

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**EXTRACCIÓN DE ZINC MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR AGITACIÓN DE
LA SMITHSONITA DEL YACIMIENTO DE PARCCO – ACCHA – PARURO**

(Investigación Tecnológica)

PRESENTADA POR:

Br. MAYRA KATHERIN JORDAN AMPA

Br. YANETH LLASA YUCRA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

Dr. PEDRO CAMERO HERMOZA

COASESOR:

Dr. ROLANDO RAMOS OBREGÓN

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:.....
EXTRACCIÓN DE ZINC MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR
AGITACIÓN DE LA SMITHSONITA DEL YACIMIENTO DE
PARCCO - ACCHA - PARURO (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA).....

presentado por: MAYRA KATHERIN JORDAN AMPA con DNI Nro.: 73636821..... presentado
por: YANETH LLASA YUCRA con DNI Nro.: 73245240..... para optar el
título profesional/grado académico de INGENIERO METALÚRGICO.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la**
UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 07.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o
título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 08 de ABRIL..... de 2025.....


.....
Firma

Post firma: DR. PEDRO CAMERO HERMOZA.....

Nro. de DNI: 23956513.....

ORCID del Asesor: 0000-0001-5366-9187.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:446980228 ✓

MAYRA KATHERIN - YANETH JORDAN AMPA - LLAS... EXTRACCIÓN DE ZINC MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR AGITACIÓN DE LA SMITHSONITA DEL YACIMIENTO DE PARC

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:446980228

140 Páginas

Fecha de entrega

8 abr 2025, 10:07 a.m. GMT-5

24.179 Palabras

Fecha de descarga

8 abr 2025, 10:31 a.m. GMT-5

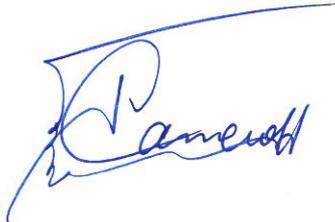
137.139 Caracteres

Nombre de archivo

EXTRACCIÓN DE ZINC MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR AGITACIÓN DE LA SMITHSONITA DEL Y....pdf

Tamaño de archivo

3.0 MB



7% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Small Matches (less than 10 words)

Exclusions

- ▶ 92 Excluded Matches

Top Sources

- 6%  Internet sources
- 0%  Publications
- 4%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**
10 suspect characters on 4 pages
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Señores Catedráticos Miembros del Jurado, de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Con el propósito de optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico y cumpliendo con las exigencias en el artículo 18° del Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución Nro. CU-324-2020-UNSAAC de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra consideración la presente Tesis, intitulado:

EXTRACCIÓN DE ZINC MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR AGITACIÓN DE LA SMITHSONITA DEL YACIMIENTO DE PARCCO – ACCHA – PARURO

(Investigación Tecnológica)

El presente trabajo de investigación tiene como propósito principal extraer zinc (Zn) mediante lixiviación ácida, utilizando como materia prima los minerales de smithsonita almacenados, los cuales representan un producto secundario obtenido del método de pallaqueo.

Este estudio aplica conocimientos académicos, científicos y técnicos con el fin de cumplir de manera óptima los objetivos planteados. Su relevancia radica en generar un valor agregado del mineral, promoviendo la eficiencia en el aprovechamiento de recursos minerales y en contribución para el avance en el ámbito de la ingeniería metalúrgica.

Mayra Katherin Jordan Ampa

Yaneth Llasa Yucra

DEDICATORIA

A Dios, por permitirnos avanzar y seguir acompañándonos en cada momento.

A mis padres, Carlota A. e Isidro J. por el apoyo recibido durante el transcurso de mi formación profesional.

A mi compañera de trabajo y docentes por el apoyo durante el desarrollo del presente proyecto.

Mayra Katherin Jordan Ampa

A mis queridos padres, Santos Ll. y Matilde Y., por sus enseñanzas y el apoyo constante en cada paso de mi camino.

A mi hermanita Ruth y a mi pequeño, quienes llenan mi vida de momentos felices y me inspiran a ser mejor cada día.

A quienes confiaron en mí, especialmente a Yhon, por su apoyo a lo largo de este viaje lleno de retos y aprendizajes.

Yaneth Llasa Yucra

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradecemos a nuestros asesores, el Dr. Pedro Camero Hermoza y al Dr. Rolando Ramos Obregón, por su valiosa orientación, paciencia y apoyo constante durante todo este proceso. Sus conocimientos y consejos han sido esenciales para el desarrollo de esta tesis.

