimic Lab.*

- **Caracterización mineralógica**

- ✓ A nivel macroscópico

**Ilustración 1:** Masicotita



*Fuente: Laboratorio de Petrominerografía - UNDAC*

Se observa **masicotita** con las siguientes características:

Fórmula: PbO

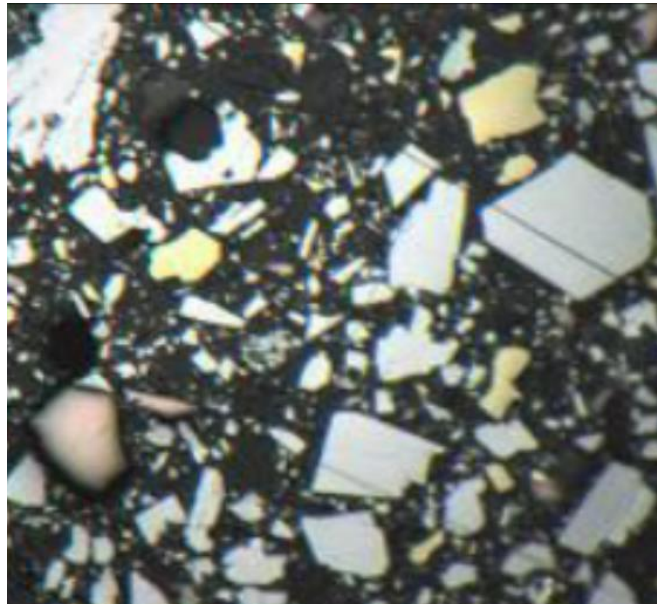
Color: Amarillo azufre

Brillo: Craso, terroso

Hábito: Entre terroso y masivo.

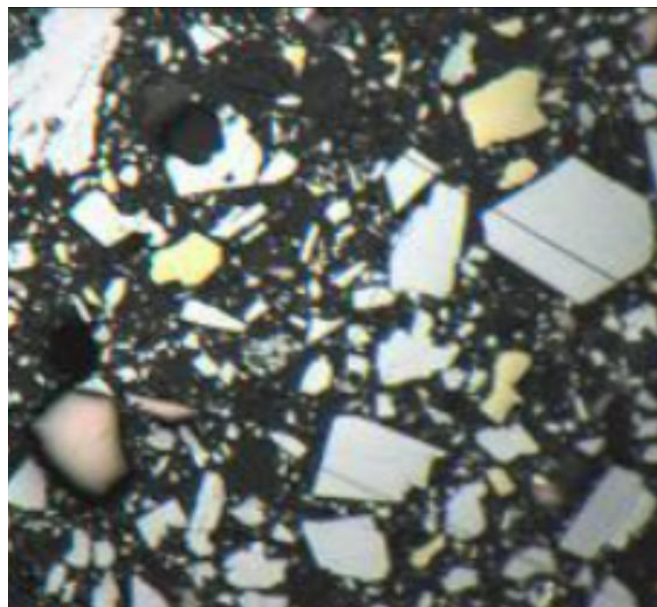
✓ A nivel microscópico

**Ilustración 2:** Galena a 50 micrones



*Fuente:* Laboratorio de Petrominerografía - UNDAC

**Ilustración 3:** Galena a 600 micrones



*Fuente:* Laboratorio de Petrominerografía - UNDAC



- **Pruebas de lixiviación**

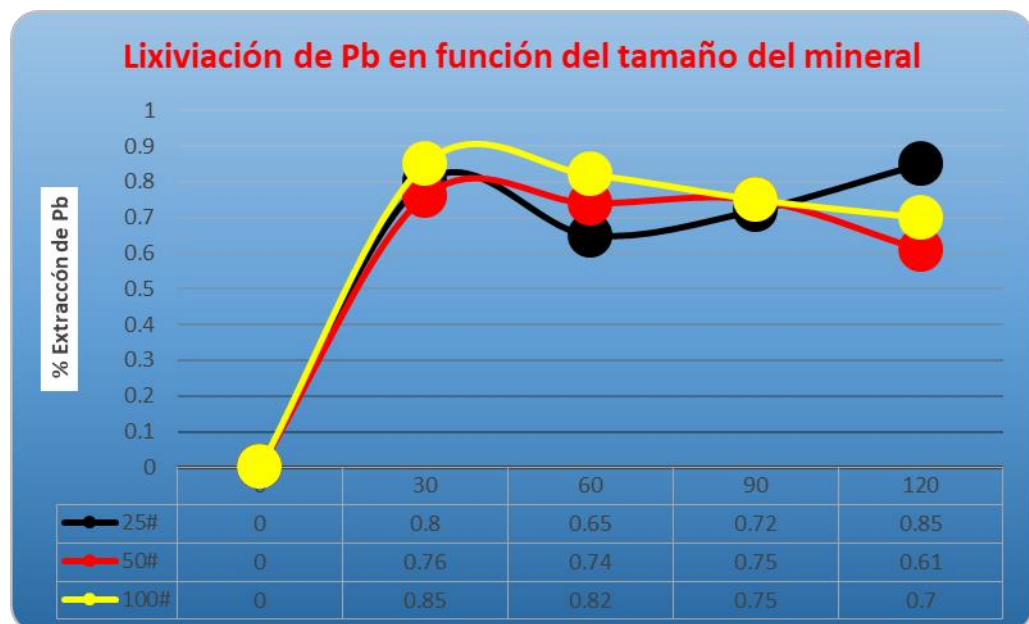
Se desarrolló las siguientes pruebas:

- Análisis de lixiviación de Pb en función de la granulometría.

