



Instituto Politécnico Nacional

**Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
campus Zacatecas**

Ingeniería Metalúrgica

***“Lixiviación de concentrado de plomo por el
sistema $FeCl_3$ - $NaCl$ evaluando el efecto de la
concentración y temperatura”***

Opción de titulación: Curricular

Que para obtener el título de Ingeniero Metalúrgico

Presenta:

Alumno: Christian Uriel Meza Solis

Asesor del proyecto: M.I.M. Ernesto Emmanuel Vázquez Sánchez
Coasesor del proyecto: Dra. Elvia Angélica Sánchez Ramírez

Zacatecas, Zac. a Junio de 2022

Folio
UPIIZ/ESA/084/2023

2023. Año de Francisco Villa
30 Aniversario de la Declaración sobre
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del GENAC
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

Asunto
DESIGNACIÓN DE ASESORES

Zacatecas, Zac., a 03 de abril de 2023

C. CHRISTIAN URIEL MEZA SOLIS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2019670029
GENERACIÓN: 2018-2022
PRESENTE

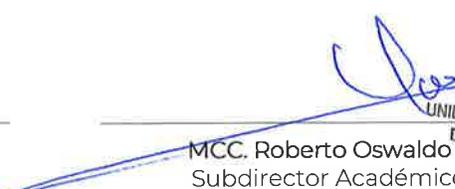
Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica y este Departamento aceptan que el M.I.M. Ernesto Emmanuel Vázquez Sánchez sea su Asesor y la Dra. Elvia Angélica Sánchez Ramírez, su Coasesora, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Lixiviación de concentrado de plomo por el sistema $FeCl_3-NaCl$ evaluando el efecto de la concentración y temperatura".

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



L.C. María Monserrat Saldana Noriega
Jefa del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico



MCC. Roberto Oswaldo Cruz
Subdirector Académico Interino
de la UPIIZ

Folio
UPIIZ/ESA/159/2023

2023. Año de Francisco Villa
30 Aniversario de la Declaración sobre
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del CENAC
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil
40 Aniversario del CIDIR, Unidad Oaxaca

Asunto
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

C. CHRISTIAN URIEL MEZA SOLIS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2019670029
GENERACIÓN: 2018-2022
PRESENTE

Zacatecas, Zac., a 19 de abril de 2023

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Lixiviación de concentrado de plomo por el sistema $FeCl_3-NaCl$ evaluando el efecto de la concentración y temperatura".

El departamento de Evaluación y Seguimiento Académico, así como sus asesores, determinaron que el citado Trabajo de Titulación, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.

L.C. MARÍA MONSERRAT SALDAÑA NORIEGA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



M.I.M. ERNESTO EMMANUEL VÁZQUEZ SÁNCHEZ
ASESOR



DRA. ELVIA ANGÉLICA SÁNCHEZ RAMÍREZ
COASESOR

Autorización de uso de obra

Autorización de uso de obra INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad **el** que suscribe **Christian Uriel Meza Solis**, estudiante del programa de **Ingeniería Metalúrgica**, con número de boleta **2019670029**, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **Lixiviación de concentrado de plomo por el sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$ evaluando el efecto de la concentración y temperatura**, en adelante “El Trabajo de Titulación” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el “IPN”, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales como referencia para investigaciones, tareas y prácticas “El Trabajo de Titulación” por un periodo de 1 año contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al “IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, el “IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “El Trabajo de Titulación”.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “El Trabajo de Titulación”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de “El Trabajo de Titulación”, por lo que deslindo de toda responsabilidad al “IPN” en caso de que el contenido de “El Trabajo de Titulación” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 21 de abril de

2023

Atentamente



Christian Uriel Meza Solis



Dedicatoria

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y paciencia para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Celia

Por haberme educado para bien y por su paciencia y cariño. Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos y sus valores, por la motivación que me ha permitido ser una persona de bien, pero aun más que nada, por su amor. Por el esfuerzo que siempre da por mí y por quien soy ahora.

A mi familia

Por enseñarme que a pesar de los malos momentos hay que saber levantarse y luchar, gracias por los valores del respeto, responsabilidad y honestidad, porque siempre han estado ahí.

A mi docente de U.A., asesor, coasesor y revisores

M.I.M. Ernesto Emmanuel Vázquez Sánchez por el apoyo y motivación para la elaboración de este proyecto. Ing. Perla Maria Arellano Sosa, Dra. Elvia Angélica Sánchez Ramírez, Dr. Víctor Hugo Gutiérrez Pérez y Dra. Seydy Lisbeth Olvera Vázquez por su constante apoyo en su momento.

A mis amigos

Que siempre nos apoyamos mutuamente en nuestra formación, gracias por la confianza y cariño.



Tabla de contenido

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
CAPÍTULO I	9
1. <i>Introducción</i>	9
CAPÍTULO II	10
2. <i>Antecedentes</i>	10
2.1. Generalidades del plomo	10
2.2. El plomo y su toxicidad.....	16
2.3. Metalurgia extractiva	19
2.3.1. Pirometalurgia industrial.....	19
2.3.2. Hidrometalurgia industrial	20
2.4. Procesos para la producción de plomo por la vía pirometalúrgica.....	20
2.5. Pirometalurgia vs hidrometalurgia.....	26
2.6. Hidrometalurgia	26
2.6.1. Proceso de Lixiviación	27
2.6.2. Procesos de extracción de metales disueltos	30
2.6.3. Procesos de recuperación de metales.....	31
2.7. Procesos de lixiviación como alternativa para la obtención de plomo	33
2.8. Lixiviación en medios de cloruro férrico	44
CAPÍTULO III	49
3. <i>Planteamiento del problema</i>	49
4. <i>Justificación</i>	49
5. <i>Hipótesis</i>	49
6. <i>Objetivos</i>	50
CAPÍTULO IV	51
7. <i>Metodología experimental</i>	51
7.1. Materiales y equipo	51



7.2. Diagrama del procedimiento para la realización y distribución de las pruebas de lixiviación de plomo	52
7.3. Procedimiento experimental	53
CAPÍTULO V	58
8. <i>Resultados y discusión</i>	58
CAPÍTULO VI	64
9. <i>Conclusiones</i>	64
10. <i>Anexos</i>	65
11. <i>Referencias</i>	74

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del proceso de extracción de plomo [1].	21
Figura 2. Ciclo del plomo metálico [1].	22
Figura 3. Diagrama de proceso planta de sinterización-alto horno [1].	23
Figura 4. Aplicación de la solución y flujo a través de las partículas [16].	29
Figura 5. Celda electrolítica [12].	35
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de electrólisis de sales fundidas de lixiviación de cloruro férrico [9].	37
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso [19]	42
Figura 8. Diagrama Eh-pH para el sistema Pb-S-H ₂ O a 25°C y concentración total de iones cloruro 1 M, la región Pb ²⁺ coexiste con la región sólida PbCl ₂ [21].	45
Figura 9. Diagrama esquemático de la reacción de la partícula de galena [22].	47
Figura 10. Diagrama del proceso de lixiviación por el sistema FeCl ₃ -NaCl.	52
Figura 11. Desgrumado del concentrado de plomo.	53
Figura 12. Pesaje de cloruro férrico.	54
Figura 13. Preparación de la solución de cloruro férrico.	54
Figura 14. Prueba de lixiviación.	55
Figura 15. Filtración de la solución de lixiviación a los 120 minutos.	56
Figura 16. Componentes básicos de un equipo de absorción atómica.	57
Figura 17. Recuperaciones de Pb, pruebas 1, 2, 3 y 4. Etapa 1.	60
Figura 18. Recuperaciones de Pb, pruebas 5, 6 y 7. Etapa 2.	61
Figura 19. Recuperaciones de Pb, pruebas 8, 9 y 10. Etapa 3.	62
Figura 20. Recuperaciones de Pb, pruebas 11, 12 y 13. Etapa 4.	63



Índice de Tablas

Tabla 1. Usos finales del plomo de 1960-2005 [1].	12
Tabla 2. Usos principales del plomo [2, 3, 4].	12
Tabla 3. Propiedades físicas del plomo [6, 7, 8].	13
Tabla 4. Propiedades químicas del plomo [6, 7, 8].	14
Tabla 5. Minerales del plomo [8].	15
Tabla 6. Caracterización de la galena.	16
Tabla 7. Efectos en la salud por una alta exposición al plomo [1].	17
Tabla 8. Valor límite de exposición a metales [1].	18
Tabla 9. Normas típicas de descarga de efluentes [1].	18
Tabla 10. Procesos de lixiviación [15, 16, 17].	27
Tabla 11. Procesos de extracción de metales disueltos [16].	30
Tabla 12. Procesos de recuperación de metales [16].	32
Tabla 13. Materiales, equipo y reactivos para la realización de las pruebas de lixiviación de plomo.	51
Tabla 14. Condiciones de lixiviación de plomo por el sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$.	55
Tabla 15. Variación de condiciones para las pruebas de lixiviación.	56
Tabla 16. Resultados de cada proceso de lixiviación.	58
Tabla 17. Cantidades de reactivos calculados.	65
Tabla 18. Cantidades de muestras líquidas y sólidas.	65
Tabla 19. Balance metalúrgico, prueba 1 $[\text{FeCl}_3]=0.3 \text{ M}$.	66
Tabla 20. Balance metalúrgico, prueba 2 $[\text{FeCl}_3]=0.5 \text{ M}$.	66
Tabla 21. Balance metalúrgico, prueba 3 $[\text{FeCl}_3]=0.8 \text{ M}$.	67
Tabla 22. Balance metalúrgico, prueba 4 $[\text{FeCl}_3]=1 \text{ M}$.	67
Tabla 23. Balance metalúrgico, prueba 5 $[\text{FeCl}_3]=0.3 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=1 \text{ M}$.	67
Tabla 24. Balance metalúrgico, prueba 6 $[\text{FeCl}_3]=0.3 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=3 \text{ M}$.	67
Tabla 25. Balance metalúrgico, prueba 7 $[\text{FeCl}_3]=0.3 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=5 \text{ M}$.	68
Tabla 26. Balance metalúrgico, prueba 8 $[\text{FeCl}_3]=1 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=1 \text{ M}$.	68
Tabla 27. Balance metalúrgico, prueba 9 $[\text{FeCl}_3]=1 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=3 \text{ M}$.	68
Tabla 28. Balance metalúrgico, prueba 10 $[\text{FeCl}_3]=1 \text{ M}$ y $[\text{NaCl}]=5 \text{ M}$.	68
Tabla 29. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 minutos.	69
Tabla 30. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 minutos.	69
Tabla 31. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 minutos.	69
Tabla 32. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 60 minutos.	69
Tabla 33. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 minutos.	70
Tabla 34. Balance metalúrgico, prueba 11, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 120 minutos.	70
Tabla 35. Balance metalúrgico, prueba 12, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 minutos.	70
Tabla 36. Balance metalúrgico, prueba 12, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 minutos.	70
Tabla 37. Balance metalúrgico, prueba 12, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 minutos.	71
Tabla 38. Balance metalúrgico, prueba 12, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 60 minutos.	71



Tabla 39. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 90 minutos.	71
Tabla 40. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 120 minutos.	71
Tabla 41. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 10 minutos.	72
Tabla 42. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 20 minutos.	72
Tabla 43. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 30 minutos.	72
Tabla 44. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 60 minutos.	72
Tabla 45. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 90 minutos.	73
Tabla 46. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 120 minutos.	73

Simbología y/o notación utilizada

AA	Absorción Atómica
$C_6H_8O_7$	Ácido cítrico
HCl	Ácido clorhídrico
H_2SiF_6	Ácido fluosilícico
HNO_3	Ácido nítrico
H_2S	Ácido sulfhídrico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
Ah	Amperios por hora
A/m ²	Amperios por metro cuadrado
Ag ₂ S	Argentita
S	Azufre elemental
PbCO ₃	Carbonato de plomo (Cerusita)
CIL	Carbono en lixiviación
CIP	Carbono en pulpa
°C	Celsius de temperatura
$Na_3C_6H_5O_7$	Citrato trisódico
LiCl	Cloruro de litio
KCl	Cloruro de potasio
NaCl	Cloruro de sodio
FeCl ₃	Cloruro férrico
FeCl ₂	Cloruro ferroso
Cu	Cobre
M	Concentración molar
SO ₂	Dióxido de azufre
EPP	Equipo de protección personal
FCC	Estructura cúbica centrada en las caras
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico
g/L	Gramos por litro
Cl ⁻	Ión cloro



Fe^{3+}	Ión férrico
H^+	Ión hidrógeno
J/g	Joule por gramo
J/Kg K	Joule por kilogramo Kelvin
K	Kelvin de temperatura
KPa	KiloPascal
$\mu\text{g}/\text{dL}$	Microgramos por decilitro
$\mu\text{g}/\text{L}$	Microgramos por litro
mN/m	MiliNewton por metro
mPa s	MiliPascal por segundo
Mol/L	Moles por litro
nm	Nanómetro
BLL	Nivel de plomo en sangre
ohm/cm	Ohmios por centímetro
SnO_2	Óxido de estaño
IrO_2	Óxido de iridio
MnO_2	Óxido de manganeso
PbO_2	Óxido de plomo
RuO_2	Óxido de rutenio
N_2O	Óxido nitroso
O_2	Oxígeno
O_3	Ozono
H_2O_2	Peróxido de hidrógeno
Ag	Plata
Pb	Plomo
CIC	Proceso de carbono en columna
S/L	Relación sólido líquido
rpm	Revoluciones por minuto
PLS	Solución de lixiviación preñada
Pb_2O	Subóxido de plomo
PbSO_4	Sulfato de plomo (Anglesita)
PbS	Sulfuro de plomo (galena)
cm	Unidad de medida, centímetro
μm	Unidad de medida, micrómetro
mL	Unidad de medida, mililitro
mm	Unidad de medida, milímetro
gal	Unidad de peso, Galón
lb	Unidad de peso, libra
T	Unidad de peso, tonelada
atm	Unidad de presión, atmósfera



h	Unidad de tiempo, hora
min	Unidad de tiempo, minuto
TLV	Valores límite umbral
W/m K	Vatios por metro Kelvin
V	Volt
Zn	Zinc



RESUMEN

El interés por la sustitución de los procesos pirometalúrgicos tradicionales por procesos hidrometalúrgicos, para lograr la recuperación metálica con ventajas en el proceso y mejoras ambientales crece cada vez más. En el caso del plomo, varias rutas de recuperación metálica han sido investigadas en los últimos años, teniendo resultados variantes, esto debido a la complejidad de disolver por lixiviación minerales sulfurados, que son la principal mena de plomo, aunque dentro de estas rutas ha destacado la cloruración como el proceso con mayor efectividad en la recuperación de este metal.

En el presente estudio se obtuvo cloruro de plomo (PbCl_4^{2-}) a partir de un concentrado de plomo, aplicando el método de lixiviación por agitación por medio de un sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$ en solución a nivel laboratorio. Se determinaron las condiciones óptimas para obtener una buena recuperación superior al 80%, por un proceso hidrometalúrgico que produce como residuo S elemental no contaminante y buscar romper el efecto de pasivación producido en la lixiviación con FeCl_3 , para esto se realizaron 13 pruebas repartidas en 4 etapas, cada una con condiciones diferentes variando la concentración y la temperatura. La mayor recuperación obtenida fue de 90.07% empleando 2 horas de lixiviación con las siguientes condiciones: $\text{pH}_0=0.38$, $\text{pH}_f=1.03$, $[\text{FeCl}_3]=1\text{M}$, volumen de solución de 200mL, $\text{NaCl}=5\text{M}$, $T=60^\circ\text{C}$, velocidad de agitación= 800rpm y empleando 10g de muestra.

Palabras clave: pasivación, concentración, temperatura.



ABSTRACT

The interest in replacing traditional pyrometallurgical processes with hydrometallurgical processes, to achieve metal with advantages in the process and environmental improvements, is growing more and more. In the case of lead, several metal recovery routes have been investigated in recent years, with varying results, due to the complexity of dissolving sulphide minerals by leaching, which are the main lead ore, although within these routes there has been highlighted chlorination as the most efficient process in the recovery of this metal.

In the present study, lead chloride (PbCl_4^{2-}) was obtained from a lead concentrate, applying the agitation leaching method by means of a FeCl_3 - NaCl system in solution at the laboratory level. The optimal conditions were determined to obtain a good recovery of over 80%, by a hydrometallurgical process that produces non-polluting elemental S as residue and seek to break the passivation effect produced in the leaching with FeCl_3 , for these 13 tests were carried out spread over 4 stages, each with different conditions varying the concentration and temperature. The highest recovery obtained was 90.07% using 2 hours of leaching under the following conditions: $\text{pH}_0=0.38$, $\text{pH}_f=1.03$, $[\text{FeCl}_3] = 1\text{M}$, solution volume of 200mL, $\text{NaCl}=5\text{M}$, $T=60^\circ\text{C}$, stirring speed= 800rpm and using 10g of sample.

Keywords: passivation, concentration, temperature.



CAPÍTULO I

1. Introducción

Desde la antigüedad el uso del plomo ha sido de gran importancia para el desarrollo de la sociedad, gracias a las propiedades tanto físicas como químicas que tiene este metal, abrieron paso a su uso en muchas aplicaciones en distintos sectores. Hoy en día muchas han sido desplazadas debido a que se han identificado problemas graves en la salud y el medio ambiente. Sin embargo, persisten muchas otras donde el plomo no tiene rival y otorga características especiales que no se pueden conseguir con otro material [1].

Las reservas minerales de plomo se forman principalmente por minerales sulfurados con bajo contenido metálico, la galena (PbS) es el más conocido y es el único sulfuro de importancia comercial. Estos minerales sulfurados se procesan comúnmente por la vía pirometalúrgica. Desafortunadamente, los procesos pirometalúrgicos requieren de mucha energía para alcanzar altas temperaturas y generan subproductos como gases y escoria que conllevan problemas persistentes de contaminación y altos costos. En todas las plantas pirometalúrgicas que procesan plomo son preocupantes los problemas higiénicos causados por este metal. Por ello, la fundición está en duda como un medio para obtener plomo. Por otro lado, los procesos hidrometalúrgicos ofrecen una gran alternativa para resolver estos problemas y se han desarrollado muchos estudios, que incluyen: el estudio de la termodinámica de las especies, de la cinética de los sistemas de lixiviación, de los procesos de regeneración de solución lixivante y del proceso de electroobtención de plomo en búsqueda de un proceso adecuado para lograr su extracción y obtención de plomo por estas técnicas en soluciones acuosas con ayuda de variables que permitan acelerar el proceso de manera eficiente [11, 12, 13].

La reacción de lixiviación produce como subproducto azufre elemental en estado sólido no contaminante que es una gran ventaja en este proceso. Con ayuda de condiciones óptimas se puede obtener una buena recuperación de plomo evitando un daño medioambiental y altos costos. Esto se puede lograr utilizando un sistema de sales de cloruro que, gracias a la teoría y estudios anteriores, se ha confirmado que es un sistema muy eficiente y rápido.

EL presente trabajo desarrolla un estudio de la variación de la concentración y la temperatura para el sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$, utilizando un proceso de lixiviación dinámica con el cual se obtienen las condiciones óptimas para optimizar recuperación de plomo (Pb) mediante un proceso hidrometalúrgico.



CAPÍTULO II

2. Antecedentes

2.1. Generalidades del plomo

Historia: Propiedades y usos

El plomo es un metal de amplia importancia histórica, a menudo se extraía y producía como un coproducto de plata: el plomo servía como recolector de plata y oro y la fundición se realizaba principalmente para este propósito. El nombre viene del latín *Plumbum* que significa plomo o caño de agua (hecho con plomo) [1].

Los fenicios y más tarde los romanos extrajeron plata y plomo en España, Grecia, las islas de Rodas y Chipre, Gran Bretaña y en la antigua Galia. En la Edad Media, la minería y la producción de plata y plomo florecieron en Alemania. Más tarde se encontraron grandes depósitos en Estados Unidos, México, Canadá y Australia, todavía de gran importancia en la actualidad. Los primeros usos del plomo se relacionan con el labrado de vasos y copas, posteriormente se comienza a usar en monedas y estatuas. Principalmente, en la época romana, el plomo se usaba para hacer tuberías de agua, revestir tanques de agua y baños, como material para techos y como sello para impermeabilizar edificios. Fue utilizado en láminas de plomo soldadas en los Jardines Colgantes de Babilonia.