Agradecemos también a nuestros docentes y compañeros de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC, quienes con sus enseñanzas y colaboración han enriquecido nuestra formación tanto académica como personal.

A nuestras familias, por su amor incondicional, comprensión y apoyo en todo momento. Gracias por creer en nosotras y por ser nuestra fuente de inspiración y fortaleza.

A nuestros amigos, por su compañía, ánimo y por los momentos de distracción que nos ayudaron a mantener el equilibrio durante este arduo camino.

Finalmente, agradecemos a todas las personas y entidades que, de manera directa o indirecta, han contribuido a la culminación de esta tesis. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

Mayra Katherin Jordan Ampa

Yaneth Llasa Yucra

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
SIMBOLOGÍA	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Situación del Problema	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1. Problema General	2

1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Justificación	2
1.3.1. Justificación Económica.....	2
1.3.2. Justificación Social.....	3
1.3.3. Justificación Tecnológica	3
1.3.4. Justificación Ambiental	4
1.3.5. Valor Teórico	4
1.3.6 Utilidad Metodológica.....	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes Internacionales	6
2.2. Antecedentes Nacionales	9
2.3. Bases Teóricas.....	10
2.3.1. Química del Zinc	10
2.3.2. Procesos Hidrometalúrgicos	13
2.3.2.1. Lixiviación Ácida Inorgánica	13
2.3.2.2. Lixiviación Ácida Orgánica.....	15
2.3.3. Lixiviación Ácida de la Smithsonita	15

2.3.5. Factores Influyentes en el Proceso de Lixiviación	18
2.3.6. Termodinámica del Proceso.....	23
2.3.6.1. Diagrama de Pourbaix	23
2.3.6.2. Química de la Smithsonita en Medio Acuoso	25
2.3.6.3. Solubilidad de la Smithsonita en Ácido Sulfúrico.....	28
2.4. Cinética del Proceso de Lixiviación	31
2.4.1. Reacción Heterogénea	31
2.4.2. Selección del Modelo Cinético.....	34
2.4.2.1. Modelo de Núcleo Decreciente (Shrinking Core Model - SCM).....	34
2.4.2.1.1. Modelo de Jander	35
2.4.2.1.1. Modelo de Jander Modificado.....	36
2.4.2.2. Modelo de Conversión Progresiva (Progressive- Conversión Model – PCM)37	
2.4.2.2.1. Modelo de Reacción de Superficie Controlada -Modelo Topoquímico	38
2.5. Marco Conceptual	39
2.5.1. Acidez	39
2.5.2. Ácido Fuerte	39
2.5.3. Ácidos Orgánicos.....	40
2.5.4. Ácidos Inorgánicos	40
2.5.5. Regiones de Estabilidad.....	40
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES	41
3.1. Hipótesis	41

3.1.1. Hipótesis General	41
3.1.2. Hipótesis Específicas	41
3.2. Variables	41
3.2.1. Identificación de Variables	41
3.2.2. Operacionalización de Variables	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	44
4.1. Ámbito del Estudio: Localización Política, Geográfica	44
4.1.1. Localización Política	44
4.1.2. Localización Geográfica.....	45
4.2. Diseño de Investigación.....	46
4.2.1. Método de Investigación	46
4.2.2. Tipos de Investigación.....	46
4.2.3. Nivel de Investigación (Alcance)	47
4.3. Población de Estudio	48
4.3.1. Población	48
4.3.2. Tamaño de Muestra	48
4.3.3. Técnicas de Selección.....	49
4.3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad.....	49
4.3.4.1. Técnica	49

4.3.4.2. Instrumentos	50
4.3.4.3. Validez y Confiabilidad de Instrumentos.....	55
4.4. Plan de Análisis de Datos	55
4.5. Diagrama de Bloques de la Prueba Experimental.....	56
CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES	58
5.1. Muestreo.....	58
5.1.1. Preparación de Muestra Representativa.....	58
5.2. Pruebas Preliminares	60
5.2.1. Análisis Mineralógico.....	60
5.2.2. Análisis Químico	61
5.2.3. Cálculo del Porcentaje de Humedad.....	62
5.2.4. Cálculo de la Gravedad Específica.....	62
5.3. Prueba de molienda y Análisis Granulométrico	64
5.4. Pruebas experimentales	73
5.4.1. Preparación de Pulpa	74
5.4.2. Preparación de Solución Lixivante.....	76
5.4.3. Determinación del Porcentaje de Extracción.....	77
5.5. Cinética del Proceso	83
5.6. Diseño Factorial 2³ con Puntos Centrales con Minitab	86