Las condiciones fueron:

- ✓ Solución de NaOH a 4 mol.
- ✓ Mineral a: -25#, -50#,-100#
- ✓ Ratio mineral: solución; 1:5 (200gr:1000ml)
- ✓ Velocidad de agitación: 400 rpm
- ✓ pH: 13

**Gráfico 3:** Lixiviación de Pb en función a la granulometría



Fuente: Elaboración propia

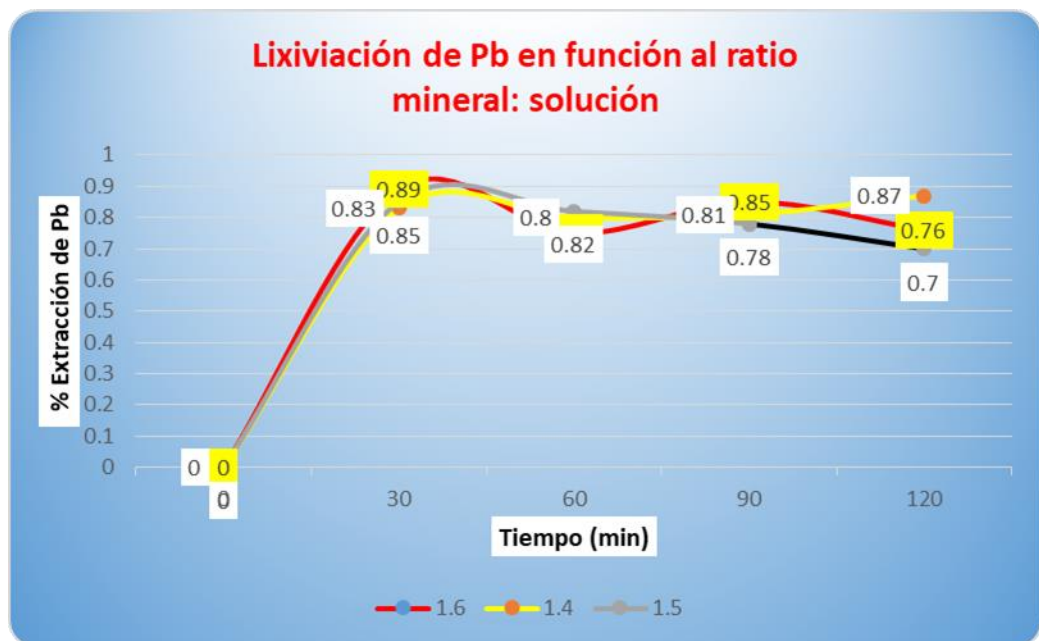
Comentario: El tamaño de partícula influye en la recuperación de Pb, a mayor tamaño la recuperación es ligeramente menor, por la falta de liberación del PbS, la recuperación supera el 70%.

- Análisis de lixiviación de Pb en función de la densidad de pulpa.

Las condiciones fueron:

- ✓ Solución de NaOH a 4 mol.
- ✓ Mineral a – 100#
- ✓ Velocidad de agitación: 400 rpm
- ✓ pH: 13
- ✓ Ratio del mineral: solución 1:5 (200gr:100ml), 1:4 (200gr:80ml), 1:6 (20gr:1200ml)

**Gráfico 4:** Lixiviación de Pb en función a la densidad de pulpa



Fuente: Elaboración propia

o

: la lixiviación de Pb, no presenta diferencia significativa de diferentes proporciones del mineral: solución; la galena por su peso específico desarrolla un mejor contacto con la solución, en cambio los óxidos de plomo, se mantiene en suspensión y son más solubles.