El bajo punto de fusión y suavidad del plomo le permitieron ser utilizado para sellar conectores de bronce y hierro en piedra de construcción. Se utilizó para la construcción de grandes ventanas a partir de fragmentos más pequeños de vidrio. Debido a su alta densidad y facilidad de moldeo, el plomo se utilizó como proyectil en la guerra, pero después de la invención de la pólvora, se utilizó para la fabricación de municiones. También debido a la facilidad de moldeo, así como a la dureza de su aleación con antimonio, Johannes Gutenberg utilizó plomo en el primer proceso de impresión para la fabricación de tipos móviles, y sigue siendo la base de la configuración de tipos de impresión a gran escala [1].

Adicionalmente, los óxidos de plomo rojo y blanco se utilizaron como pigmentos de pintura hasta mediados del siglo XX. Las propiedades electroquímicas únicas del plomo en combinación con sus óxidos y sulfatos proporcionaron un medio para construir baterías de almacenamiento eléctrico de alta capacidad y alta potencia. Debido a que el plomo en esta aplicación permanece concentrado y no se dispersa, se puede recuperar fácilmente, lo que hace que el plomo sea el metal más reciclado, con alrededor del 60 % del suministro mundial total.



La resistencia a la corrosión del plomo se debe a la formación de películas superficiales densas como óxido, carbonato o sulfato. Esto, junto con su capacidad para ser aleado y laminado, ha permitido que se utilice como material de construcción en la industria química en entornos sulfúricos, fosfóricos o de ácido crómico, como recubrimiento protector sobre el acero. La alta densidad del plomo, y el hecho de que sus óxidos se disolverán en vidrio sin causar coloración, han permitido su uso para aumentar el índice de refracción y formar productos decorativos de vidrio "cristalino". El cristal de alta calidad puede contener hasta un 70 % de plomo y se introdujo por primera vez en el siglo XVII [1].

Muchos compuestos de plomo tienen propiedades únicas con las correspondientes aplicaciones útiles. El tetraetilo de plomo ha sido importante como aditivo al combustible automotriz para controlar la preignición en el motor de combustión interna, representó un gran uso a mediados del siglo XX. Los compuestos de plomo también se utilizan para una gama de estabilizadores de plástico para superar la degradación del plástico por el calor y la radiación UV. Esto se aplica particularmente al cloruro de polivinilo (PVC). Otros usos significativos del plomo son para el revestimiento de cables eléctricos y de comunicación, y para la protección contra la radiación de alta energía. Su alto coeficiente de absorción de rayos X y rayos gamma, combinado con la capacidad de disolver óxidos de plomo en vidrio, proporcionó la construcción de tubos de rayos catódicos para aplicaciones de televisión y monitores informáticos. Además de la adición al vidrio, el blindaje contra la radiación en muchas formas en la industria nuclear se basa en el uso de plomo.

Muchos usos antiguos del plomo, como el de las municiones, permanecen, pero muchos se han eliminado gradualmente con la disponibilidad de nuevos materiales y debido al reconocimiento de los peligros para la salud. Los problemas de salud también han visto el plomo eliminado de las pinturas y la gasolina. Las antiguas prácticas de usar plomo en cosméticos y endulzar el vino almacenándolo en recipientes de plomo o agregando acetato de plomo se han eliminado desde hace mucho tiempo. El plomo disparado en cartuchos para la caza de aves acuáticas ha sido reemplazado en gran medida por el disparo de hierro debido a las preocupaciones sobre el envenenamiento de las aves por la ingestión de disparos recolectados con alimento del fondo de las vías fluviales. Con estas presiones sanitarias y ambientales, el patrón de uso de plomo ha cambiado notablemente, como se ilustra en la Tabla 1 que muestra los usos finales de plomo para 1960 y para 2005. Debido a preocupaciones ambientales y de salud, la clara tendencia general es reemplazar el plomo en los usos dispersivos y concentrar su aplicación en los usos donde se puede reciclar [1].



Tabla 1. Usos finales del plomo de 1960-2005 [1].

Uso final	1960	2005
Pilas	28%	75%
Pigmentos y productos químicos	10%	8%
Extrusiones laminadas	16%	6%
Aleaciones y municiones	15%	5%
Revestimiento de cables	18%	2%
Varios (incluyendo tetraetilo de plomo)	13%	4%

A continuación se presentan en la Tabla 2 los principales usos del plomo [2, 3, 4].

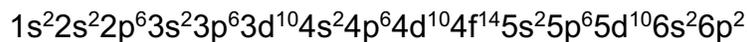
Tabla 2. Usos principales del plomo [2, 3, 4].

Usos del plomo	Descripción
Baterías de plomo modernas	Son innovadoras, fiables y sostenibles. Alimentación de vehículos y almacenamiento de energía renovable eólica y solar, como suministro de energía de emergencia para hospitales, telecomunicaciones y sistemas informáticos. El 80 % del uso moderno de plomo está en la producción de baterías, de las cuales casi el 100 % se recicla.
Techos o tejados	Un techo de plomo durará más que cualquier otro material de construcción tradicional, a veces por cientos de años. Funciona como protección contra la intemperie en aplicaciones arquitectónicas.
Barrera a la radiación	Como barrera a la radiación, el plomo no tiene rival y es esencial en hospitales, consultorios dentales, laboratorios e instalaciones nucleares.
Recipientes radiactivos	El plomo es uno de los materiales más efectivos para construir recipientes que permiten albergar material radiactivo. Son sustancias químicas peligrosas que requieren de un envase fuerte y robusto.
Aleaciones, soldaduras y compuestos	La fabricación de plásticos y cerámicas utilizan el plomo como uno de sus ingredientes, también usado en aceros, latones y aleaciones de aluminio de libre mecanizado. En soldaduras industriales utilizadas en electrónica especializada y aplicaciones eléctricas. Como intermediario en la fabricación de compuestos de plomo como los óxidos de plomo.



Cubiertas para cable	Como revestimiento interior en cables de alimentación y telecomunicaciones (alta tensión). Utilizado también para cables submarinos de energía y comunicación.
Fabricación de municiones	La mayoría de las aleaciones de metales en las municiones de armas están acompañadas con plomo. Generalmente, la punta de las balas está hecha de este metal, lo que consigue una mayor penetración y fuerza.
Fabricación de vidrio	Ciertos vidrios especiales se fabrican con fines técnicos y artísticos, por lo cual requieren de mayor resistencia. Para este caso la industria se vale del plomo, uno de los ingredientes de confección secundarios.
Elaboración de pinturas	Las pinturas industriales y la alta variedad de pigmentos en el planeta están compuestos por numerosos elementos químicos. El plomo es uno de los principales en gran parte de estos productos.
Economía circular	Capacidad única para facilitar la recuperación energéticamente eficiente de muchos otros metales no ferrosos y materiales de tecnología crítica.

Como se puede observar el plomo se ha utilizado desde hace mucho tiempo hasta hoy en día, gracias a sus propiedades físicas y químicas que lo caracterizan. El plomo es un elemento químico de aspecto gris azulado. Su símbolo es Pb y pertenece al grupo de los metales del bloque p y su estado habitual en la naturaleza es sólido. El plomo está situado en la posición 82 de la tabla periódica y tiene la siguiente configuración electrónica [5]:



A continuación se presentan las principales propiedades del plomo [6, 7, 8] (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Propiedades físicas del plomo [6, 7, 8].

Propiedades físicas del plomo	
Color	Gris plomo, blanco gris
Densidad	11.33 g/cm ³ (20 °C)
Fractura	Maleable. Se deforma en lugar de romperse con un martillo.
Dureza	1.5 Mohs
Luminiscencia	No fluorescente



Brillo	Metálico
Magnetismo	No magnético
Raya	Gris plomo
Punto de fusión	327.4 °C
Punto de ebullición	1,770 °C
Solubilidad	Poco soluble en agua
Calor latente de fusión	23.4 J/g
Calor latente de volatilización	862 J/g
Calor específico	130 J/Kg K
Presión de vapor	0.133 KPa (980 °C) 1.33 KPa (1,160 °C) 26.7 KPa (1,500 °C) 53.3 KPa (1,600 °C)
Tensión superficial	444 mN/m (327.4 °C)
Viscosidad	2.75 mPa s (327.4 °C)
Conductividad térmica	34.7 W/m K
Resistencia eléctrica específica	20.65 ohm/cm (20 °C)

Tabla 4. Propiedades químicas del plomo [6, 7, 8].

Propiedades químicas del plomo	
Número atómico	82
Sistema periódico	Grupo 48
Valencia	+2 y +4
Peso atómico	207.21
Radio atómico	0.175 nm
Sistema cristalino	FCC
Atomos por celda unitaria	4
Isótopos	208, 206, 207 y 204
Electronegatividad	1.6
Radio iónico	Pb ²⁺ (0.118 nm) Pb ⁴⁺ (0.07 nm)
Potencial de reducción estándar (25 °C)	Pb ²⁺ (-0.126 v) Pb ⁴⁺ (0.783 v)
Reacciones y potenciales de oxidación estándar (25 °C)	Pb = Pb ²⁺ + 2e ⁻ (0.126 v) Pb ²⁺ + 2H ₂ O = PbO ₂ + 4H ⁺ + 2e ⁻ (-1.456 v) Pb + 2OH ⁻ = PbO + H ₂ O + 2e ⁻ (0.576 v) Pb + 3OH ⁻ = HPbO ₂ ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ (0.54 v)
Oxidación por aire	Se oxida superficialmente, recubriéndose de una capa de color gris de subóxido de plomo



	(Pb ₂ O), le quita el brillo metálico. En presencia de oxígeno, el agua lo ataca, pero si contiene carbonatos y silicatos, se forma una capa protectora de sus derivados y la corrosión se hace muy lenta.
Resistencia a la corrosión	El ácido sulfúrico diluido no lo ataca, en cambio en muy altas concentraciones y caliente genera sulfato de plomo (II). El ácido clorhídrico diluido en frío tampoco reacciona, pero concentrado ataca al plomo. El ácido nítrico en frío lo disuelve dando nitrato de plomo (II) y vapores nitrosos, muy tóxicos. El plomo también es corroído por ácidos orgánicos débiles, como el ácido acético o tartárico, en presencia de oxígeno.

Minerales de Plomo

La galena (PbS) es el más importante de los minerales de plomo por su contenido de este metal (86.6%) y es uno de los sulfuros metálicos más abundantes, es el único que tiene un amplio interés económico. Los minerales de plomo más comunes se indican en la Tabla 5 [8].

Tabla 5. Minerales del plomo [8].

Mineral	Fórmula	Contenido de Pb (%)
Galena	PbS	86.6%
Anglesita	PbSO ₄	68.3%
Cerusita	PbCO ₃	77.5%
Jamesonita	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	50.8%
Piromorfita	3Pb ₃ P ₂ O ₈ .PbCl ₂	76.4%
Bournonita	3(Pb,Cu ₂)S.Sb ₂ .S ₃	24.7%
Mimetita	(PbCl)Pb ₄ (AsO ₄) ₃	69.7%

Los depósitos de galena se formaron comúnmente por procesos hidroquímicos a través del enfriamiento de soluciones ricas en minerales asociadas con erupciones magmáticas o intrusiones, y ocurren en lechos o venas. A continuación se muestra la caracterización de la galena en la Tabla 6 [8].



Tabla 6. Caracterización de la galena.

Caracterización de la galena	
Fórmula	PbS
Lustre	Metálico
Transparencia	Opaca
Color	Gris
Raya	Grisácea

Los minerales asociados son con frecuencia sulfuro de zinc o esfalerita, calcopirita, pirita y minerales menores de sulfuro mixto que a menudo contienen plata. La meteorización y la oxidación de los sulfuros primarios conduce a la formación de depósitos de anglesita y cerusita [1].

La mayoría de los minerales de plomo también contienen plata, antimonio, arsénico y bismuto. La plata es un componente económicamente importante de los concentrados de plomo misma que puede estar presente como argentita (Ag_2S), pero más comúnmente presente en asociación con minerales de antimonio, cobre y arsénico como pirargirita (Ag_3SbS_3), proustita (Ag_3AsS_3), freieslebenita ($(\text{Pb,Ag})_8\text{Sb}_5\text{S}_{12}$), polibasita ($(\text{Ag,Cu})_{16}(\text{Sb,As})_2\text{S}_{11}$), y tetraedrita ($(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) en la que la plata puede sustituir parcialmente al cobre. La presencia de oro también es común y puede ser de valor ya que se recupera con la plata [1].

Los depósitos de plomo son en un 75% mixtos cinc-plomo, en un 20% predominantemente plomo y el resto asociados a minerales de cobre y otros. Existe una asociación natural de la plata con los minerales de plomo, tanto es así que el 70% de la plata se recupera en el proceso del plomo [8].

2.2. El plomo y su toxicidad

Los efectos del plomo en la salud humana y su impacto en el medio ambiente han sido una preocupación importante para la sociedad durante mucho tiempo, y se han investigado más a fondo que para la mayoría de los otros metales. Esto ha llevado al desarrollo de regulaciones que controlan la industria del plomo en la mayoría de los países desarrollados, e influye en gran medida en el diseño y la operación de las plantas de procesamiento de plomo.

La ingestión es el principal medio de absorción de plomo en el torrente sanguíneo, la absorción a través de la piel o en los pulmones es menor, y el plomo inhalado en el polvo generalmente se expulsa de los pulmones en la mucosa y se absorbe en el



estómago. Los seres humanos adultos absorben entre el 5 y el 15 % del plomo ingerido y generalmente retienen menos del 5% de la cantidad absorbida.

Debido a las diferencias metabólicas, los niños pequeños absorben más plomo ingerido en alrededor del 30 al 40 %. El plomo compite con varios elementos esenciales (hierro, calcio y zinc) y las deficiencias dietéticas en estos elementos aumentarán la absorción de plomo, una nutrición adecuada es esencial para minimizar el riesgo. Una vez absorbido, el plomo se deposita en el tejido mineral como los huesos y los dientes, en algunos tejidos blandos como el hígado, los riñones y el cerebro, y algunos se retienen en el torrente sanguíneo. En condiciones como la osteoporosis, enfermedades crónicas, embarazo y lactancia, el plomo puede liberarse de los huesos al torrente sanguíneo [1].

Los impactos de los altos niveles de exposición al plomo pueden ser graves, con una ruptura masiva del sistema nervioso (encefalopatía) e insuficiencia renal. Los impactos del plomo en la salud humana a niveles más bajos de exposición son la neurotoxicidad y algunos efectos renales [1].

El efecto sobre el desarrollo infantil ha sido una preocupación particular para la sociedad y ha habido muchos estudios epidemiológicos relacionados con los efectos de la exposición al plomo, como los problemas psicomotores, cognitivos y conductuales. A continuación, se muestran los principales efectos en la salud por exposición al plomo en la Tabla 7.

Tabla 7. Efectos en la salud por una alta exposición al plomo [1].

Efecto en la salud	Valor de exposición
Letalidad	Niños: $BLL > 125^{\mu g} / dL$ Adultos: $BLL > 300-400^{\mu g} / dL$
Encefalopatía	Niños: $BLL > 80^{\mu g} / dL$ Adultos: $BLL > 100^{\mu g} / dL$
Cólico	$BLL: > 60-100^{\mu g} / dL$
Toxicidad renal	Exposición prolongada: $> 60^{\mu g} / dL$
Anemia	$BLL > 50^{\mu g} / dL$
Desempeño neuroconductual	$40-50^{\mu g} / dL$
Reproducción masculina	Cambios sutiles arriba de $40^{\mu g} / dL$
Reproducción femenina	Aborto espontáneo a alta exposición Efectos sutiles posibles a $15-30^{\mu g} / dL$



La medición del plomo óseo es el indicador más definitivo, pero es bastante difícil de evaluar e interpretar. En consecuencia, el nivel de plomo en sangre (BLL) se utiliza como el principal indicador de exposición, normalmente se expresa en microgramos por decilitro de sangre y se puede medir a partir de muestras de pinchazos en los dedos como una pantalla de primer orden o de muestras de sangre extraídas. La BLL para la población general, basada en los efectos en los niños, se ha reducido progresivamente de 55 $\mu\text{g}/\text{dL}$ antes de 1970 a 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en 1991, estos niveles a menudo se consideran "límites de envenenamiento".

La exposición a metales asociados también puede ser significativa y los valores límite umbral (TLV) relevantes enumerados por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA) y las Conferencias Americanas de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) se dan en la Tabla 8 [1].

Tabla 8. Valor límite de exposición a metales [1].

Elemento	Máximo plomo en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Plomo	50
Antimonio	500
Arsénico	10
Bismuto	500
Cadmio	10
Cobre	200
Selenio	200
Telurio	100
Talio	100
Zinc	5,000

Las normas para proteger la vida acuática se dan como 65 $\mu\text{g}/\text{L}$ para los sistemas de agua dulce y 210 $\mu\text{g}/\text{L}$ para los sistemas de agua salada. Los efluentes líquidos se procesan comúnmente por neutralización de cal para precipitar metales, con el objetivo de niveles de pH del orden de nueve a diez [1]. Las normas típicas de descarga de efluentes se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Normas típicas de descarga de efluentes [1].

Elemento	Límite típico (mg/L)
Plomo	0.2
Zinc	1.5
Cobre	0.3
Cadmio	0.03



Manganeso	0.5
Arsénico	0.25
Mercurio	0.01
Selenio	0.02
Talio	0.01
Cloro	250
Flúor	2

Protección a la salud

Los controles están dirigidos principalmente a limitar el contenido de plomo del aire al que están expuestos los trabajadores. También se aplican estándares de limpieza y el monitoreo de todos los trabajadores expuestos es obligatorio, lo que implica determinaciones regulares de plomo en la sangre y evaluación de registros para determinar tendencias.

Algunas medidas a nivel industrial son las siguientes:

- Las muestras personales y de área generalmente se toman cada ocho horas, el análisis de la muestra se realiza por absorción atómica. Los análisis de orina se realizan periódicamente y los niveles de plomo en sangre se controlan al menos cada seis meses.
- Si la determinación del nivel en sangre más reciente de un empleado es igual o superior a 40 microg/100 g de sangre completa, el control se repite al menos cada dos meses hasta que dos muestras de sangre consecutivas muestren un nivel de plomo en sangre por debajo de 40 microg/100 g [9].

2.3. Metalurgia extractiva

La metalurgia integra aquellos procesos industriales dedicados a preparar, tratar física o químicamente y producir metales puros o aleaciones. Contempla el ciclo completo, desde la extracción del metal en el yacimiento. Así, existen distintas técnicas metalúrgicas según el metal o el proceso empleado. La pirometalurgia y la hidrometalurgia son las técnicas más comunes [10].

2.3.1. Pirometalurgia industrial

Es una rama de la metalurgia extractiva centrada en obtener y refinar los metales a través del calor. Así, se extrae el metal del mineral separando la ganga (el material que se descarta al extraer la mena del yacimiento) para purificarlo. Las principales operaciones de la pirometalurgia son el secado, la calcinación, la tostación, la fusión



y el refinado. En los procesos pirometalúrgicos se manejan temperaturas muy altas, que rondan los 950°. La energía se obtiene principalmente del carbón.

Entre las ventajas de la pirometalurgia encontramos que permite procesar cantidades muy grandes de mineral, que las velocidades de reacción son muy altas y que es un proceso fácil de controlar con el equipo adecuado. Además, la pirometalurgia es el tratamiento más indicado para aquellas materias primas más complejas y heterogéneas. Sin embargo, esa reacción tan rápida tiene como consecuencia materiales impuros, por lo que en ocasiones es necesario repetir el proceso, lo que redundaría en un mayor gasto de energía. Como consecuencia de este elevado consumo, la pirometalurgia resulta muy contaminante. Por esta razón se suele utilizar sólo para minerales de alta ley [10].