5.7. Variables Evaluadas	87
5.8. Representación Geométrica de las Combinaciones	89
5.9. Análisis de los Efectos Principales y de Interacción	92
5.10. Análisis de Varianza	94
5.11. Análisis de Reportes Gráficos	96
5.11.1. Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	96
5.11.2. Gráfica Normal de Efectos Estandarizados	97
5.12. Modelo matemático	98
5.12.1. Ecuación del Modelo Matemático a Escala Codificada	98
5.12.2. Ecuación del Modelo Matemático a Escala Natural (Modelo Matemático Lineal)	99
5.13. Optimización de Respuesta	99
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	101
6.1. Discusión de Resultados	101
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	106
ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Porcentaje en peso de zinc en minerales más conocidos.	12
Tabla 2 Líneas de equilibrio en relación al tipo de reacción	25
Tabla 3 Operacionalización de variables.	43
Tabla 4 Equipos de laboratorio para las pruebas de lixiviación.	51
Tabla 5 Materiales y herramientas de laboratorio.....	52
Tabla 6 Reactivos de laboratorio.	54
Tabla 7 Análisis mineralógico del mineral del yacimiento de parroco.....	60
Tabla 8 Ley de cabeza del mineral de zinc.....	61
Tabla 9 Resultados del porcentaje de humedad.....	62
Tabla 10 Resultados de la gravedad específica del mineral.	63
Tabla 11 Prueba de análisis granulométrico de la muestra mg 1, t1= 20 minutos.....	65
Tabla 12 Prueba de análisis granulométrico de la muestra mg 2, t2= 25 minutos	66
Tabla 13 Prueba de análisis granulométrico de la muestra mg 3, t3= 30 minutos	67
Tabla 14 Prueba de análisis granulométrico de la muestra mg 4, t4= 35 minutos	68
Tabla 15 Prueba de análisis granulométrico de la muestra mg 5, t5= 40 minutos	69
Tabla 16 Recolección de datos para la cinética de la molienda.....	70
Tabla 17 Balance de pulpa para 25% de sólidos.	74
Tabla 18 Balance de pulpa para 30% de sólidos.	75
Tabla 19 Balance de pulpa para 35% de sólidos.	75

Tabla 20 Preparación de solución lixiviante.....	76
Tabla 21 Pesos de relaves de las 11 muestras.....	78
Tabla 22 Balance de materia para muestra 1.....	78
Tabla 23 Balance de materia para muestra 2.....	79
Tabla 24 Balance de materia para muestra 3.....	79
Tabla 25 Balance de materia para muestra 4.....	79
Tabla 26 Balance de materia para muestra 5.....	80
Tabla 27 Balance de materia para muestra 6.....	80
Tabla 28 Balance de materia para muestra 7.....	80
Tabla 29 Balance de materia para muestra 8.....	81
Tabla 30 Balance de materia para muestra 9.....	81
Tabla 31 Balance de materia para muestra 10.....	81
Tabla 32 Balance de materia para muestra 11.....	82
Tabla 33 Resumen de porcentaje de extracción y ley de concentrado por prueba metalúrgica m1 – m8.....	82
Tabla 34 Resumen de porcentaje de extracción y ley de concentrado por prueba metalúrgica m9 – m11.....	83
Tabla 35 Data obtenida para determinar modelo cinético.....	84
Tabla 36 Valores mínimos y máximos utilizados en el proceso de lixiviación.....	87
Tabla 37 Variables en escala natural y codificada con replicas en el centro.....	88
Tabla 38 Efectos estimados para la extracción del zinc (unidades codificadas).....	90

Tabla 39 Análisis de la varianza.....95

Tabla 40 Factores óptimos para la extracción.....99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Eh-pH del sistema Zn-C-H ₂ O, T= 25oC	27
Figura 2 Proceso de transferencia de masa	32
Figura 3 Modelo del núcleo que se encoge sin reaccionar.....	34
Figura 4 Modelo de conversión progresiva PCM.	38
Figura 5 Fotografía de reserva de mineral de smithsonita	44
Figura 6 Ubicación Geográfica	45
Figura 7 Diagrama de bloque de la prueba experimental.....	57
Figura 8 Distribución de muestras para pruebas preliminares.	59
Figura 9 Procedimiento para pruebas de análisis granulométrico.....	64
Figura 10 Curva de distribución de tamaños de muestra MG 1.....	66
Figura 11 Curva de distribución de tamaños de muestra MG 2.....	67
Figura 12 Curva de distribución de tamaños de muestra MG 3.....	68
Figura 13 Curva de distribución de tamaños de muestra MG 4.....	69
Figura 14 Curva de distribución de tamaños de muestra MG 5.....	70
Figura 15 Curva de cinética de molienda.....	71
Figura 16 Procedimiento de pruebas experimentales.....	73
Figura 17 Modelo matemático Topoquímico.....	84
Figura 18 Modelo matemático de Jander	85
Figura 19 Modelo matemático de Jander Modificado.....	85
Figura 20 Porcentaje de extracción vs el tiempo.....	86
Figura 21 Representación geométrica de las variables en 2 ³ puntos centrales.....	89
Figura 22 Efectos principales para la extracción de Zinc	92