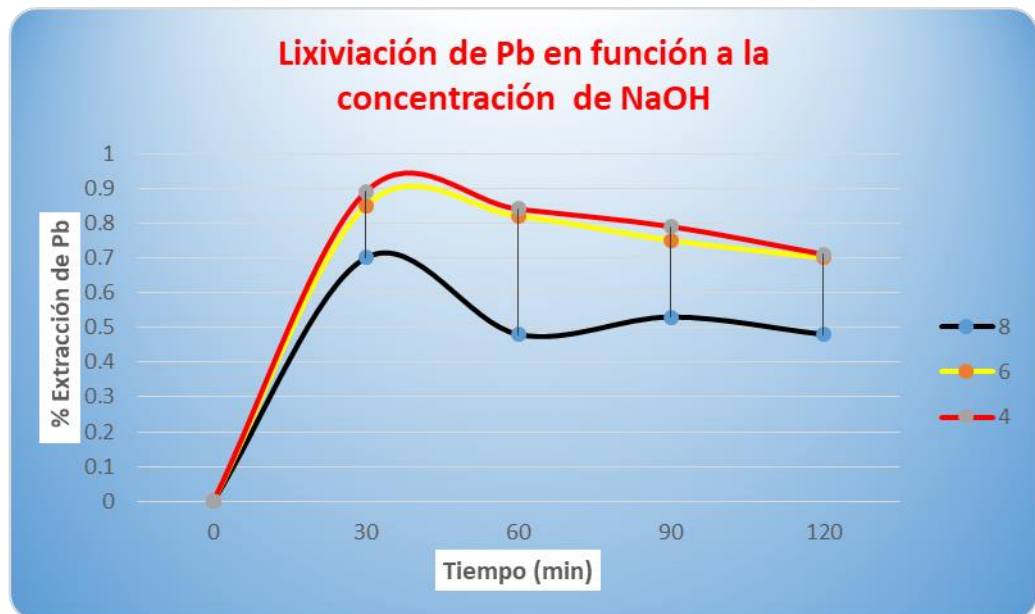
- Análisis de lixiviación de Pb en función a la concentración de NaOH.

Las condiciones fueron:

- ✓ Solución de NaOH a 4, 6 y 8 mol.
- ✓ Mineral a – 100#
- ✓ Ratio mineral: solución; 1:5 (200gr:1000ml)
- ✓ Velocidad de agitación: 400 rpm
- ✓ pH: 13

**Gráfico 5:** Lixiviación de Pb en función a la concentración de NaOH

IC



IC  
Fuente: Elaboración propia

:

En el gráfico se observa que, a mayor concentración de la solución, el Pb se vuelve a precipitar, disminuyendo la recuperación, una proporción adecuada de solución es a 4 moles de NaOH.

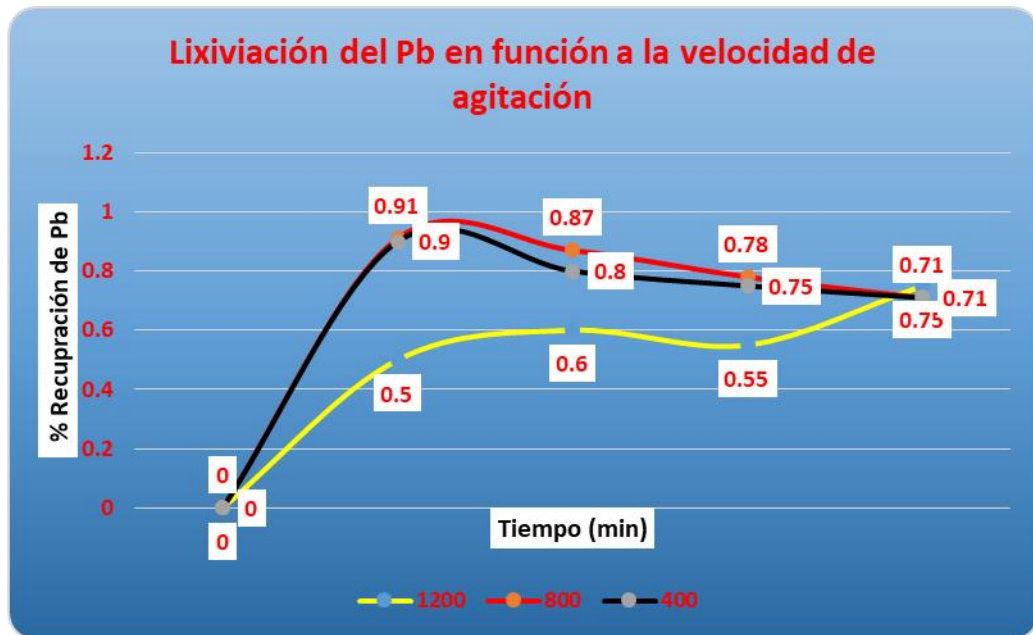
- Análisis de lixiviación de Pb en función de la velocidad de agitación.

Las condiciones fueron:

- ✓ Solución de NaOH a 4 mol.
- ✓ Mineral a – 100#

- ✓ Ratio mineral: solución; 1:5 (200gr:1000ml)
- ✓ Velocidad de agitación: 400, 800 y 1200 rpm
- ✓ pH: 13

**Gráfico 6:** Lixiviación de Pb en función a la velocidad de agitación



Fuente: Elaboración propia

o: En el gráfico se observa el comportamiento de la lixiviación de Pb al variar la velocidad de agitación de 400 a 800 rpm, no se presentan diferencias en la recuperación, pero al incrementarse a 1200 rpm, disminuye notablemente la recuperación de Pb, debido a que la solución se satura y puede haber una inversión en la reacción de lixiviación.

- **Pruebas de cementación**

Las condiciones fueron:

- ✓ Granallas de Al: 1,2 g.

- ✓ Filtración de la solución previa
- ✓ Tiempo de cementación: 120 minutos
- ✓ Lavado con agua para separar el Pb precipitado de las granallas
- ✓ Secado a 40°C del precipitado.