2.3.2. Hidrometalurgia industrial

Es una rama de la metalurgia que se centra en la extracción y recuperación de los elementos de interés a través de soluciones líquidas, acuosas y orgánicas, empleando la lixiviación. Es decir, el metal puro se extrae a partir de reacciones químicas en la solución que lo contiene. Se opera con temperaturas bajas y presiones de hasta 5,000 kPa.

La hidrometalurgia es un proceso más sencillo que la pirometalurgia, además de mucho menos contaminante. En la parte negativa se encuentra la alta acidez de trabajo y que, en algunos casos, se generan residuos tóxicos. Asimismo, es un proceso menos eficaz porque se usan temperaturas bajas, lo que afecta a las tasas de reacción química [10].

2.4. Procesos para la producción de plomo por la vía pirometalúrgica

La industria de fundición de plomo se divide ampliamente en fundiciones primarias y secundarias (Figura 1), que producen lingotes de plomo crudo, y refinadoras, eliminando las impurezas de los lingotes crudos para lograr el grado de mercado de plomo refinado según lo establecido por la Bolsa de Metales de Londres o el cliente. Las refinadoras pueden estar directamente asociadas con las operaciones de fundición o pueden ser operaciones independientes separadas, tomando lingotes crudos de las fundiciones. Un enfoque eficiente es que una fundición primaria se encuentra en un sitio minero y la refinadora se encuentra cerca de los mercados finales de plomo refinado. La refinación de lingotes primarios es más compleja que para lingotes secundarios, y la mayoría de las refinadoras independientes tienen la capacidad de manejar lingotes primarios. La refinación secundaria puede ser

relativamente simple con pocas impurezas para eliminar, y generalmente es parte de la fundición secundaria [1].

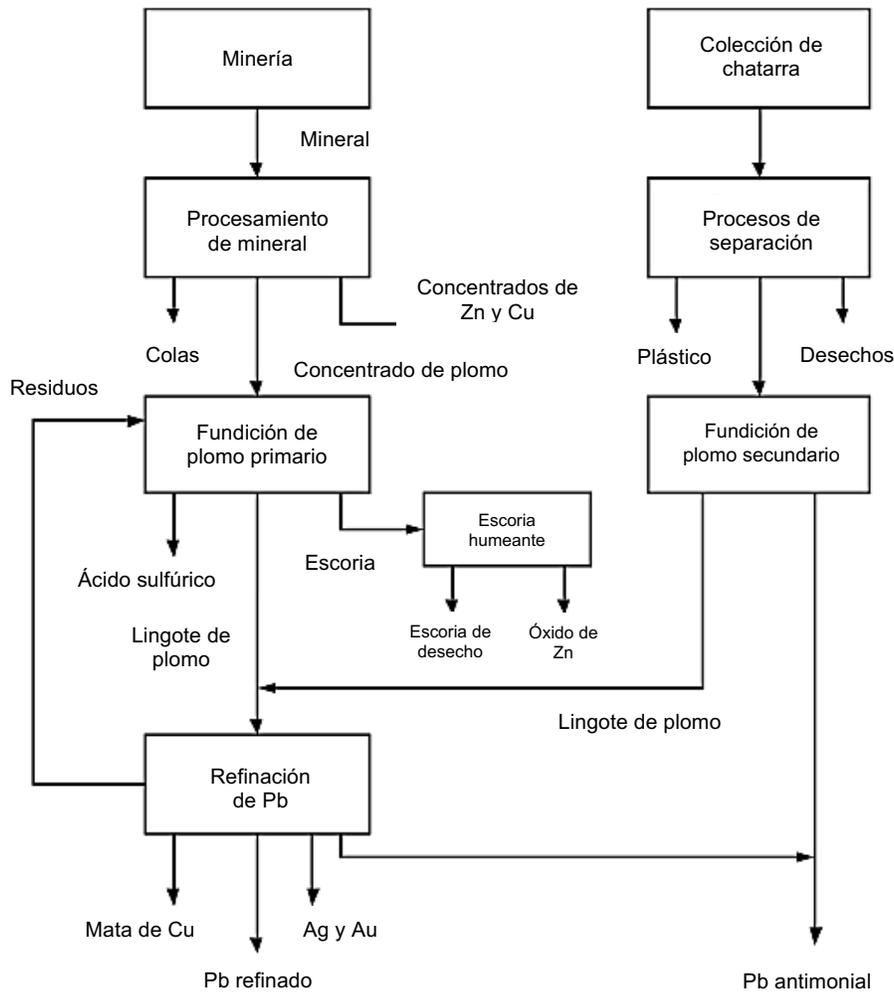


Figura 1. Diagrama del proceso de extracción de plomo [1].

Las fundiciones primarias a menudo se asocian con las principales operaciones mineras, pero generalmente están ubicadas en el centro de los principales centros industriales. Debido a los problemas ambientales asociados con los sitios de fundición de plomo en el pasado, será muy difícil en el futuro obtener licencias para la construcción de nuevos sitios de fundición de plomo primario. Como resultado, ha habido muy pocas fundiciones primarias nuevas en los últimos 20 a 30 años. Esto se ve reforzado por el hecho de que la fundición primaria de plomo ha sido estática durante ese período, por lo que no ha habido necesidad de capacidad adicional. Es probable que este enfoque continúe, y las fundiciones primarias

existentes tenderán a actualizarse o reemplazarse con tecnología mejorada en los sitios existentes.

La fundición secundaria de plomo tiende a ubicarse alrededor de los principales centros de población y el suministro de baterías de desecho, debido al costo relativamente alto asociado con el transporte de baterías usadas. Las tecnologías de fundición secundaria utilizadas también son adecuadas para operaciones a escala relativamente pequeña en comparación con las fundiciones primarias, que pueden beneficiarse significativamente de las economías de escala.

El balance de los flujos de plomo metálico para la industria total de plomo se ilustra en la Figura 2, con el ancho horizontal de las barras que representa el tonelaje anual de metal producido y utilizado. Esto ilustra el nivel relativamente alto de producción mediante el reciclaje secundario de plomo en comparación con el nuevo plomo de la producción minera. El nuevo plomo esencialmente informa a un creciente inventario de baterías de plomo-ácido y otros usos de metales, y a las pérdidas del sistema como usos dispersivos. El efecto de inventario refleja tanto la creciente demanda de baterías como la vida útil de la batería antes de que se deseché y recicle [1].

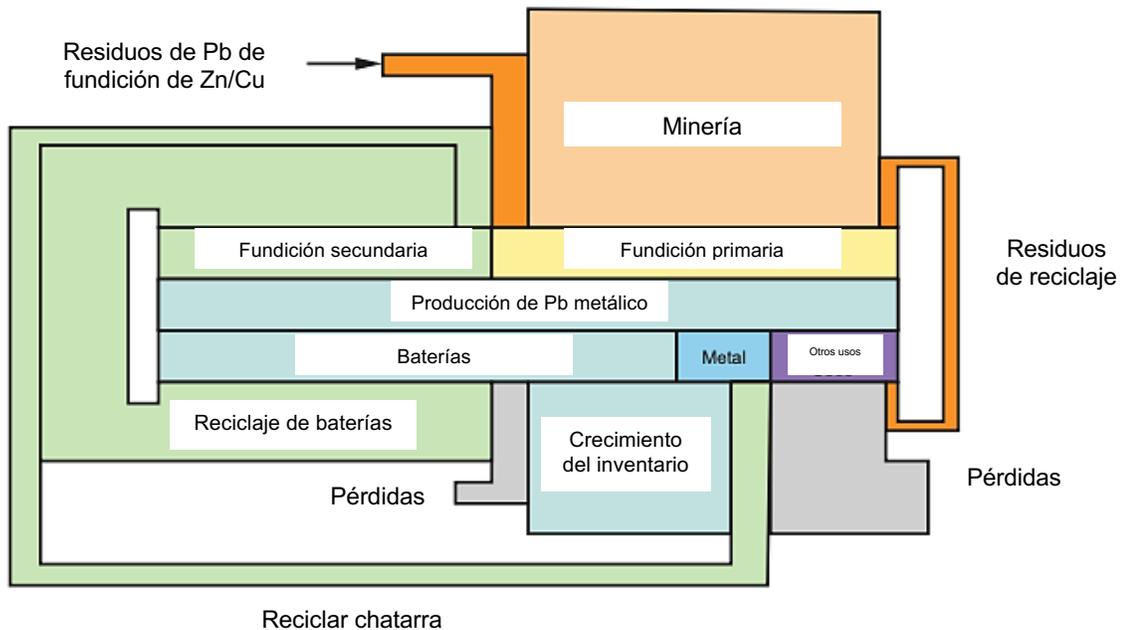


Figura 2. Ciclo del plomo metálico [1].

Fundición primaria

La fundición primaria de plomo se basa en gran medida en el tratamiento de concentrados de sulfuro de plomo (galena). Se utilizan varios procesos, pero ha predominado la tecnología tradicional de planta de sinterización-alto horno (como se ilustra en la Figura 3).

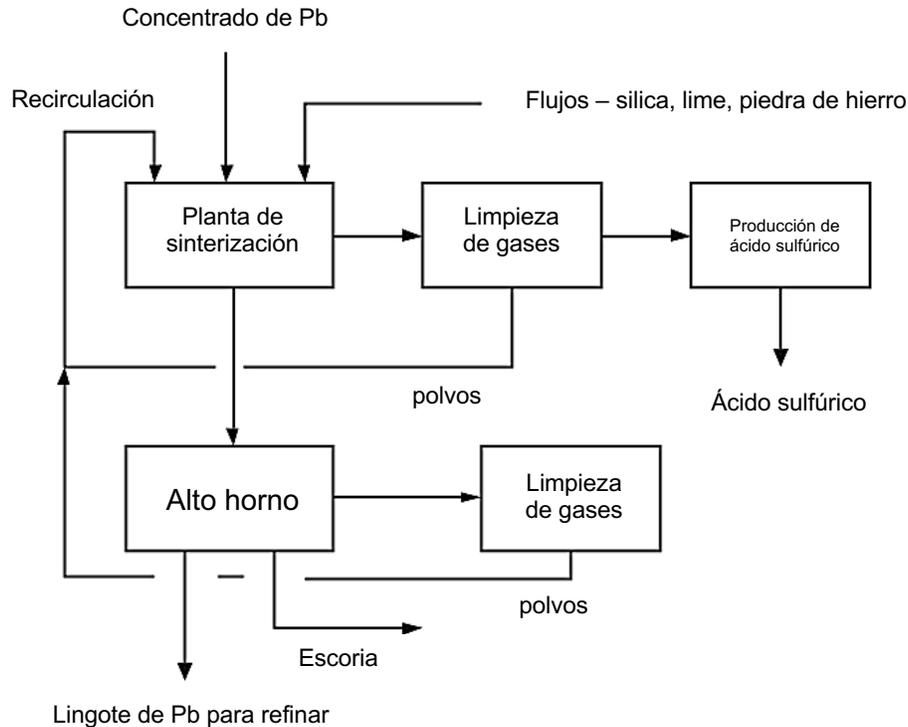


Figura 3. Diagrama de proceso planta de sinterización-alto horno [1].

La planta de sinterización elimina el azufre y produce un material aglomerado con alimentación de plomo y flujos presentes como óxidos, que posteriormente se reduce a metal de plomo en el alto horno utilizando coque metalúrgico. Los lingotes de plomo crudo se refinan ya sea por el proceso térmico, que separa individualmente las impurezas, o por el proceso de electrorrefinación, para dar un plomo refinado con menos del 0.01 % de impurezas totales.

Los desarrollos de procesos más recientes se han aplicado a la fundición directa en la que la eliminación de azufre y la reducción de óxido tienen lugar en una unidad, lo que permite utilizar el calor de la oxidación de sulfuro y, por lo tanto, mejorar la eficiencia térmica general del proceso. Los procesos de fundición directa evitan el uso de coque metalúrgico como combustible y reductor de costo relativamente alto. El incentivo para cambiar de la tecnología de planta de sinterización-alto horno también ha sido impulsado por problemas ambientales, ya que estas operaciones son difíciles de contener y pueden contribuir con emisiones significativas de partículas de plomo a la atmósfera [1].

Los principales procesos de fundición de plomo primario en uso son:

1. La combinación de planta de sinterización y alto horno
2. El proceso de fundición imperial (también una planta de sinterización con alto horno superior cerrado para la coproducción de zinc)



3. Procesos de fundición directa:

- Proceso Kivcet
- Proceso QSL
- Procesos ISASMELT y Ausmelt
- Proceso de Boliden
- Proceso KALdo TBRC

La mayoría de las fundiciones primarias también aceptan proporciones variables de materiales secundarios como parte de su alimentación. Estos alimentos adicionales son comúnmente en forma de residuos de plomo, que contienen óxido de plomo, así como sulfatos. Estos residuos pueden surgir del procesamiento de chatarra o de otra extracción de metales como el zinc y el cobre, que dan lugar a humos y residuos de lixiviación que contienen altos niveles de plomo. Estos materiales pueden representar alrededor del 10% de la producción total de plomo de la planta de sinterización, y la producción de lingotes de plomo del alto horno puede ser significativamente mayor debido a la alimentación directa al horno, particularmente si esos materiales contienen plomo metálico.

La refinación es una parte importante y separada de la fundición primaria de plomo, y se utilizan dos enfoques diferentes que involucran procesos de separación pirometalúrgica o electrorrefinación. Los métodos pirometalúrgicos implican la oxidación de impurezas seleccionadas de lingotes de plomo fundido para su recolección como escoria, o la precipitación de impurezas para formar una escoria o corteza mediante la adición de reactivos y/o por cambios de temperatura. Por lo general, se aplican una serie de pasos para la eliminación de cobre, arsénico y antimonio, plata y metales preciosos, zinc, luego bismuto y, finalmente, impurezas menores residuales y reactivos de escoria mediante tratamiento con sosa cáustica. Las operaciones generalmente se llevan a cabo en crisoles calentados externamente o "hervidores", que contienen entre 100 y 300 t de plomo fundido. Una parte significativa de la operación de refinación implica la recuperación de subproductos, particularmente los metales preciosos plata y oro [1].

La electrorrefinación implica la transferencia de plomo de una lámina de ánodo impuro, a través de un electrolito a un cátodo de plomo de alta pureza. Los lingotes crudos, después de la eliminación de cobre, arsénico y antimonio, se funden en ánodos, que se colocan en celdas de tanque. El electrolito comúnmente utilizado en el proceso de Betts es una solución de fluorosilicato de plomo y ácido fluorosilícico libre. El plomo se deposita en láminas de inicio de plomo, que se retiran de las células y se funden en plomo refinado de alta pureza. Las impurezas están



contenidas en el ánodo y se recogen y procesan por métodos pirometalúrgicos para la recuperación de metales preciosos, bismuto y cobre.

Producción secundaria de plomo

El plomo secundario se obtiene principalmente de baterías de plomo-ácido de desecho, pero también de chatarra metálica procesada, como láminas y tuberías. Las operaciones secundarias se caracterizan por plantas relativamente pequeñas en comparación con las fundiciones primarias, y están dimensionadas para manejar la disponibilidad de chatarra dentro de un área local. Esto está determinado por la economía de la recolección de baterías de chatarra y el transporte a la operación secundaria, y se deduce que las plantas secundarias más grandes se encuentran en las áreas de alta densidad de vehículos.

El primer paso en el procesamiento secundario de plomo es la rotura y separación de las baterías de desecho. En este paso, las baterías se trituran o desintegran, luego los componentes de la batería se separan por métodos físicos en componentes metálicos, pastas que contienen óxidos de plomo y sulfato, plásticos de cajas de baterías y separadores de placas, y ácido de batería de desecho, que generalmente se neutraliza con cal para formar yeso. El polipropileno recuperado de las cajas es un material valioso y se puede reciclar para su reutilización. Los componentes metálicos pueden simplemente fundirse para recuperar plomo, en gran parte contaminado con antimonio, pero las pastas de batería se tratan en un proceso de fundición en el que se reducen, utilizando un combustible a base de carbono, a lingotes de plomo y una escoria de desecho [1].

Los procesos utilizados para la fundición secundaria incluyen los siguientes:

- Alto horno
- Horno de reverberación
- Horno rotativo corto
- Horno rotativo
- Reactor de baño de escoria de lanza sumergida (por ejemplo, procesos isasmelt o ausmelt)
- Hornos eléctricos

Se requiere un poco de refinación de lingotes secundarios para la eliminación de antimonio, arsénico, cobre y estaño. Esto generalmente se hace en hervidores utilizando técnicas de refinación pirometalúrgica. El plomo secundario se recupera como "plomo blando" o como plomo "duro" o antimonial. Los componentes metálicos de las baterías de automóviles, como las rejillas de placas y los postes,



pueden estar hechos de aleaciones de plomo antimonial que contienen hasta un 10% de antimonio, pero generalmente menos del 3%. Esto proporciona la fuente de antimonio en el plomo secundario, pero se puede controlar hasta cierto punto mediante el procesamiento por separado de chatarra metálica y no metálica. Existe una tendencia al uso de aleaciones de plomo de calcio en lugar de antimonio para baterías selladas, lo que reduce significativamente la cantidad de plomo antimonial producido por las fundiciones secundarias [1].

2.5. Pirometalurgia vs hidrometalurgia

La mayoría de los procesos de producción mundial de plomo se basan en el proceso pirometalúrgico. El polvo rico en plomo y las emisiones de los gases emanados de las plantas y la dilución de gases de SO_2 son problemas de gran dificultad, que contaminan el entorno natural, deterioran el entorno operativo y los procesos anticontaminantes son costosos y por lo general, dicho proceso requiere que los minerales de sulfuro de plomo tengan un grado más alto, es decir, una mayor ley de mineral. La flotación es un método para conseguirlo pero durante la flotación, es necesario agregar una gran cantidad de depresor para inhibir el sulfuro de zinc que acompaña al sulfuro de plomo, lo que aumenta el costo de los reactivos de flotación.

Por lo tanto, existen motivos para desarrollar vías alternas que permitan producir plomo y los métodos hidrometalúrgicos de plomo son una buena opción, debido a que tienen las ventajas de producción principalmente de plomo puro, respeto al medio ambiente y baja inversión de capital con costo operativo, gracias al uso de agentes de lixiviación como el medio ácido y sales inorgánicas. Estos procesos resultan ser más selectivos en comparación con los métodos pirometalúrgicos y no existe ningún requisito especial para el grado mineral [11, 12, 13].

2.6. Hidrometalurgia

Los métodos hidrometalúrgicos para la recuperación del plomo de sus concentrados están frecuentemente divididos en las siguientes etapas:

- a) Pre-tratamiento: la etapa de conversión produce compuestos adecuados para la disolución.
- b) Lixiviación: la disolución de concentrados o formación de compuestos.
- c) Tratamiento de la solución: remover impurezas y precipitación de compuestos del plomo.
- d) Recuperación: etapa de producción del plomo metálico [14].



2.6.1. Proceso de Lixiviación

Es la disolución de un metal de interés en un reactivo adecuado. Uno de los beneficios de la lixiviación es que es aplicable en operaciones de baja escala, lo cual no representa costos tan elevados. Otra ventaja es que el proceso se puede llevar a cabo con rapidez. Se produce con la ayuda de una solución lixivante que es una solución acuosa de un ácido, una base o una sal. En ocasiones se utilizan reactivos adicionales con el objeto de la reacción de disolución. Los más comunes son los agentes oxidantes [15].

La lixiviación de minerales y compuestos metálicos se ha vuelto cada vez más importante en la producción de metales no ferrosos. Las condiciones que se necesitan para que ocurra la lixiviación se determinan utilizando la termodinámica. Los diagramas de fase se utilizan a menudo para determinar el entorno de solución que será necesario para la lixiviación. Debido a que la lixiviación implica solubilización, el diagrama muestra las condiciones necesarias para la extracción. La extracción a través de la lixiviación es posible en regiones con especies estables y solubles.