Figura 23 Efectos de interacción para la extracción de Zinc.	93
Figura 24 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.	96
Figura 25 Gráfica normal de efectos estandarizados.....	97
Figura 26 Grafica de optimización de las tres variables para el modelo.....	100

RESUMEN

La presente investigación consiste en determinar la extracción del zinc utilizando el proceso de lixiviación ácida por agitación del mineral de smithsonita, un mineral con alto contenido de carbonatos, para mejorar la extracción de zinc y aumentar la eficiencia de producción mediante el uso de técnicas hidrometalúrgicas. Con el objetivo de determinar el porcentaje de zinc que se obtendrá del mineral de smithsonita procedente del yacimiento de Parcco mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación. Para alcanzar este objetivo, se empleó un diseño experimental factorial 2^3 con enfoque cuantitativo y nivel explicativo, que permitió evaluar tres variables independientes: la concentración del ácido sulfúrico (100, 150 y 200 g/L), porcentaje de sólidos (25%, 30% y 35%) y tiempo de lixiviación (1.5, 2.0 y 2.5 horas), tomando como variable dependiente el porcentaje de extracción de zinc. Las pruebas experimentales se realizaron con muestras de 20 kg; fueron chancadas, molidas y tamizadas hasta obtener una granulometría de (-200) malla. Las pruebas se realizaron en reactores de lixiviación en botellas roladas, y las muestras se analizaron mediante espectrometría de absorción atómica (AAS). Así mismo, se efectuaron balances de materia y un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos principales y las interacciones entre las variables, desarrollando un modelo matemático para predecir el porcentaje de extracción de zinc. Los resultados indicaron que la concentración óptima de ácido sulfúrico fue de 200 g/L, con un porcentaje de sólidos del 25 % y un tiempo de lixiviación de 1.5 horas, debido al alto contenido de carbonatos en el mineral. Se concluyó que el porcentaje de zinc obtenido en este trabajo de investigación fue del 96.43 %.

Palabras clave: smithsonita, carbonatos, lixiviación ácida, extracción, Parcco.

ABSTRACT

The present research focuses on determining zinc extraction using the acid agitation leaching process applied to smithsonite, a mineral with a high carbonate content, to enhance zinc recovery and increase production efficiency through the use of hydrometallurgical techniques. The general objective is to determine the percentage of zinc recoverable from smithsonite ore originating from the Parcco deposit through the acid agitation leaching process. To achieve this objective, a factorial 2^3 experimental design with a quantitative and explanatory approach was implemented, allowing the evaluation of three independent variables: sulfuric acid concentration (100, 150, and 200 g/L), solids percentage (25%, 30%, and 35%), and leaching time (1.5, 2.0, and 2.5 hours). The dependent variable was the zinc extraction percentage. Experimental tests were carried out using 20 kg samples that were crushed, ground, and sieved to achieve a particle size of (-200) mesh. The tests were conducted in rolling bottle leaching reactors, and the samples were analyzed using atomic absorption spectrometry (AAS). Additionally, material balances and an analysis of variance (ANOVA) were performed to evaluate the main effects and interactions between the variables, leading to the development of a mathematical model to predict the zinc extraction percentage. The results showed that the optimal sulfuric acid concentration was 200 g/L, with a solids percentage of 25% and a leaching time of 1.5 hours, due to the high carbonate content in the ore. It was concluded that the zinc extraction percentage achieved in this research was 96.43%.

Keywords: Smithsonite, carbonates, acid leaching, extraction, Parcco.