**Tabla 8:** Recuperaciones de las pruebas de cementación con aluminio

Tiempo (Min)	Concentración NaOH		Aluminio		Concentración Pb	
	4 M	8 M	1,2 g		0,47 g/20 ml	
30	65	56	57%	32%	69%	50%
60	79	64	62%	36%	76%	75%
90	85	78	65%	64%	63%	61%
120	92	82	65%	67%	92%	94%

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

#### 4.3.1. Primera hipótesis específica

La primera hipótesis indica que: Si determinamos las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo entonces será posible disolver con NaOH en Colpa – Tarma – 2019.

- a. Formular la hipótesis de investigación

H<sub>0</sub>: Determinar las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo no influye en la disolución con NaOH en Colpa – Tarma - 2019. **(Hipótesis nula)**

H<sub>a</sub>: Determinar las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo si influye en la disolución con NaOH en Colpa – Tarma - 2019. **(Hipótesis alterna)**

- ii. Fijar el nivel de significación ( $\alpha$ ):  $\alpha = 0,05$
- iii. Estadístico de prueba: Z de Wilcoxon y significancia p – valor  $<0,05$
- iv. Decisión:

**Tabla 9:** Prueba de la primera hipótesis específica

	<b>Determinar las condiciones óptimas de lixiviación y cementación de plomo</b>
Z	- 2,100
Sig. Asintótica (bilateral)	0,038

Fuente: Elaboración propia.

v. Conclusión

Con un nivel de significancia del 0,05, hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y afirmar que determinar las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo influye en la disolución con NaOH.

**4.3.2. Segunda hipótesis específica**

La segunda hipótesis indica: determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo entonces

será posible obtener los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019.

1. Formular la hipótesis de investigación

H<sub>0</sub>: Determinando los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo no influye en la obtención de los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019. **(Hipótesis nula)**

H<sub>a</sub>: Determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo si influye en la obtención de los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019. **(Hipótesis alterna)**

2. Fijar el nivel de significación ( $\alpha$ ):  $\alpha = 0,05$

3. Estadístico de prueba: Z de Wilcoxon y significancia p – valor  $<0,05$

4. Decisión:

**Tabla 10:** Prueba de la segunda hipótesis específica

	Determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo
Z	- 2,225
Sig. Asintótica (bilateral)	0,028

Fuente: Elaboración propia

5. Conclusión

Con un nivel de significancia del 0,05, hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y

afirmar que Determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo si influye en la obtención de los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019, toda vez que el estadístico Z de Wilcoxon es -2,225.

#### **4.3.3. Hipótesis general**

La hipótesis general señala que: Si desarrollamos pruebas experimentales de lixiviación básica y cementación entonces será posible recuperar plomo de minerales oxidados en Colpa – Tarma – 2019.

Basado en los resultados de las hipótesis específicas es posible validar que el diagnóstico al mineral de plomo contribuye a demostrar el porcentaje de disolución de mineral y la cementación posterior.

#### **4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

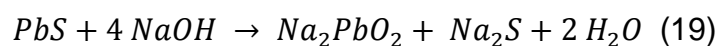
A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede observar que a los primeros 30 minutos de lixiviación, la disolución del plomo supera el 80%, a diversas concentraciones lo que corrobora a los resultados alcanzados por Frenay (2005) y expuesto en EMC; que es posible lograr altas recuperaciones de plomo por lixiviación básica.

Frenay (2005) encontró que, partiendo de un concentrado gravimétrico de mineral oxidado con ley de 5,2 % de Pb y de una solución con 150 g/l de NaOH (3,75 M), a temperatura ambiente, se



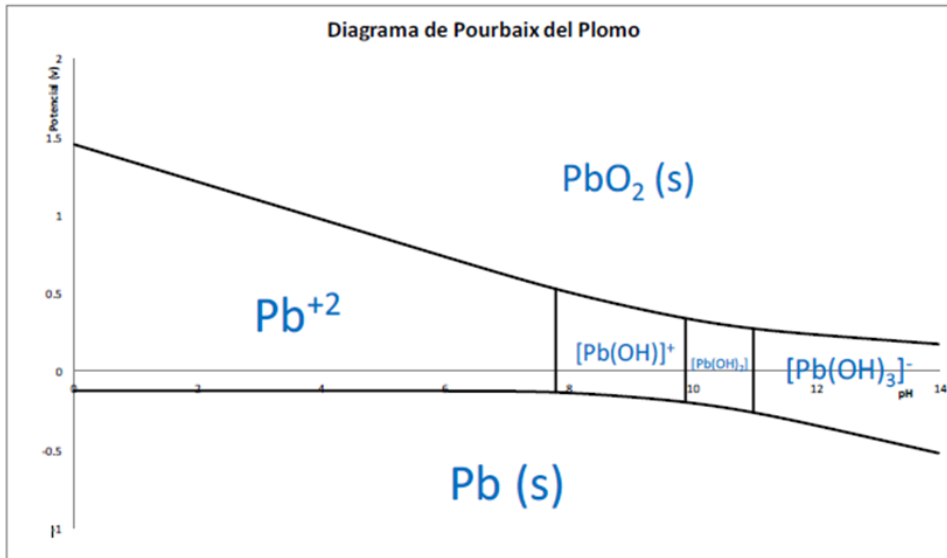
disuelven 3 g/l de Pb. Zhao (2000) encontró que a partir de smithsonita (carbonato de zinc), a una temperatura de 95°C, con una solución 5 M de NaOH y adición de NaCl, se genera una típica composición de solución de 2,96 – 3,05 g/l de Pb. Ornelas T. J., et al., (1998) en su investigación sobre “*Lixiviación alcalina de Pb y Zn a partir de minerales oxidados*” con NaOH, encontraron que partiendo de un sulfuro tostado con una concentración de 2,5 M de NaOH y a una temperatura 25°C, se logra disolver de 5,1 a 5,9 g/l de Pb. (Rojas, T. 2017).