También es importante tener en cuenta que si el potencial está por encima de la línea de estabilidad del agua, el agua se descompondrá para formar gas oxígeno. Si el potencial está por debajo de la línea de estabilidad del agua inferior, el agua se descompondrá en gas hidrógeno e iones de hidróxido. Por lo tanto, solo las regiones potenciales estrechas son prácticas para la extracción más acuosa. Los diagramas de fases y la termodinámica son herramientas importantes para evaluar la viabilidad de la lixiviación bajo un conjunto prescrito de condiciones. Sin embargo, distinguir entre lo que es posible en el contexto de la lixiviación y lo que es práctico desde el punto de vista de la ingeniería requiere una evaluación de las tasas aplicables, la cinética química, electroquímica y transporte de masas. La lixiviación se puede llevar a cabo de diferentes maneras, las cuáles se presentan en la tabla 10 [15]:

Tabla 10. Procesos de lixiviación [15, 16, 17].

Proceso de lixiviación	Descripción
Lixiviación "in situ"	Implica la oxidación mineral sin la eliminación de material, utiliza material con la porosidad adecuada, la cuál es natural o inducida por medios como los explosivos. Se puede realizar de forma segura si los niveles freáticos y las formaciones geológicas son apropiados. La lixiviación in situ reduce los costosos costos de excavación y recuperación.



<p>Lixiviación en vertederos</p>	<p>Se caracteriza por una lixiviación de mineral de muy baja ley. Se trata de material de pasada que no ha sido sometido a una trituración o procesamiento significativo. El material se vierte sobre los bordes del terreno minero bajo el cual se ha colocado un revestimiento. Las soluciones de lixiviación se aplican en la parte superior y se dejan filtrar a través del vertedero. Algunos vertederos tienen cientos de pies de profundidad y pueden tardar décadas en lixiviarse.</p>
<p>Lixiviación en pilas (montones)</p>	<p>Es realizada en minerales de baja a media ley. El tiempo de lixiviación para minerales como óxidos simples puede ser de 45 días y para los minerales de sulfuro es de 600 días. Cada ascensor o sección vertical tiene menos de 10 m de altura. Los elevadores se construyen sobre una base, subrayador (30 cm grosor), revestimiento o geomembrana (grosor 2 mm) y overliner (grosor 30 cm). El mineral se tritura a un tamaño entre 25 y 8 mm con el tamaño más común cerca de 12.5 mm. La solución que se aplica al montón extrae el metal deseado en la solución de lixiviación preñada (o cargada de producto) (PLS).</p>
<p>Lixiviación contracorriente</p>	<p>Se coloca cada uno de los espesadores con una elevación levemente mayor que la del espesador que lo precede de modo que el desbordamiento claro fluya de un espesador a otro por gravedad, la pulpa que era transferida por bombeo se desborda con una velocidad menor. Hay dos flujos separados de material en direcciones opuestas, la pulpa empobrecida que fluye sucesivamente hacia el final de la descarga del residuo y el cuerpo principal de la solución que se mueve en dirección opuesta, enriqueciéndose progresivamente.</p>
<p>Lixiviación en tanques agitados (agitadores)</p>	<p>El solvente y el material son reunidos en contacto íntimo por agitación, con separación subsecuente de la solución y de tizones impregnados. Tipo mecánico: los sólidos se mantienen en suspensión dentro de un tanque circular que tiene un propulsor en la parte inferior, que gira sobre un eje vertical central. El flujo</p>

	<p>circulatorio a alta velocidad previene la sedimentación y asegura la mezcla íntima y el contacto del sólido con el solvente. Agitadores de aire comprimido: funcionan por el principio de elevación de aire, introduciendo aire comprimido por la parte inferior, la agitación violenta causa la aireación excelente.</p>
<p>Lixiviación en tanques agitados a presión y temperaturas elevadas (autoclaves)</p>	<p>La mayoría de las veces, se realiza utilizando altas presiones de gas oxígeno (5-50 atm). También se utilizan temperaturas elevadas, generalmente cercanas a 200 °C. Como resultado de la temperatura y presión elevadas, la tasa de extracción de metales es rápida. El tiempo promedio de residencia es de 2 h. La disolución es favorecida por el aumento de la temperatura y de la presión, particularmente cuando la solución debe ser asistida por la presencia de una fase gaseosa.</p>

Permeabilidad y flujo de fluidos a través de lechos de partículas

La permeabilidad es la capacidad de un medio para conducir un fluido. A medida que el fluido viaja a través de un lecho de partículas, hay un tremendo arrastre debido a las superficies sobre las que fluye el fluido. En la Figura 4 se muestra un diagrama esquemático del flujo a través de un lecho de partículas. Cuando se aplica solución a un lecho de partículas, algunas regiones se saturan con líquido. Otras regiones tienen vacíos, la solución fluye más rápidamente a través de regiones que tienen una buena permeabilidad [16].

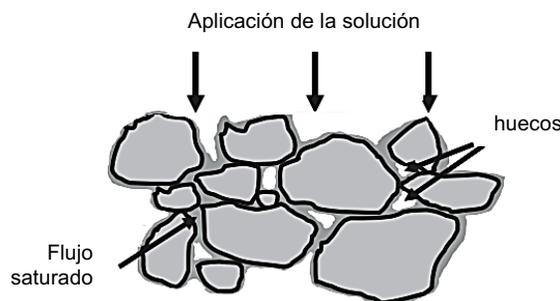


Figura 4. Aplicación de la solución y flujo a través de las partículas [16].



El caudal es extremadamente sensible a las variaciones en el tamaño de los poros, que es una función del tamaño de partícula y la distribución del tamaño de partícula. Por lo tanto, a medida que disminuye el tamaño de las partículas, hay una tremenda disminución en la tasa de flujo a través de un lecho de partículas.

2.6.2. Procesos de extracción de metales disueltos

Son los procedimientos donde solo se extraen el metal o metales requeridos de la solución, y las impurezas permanecen en la solución, después se retiran de la solución antes de su recirculación al circuito de lixiviación utilizando un procedimiento diferente. A continuación, en la Tabla 11 se describen los procesos de extracción de metales disueltos [16].

Tabla 11. Procesos de extracción de metales disueltos [16].

Proceso de extracción	Descripción
Extracción líquido-líquido o solvente	Se realiza utilizando un extractante orgánico que se disuelve en una fase orgánica. Se permite que la fase orgánica entre en contacto con una fase acuosa que contiene el metal disuelto o el complejo de iones metálicos. Se lleva a cabo utilizando un mezclador. El mezclador dispersa la fase orgánica en la fase acuosa como pequeñas gotas. La etapa de mezcla se interconecta con una etapa de sedimentación. La etapa de asentamiento permite la separación de las fases. La fase orgánica cargada se despoja en una solución acuosa concentrada. La fase acuosa a menudo requiere algún acondicionamiento. Los pasos de acondicionamiento a menudo incluyen aclaraciones para eliminar las partículas.
Intercambio iónico	Los grupos funcionales con capacidad específica de intercambio iónico se colocan dentro de los poros. Las cuentas porosas resultantes son capaces de cargar una gran cantidad de especies disueltas. Después de que se produce la adsorción, las cuentas se despojan de la especie cargada. La extracción se realiza utilizando una alta concentración de especies con carga similar. Las resinas de intercambio iónico se utilizan a menudo en columnas empaquetadas. A medida que la solución entra en la columna, el intercambio iónico comienza en la entrada.

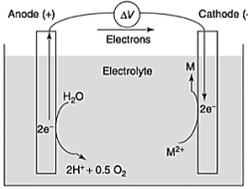
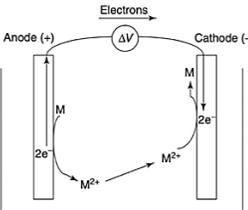
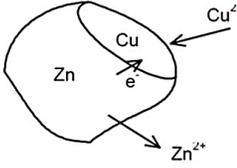


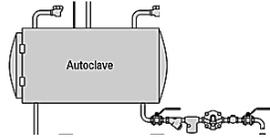
<p>Adsorción de carbón activado</p>	<p>El carbón activado a menudo se utiliza a contracorriente para maximizar la adsorción. El procesamiento a contracorriente permite que el carbono con la materia menos adsorbida entre en contacto con la solución que está más agotada. Hay varias opciones de procesamiento para el uso de carbón activado, como el proceso de carbono en columna (CIC), carbono en pulpa (CIP) y carbono en lixiviación (CIL).</p>
<p>Ultrafiltración u ósmosis inversa</p>	<p>La ultrafiltración es el proceso de filtrar el soluto de una solución a través de una membrana a alta presión. Las soluciones iónicas tienen una fuerza motriz osmótica significativa para adquirir moléculas de soluto adicionales. La vía para la transferencia de iones puede ser una membrana, estas tienen poros pequeños que permiten selectivamente el transporte de iones. Se requieren altas presiones para revertir el proceso osmótico y expulsar las moléculas de disolvente a través de las membranas. Este proceso se llama ultrafiltración porque el disolvente se filtra de la solución. La presión requerida es la presión osmótica. La presión osmótica del agua de mar a 25 °C es de 25 atm o 25 MPa.</p>
<p>Precipitación</p>	<p>La precipitación es un método común para concentrar el contenido de metal y purificar soluciones. Muchos iones metálicos divalentes, son relativamente solubles a niveles de pH bajos e intermedios. La precipitación se puede lograr utilizando gases y/o agua, también se practica a través de la reducción de contacto para producir metal.</p>

2.6.3. Procesos de recuperación de metales

Son todos aquellos procesos que forman la parte final para la obtención y refinación de metales en forma sólida, para ello se hace uso de la electroquímica, la cuál relaciona dos conceptos dentro de los procesos de recuperación de metales, las reacciones químicas y la energía eléctrica. A continuación, se describen los principales procesos de recuperación de metales en la Tabla 12.

Tabla 12. Procesos de recuperación de metales [16].

Proceso de recuperación	Imagen	Descripción
Electroobtención		<p>La electroobtención es el proceso electrolítico de "ganar" o recuperar metal disuelto utilizando un potencial aplicado. La electroobtención utiliza un potencial aplicado para impulsar las reacciones electroquímicas en la dirección deseada. Una fuente de alimentación externa suministra el potencial y la corriente. Se utiliza un ánodo inerte para completar el circuito y la contra reacción necesaria para la recuperación de metales. El metal se recupera en el cátodo. Debe existir un electrolito o medio conductor de iones entre el ánodo y el cátodo.</p>
Electrorrefinación		<p>Utiliza el metal deseado de pureza intermedia (95-99.5%) como ánodo. El proceso consiste en disolver electrolíticamente el metal deseado del ánodo. El metal disuelto se electrodeposita en el cátodo. La electrorefinación da como resultado un metal depositado de mayor calidad. La diferencia de potencial entre las dos reacciones de media celda es cero en la electrorefinación. En consecuencia, no se consume energía para superar las diferencias en los potenciales de media celda.</p>
Cementación o reducción de contacto		<p>El principio básico de la cementación es la reducción del contacto. En otras palabras, los electrones de un metal menos noble se entregan a un metal disuelto más noble. El intercambio de electrones se realiza a medida que el ion</p>

		de metal más noble entra en contacto con la superficie de metal menos noble.
Recuperación mediante reactivos reductores disueltos		Los metales se pueden recuperar de la solución utilizando una amplia variedad de compuestos reductores. Un agente reductor eficaz utilizado en la industria de los metales es el gas hidrógeno, se utiliza para recuperar metales en autoclaves donde es posible lograr altas presiones parciales de gas hidrógeno a temperaturas elevadas para acelerar el proceso de recuperación. El metal resultante consiste en partículas relativamente puras.

2.7. Procesos de lixiviación como alternativa para la obtención de plomo

1. Lixiviación electro generativa en solución con cloruro férrico regenerado ($FeCl_3$)

Las sal férrica se ha usado para el tratamiento de minerales, es un oxidante común y fácilmente disponible, los minerales lixiviados comúnmente por las sales férricas son los sulfuros.

El efecto de la concentración del cloruro férrico ($FeCl_3$) y la concentración de ión cloro (Cl^-) sobre la lixiviación electrogenerativa es similar al proceso de lixiviación tradicional, la temperatura de lixiviación afecta la lixiviación de galena influyendo en la polarización anódica [11].

a) Regeneración de Fe^{3+}

Las condiciones optimizadas para la regeneración de ión férrico (Fe^{3+}) en los experimentos de lixiviación posteriores se especifican de la siguiente manera: concentración de cloruro ferroso ($FeCl_2$) = 0.4 mol/L, concentración de ácido clorhídrico (HCl) = 4 mol/L, concentración de cloruro de sodio (NaCl) = 1.5 mol/L, densidad de corriente anódica = 1789 A/m², Relación inicial Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0, cantidad eléctrica = 3 Ah, velocidad de agitación = 400 rpm [11].

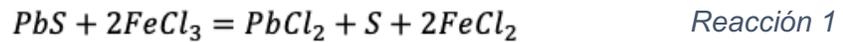
b) Lixiviación

Después de la regeneración de ión férrico (Fe^{3+}), se aplicó el electrolito a la galena de lixiviación, la suspensión se enfrió y filtró para separar la escoria y el cloruro de



plomo ($PbCl_2$), y el filtrado se electrolizó para regenerar ión férrico (Fe^{3+}) y así, continuar con el ciclo [11].

En la lixiviación de galena con ión férrico (Fe^{3+}) regenerado, los iones Fe^{3+} participaron en la reacción:

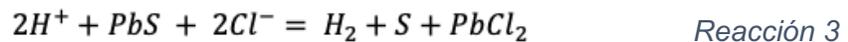
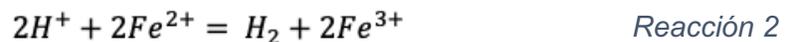


Se puede obtener cloruro de plomo con recuperaciones de plomo de 87.3% bajo las siguientes condiciones: temperatura= 90 °C, relación S/L= 40 g/L, tiempo= 12 min, velocidad de agitación= 600 rpm.

La tasa de lixiviación continuó disminuyendo a medida que aumentaba la relación S/L, la caída en la velocidad de lixiviación puede contribuir a la lenta velocidad de reacción causada por la disminución de la concentración de ión férrico (Fe^{3+}) que se aceleró con la existencia de más concentrado.

c) Ciclo

El ciclo de la regeneración de ión férrico (Fe^{3+}) y la lixiviación de la galena se puede representar mediante las reacciones 2 y 3. Por tanto, el funcionamiento eficiente de un ciclo se basa en el consumo de ión hidronio (H^+) [11].



2. Lixiviación selectiva de un mineral de galena-esfalerita por electro-oxidación en solución por ión férrico (Fe^{3+}) y cloruro de sodio ($NaCl$) y ácido clorhídrico (HCl)

Para la lixiviación se utilizó una celda electrolítica sin diafragma (7.5 cm x 5.5 cm x 5.5 cm), electrodo DSA (electrodo dimensionalmente estable, óxido de rutenio (RuO_2), óxido de iridio (IrO_2), electrodo de malla recubierto de óxido de estaño (SnO_2)) en el ánodo y el cátodo, se usó un electrolito (sistema $FeCl_2$ - $NaCl$) en solución de ácido clorhídrico (HCl), el electrolito se expuso al aire y el volumen de la solución se mantuvo en 100 mL (Figura 5).

La mezcla de galena-esfalerita se añadió a la región del ánodo de la celda electrolítica, donde el mineral reaccionará con Fe^{3+} y Cl^- para formar $[PbCl_4]^{2-}$ y posteriormente se electro-deposite plomo metálico sobre el cátodo. Se propuso un experimento de electrodeposición con el objetivo de acelerar la tasa de lixiviación

de plomo de la galena, utilizar la energía del cátodo y evitar que el Fe^{3+} se reduzca en el cátodo. Para el experimento de electrodeposición se llevó a cabo reemplazando el electrodo DSA con una placa de acero en el cátodo, el experimento de electrodeposición solo aceleraría la lixiviación de plomo de la galena y no cambiaría la lixiviación de zinc de la esfalerita [12].

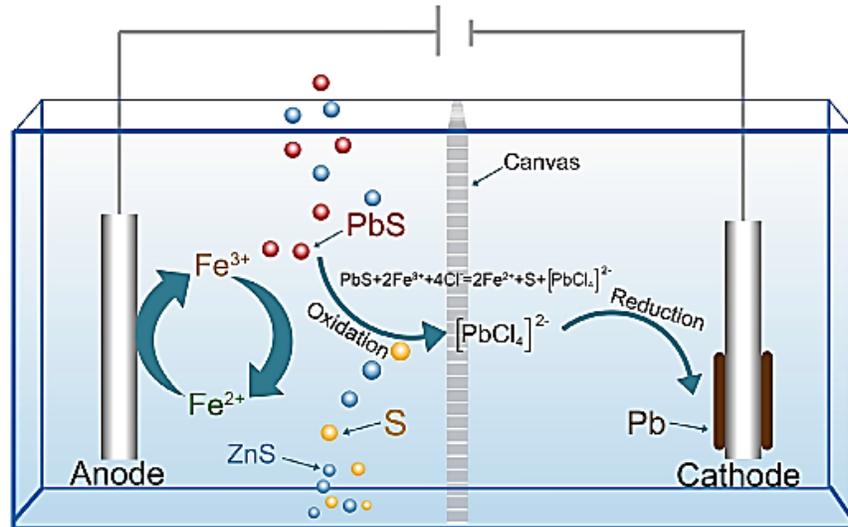


Figura 5. Celda electrolítica [12].

Se puede lograr una recuperación de plomo del 89.2-90.1% bajo las siguientes condiciones: tamaño de partícula= rango de $2\ \mu\text{m}$ a $200\ \mu\text{m}$ con $79.66\% < 100\ \mu\text{m}$, tiempo de reacción= 45 min, velocidad de agitación= 700 rpm, temperatura= $63\ ^\circ\text{C}$, densidad de corriente anódica= $989\ \text{A/m}^2$, potencial aplicado= 2.6 V - 3.2 V, $[\text{Cl}^-]= 4.3\ \text{mol/L}$, relación inicial $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}= 0$, $[\text{Fe}^{2+}]= 0.4\ \text{mol/L}$ (8 g), relación S/L= 0.03 g/mL, $[\text{H}^+]= 0.5\ \text{mol/L}$ [12].

Cuando se incrementó aún más la velocidad de agitación, la tasa de lixiviación de la galena casi no cambió. Cuando la velocidad de agitación era grande, la difusión de minerales ya no estaba limitada.

La tasa de lixiviación de galena fue mejor cuando el contenido de Fe^{2+} fue mayor que Fe^{3+} .

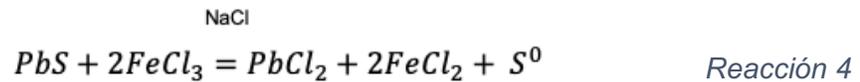
Cuando la concentración de H^+ era demasiado alta, el proceso de lixiviación ácida podía producir un gas nocivo conocido como ácido sulfhídrico (H_2S), aunque pequeña parte podría ser oxidada por el Fe^{3+} para producir S elemental, una gran cantidad de ácido sulfhídrico (H_2S) podría representar un peligro para el entorno operativo y contaminar el medio ambiente.



Cuando la concentración de H^+ en la solución era demasiado pequeña, el Fe^{3+} sufriría una reacción de hidrólisis, lo que afectaría la formación y detección del producto [12].

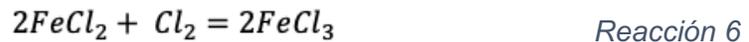
3. Lixiviación-electrólisis de cloruro férrico ($FeCl_3$) para la producción de plomo

Método alternativo lixiviando concentrado de sulfuro de plomo con una solución de cloruro férrico-cloruro de sodio ($FeCl_3$ - $NaCl$) para producir cloruro de plomo (Reacción 4) y posteriormente una electrólisis de sal fundida de cloruro de plomo para producir plomo metálico (Pb) y cloro (Cl_2) (Reacción 5), tratando 750 libras de concentrado por día y usando el cloro para regenerar el cloruro férrico ($FeCl_3$) para la solución de lixiviación (Reacción 6).



NaCl

Electrólisis



Un lote de 125 lb de concentrado de plomo se lixivia a aproximadamente $95^\circ C$ en 300 gal de solución (73 g/L de cloruro férrico ($FeCl_3$), 254 g/L de cloruro de sodio ($NaCl$) y ácido clorhídrico (HCl) para dar un pH de 0.3). Después de 15 minutos, la suspensión se filtra en un filtro prensa de placa y marco de polipropileno [9].

Se sopla aire a través de la torta de filtración después de cada filtración. La solución se transfiere a un cristizador de 400 gal donde se enfría a $20^\circ C$ para precipitar el cloruro de plomo. La suspensión se filtra. El cloruro de plomo se carga en bandejas y se seca en un horno eléctrico a $150^\circ C$ por 6 horas.

El cloruro de plomo seco se tritura y se coloca en una tolva de alimentación cerrada dentro de una campana de extracción. Cuando la solución en el tanque de preparación ha alcanzado los $70^\circ C$, se descarga en un tanque de 600 gal. La solución en el tanque se mantiene a $75^\circ C$; una corriente de este tanque, a 8 gal/min, circula a través de una torre de cloración para convertir cloruro ferroso a cloruro férrico. El cloruro de plomo seco se agrega a la celda electrolítica de 3000 amperios desde una tolva de alimentación. El baño inicial estaba compuesto por 834 libras de mezcla de sal con una composición de 25 % peso de cloruro de litio ($LiCl$), 32 % peso de cloruro de potasio (KCl) y 43% peso de cloruro de plomo ($PbCl_2$). El calor de la electrólisis mantiene la temperatura del electrolito en $450^\circ C$ y la temperatura

del metal de plomo en 400°C. El plomo metálico producido se extrae periódicamente de la celda y se descarga en un molde en una cámara de vacío. El cloro producido en la celda se extrae a través de una tubería de fibra de vidrio hasta una torre de cloración donde fluye a contracorriente de la solución de lixiviación gastada, convirtiendo así el cloruro ferroso (FeCl_2) en cloruro férrico (FeCl_3). La absorción de cloro es superior al 98% [9]. El diagrama del proceso se presenta en la Figura 6.

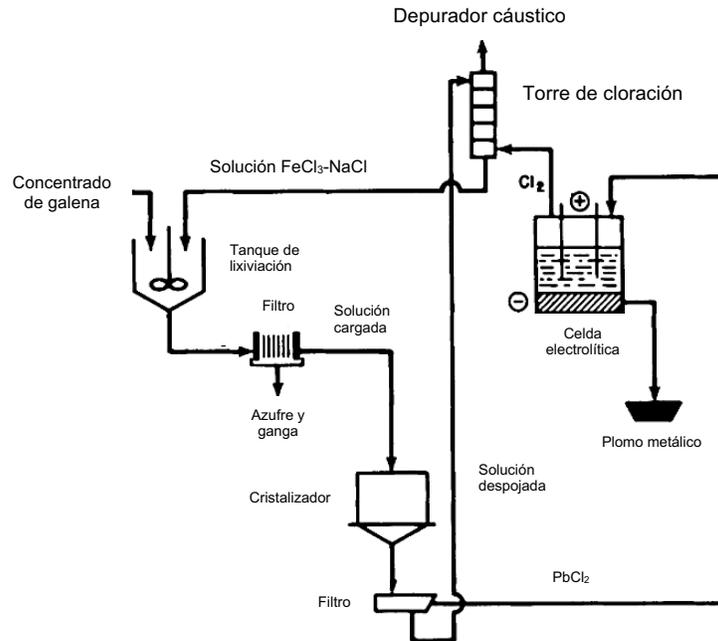


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de electrólisis de sales fundidas de lixiviación de cloruro férrico [9].

La extracción de plomo fue generalmente del 96 al 98%, el residuo de lixiviación contiene un 50% de azufre elemental, el resto está presente como sulfatos insolubles y sulfuros de hierro, cobre, zinc y plomo sin reaccionar. Los metales más electronegativos, como el cobre y la plata, están presentes en el producto de metal de plomo [9].

4. Lixiviación ácida en solución de ácido clorhídrico (HCl), cloruro de sodio (NaCl) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

Es un procesamiento hidrometalúrgico con el objetivo de recuperar plomo (Pb) y plata (Ag) de residuos hidrometalúrgicos de Zinc (Zn), el proceso es simple, fácil de implementar con mayor recuperación, rentable y respetuoso con el medio ambiente. El residuo generalmente contiene un plomo de baja calidad de un promedio de 8% y 300 a 500 g de plata (Ag) por 1 tonelada de residuo.



Las tasas de lixiviación de Pb y Ag pueden alcanzar recuperaciones de 94.75-96.6% y 82%, respectivamente al lixiviar bajo las siguientes condiciones: muestra de 10 g con 350 g/L de solución de cloruro durante 2 h, temperatura de 368.15 K, velocidad de agitación de 400 rpm, ácido clorhídrico (HCl) de 12 mL y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) de 15 mL como aditivo [18].

El exceso de cloruro de sodio (NaCl) es necesario para mantener una mayor tasa de extracción y asegurar suficientes reacciones, pero el exceso de cloruro de sodio no es económico en la práctica de producción industrial.

La alta temperatura puede aumentar el número de moléculas activadas y el coeficiente de difusión, la disolución del metal se puede mejorar.

Cuanto menor es el tamaño de partícula, más rápida es la disolución del metal, debido a que cuando el peso total se mantiene constante, la disminución del tamaño de las partículas puede aumentar el número y el área de contacto de las partículas con el fluido.

Una baja concentración de sólidos puede resultar en un mayor consumo y una gran circulación de líquido [18].

5. *Lixiviación de plomo por peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en solución de citrato trisódico (Na₃C₆H₅O₇) y acetato sodio (C₂H₃NaO₂)*

Las soluciones orgánicas son lixiviantes prometedores para la extracción de Pb rápida y ambientalmente sostenible a partir de minerales a bajas temperaturas, el problema es la escasa comprensión del mecanismo de lixiviación y la formación de fases de pasivación de la superficie.

Para la lixiviación con galena, un desafío es la baja solubilidad del plomo en muchas soluciones de lixiviación. Las soluciones de citrato y acetato tienen una fuerza de disolución relativamente alta en comparación con otras soluciones orgánicas, lo que las hace atractivas para la extracción de metales pesados como el Pb. Las soluciones de citrato y acetato tienen una toxicidad y corrosividad relativamente bajas y es poco probable que produzcan gases nocivos durante el proceso de extracción, pueden considerarse lixiviantes más ecológicos en comparación con las soluciones inorgánicas.

Los experimentos tienen el objetivo de estudiar el mecanismo de pasivación de la superficie y como afecta la lixiviación de la galena.

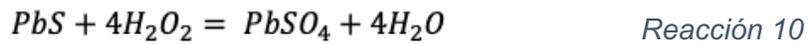
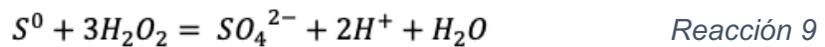
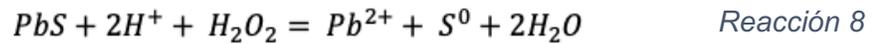
El peróxido de hidrógeno es un oxidante muy fuerte (potencial redox estándar de 1.77 V) contra el electrodo de hidrógeno estándar en condiciones ácidas. Se usa comúnmente en la lixiviación de sulfuros que contienen metales, ya que se adsorbe



en la superficie del mineral, recibe electrones del mineral y se descompone en agua (Reacción 7). Mientras tanto, el mineral se oxida y se disuelve [13].



La lixiviación de galena con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) conduce a la formación de azufre elemental (Reacción 8), que puede oxidarse más a sulfato (Reacción 9). El sulfato puede precipitar como anglesita ($PbSO_4$), y la reacción general es la Reacción 10.



Sin embargo, en presencia de ligandos complejantes de acetato o citrato, una cantidad significativa de Pb^{2+} puede estabilizarse como especies acuosas $Pb(CH_3COO)_n^{2-n}$ o $Pb(C_6H_5O_7)_n^{2-3n}$, evitando la precipitación de anglesita [13].

Aunque la mayor parte del azufre se convierte en iones sulfato durante la lixiviación, los iones sulfato precipitan como anglesita durante la lixiviación de acetato, durante la lixiviación de citrato, los iones sulfato permanecen en la solución sin la precipitación de anglesita y no se produce pasivación de la superficie de la galena.

La pasivación de la superficie por azufre elemental y óxido de Pb es el principal factor que impide la oxidación completa de la galena, la película delgada de óxido de Pb detectada es impermeable y bloquea la solución del núcleo de galena no lixiviado. La formación de anglesita ($PbSO_4$) durante el procesamiento a escala industrial de minerales de Pb es uno de los principales factores que limitan la recuperación de Pb y aumentando el costo de procesamiento (el proceso Fluobor, desarrollado por Doe Run y Engitec Technologies, utiliza fluoroborato férrico para extraer selectivamente Pb a $80^\circ C$, el proceso precipita la anglesita ($PbSO_4$) durante el paso de adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4), dando una extensión del procesamiento para liberar Pb de la anglesita.

a) Lixiviación en soluciones de acetato

Bajo la condición de $35^\circ C$, $53-106 \mu m$, tiempo de lixiviación de 6 h y solución a pH 4, la lixiviación con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 0.25 M, ácido acético 0.77 M y acetato de sodio trihidratado ($C_2H_3NaO_2$). $3H_2O$ 0.23 M, resultó en una extracción



de $36.8 \pm 1.9\%$ de Pb y produjo un 5.7% de anglesita (PbSO_4), mientras que la lixiviación con 0.84 M peróxido de hidrógeno (H_2O_2) dio una extracción de $29.2 \pm 1.9\%$ de Pb y precipitó un 68% de anglesita (PbSO_4). La extracción de Pb no superó el 55.6% incluso después de 1448 h de lixiviación.

A 0.25 M de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la anglesita (PbSO_4) precipitó como parches irregulares en la superficie de la galena (PbS) y a lo largo de los planos de escisión. Sin embargo, en los experimentos con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 0.84 M, todo el grano se incrustó en anglesita (PbSO_4), incluidas las reliquias de azufre elemental [13].

La cantidad de anglesita fue proporcional a la extracción de Pb y aumentó con el aumento de la temperatura, tiempo y concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

La galena es la fase más estable a valores bajos de Eh en todas las condiciones de pH, en las condiciones oxidantes-ácidas, la anglesita es más estable para la solución de $\text{pH} < 5$, por ello se forma la anglesita (PbSO_4) en todos los experimentos de lixiviación de acetato en presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

b) Lixiviación en soluciones de citrato

Se utilizó una solución de pH 7, ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 0.01 M, citrato trisódico ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) 0.99 M y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 0.79 M utilizando un tamaño de partícula de 53-106 μm y a 50°C . La lixiviación de galena en solución de citrato fue más rápida, con $44.1 \pm 1.5\%$ de extracción en solo 5 minutos. Gracias al fenómeno de efervescencia y el calentamiento del recipiente de reacción (la oxidación de sulfuros es un proceso exotérmico) la extracción máxima de $87.1 \pm 0.9\%$ de Pb se logró después de 96 h y después de 1488 h fue casi constante.

La ejecución de los experimentos con un tamaño de partícula más pequeño de menos de 38 μm logró como resultado la extracción completa de Pb en solo 6 h [13].

En el caso de la lixiviación de citrato, no se formó anglesita (PbSO_4) incluso en el experimento con la extracción de Pb más alta ($87.1 \pm 0.9\%$), fuerte capacidad complejante de los ligandos de citrato con Pb^{2+} , a pesar de la conversión de todo el azufre en sulfato cuando se utilizó cinco veces la cantidad estequiométrica del oxidante, no se detectó anglesita en el residuo lixiviado.

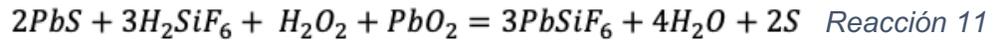
En el rango de pH de 6.5 a 8.5, el Pb existe como complejos de citrato de plomo soluble como $\text{Pb}_2(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2^{2-}$, $\text{Pb}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)^-$ y $\text{Pb}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2^{4-}$, explicando la alta extracción de Pb bajo estas condiciones en experimentos de lixiviación [13].



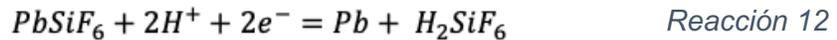
6. *Lixiviación de plomo en solución con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), óxido de plomo (PbO_2) y ácido fluosílico (H_2SiF_6)*

El proceso consta de la lixiviación oxidativa con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), óxido de plomo (PbO_2) y ácido fluosílico residual (H_2SiF_6) a $95^\circ C$ para producir $PbSiF_6$ y un residuo que tiene S elemental, posteriormente una electrodeposición de la solución de $PbSiF_6$ a $35^\circ C$ para producir 99.99% Pb y H_2SiF_6 y finalmente una extracción por solventes para recuperar S elemental dejando un residuo con Cu, Ag, entre otros.

La reacción general del proceso es la siguiente:



Se realiza una separación sólido líquido para obtener en solución el plomo fluocrocílico y el residuo S elemental; La electroobtención de $PbSiF_6$ acuoso se produce como se presenta a continuación:



El ácido fluosílico (H_2SiF_6) se recicla para lixiviar más galena (PbS), se puede promover la formación de óxido de plomo (PbO_2), para evitarlo se busca agregar porciones pequeñas de fosfato o compuestos arsénicos en la solución (electrolito) H_2SiF_6 , permitiendo hacerlo un proceso viable [19]. El proceso se describe en la Figura 7.

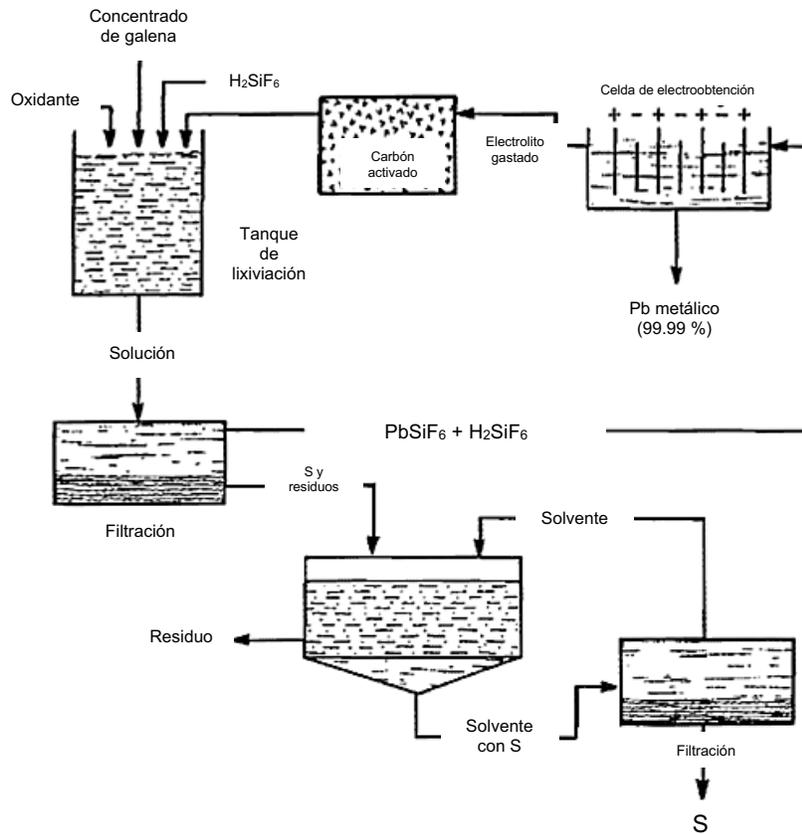


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso [19].

Las condiciones utilizadas para extraer hasta un 96% Pb son las siguientes: 20 g galena (PbS), 2 mL peróxido de hidrógeno (H₂O₂), 0.5 g óxido de plomo (PbO₂), 100 mL solución de ácido fluosilícico (H₂SiF₆), 60 minutos, 95°C. Algunos otros oxidantes usados son el aire, oxígeno (O₂), ozono (O₃), ácido nítrico (HNO₃), óxido de manganeso (MnO₂), se suelen usar individualmente o en combinación con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), generan menos del 80% de Pb de extracción.

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es más eficiente para iniciar la reacción de lixiviación y es más económico que óxido de plomo (PbO₂), por ello el óxido de plomo (PbO₂) se debe usar al final de la lixiviación para evitar la formación en sulfato de plomo (PbSO₄).

Previo electrólisis se agrega pegamento (glue) como aditivo (agente ligero) y lignosulfonato de calcio (lignosita) como refinador de grano y el H₃PO₄ fue agregado para prevenir un exceso de óxido de plomo (PbO₂) en ánodo. Para la electroobtención se utilizó una celda de 1 L por 8 hrs, 2 ánodos de titanio recubiertos de óxido de plomo (PbO₂), 1 Cátodo de hoja de Pb puro, temperatura de 35°C, densidad de corriente de 180-250 A/m² [19].

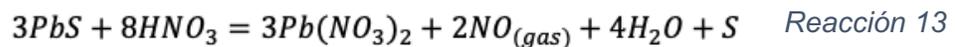


7. Lixiviación de plomo en solución de ácido nítrico (HNO_3)

El uso de ácido nítrico (HNO_3) como reactivo de lixiviación es limitado debido a que tiene un alto costo y existe poca disponibilidad de la tecnología apropiada para su regeneración, problemas que impiden su comercialización como método de tratamiento. Sin embargo, es atractivo para la recuperación de metales debido a que el ácido nítrico (HNO_3) es un fuerte agente oxidante que puede ser reciclado por adición de oxígeno directamente en la lixiviación o usando una oxidación externa de óxido nitroso (N_2O).

La lixiviación es muy rápida y forma S elemental en estado sólido, el proceso se realiza en una autoclave a altas presiones y temperaturas. La cinética y el mecanismo de disolución de sulfuros metálicos en ácido nítrico (HNO_3) así como la formación de S elemental y sulfatos son poco comprendidos, se dice que la producción de estos últimos aumenta con el incremento de la concentración de ácido.

La química de lixiviación de galena con ácido nítrico (HNO_3) está dada por:



El proceso de lixiviación puede recuperar el 91% de Pb en un tiempo de 10 horas con una concentración de 120g/L de ácido nítrico (HNO_3) (1.9 M), y un pH de 2.4. Se necesita una etapa posterior de purificación para remover el hierro y el zinc de la solución, pero también para remover los nitratos residuales, los cuales pueden interferir en el proceso posterior de electro-refinación [15].

8. Otros procesos de lixiviación de plomo

- a) Se ha estudiado la lixiviación a alta presión para lograr una separación y recuperación eficientes de minerales de sulfuro de plomo y zinc pero, el proceso está limitado por factores como los altos requisitos de control del proceso, la baja eficiencia de separación y el alto costo.
- b) Se ha estudiado la lixiviación de compuestos que contienen cloro, el cloro líquido se utilizó como agente de lixiviación para regular el potencial de suspensión por el catalizador, el cloro líquido es altamente tóxico y presenta ciertos riesgos durante el almacenamiento y uso [12].



2.8. Lixiviación en medios de cloruro férrico

Con el fin de intensificar los procesos de lixiviación, se han llevado a cabo investigaciones en un gran número de medios y oxidantes. Se descubrió que aunque el ion férrico es un agente que lixivía metales de minerales y concentrados, como resultado del uso de los iones férricos en diferentes formas, estos se lixivian a diferentes velocidades y en diferentes cantidades. Utilizando el cloruro férrico como agente de lixiviación en comparación con el sulfato férrico con condiciones comparables, el rendimiento es de 2 a 8 veces mayor para el mismo tiempo de lixiviación [21].

Al comparar el método de lixiviación de cloruro con la lixiviación de sulfato convencional, podemos definir ciertas ventajas potenciales de los métodos de cloruro:

- Lixiviación más fácil de concentraciones complejas de cloruro
- Transferencia de azufre a forma elemental
- Obtención de soluciones de cloruro concentrado
- El metal se puede extraer de la solución por extracción líquida
- La regeneración de la solución es simple por oxidación con oxígeno o cloro
- El hierro se puede precipitar a partir de la solución.