La cinética de la lixiviación de la galena es como sigue:



El diagrama de Pourbaix, demuestra que a pH mayores a 10, los óxidos de plomo pueden disolverse con soluciones de NaOH, controlando otros elementos como el Fe, que no se disuelve. El diagrama de Pourbaix del plomo en solución de NaOH es:

**Gráfico 7:** Diagrama de Pourbaix del plomo



Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

1. Las pruebas experimentales de lixiviación con NaOH, lograron la máxima recuperación de plomo (85%), demostrándose que se puede lixiviar óxidos y sulfuros a las siguientes condiciones:
  - Solución de NaOH a 4 mol/l.
  - Granulometría a mallas – 100.
  - Relación mineral: pulpa; 1:5.
  - Velocidad de agitación: 400 rpm.
  - PH 13
2. Al realizar las pruebas experimentales de lixiviación con NaOH, se lograron la máxima recuperación de plomo (85%), se concluye que teniendo los parámetros influyentes se puede lixiviar óxidos y sulfuros, y los parámetros más influyentes son:
  - Granulometría a mallas – 100#.
  - Solucion de NaOH a 4mol/L
  - Velocidad de agitación: 400 rpm.
3. A partir de la solución lixiviante, la recuperación de plomo por cementación fue de 94% a las siguientes condiciones:
  - Tiempo de cementación: 120 minutos.
  - Disolución del aluminio: 67%.
  - Pb disuelto en solución: 0,47 g/20 ml solución.
4. A pH altamente básicos no se disuelve el Fe.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda desarrollar pruebas de microscopia electrónica de barrido, para determinar qué elementos más tiene el mineral existente en Colpa.
2. Desarrollar pruebas experimentales de electrodeposición de plomo a partir de la solución obtenida.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, Víctor. (2012). *Probabilidad y estadística*. México: Patria
- C., P., & Severo. (2010). *Estadística experimental aplicada a ciencia e ingeniería*. Lima: Concytec.
- Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile: NULL.
- Ekmekyapar, A. &. (2003). Dissolution kinetics of an oxidized copper ore in ammonium chloride solution. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 261 - 266.
- Frenay, J. &. (2005). Development of a new hydrometallurgical process to recover oxidized Zn-Pb deposit. *EMC*, 569 - 579.
- Gupta, K. &. (1990). *Hidrometalurgia in Extraction Processes, Volume I*. New York: CRC Press.
- Habashi, F. (1999). *Hydrometallurgy*. Québec: Universidad de Laval.
- Habashi, F. (2003). Trends in the hydrometallurgical treatment of copper oxides ores. *Arab Mining Journal*, 99 - 112.
- Hernández, R.; Zapata, N. & Mendoza, Ch. (2013). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Montgomery, D. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley.

- Ornelas, T. e. (1999). Lixiviación alcalina de Pb y Zn a partir de minerales oxidados. *Hidrometalurgia* (págs. 268 - 273). Mexico: UNAM.
- Orosco, F. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo*. México: Porrúa.
- Reghezza. (1987). *Precipitación de soluciones*. Concepción: Univ. de Concepción.
- Thompson, L. &. (2009). Sonochemistry: Science and Engineering. *Journal of the American Chemical Society*, 1215 - 1249.
- Van Arsdale, G. (1985). *Hidrometalurgia de metales comunes*. Mexico: Unión Tipográfica Hispano Americana.
- Yong, S. &. (1986). *Cinética de los procesos de la Metalurgia Extractiva*. México: Trillas.
- Zhao, Y. %. (2000). Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn-Pb ores. *Hydrometallurgy*, 237 - 249.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