Los principales problemas asociados con los procesos de cloruro son:

- La lixiviación en un medio cloruro no es suficientemente selectiva y en mezclas o impurezas convencionales son altamente solubles en el medio de lixiviación, por lo que la recirculación y la limpieza del agente lixivante deben incluirse en el ciclo tecnológico.
- La alta densidad de corriente es esencial en la electrólisis (aumenta los costos de producción).
- El diseño de electrolitos para la electrólisis a partir de un medio cloruro es complicado y costoso.
- El cloro puede precipitarse en el ánodo en lugar de oxígeno; debido a su toxicidad y corrosividad, el cloro debe eliminarse de manera permanente y eficiente.
- La tensión de vapor relativamente alta de los cloruros de las soluciones de cloruro ácido requiere un sistema de extracción grande y eficiente que atrape los cloruros resultantes seguido de su procesamiento.
- La resistencia a la corrosión de las soluciones de cloruro es considerablemente mayor y estas soluciones requieren materiales especiales para aparatos y sistemas de soporte o transporte (gastos de capital).

- Los residuos de lixiviación representan un riesgo ambiental potencial y requieren un procesamiento adicional (aumenta los costos totales de producción).

Sin embargo, los procesos de hidrometalurgia de cloruro representan en la actualidad la última tendencia [20].

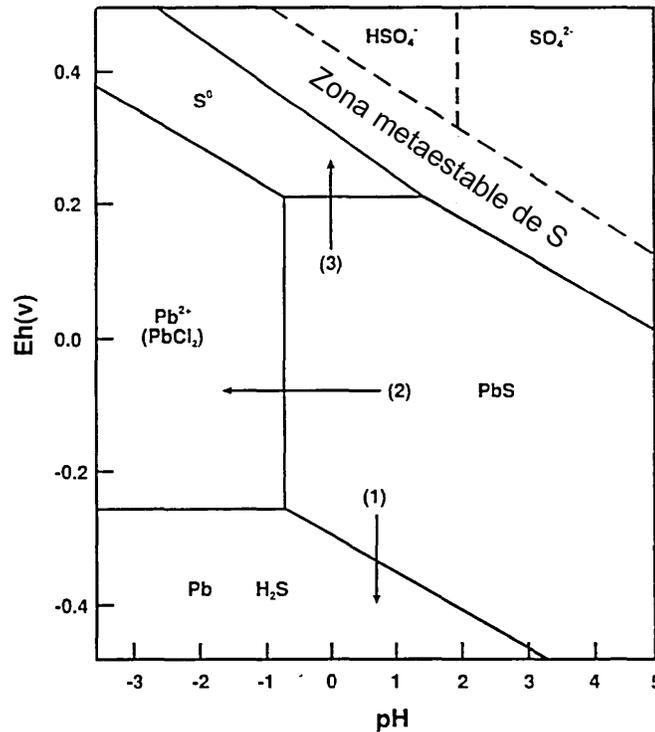
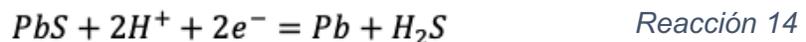


Figura 8. Diagrama Eh-pH para el sistema Pb-S-H₂O a 25°C y concentración total de iones cloruro 1 M, la región Pb²⁺ coexiste con la región sólida PbCl₂ [21].

La termodinámica del sistema de lixiviación se puede discutir en términos de un diagrama de Eh-pH para el sistema Pb-S-H₂O, y el diagrama obtenido a 25°C y 1 M de concentración total de iones de cloruro se ilustra en la Figura 8. Las flechas mostradas representan posibles métodos para extraer plomo de la galena, y corresponden a las reacciones de lixiviación expresadas por las reacciones 14-16, respectivamente [21].





El proceso de reducción directa está representado por la reacción 14, la contaminación del producto de plomo con varios elementos de impureza (As, Bi, Cu) presentes en el concentrado es inevitable, solo se han reportado unos pocos estudios sobre esta opción. La reacción 15 muestra la condición para la lixiviación no oxidativa que disuelve el plomo con la evolución del gas sulfuro de hidrógeno, el paso de control de velocidad es la difusión hacia el exterior del sulfuro de hidrógeno disuelto a través de la capa límite líquida. La tercera flecha representa el proceso de lixiviación oxidativa, por el cual el azufre se oxida a la forma elemental y el plomo se obtiene como iones de plomo divalentes. Termodinámicamente, el azufre en el PbS se oxidará a sulfato o bisulfato en condiciones moderadamente oxidantes incluso a valores bajos de pH. En la práctica, sin embargo, el azufre elemental se forma durante la lixiviación atmosférica de la galena en medios ácidos, y el producto de azufre no se oxida significativamente en estas condiciones [21].

A pesar de la formación observada de pequeñas cantidades de especies de azufre oxidado durante la lixiviación de galena, la región de metaestabilidad del azufre se expande hacia el lado derecho de la Figura 8 como sugiere la línea quebrada. La extensión de la zona de metaestabilidad del azufre no está bien definida, y depende de los aniones presentes, pH y temperatura. Se han realizado muchos estudios cinéticos sobre la reacción de lixiviación. Sin embargo, a pesar del número de estudios, las investigaciones informadas no coinciden consistentemente en las tasas de reacción, las dependencias paramétricas o el mecanismo de lixiviación [21].

Características de la lixiviación por cloruro férrico ($FeCl_3$)

- La lixiviación de cloruro férrico es un método potencialmente atractivo para procesar concentrados de plomo y se han realizado muchos estudios sobre la cinética de disolución de galena (PbS).
- La reacción de lixiviación es rápida y el azufre elemental es el producto de reacción dominante.
- En la lixiviación en medios de cloruro férrico se llegan a formar partículas de cloruro de plomo en la superficie de galena (PbS), la presencia de cloruro de plomo tiene un efecto pasivante en la disolución que conduce a una tasa de disolución menor. En la figura 9 se puede observar el mecanismo de la lixiviación por este sistema.

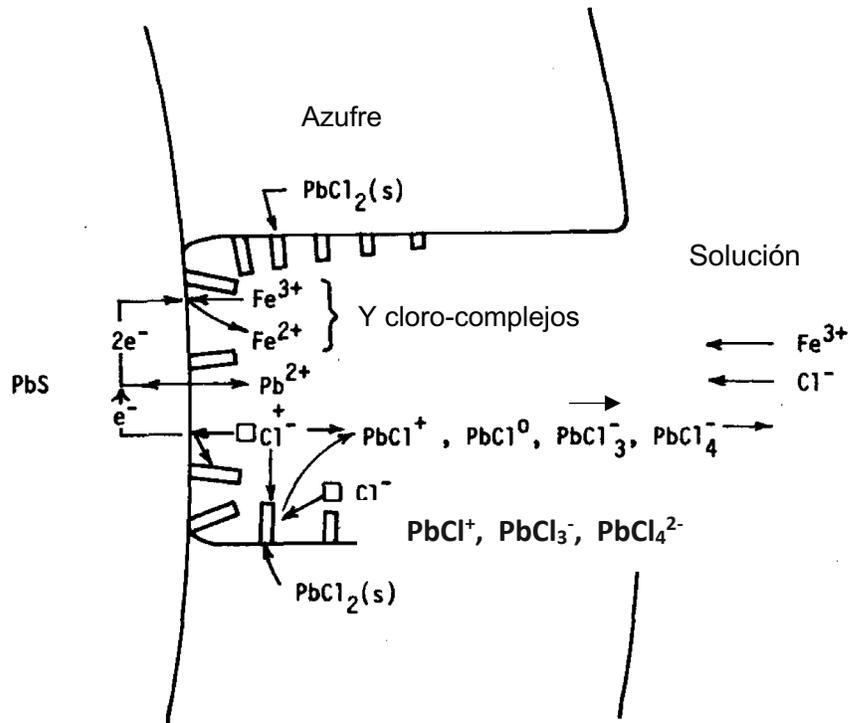


Figura 9. Diagrama esquemático de la reacción de la partícula de galena [22].

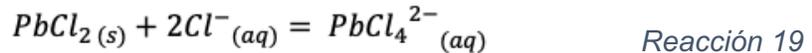
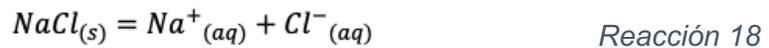
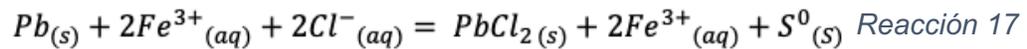
Un ejemplo de este efecto se dio en una investigación de lixiviación por percolación de minerales de Zn-Pb-Cu con cloruro férrico (FeCl_3) en el que el cloruro de plomo (PbCl_2) precipitado a menudo bloqueaba la columna de mineral e impedía el contacto adecuado de la solución de lixiviación con el mineral, el aumento de los niveles de iones cloruro alivió el problema de bloqueo debido a una mayor solubilidad del plomo disuelto, es decir, tasas de disolución muy mejoradas con la adición de cloruro de sodio (NaCl), pero no lo eliminó por completo.

- La adición de cloruro férrico (FeCl_3) a una solución de salmuera aumenta la solubilidad del cloruro de plomo (PbCl_2). Esto se debe, al menos en parte, a un aumento en el nivel de iones cloruro libres en solución que fue proporcionado por la sal de cloruro férrico (FeCl_3) al disolverse y formarse cloro-complejos férricos. El efecto del cloruro libre también se puede ver en la solubilidad mejorada del cloruro de plomo con el aumento de la concentración de cloruro de sodio (NaCl).
- Las concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) $> 1 \text{ M}$ mejoran la velocidad de reacción, mientras que la velocidad de lixiviación es relativamente independiente de las concentraciones más bajas de cloruro de sodio (NaCl).
- La influencia del complejamiento y su efecto sobre la concentración de cloruro libre y la solubilidad también se ha observado para cloruro de plata (AgCl) en soluciones similares. La solubilidad del plomo aumentará mediante



la adición de cloruro cúprico que se compleja de la misma manera que el cloruro férrico (FeCl_3). El zinc disuelto, por otro lado, se compleja fuertemente con el ion cloruro y no tendría ningún efecto sobre la solubilidad o haría que disminuyera, estos efectos sobre la solubilidad se observarían solo para adiciones externas de estas sales, y cualquier Cu^{2+} o Zn^{2+} disuelto de un concentrado de galena en realidad disminuiría la solubilidad del plomo, ya que en este caso se consumiría ión cloruro libre.

- El mecanismo de reacción se describe a continuación, con las condiciones óptimas se puede recuperar hasta un **96% del plomo** o más:



- La disolución del sulfuro complejo de cualquier metal (Zn, Cu, Fe, Ag) que tienden a formar complejos con Cl^- tendría el efecto contrario y tendería a disminuir la solubilidad del cloruro de plomo [21, 22, 23].



CAPÍTULO III

3. Planteamiento del problema

El proceso de lixiviación convencional con FeCl_3 es sencillo, muy eficiente y el cloruro férrico es el más apto según la literatura para lograr una buena extracción de plomo. Sin embargo, llega a generar una pasivación durante el proceso de lixiviación, la cuál impide parcial o totalmente que la reacción química ocurra con éxito. Aunque la reacción sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasivante no permitirá la interacción del sistema.

Con el sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$, se busca romper esa pasivación aumentando el porcentaje de extracción de plomo y convirtiéndolo en un proceso exitoso y con una reacción completa, con ayuda de parámetros o variables como la concentración y temperatura.

4. Justificación

Debido a la gran cantidad de contaminantes que generan los procesos pirometalúrgicos como los gases tóxicos (SO_2) y polvos ricos en plomo, cada día crece más el interés por emplear procesos más amigables con el medio ambiente; los procesos de lixiviación juegan un papel muy importante en esta causa debido a que pueden obtener los mismos o mejores resultados, pero generando menos contaminantes que dañan al medio ambiente. Esto permitirá sustituir a nivel industrial el proceso pirometalúrgico que ha permanecido por mucho tiempo como el proceso principal para la obtención de plomo.

El presente proyecto se basa en utilizar la hidrometalurgia en la obtención de plomo por un proceso de lixiviación teniendo como producto principal el cloruro de plomo y subproductos como cloruro ferroso y azufre elemental no contaminante.

5. Hipótesis

Con la utilización del sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$ el proceso de lixiviación se verá más beneficiado que con solo utilizar FeCl_3 , ya que promoverá una mejor recuperación de plomo y romperá la pasivación que genera este compuesto. El proceso de lixiviación mejorará también con la ayuda de algunas variables como el aumento de la temperatura, ya que mejorará la disolución y aumentará el número de moléculas activadas. Un menor tamaño de partícula aumentará el número y el área de contacto de las partículas con el fluido. Un aumento en la velocidad de agitación aumentará la velocidad de disolución y por lo tanto, mejorará la reacción del sistema.



6. Objetivos

General:

Recuperación de plomo a partir de un concentrado de galena (PbS) por el proceso de lixiviación en un sistema FeCl_3 -NaCl, variando concentración y temperatura.

Particulares:

- Evaluar el efecto de la variación de la concentración de FeCl_3 sin adición de NaCl y confirmar la existencia de formación de la capa de pasivación.
- Determinar el efecto de la variación de la concentración de FeCl_3 con adición de NaCl para evitar la pasivación del proceso y obtener las concentraciones que generen la mayor recuperación metálica.
- Evaluar el efecto de la variación de temperatura durante el proceso de lixiviación y obtener las condiciones óptimas de extracción de plomo.
- Determinar el tiempo óptimo de extracción mediante pruebas cinéticas de lixiviación, para las pruebas con variación de temperatura.

CAPÍTULO IV

7. Metodología experimental

7.1. Materiales y equipo

A continuación, en la Tabla 13 se muestran los materiales, equipo y reactivos que se utilizaron para la realización de las pruebas de lixiviación.

Tabla 13. Materiales, equipo y reactivos para la realización de las pruebas de lixiviación de plomo.

Reactivos y sustancias	Material de laboratorio
Cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	Rodillo para desgrumar
Cloruro de sodio (NaCl)	Tapete o bolsa de plástico
Agua destilada	Brocha
Concentrado de plomo	Vaso de precipitado (100 mL)
Equipo de laboratorio	Vaso de precipitado (500 mL)
Balanza granataria	Espátula
Parrilla eléctrica	Vidrio de reloj o charolas de aluminio
Termómetro	Embudo
Cronómetro	Papel filtro
pH metro	Pipeta graduada
Bomba para filtrar	Piseta
Equipo de protección personal (EPP)	Jeringa
Guantes látex	Contenedor o frasco de plástico
Lentes de seguridad	Kitasato
Bata de laboratorio	Embudo de porcelana
Botas de casquillo	Agitador magnético
	Bolsas de plástico
	Plumón
	Cinta adhesiva

7.2. Diagrama del procedimiento para la realización y distribución de las pruebas de lixiviación de plomo

La Figura 10 describe el procedimiento experimental en forma de diagrama, incluyendo la distribución de las pruebas de lixiviación dependiendo cada etapa con su respectiva concentración de sales.

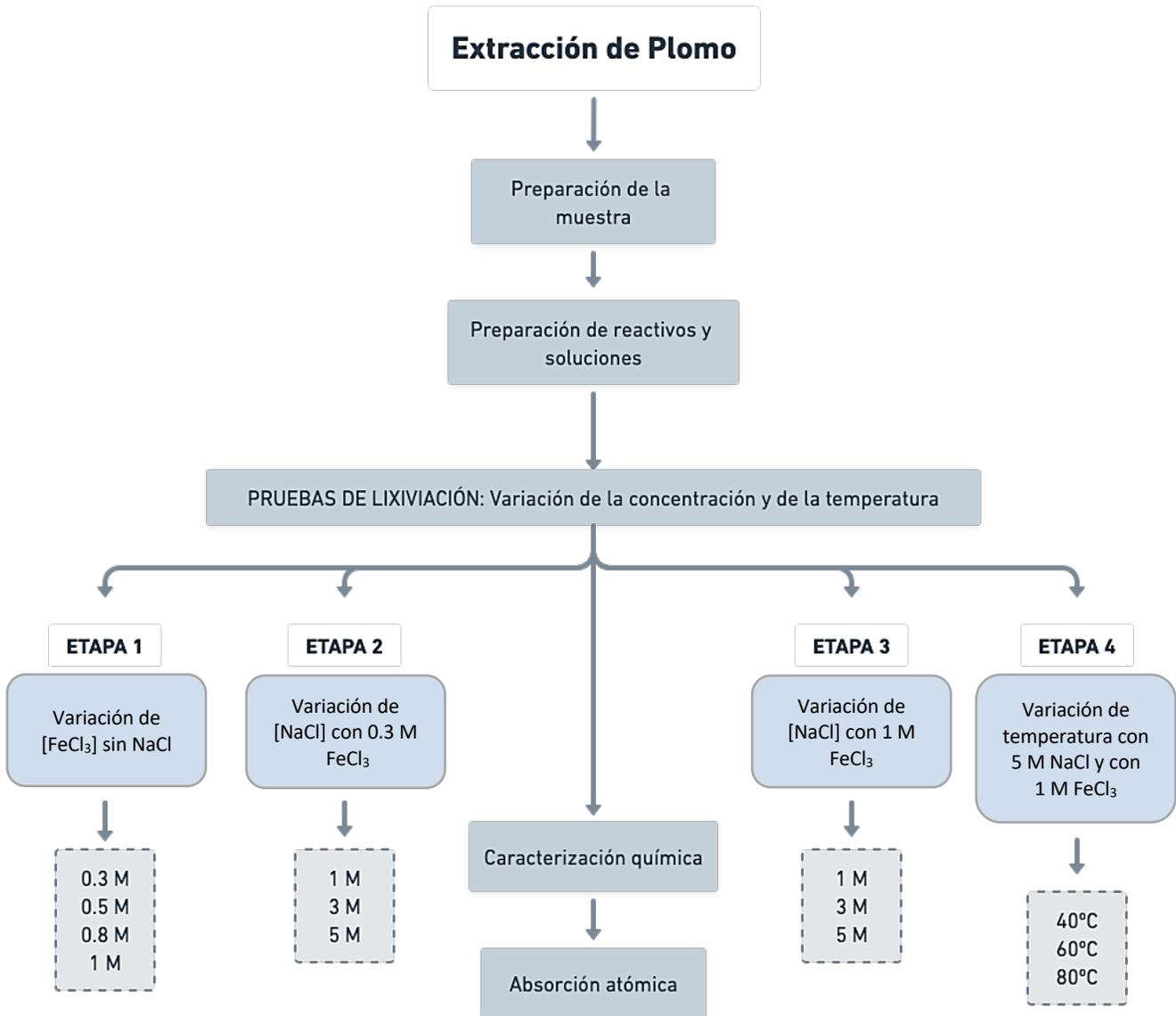


Figura 10. Diagrama del proceso de lixiviación por el sistema $FeCl_3$ - $NaCl$.

7.3. Procedimiento experimental

Preparación de la muestra: desgrumado y homogenizado

Se colocó la muestra sobre un tapete y con una espátula y un rodillo se desgrumó el concentrado de plomo de manera continua hasta lograr eliminar los grumos de la muestra (Figura 11), con un promedio de 34 vueltas se llevó el concentrado de una esquina a otra y en todas direcciones, se pesó una cantidad de 200 g de concentrado y se guardó en una bolsa etiquetada correctamente.



Figura 11. Desgrumado del concentrado de plomo.

Preparación de reactivos y soluciones

Se realizaron los cálculos necesarios para cada reactivo y cada prueba y se obtuvieron las cantidades exactas en gramos para cada prueba de lixiviación, se tomó cada reactivo y se pesó la cantidad necesaria para cada prueba sobre un vidrio de reloj o pesa muestra en una balanza granataria (Figura 12).



Figura 12. Pesaje de cloruro férrico.

Para la disolución de FeCl_3 , Se calentaron 200 mL de agua destilada en un vaso de precipitado de 500 mL en la parrilla eléctrica a una temperatura promedio de $60\text{ }^\circ\text{C}$, posteriormente se agregó el cloruro férrico (FeCl_3) y se agitó la solución a 800 rpm utilizando un agitador magnético (Figura 13), después se midió el pH con el pH metro y en el caso de ser necesario se agregó cloruro de sodio (NaCl), finalmente se esperó hasta que se tuviera una disolución completa.



Figura 13. Preparación de la solución de cloruro férrico.

Pruebas de lixiviación

Con base en los parámetros presentados en las Tablas 14 y 15 se realizaron las pruebas de lixiviación, se inició agregando el concentrado de plomo a la solución previamente preparada de cloruro férrico, con o sin cloruro de sodio, dependiendo de cada etapa y cada prueba (Figura 14), después se midió el tiempo con el cronómetro. En el caso de ser necesario se colocó el termómetro en la solución, se midió la temperatura y se mantuvo constante durante todo el proceso. Se tomaron muestras de 10 mL a diferentes tiempos con la pipeta graduada, posteriormente se filtró la solución con el papel filtro sobre el contenedor o frasco, se utilizó el embudo y vaso de precipitado como soporte.

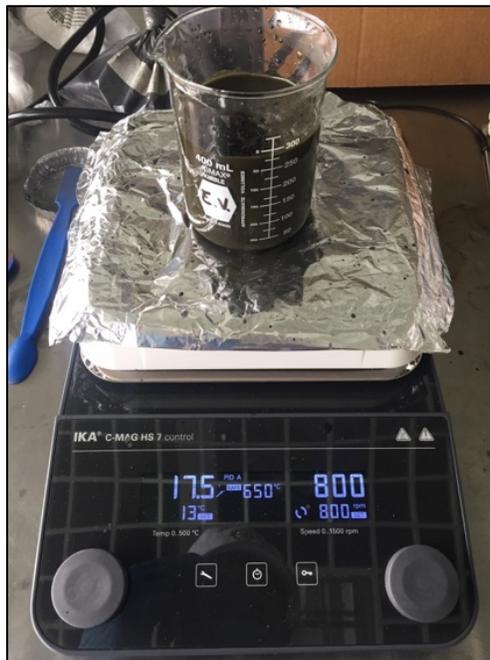


Figura 14. Prueba de lixiviación.

Tabla 14. Condiciones de lixiviación de plomo por el sistema $FeCl_3$ - $NaCl$.

Condiciones	Valores
Tiempo	10, 20, 30, 60, 90, 120 minutos
pH ₀	< 2
pH _f	< 2
[$FeCl_3$]	0.3, 0.5, 0.8, 1 M (200 mL)
[$NaCl$]	1, 3, 5 M (11.68, 35.06, 58.44 g)
Temperatura	20, 40, 60, 80 °C
Velocidad de rotación	800 rpm
Cantidad de mineral	10 g

Posteriormente, a los 120 minutos se apagó la parrilla y se midió nuevamente el pH de la solución, después se filtró la solución de lixiviación pasándola por un papel filtro y un embudo de porcelana sobre un Kitasato (Figura 15), se utilizó la bomba para facilitar el proceso. Se realizó un lavado en caliente con agua destilada y se depositó el papel filtro sobre una charola de plástico, finalmente se llevó la charola al cuarto caliente para el secado del papel filtro y se obtuvo el peso de la muestra sólida con la balanza granataria.

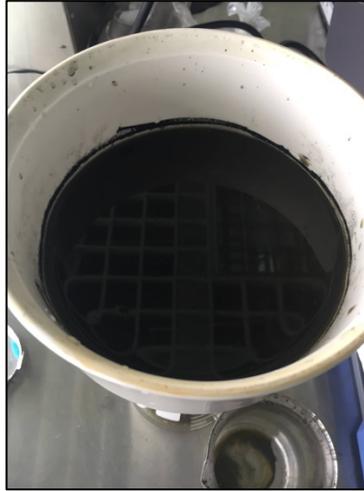


Figura 15. Filtración de la solución de lixiviación a los 120 minutos.

Tabla 15. Variación de condiciones para las pruebas de lixiviación.

Etapa 1 (variación de $FeCl_3$ sin adición de $NaCl$)	
Prueba 1	0.3 M
Prueba 2	0.5 M
Prueba 3	0.8 M
Prueba 4	1 M
Etapa 2 (variación de $NaCl$ con 0.3 M $FeCl_3$)	
Prueba 5	1 M
Prueba 6	3 M
Prueba 7	5 M
Etapa 3 (variación de $NaCl$ con 1 M $FeCl_3$)	
Prueba 8	1 M
Prueba 9	3 M
Prueba 10	5 M
Etapa 4 (variación de temperatura con 1 M $FeCl_3$ y 5 M $NaCl$)	
Prueba 11	40 °C
Prueba 12	60 °C
Prueba 13	80 °C

Caracterización química: análisis químico de las soluciones y sólidos por AA

Al finalizar las pruebas se enviaron a analizar las pruebas por el método de caracterización de absorción atómica. El proceso consistió en utilizar atomizadores con y sin llama para producir átomos libres del metal en el haz de la radiación. La solución de la muestra es convertida primero a un fino aerosol, y luego llevada a la llama que entrega la energía suficiente para evaporar el solvente y descomponer los compuestos químicos resultantes en átomos libres en su estado fundamental. En los atomizadores sin llama-atomización electrotérmica con horno de grafito el vapor atómico se genera en un tubo de grafito calentado eléctricamente, en cuyo interior se ubica la muestra. En la Figura 16 se muestran los componentes de un equipo de absorción atómica.

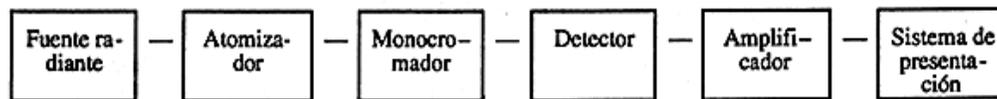


Figura 16. Componentes básicos de un equipo de absorción atómica.

CAPÍTULO V

8. Resultados y discusión

En la tabla 16 se muestran las características y datos generales para las pruebas de lixiviación realizadas. Cada una de ellas se identifica por la variación de la concentración o la temperatura dependiendo cada etapa.

Tabla 16. Resultados de cada proceso de lixiviación.

Etapa	No. prueba	Condiciones	Recuperación final
1	1	t= 120 min, pH ₀ =1.25, pH _f =1.7, [FeCl ₃]=0.3M, solución= 200mL, NaCl=/, T=20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	13.94%
	2	t= 120 min, pH ₀ =0.45, pH _f =1.27, [FeCl ₃]=0.5M, solución= 200mL, NaCl=/, T=20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	16.55%
	3	t= 120 min, pH ₀ =1.15, pH _f =0.88, [FeCl ₃]=0.8M, solución= 200mL, NaCl=/, T=20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	20.45%
	4	t= 120 min, pH ₀ =0.44, pH _f =0.8, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=/, T=20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	23.43%
2	5	t= 120 min, pH ₀ =0.9, pH _f =1.2, [FeCl ₃]=0.3M, solución= 200mL, NaCl=11.68g, T=20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	20.62%
	6	t= 120 min, pH ₀ =0.7, pH _f =1.24, [FeCl ₃]=0.3M, solución= 200mL, NaCl=35.06g, T=20 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	41.34%
	7	t= 120 min, pH ₀ =0.89, pH _f =1.4, [FeCl ₃]=0.3M, solución= 200mL, NaCl=58.44g, T=20 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	62.36%



3	8	t= 120 min, pH ₀ =0.67, pH _f =1.11, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=11.68g, T= 20°C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	11.83%
	9	t= 120 min, pH ₀ =0.53, pH _f =1.17, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=35.06g, T= 20 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	50.01%
	10	t= 120 min, pH ₀ =0.57, pH _f =1.07, [FeCl ₃]=1 M, solución= 200mL, NaCl=58.44 g, T=20 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	65.59%
4	11	t= 120 min, pH ₀ =0.49, pH _f =0.62, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=58.44 g, T=40 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	79.22%
	12	t= 120 min, pH ₀ =0.38, pH _f =1.03, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=58.44 g, T=60 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	90.07%
	13	t= 120 min, pH ₀ =0.35, pH _f =1.07, [FeCl ₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=58.44 g, T=80 °C, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g	86.78%

Las pruebas de lixiviación se realizaron tomando en cuenta los siguientes puntos:

- El pH de la solución no debe ser igual o mayor a 2.
- El tamaño de partícula debe estar por debajo de 100 micras.

Con estas consideraciones para el sistema de cloruro férrico, más un estudio de la variación de la concentración y la temperatura se pudieron determinar las condiciones óptimas para obtener una buena recuperación de plomo, logrando romper el efecto de la pasivación, dichas condiciones corresponden a la prueba 12 con un porcentaje de recuperación del 90% con las condiciones siguientes: [FeCl₃]=1M, solución= 200mL, NaCl=5M, T=60 °C, vel. agitación= 800rpm.

Para cada etapa de las pruebas de lixiviación fue de suma importancia cuidar el contenido de la solución PLS y la muestra sólida. Se pudieron obtener los siguientes resultados a manera de gráficos con base en el análisis por AA y la realización de balances metalúrgicos considerando el peso inicial de la muestra y el peso de las muestras sólidas y líquidas de cada etapa.

Etapa 1: variación de concentración de cloruro férrico (FeCl_3)

Para la etapa 1 correspondiente a la variación de cloruro férrico sin la adición de cloruro de sodio a temperatura ambiente, se observa que existe un pequeño aumento con una mayor adición de cloruro férrico (Figura 17). Sin embargo, se obtuvo como resultado una baja recuperación en todas las pruebas, con un máximo porcentaje del 23.43% para la concentración más alta (1 M), lo que confirma el efecto de pasivación producido en la lixiviación de sulfuro de plomo, que impide una buena extracción de plomo, debido a la formación de una capa de cloruro de plomo insoluble sobre la partícula del concentrado.

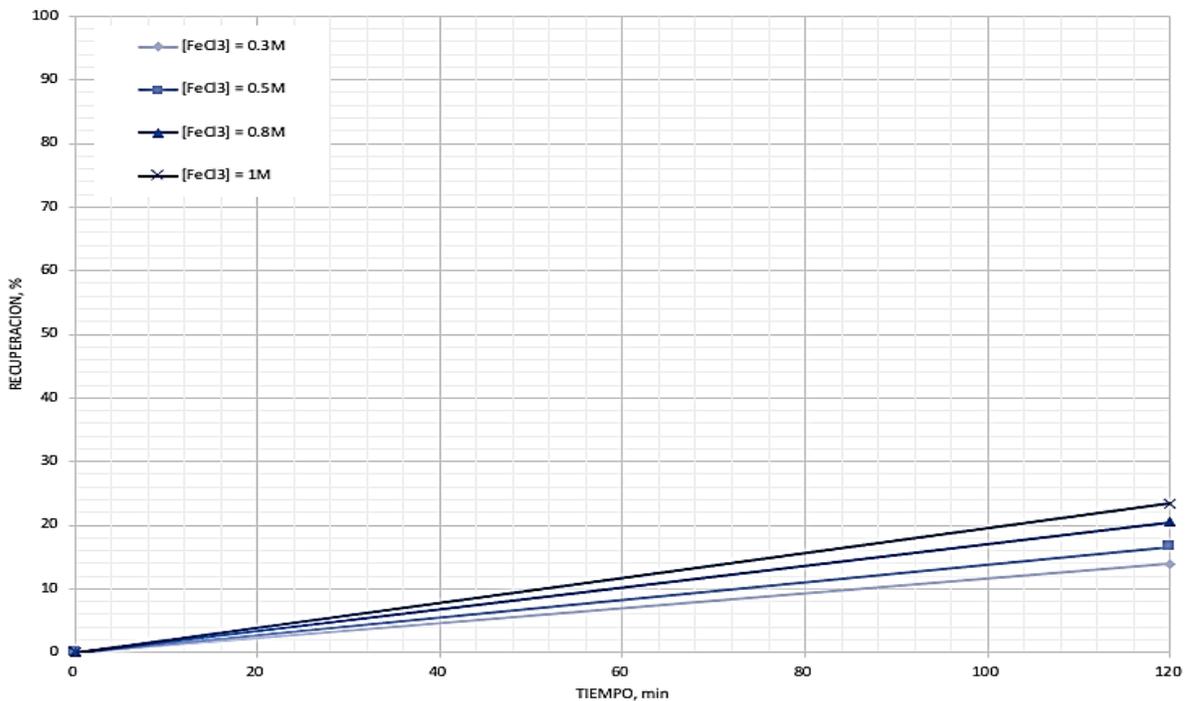


Figura 17. Recuperaciones de Pb, pruebas 1, 2, 3 y 4. Etapa 1.

Etapa 2: variación de concentración de cloruro de sodio (NaCl) con 0.3 M de cloruro férrico (FeCl_3)

Para la etapa 2 correspondiente a la variación de cloruro de sodio (NaCl) con una concentración mínima de 0.3 M de cloruro férrico (FeCl_3), se observa una mayor recuperación de plomo con un aumento de concentración de cloruro de sodio, logrando con la máxima concentración de cloruro de sodio (5 M) una extracción final del 62.36% en 2 horas, lo que confirma el rompimiento del efecto de pasivación (Figura 18). Sin embargo, no es suficiente para lograr un buen porcentaje de recuperación. También se puede observar que con una baja concentración de

cloruro de sodio no se logra romper el efecto de la pasivación obteniendo tan solo un porcentaje de extracción final de 20.62%, a partir de un aumento de 1 a 3 M de cloruro de sodio se observa un aumento del porcentaje al doble.

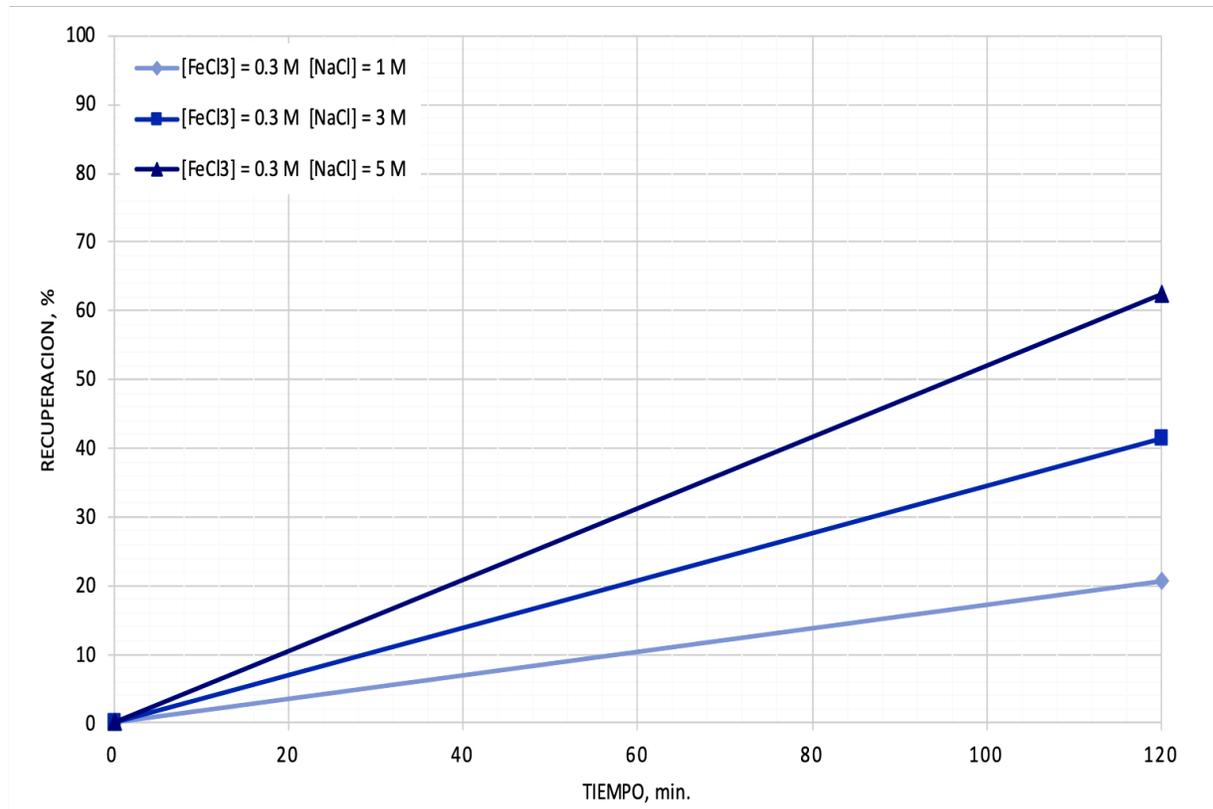


Figura 18. Recuperaciones de Pb, pruebas 5, 6 y 7. Etapa 2.

Etapa 3: variación de concentración de cloruro de sodio (NaCl) con 1 M de cloruro férrico (FeCl₃)

Para la etapa 3 correspondiente a la variación de cloruro de sodio (NaCl) con una concentración máxima de 1 M de cloruro férrico (FeCl₃), se observa un comportamiento similar a la etapa 2, es decir, una mayor recuperación de plomo con un aumento de concentración de cloruro de sodio, logrando con la máxima concentración de cloruro de sodio (5 M) una extracción final del 65.6% en 2 horas, lo que confirma el rompimiento del efecto de pasivación (Figura 19). Sin embargo, tampoco es suficiente para lograr un buen porcentaje de recuperación. Un punto importante que se puede observar es que con una baja concentración de cloruro de sodio (1 M) y una alta concentración de cloruro férrico (1 M) el efecto de pasivación se hace más presente reduciendo el porcentaje de extracción hasta un 11.8% en 2 horas, esto debido a que se produce una capa más gruesa de cloruro de plomo

insoluble sobre la partícula lo que evita casi totalmente la recuperación de Pb. A partir de un aumento de 1 a 3 M de cloruro de sodio se observa un aumento del porcentaje a 50%.

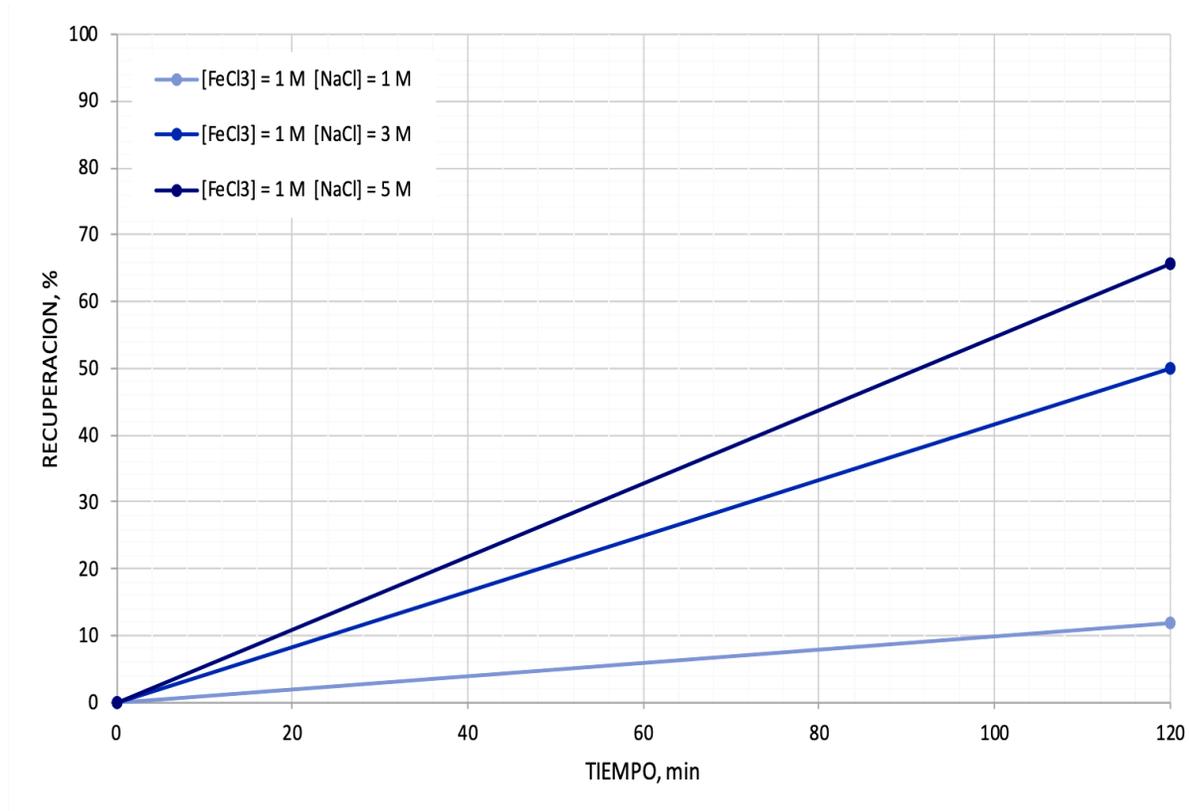


Figura 19. Recuperaciones de Pb, pruebas 8, 9 y 10. Etapa 3.