### MATRIZ DE CONSISTENCIA:

#### EVALUACIÓN HIDROMETALÚRGICA DE LA MASICOTITA Y LA RECUPERACIÓN POR CEMENTACIÓN EN COLPA - TARMA – 2019

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
<p><b>General</b> ¿Cómo influye la lixiviación básica en la recuperación por cementación de plomo altamente oxidado en Colpa – Tarma – 2019?</p>	<p><b>General</b> Determinar experimentalmente por lixiviación básica y cementación la recuperación de plomo de minerales oxidados en Colpa – Tarma – 2019.</p>	<p><b>General</b> Si desarrollamos pruebas experimentales de lixiviación básica y cementación entonces será posible recuperar plomo de minerales oxidados en Colpa – Tarma – 2019.</p>	<p><b>Dependiente</b> % de disolución de plomo</p>
<p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles son las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019?</li> <li>• ¿Cómo determinamos los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019?</li> <li>• ¿Cómo se obtiene las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo en Colpa – Tarma – 2019?</li> </ul>	<p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – Tarma – 2019.</li> <li>• Determinar los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo a partir de la disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019.</li> <li>• Determinar las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo en Colpa – Tarma – 2019.</li> </ul>	<p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si determinamos las condiciones óptimas de lixiviación básica y cementación de plomo entonces será posible disolver con NaOH en Colpa – Tarma – 2019.</li> <li>• Si determinamos los parámetros influyentes en la lixiviación y cementación de plomo entonces será posible obtener los parámetros de disolución con NaOH en Colpa – tarma – 2019.</li> <li>• Si determinamos las recuperaciones máximas obtenidas por lixiviación – cementación de plomo entonces será posible optimizar el proceso en Colpa – Tarma – 2019.</li> </ul>	<p><b>Independientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pH</li> <li>• % NaOH</li> <li>• Tiempo de lixiviación</li> <li>• RPM agitación</li> </ul>



## ANEXO 2

**Ilustración 4:** Toma de muestras de mina

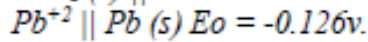
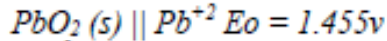


*Fuente:* Elaboración propia

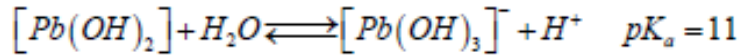
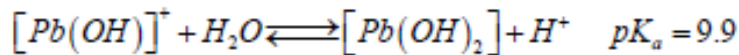
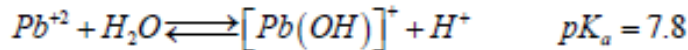
### ANEXO 3

#### DESARROLLO DEL DIAGRAMA DE POURBAIX

El plomo presenta varios grados de oxidación:



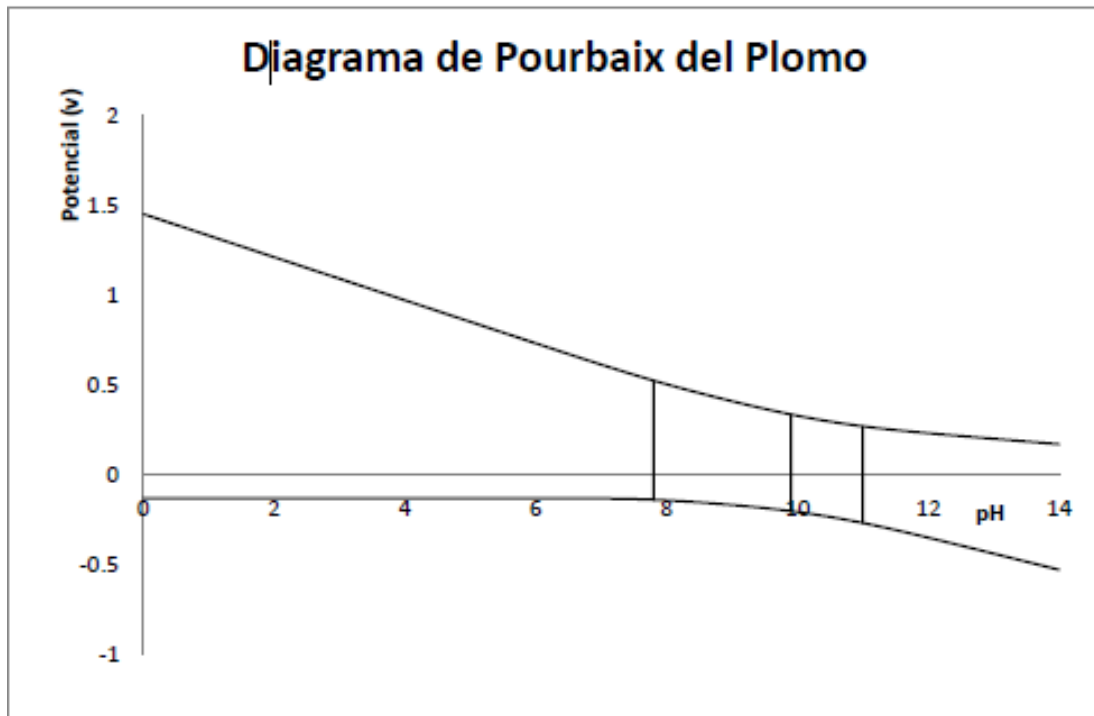
El plomo (II) tiene además propiedades ácidas:



Con esta información **DESARROLLE** el sistema de ecuaciones necesario para trazar el diagrama de Pourbaix del plomo.

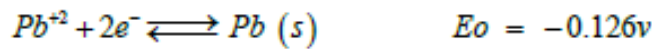
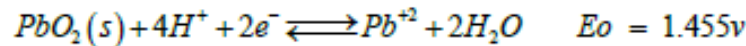
El diagrama resultante de las ecuaciones que acaba de desarrollar se muestra abajo.