Etapa 4: variación de temperatura

Para la etapa 4 correspondiente a la variación de temperatura (Figura 20) con una concentración máxima de 5 M de cloruro de sodio (NaCl) y con una concentración máxima de 1 M de cloruro férrico (FeCl₃), con un aumento de temperatura a 40°C (Prueba 11), se observa un aumento en la recuperación de plomo desde los 10 minutos y se mantiene casi constante con un máximo porcentaje de recuperación del 79.22%, lo que confirma el rompimiento de la capa de pasivación y sobre todo una buena recuperación de plomo casi llegando al 80% desde los 20 minutos. Para un aumento de temperatura a 60°C (Prueba 12), se observa un aumento mucho mayor que a 40°C, que incluso supera el 80% a los 10 minutos, posteriormente se mantiene casi constante y a partir de los 90 minutos comienza nuevamente a subir hasta un porcentaje de recuperación máximo del 90.07% a los 120 minutos. En este caso si se aumentara el tiempo de lixiviación, podría tener una mayor recuperación gracias a esta tendencia ascendente en los últimos 30 minutos. Para un aumento



de temperatura a 80°C (Prueba 13), tiene un comportamiento similar a la prueba a 60°C con un aumento en la recuperación de plomo por encima del 80% desde los 10 minutos. Sin embargo, se mantiene casi constante después de los 20 minutos de lixiviación con un máximo porcentaje de recuperación del 86.78% y no presenta algún crecimiento durante las 2 horas de lixiviación.

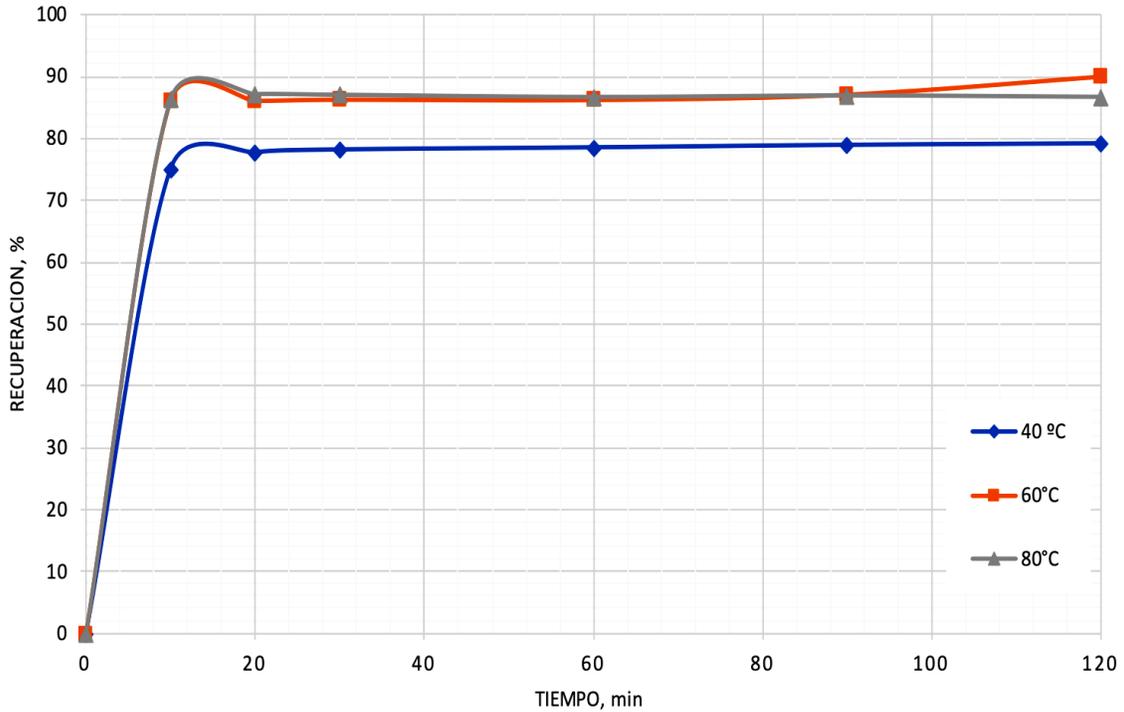


Figura 20. Recuperaciones de Pb, pruebas 11, 12 y 13. Etapa 4.



CAPÍTULO VI

9. Conclusiones

- Un aumento en la concentración de cloruro férrico (FeCl_3) sin adición de cloruro de sodio (NaCl) aumentó la recuperación de plomo. Sin embargo, se confirmó un efecto de pasivación que afectó casi totalmente la recuperación obteniendo un máximo de 23.43% en 2 horas.
- La adición de cloruro de sodio (NaCl) al sistema mejoró la recuperación de plomo rompiendo el efecto de pasivación, al mismo tiempo se observa que con un aumento en la concentración de NaCl se obtiene una recuperación máxima de 65.59%.
- Un aumento en la temperatura del proceso logró una mejora en la recuperación desde los 10 minutos en las 3 pruebas realizadas, se confirmó el rompimiento total de la capa de pasivación, la prueba a $60\text{ }^\circ\text{C}$ tuvo la mejor recuperación con un 90.07% en 2 horas con las condiciones: $t= 120\text{ min}$, $\text{pH}_0=0.38$, $\text{pH}_f =1.03$, $[\text{FeCl}_3]=1\text{M}$, solución= 200mL, $\text{NaCl}=58.44\text{ g}$, $T=60\text{ }^\circ\text{C}$, vel. agitación= 800rpm, muestra=10g.
- El proceso de lixiviación por agitación utilizando un sistema $\text{FeCl}_3\text{-NaCl}$ a condiciones específicas es una alternativa viable para lograr una buena recuperación de plomo, no genera residuos tóxicos y permite la regeneración de la solución lixivante de FeCl_2 a FeCl_3 .
- La realización de este proyecto brinda la oportunidad a futuros estudios de este sistema, en la modificación de las variables como utilizar una concentración de cloruro de sodio (NaCl) ligeramente menor o mayor a la más óptima utilizada en este trabajo o adicionar al sistema ácido clorhídrico (HCl) para reducir el consumo de cloruro de sodio (NaCl) y generar iones Cl^- para lograr el rompimiento de la capa de pasivación.



10. Anexos

Anexo 1.

Tabla 17. Cantidades de reactivos calculados.

Etapa	Prueba	Cantidad FeCl ₃	Cantidad NaCl
		(g)	(g)
1	1	16.21	Sin adición
	2	27.02	Sin adición
	3	43.23	Sin adición
	4	54.04	Sin adición
2	5	16.21	11.68
	6	16.21	35.06
	7	16.21	58.44
3	8	54.04	11.68
	9	54.04	35.06
	10	54.04	58.44
4	11	54.04	58.44
	12	54.04	58.44
	13	54.04	58.44

Anexo 2.

Tabla 18. Cantidades de muestras líquidas y sólidas.

Etapa	Prueba	Muestra líquida	Muestra sólida	Plomo en muestra sólida
		mg/L	mg/g	%
1	1	453.707	81.997	8.1997
	2	352.723	45.092	4.5092
	3	373.535	49.932	4.9932
	4	419.116	46.98	4.698
2	5	491.116	63.443	6.3443
	6	2133.606	104.413	10.4413
	7	4028.981	88.583	8.8583
3	8	647.905	141.618	14.1618
	9	2201.031	77.334	7.7334
	10	4595.169	82.143	8.2143
4	11	4116.078	51.248	5.1248
		4768.072		
		4898.682		
		4998.59		



12	5119.738	50.081	5.0081
	5195.623		
	7437.861		
	7453.79		
	7577.725		
	7548.815		
	8134.605		
	10856.563		
13	7537.911	50.034	5.0034
	8152.442		
	8082.73		
	7835.418		
	8002.798		
	7847.291		

Anexo 3.

Tabla 19. Balance metalúrgico, prueba 1 [FeCl₃]=0.3 M.

PRUEBA 1 [FeCl ₃]=0.3 M					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		453.707	90.7414	13.94346371	13.94
Sólidos (g)	6.83	8.1997	560.03951	86.05653629	
Total muestra (g)	10	6.5078091	650.78091	100	

Tabla 20. Balance metalúrgico, prueba 2 [FeCl₃]=0.5 M.

PRUEBA 2 [FeCl ₃]=0.5 M					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		352.723	70.5446	16.5473167	16.55
Sólidos (g)	7.89	4.5092	355.77588	83.4526833	
Total muestra (g)	10	4.2632048	426.32048	100	



Tabla 21. Balance metalúrgico, prueba 3 $[FeCl_3]=0.8 M$.

PRUEBA 3 $[FeCl_3]=0.8 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		373.535	74.707	20.45023307	20.45
Sólidos (g)	5.82	4.9932	290.60424	79.54976693	
Total muestra (g)	10	3.6531124	365.31124	100	

Tabla 22. Balance metalúrgico, prueba 4 $[FeCl_3]=1 M$.

PRUEBA 4 $[FeCl_3]=1 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		419.116	83.8232	23.43285159	23.43
Sólidos (g)	5.83	4.698	273.8934	76.56714841	
Total muestra (g)	10	3.577166	357.7166	100	

Tabla 23. Balance metalúrgico, prueba 5 $[FeCl_3]=0.3 M$ y $[NaCl]=1 M$.

PRUEBA 5 $[FeCl_3]=0.3 M$ $[NaCl]=1 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		491.116	98.2232	20.62024655	20.62
Sólidos (g)	5.96	6.3443	378.12028	79.37975345	
Total muestra (g)	10	7.992340268	476.34348	100	

Tabla 24. Balance metalúrgico, prueba 6 $[FeCl_3]=0.3 M$ y $[NaCl]=3 M$.

PRUEBA 6 $[FeCl_3]=0.3 M$ $[NaCl]=3 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		2133.606	426.7212	41.33627223	41.34
Sólidos (g)	5.8	10.4413	605.5954	58.66372777	
Total muestra (g)	10	17.79856207	1032.3166	100	



Tabla 25. Balance metalúrgico, prueba 7 $[FeCl_3]=0.3 M$ y $[NaCl]=5 M$.

PRUEBA 7 $[FeCl_3]=0.3 M$ $[NaCl]=5 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		4028.981	805.7962	62.36248583	62.36
Sólidos (g)	5.49	8.8583	486.32067	37.63751417	
Total muestra (g)	10	23.53582641	1292.11687	100	

Tabla 26. Balance metalúrgico, prueba 8 $[FeCl_3]=1 M$ y $[NaCl]=1 M$.

PRUEBA 8 $[FeCl_3]=1 M$ $[NaCl]=1 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		647.905	129.581	11.82938978	11.83
Sólidos (g)	6.82	14.1618	965.83476	88.17061022	
Total muestra (g)	10	16.06181466	1095.41576	100	

Tabla 27. Balance metalúrgico, prueba 9 $[FeCl_3]=1 M$ y $[NaCl]=3 M$.

PRUEBA 9 $[FeCl_3]=1 M$ $[NaCl]=3 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		2201.031	440.2062	50.00998254	50.01
Sólidos (g)	5.69	7.7334	440.03046	49.99001746	
Total muestra (g)	10	15.46988858	880.23666	100	

Tabla 28. Balance metalúrgico, prueba 10 $[FeCl_3]=1 M$ y $[NaCl]=5 M$.

PRUEBA 10 $[FeCl_3]=1 M$ $[NaCl]=5 M$					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		4595.169	919.0338	65.5884339	65.59
Sólidos (g)	5.87	8.2143	482.17941	34.4115661	
Total muestra (g)	10	23.87075315	1401.21321	100	



Tabla 29. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C, 10 minutos.

10 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
10		4116.078	823.2156	75.12085358	75.12
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	24.87914642	
Total muestra (g)	10	20.59877744	1095.85496	100	

Tabla 30. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C , 20 minutos.

20 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
20		4768.072	953.6144	77.76648122	77.77
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	22.23351878	
Total muestra (g)	10	23.04988271	1226.25376	100	

Tabla 31. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C, 30 minutos.

30 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
30		4898.682	979.7364	78.230227	78.23
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	21.769773	
Total muestra (g)	10	23.54089774	1252.37576	100	

Tabla 32. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C, 60 minutos.

60 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
60		4998.59	999.718	78.57210808	78.57
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	21.42789192	
Total muestra (g)	10	23.91649173	1272.35736	100	

Tabla 33. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C, 90 minutos.

90 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
90		5119.738	1023.9476	78.97253571	78.97
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	21.02746429	
Total muestra (g)	10	24.37193534	1296.58696	100	

Tabla 34. Balance metalúrgico, prueba 11, 40 °C, 120 minutos.

120 minutos					
PRUEBA 11 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 40°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		5195.623	1039.1246	79.21582172	79.22
Sólidos (g)	5.32	5.1248	272.63936	20.78417828	
Total muestra (g)	10	24.6572173	1311.76396	100	

Tabla 35. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 10 minutos.

10 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
10		7437.861	1487.5722	86.13822752	86.14
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	13.86177248	
Total muestra (g)	10	36.12885732	1726.95938	100	

Tabla 36. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 20 minutos.

20 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
20		7453.79	1490.758	86.16375188	86.16
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	13.83624812	
Total muestra (g)	10	36.19550586	1730.14518	100	



Tabla 37. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 30 minutos.

30 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
30		7577.725	1515.545	86.35917771	86.36
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	13.64082229	
Total muestra (g)	10	36.71406234	1754.93218	100	

Tabla 38. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 60 minutos.

60 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
60		7548.815	1509.763	86.31408654	86.31
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	13.68591346	
Total muestra (g)	10	36.5931	1749.15018	100	

Tabla 39. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 90 minutos.

90 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
90		8134.605	1626.921	87.17322345	87.17
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	12.82677655	
Total muestra (g)	10	39.04410418	1866.30818	100	

Tabla 40. Balance metalúrgico, prueba 12, 60 °C, 120 minutos.

120 minutos					
PRUEBA 12 [FeCl ₃]=1 M [NaCl]=5 M 60°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		10856.563	2171.3126	90.06980537	90.07
Sólidos (g)	4.78	5.0081	239.38718	9.930194626	
Total muestra (g)	10	50.4330498	2410.69978	100	



Tabla 41. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 10 minutos.

10 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
10		7537.911	1507.5822	86.30810116	86.31
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	13.69189884	
Total muestra (g)	10	36.54277657	1746.74472	100	

Tabla 42. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 20 minutos.

20 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
20		8152.442	1630.4884	87.20817253	87.21
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	12.79182747	
Total muestra (g)	10	39.11403598	1869.65092	100	

Tabla 43. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 30 minutos.

30 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
30		8082.73	1616.546	87.11206435	87.11
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	12.88793565	
Total muestra (g)	10	38.82235397	1855.70852	100	

Tabla 44. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 60 minutos.

60 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
60		7835.418	1567.0836	86.75914	86.76
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	13.24086	
Total muestra (g)	10	37.78757573	1806.24612	100	



Tabla 45. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 90 minutos.

90 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
90		8002.798	1600.5596	87.00007369	87.00
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	12.99992631	
Total muestra (g)	10	38.48791046	1839.72212	100	

Tabla 46. Balance metalúrgico, prueba 13, 80 °C, 120 minutos.

120 minutos					
PRUEBA 13 [FeCl3]=1 M [NaCl]=5 M 80°C					
Tiempo	Solución	Ensayo Pb	Contenido Pb	Distribución Pb	Recuperación Pb
min	mL	mg/L, %	mg	%	%
0	200				
120		7847.291	1569.4582	86.77652438	86.78
Sólidos (g)	4.78	5.0034	239.16252	13.22347562	
Total muestra (g)	10	37.8372536	1808.62072	100	



11. Referencias

- [1] R. S., The extractive metallurgy of lead, Australia, 2009, pp. 3-5.
- [2] N/A, «Ila Reach,» 2022. [En línea]. Available: <https://ila-reach.org/our-substances/lead-metal/> . [Último acceso: Marzo 2022].
- [3] N/A, «Ila-lead,» 2022. [En línea]. Available: <https://ila-lead.org/resources/lead-facts/> . [Último acceso: Marzo 2022].
- [4] N/A, «Geologiaweb,» 2022. [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/elementos-quimicos/usos-del-plomo/> . [Último acceso: Marzo 2022].
- [5] N/A, «Elementos,» 2022. [En línea]. Available: <https://elementos.org.es/plomo>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [6] N/A, «Webminweral,» 2022. [En línea]. Available: <http://webmineral.com/data/Lead.shtml#YeEU1b1Byb9> . [Último acceso: Marzo 2022].
- [7] F. H., HandBook of extractive Metallurgy. Primary Metals, Secondary Metals, Light Metals, Canada: Volume II., 1997.
- [8] C. B. Gill, Metalurgia Extractiva no ferrosa, México: Editorial Limusa, 1989.
- [9] P. a. M. W. B. R.G. Sandberg, «Ferric Chloride Leach-Electrolysis Process for Production of Lead,» 1980.
- [10] N/A, «ALSIMET,» 29 07 2021. [En línea]. Available: <http://alsimet.es/es/noticias/procesos-metalurgicos-industriales-pirometalurgia-hidrometalurgia-y-electrometalurgia>.
- [11] F. Y. M.-m. W. Z.-f. C. e. al., «Leaching of galena by regenerated ferric ion (Fe³⁺) via electro-oxidation,» 2019.
- [12] J. T. Z.-f. C. S. W., «Selective recovery of lead from galena-sphalerite by electro-oxidation,» 2019.
- [13] F. N. F. X. M. K. e. al., «Mechanisms of Surface Passivation during Galena Leaching by Hydrogen Peroxide in Acetate and Citrate Solutions at 25–50 °C,» 2020.
- [14] R. a. F. A. Subagja, New Hidrometallurgical Process Development for Lead Recovery from Their Minerals., Volume 5 No. 2, 1998.
- [15] T. M. C.K Gupta, Hidrometallurgy in Extraction Processes, Boston U.S.A.: Vol. I y II, Ed. CRC Press, 1990.
- [16] M. Free, Hydrometallurgy: Fundamentals and applications., Estados Unidos: WILEY TMS. , 2013.
- [17] W. Dennis, Extractive Metallurgy Principles and Application, Londres, Inglaterra: Ediciones Pitman and Sons LTD, 1965.
- [18] Z. Y. Y. X. L. X., «Kinetics of simultaneous leaching of Ag and Pb from hydrometallurgical zinc residues by chloride,» 2012.



- [19] A. M. W. a. E. R. C. J. Agnes Y. Lee, «Hydrometallurgical Process for Producing Lead and Elemental Sulfur From Galena Concentrates,» 1986.
- [20] T. H., Hydrometallurgy Principles and Applications, Cambridge, England, 2008.
- [21] M. G. A. A., «Optimization of operating parameters and kinetics for chloride leaching of lead from melting furnace slag,» Enero 2017.
- [22] J. E. D. C. e. a. M. KOBAYASHI, «A CRITICAL REVIEW OF THE FERRIC CHLORIDE LEACHING OF GALENA,» Enero 1990.
- [23] S.-H. K. e. a. G.W. WARREN, «Effect of Chloride Ion on the Ferric Chloride Leaching of Galena Concentrate,» Marzo 1987.