Coloque cada una de las posibles especies de plomo en su lugar correspondiente en el diagrama, analícelo y concluya.



Respuesta:

Las dos semi-reacciones redox que se indican son:

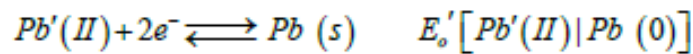
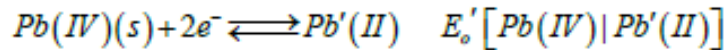


Las ecuaciones de Nernst respectivas serían:

$$E = 1.455 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|H^+|^4}{|Pb^{+2}|} \quad \dots (a)$$

$$E = -0.126 + \frac{0.06}{2} \log |Pb^{+2}| \quad \dots (b)$$

En forma condicional estas semi-reacciones se escriben como:



Y las ecuaciones de Nernst condicionales resultan ser:

$$E = E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] + \frac{0.06}{2} \log \frac{1}{|Pb'(II)|} \quad \dots (c)$$

$$E = E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] + \frac{0.06}{2} \log |Pb'(II)| \quad \dots (d)$$

Igualando a con b y c con d, se obtienen las ecuaciones para calcular los potenciales normales condicionales:

$$E = E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] + \frac{0.06}{2} \log \frac{1}{|Pb'(II)|} = 1.455 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|H^+|^4}{|Pb^{+2}|} \quad \dots (a) = (c)$$

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|H^+|^4}{|Pb^{+2}|} - \frac{0.06}{2} \log \frac{1}{|Pb'(II)|}$$

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|H^+|^4 |Pb'(II)|}{|Pb^{+2}|}$$

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 + \frac{0.06}{2} \log |H^+|^4 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|Pb'(II)|}{|Pb^{+2}|}$$

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 + 0.06 \log |H^+|^2 + \frac{0.06}{2} \log \alpha_{Pb'(II)}$$

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 - 0.12 pH + 0.03 \log \alpha_{Pb'(II)} \quad \dots (1)$$

$$E = E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] + \frac{0.06}{2} \log |Pb'(II)| = -0.126 + \frac{0.06}{2} \log |Pb^{+2}| \quad \dots (b) = (d)$$

$$E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] = -0.126 + \frac{0.06}{2} \log |Pb^{+2}| - \frac{0.06}{2} \log |Pb'(II)|$$

$$E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] = -0.126 + \frac{0.06}{2} \log \frac{|Pb^{+2}|}{|Pb'(II)|}$$

$$E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] = -0.126 + 0.03 \log \frac{1}{\alpha_{Pb'(II)}}$$

$$E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] = -0.126 - 0.03 \log \alpha_{Pb'(II)} \quad \dots (2)$$

O sea, en resumen:

$$E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] = 1.455 - 0.12 pH + \frac{0.06}{2} \log \alpha_{Pb(II)} \quad \dots (1)$$

$$E_o' [Pb'(II) | Pb(0)] = -0.126 + 0.03 \log \alpha_{Pb(II)} \quad \dots (2)$$

Respecto al coeficiente de reacción parásita del plomo:

$$\alpha_{Pb(II)} = \frac{|Pb'(II)|}{|Pb^{+2}|} = \frac{|Pb^{+2}| + |Pb(OH)^+| + |Pb(OH)_2| + |Pb(OH)_3^-|}{|Pb^{+2}|}$$

$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + \frac{|Pb(OH)^+|}{|Pb^{+2}|} + \frac{|Pb(OH)_2|}{|Pb^{+2}|} + \frac{|Pb(OH)_3^-|}{|Pb^{+2}|}$$

$$K_{a,1} = 10^{-7.8} = \frac{[Pb(OH)^+][H^+]}{|Pb^{+2}|}$$

$$K_{a,2} = 10^{-9.9} = \frac{[Pb(OH)_2][H^+]}{[Pb(OH)^+]}$$

$$K_{a,3} = 10^{-11} = \frac{[Pb(OH)_3^-][H^+]}{[Pb(OH)_2]}$$

Resulta:

$$\frac{[Pb(OH)^+]}{|Pb^{+2}|} = \frac{K_{a,1}}{[H^+]} = \frac{10^{-7.8}}{[H^+]}$$

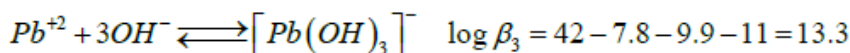
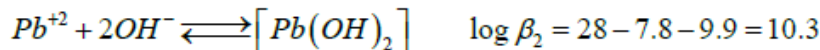
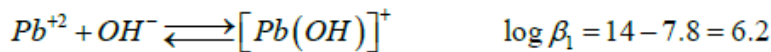
$$\frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb(OH)^+]^+} = \frac{K_{a,1} K_{a,2}}{[H^+]^2} = \frac{10^{-17.7}}{[H^+]^2}$$

$$\frac{[Pb(OH)_3]^- | H^+ ]}{[Pb(OH)_2]} = \frac{K_{a,1} K_{a,2} K_{a,3}}{|H^+|^3} = \frac{10^{-28.7}}{|H^+|^3}$$

finalmente:

$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + \frac{10^{-7.8}}{|H^+|} + \frac{10^{-17.7}}{|H^+|^2} + \frac{10^{-28.7}}{|H^+|^3} \dots (3)$$

pero si replanteamos los equilibrios como equilibrios globales de formación, entonces:



y, entonces, el coeficiente puede escribirse como:

$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i |OH^-|^i = 1 + \beta_1 |OH^-| + \beta_2 |OH^-|^2 + \beta_3 |OH^-|^3$$

$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + 10^{6.2} |OH^-| + 10^{10.3} |OH^-|^2 + 10^{13.3} |OH^-|^3 \dots (3bis)$$

Cualquiera de las dos fórmulas es perfectamente válida:

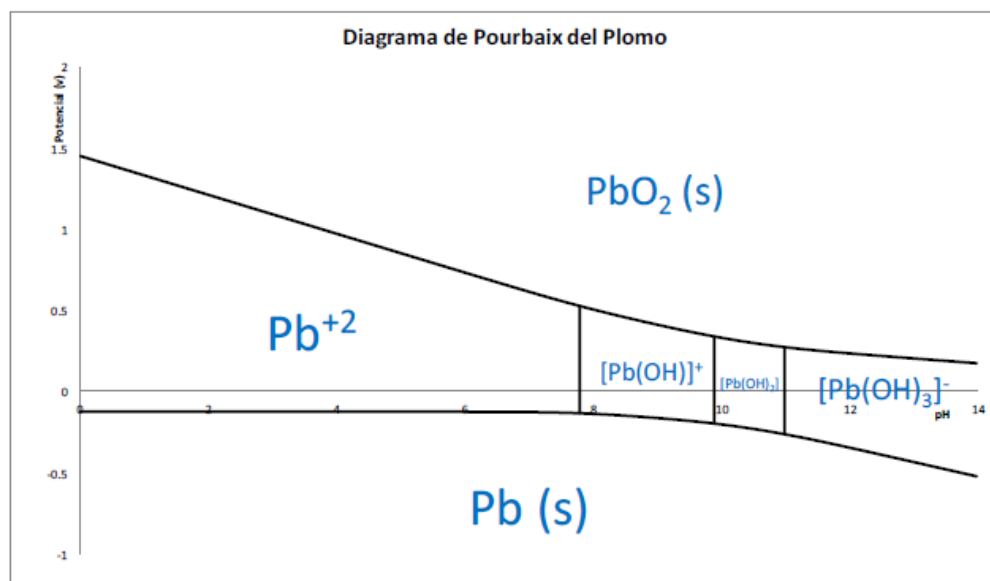
$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + \frac{10^{-7.8}}{|H^+|} + \frac{10^{-17.7}}{|H^+|^2} + \frac{10^{-28.7}}{|H^+|^3} \dots (3)$$

$$\alpha_{Pb(II)} = 1 + 10^{6.2} |OH^-| + 10^{10.3} |OH^-|^2 + 10^{13.3} |OH^-|^3 \dots (3bis)$$

Pregunta 2:

Resulta evidente que en todo momento  $E_o' [Pb(IV) | Pb'(II)] > E_o' [Pb'(II) | Pb(0)]$ ,

Por lo que a potenciales altos predomina  $PbO_2(s)$ , a potenciales bajos el reductor  $Pb(s)$  e intermedios el  $Pb(II)$  y sus complejos con  $OH$ , como todos son estables (escala de pH), entonces en medios ácidos estará libre y al aumentar el pH se van formando de manera sucesiva los tres complejos con  $OH$ , el diagrama simplemente se ve así:



## ANEXO 4

**Tabla 11:** Para el cálculo del peso específico medio

N°	M - P	W	S	W + (M - P) - S	P. E.
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
Promedio					

Donde:

M - P:                   Peso de muestra

W:                        Picnómetro + agua contenida

S:                        Muestra + picnómetro + agua no desplazada

W + (M - P) - S:    Peso del agua desplazada por la muestra.

## ANEXO 5

**Tabla 12:** Lixiviación de plomo en función del ratio mineral

N°	Ratio	Tiempo	% Disolución de Pb
1	01:04	30	
		60	
		90	
		120	
2	01:05	30	
		60	
		90	
		120	
3	01:06	30	
		60	
		90	
		120	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 13:** Lixiviación de plomo en función del tamaño del mineral

N°	Mallas	Tiempo	% Disolución de Pb
1	25	30	
		60	
		90	
		120	
2	50	30	
		60	
		90	
		120	
3	100	30	
		60	
		90	
		120	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 14:** Lixiviación de plomo en función a la concentración de la solución

N°	Moles	Tiempo	% Disolución de Pb
1	4	30	
		60	
		90	
		120	
2	6	30	
		60	
		90	
		120	
3	8	30	
		60	
		90	
		120	

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO 6

**Ilustración 5:** Determinando el peso específico del mineral



Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 6:** Preparando la solución de NaOH



Fuente: Elaboración propia.

**Ilustración 7:** Realizando el análisis granulométrico



Fuente: Elaboración propia