SIMBOLOGÍA

$\%H$	Porcentaje de humedad.
C°	Grados Celsius.
DEHPA	Ácido Di(2-etilhexil) fosfórico.
EAFD	Electric Arc Furnace Dust (Polvo de Horno de Arco Eléctrico).
G.E	Gravedad Especifica.
H_2SO_4	Ácido sulfúrico.
Ka_2	Constante de disociación del ácido carbónico de la 2da disociación.
KPI	Indicador clave de desempeño.
K_{ps}	Constante de solubilidad.
kt	Kilotoneladas.
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar.
OGPP	Oficina general de planeamiento y presupuesto.
P	Porcentaje de sólidos.
S	Solubilidad molar.
USD	United States Dollar (Dólar de los Estados Unidos).
$ZnCO_3$	Smithsonita.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la extracción de zinc se considera un proceso fundamental en la industria minera debido a su amplio uso en aplicaciones como la galvanización del acero, la fabricación de baterías, la producción de aleaciones metálicas y productos químicos. En Perú, los depósitos de carbonato de zinc, especialmente aquellos compuestos por smithsonita (ZnCO_3), ubicados en el yacimiento de Parcco-Accha, en la región de Cusco, se destacan por su alto contenido de zinc y su importancia metalogénica.

El presente estudio de investigación se centra en la extracción de zinc mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación de la smithsonita, evaluando la influencia de variables independientes como la concentración de ácido sulfúrico, el porcentaje de sólidos en la pulpa y el tiempo de lixiviación en la extracción de zinc. Este trabajo de investigación no solo aporta conocimientos técnicos al campo de los procesos hidrometalúrgicos, sino que también contribuye al desarrollo sostenible y al fortalecimiento de la economía regional.

La estructura del estudio de investigación es la siguiente:

Capítulo I: Define el problema de la investigación, formulando el problema general y los específicos, así como los objetivos generales y específicos, y las justificaciones conveniencia, relevancia social, relevancia tecnológica, valor teórico y unidad metodológica.

Capítulo II: Abarca los conceptos generales del tema, los procesos y modelos a utilizar, y todos los análisis necesarios para determinar la extracción de zinc.

Capítulo III: Presenta las hipótesis generales y específicas, así como la identificación de variables.

Capítulo IV: Define el ámbito de estudio, diseño de investigación y población de estudio, la cual se basó en el enfoque cuantitativo y nivel explicativo.

Capítulo V: Describe los resultados experimentales y los balances metalúrgicos realizados en base a los datos experimentales obtenidos. También se realiza el análisis e interpretación de los resultados obtenidos empleando el software Minitab 19.

Capítulo VI: Se dedica a la discusión de resultados obtenidos, donde se compara y contextualizan los resultados obtenidos en la investigación.

Además, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

Finalmente, se incluyen los anexos, que contienen las evidencias de las pruebas realizadas y otros testimonios relevantes del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación del Problema

En la provincia de Paruro, entre los distritos de Accha y Colquamarca, se encuentran los depósitos de zinc en el yacimiento de Parcco, según FEDU (2022) con una reserva probable de 10,571 kt y una ley de Zn de 11.20%, de acuerdo con el análisis de laboratorio realizado por "Laboratorios Analíticos del Sur", a partir de una muestra probabilística. Este yacimiento es metalogénico y rico en zinc; debido a su mineralogía, comparte muchas características con otros minerales no sulfurados, como la calamina, que se encuentran en carbonatos. Según Boni, Balassone y Arseneau (2009): “la smithsonita y la hemimorfita pueden reemplazar tanto a los minerales primarios como a las rocas carbonatadas” (p. 1). Esta característica particular ofrece una ventaja significativa para la aplicación de procesos metalúrgicos en la extracción de zinc.

Actualmente, el yacimiento de Parcco está siendo explotado mediante el método de pallaqueo, que posteriormente es comercializado como mineral de broza en el mismo lugar. Sin embargo, después del pallaqueo queda una cantidad considerable de mineral de baja ley de zinc como material de desecho. Este mineral, que contiene smithsonita, está siendo almacenado para su futura explotación.

Ante esta situación, el problema reside en la necesidad de aprovechar estos minerales de baja ley, las cuales son producto secundario del método del pallaqueo, aplicando métodos eficientes para la extracción de zinc de estos residuos.

Por ello, la presente tesis busca procesar de manera eficiente los minerales de smithsonita con baja ley de zinc mediante la lixiviación ácida por agitación, con el fin de extraer el zinc de los

residuos mineros. Este proceso puede verse afectado por diversas variables operativas. En este estudio, se investiga la influencia de las variables independientes: la concentración de ácido sulfúrico, el porcentaje de sólidos en la pulpa y el tiempo de lixiviación, en la extracción del zinc.

Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a mejorar los métodos actuales de extracción de zinc, permitiendo la explotación sostenible de minerales de baja ley y promoviendo una mayor eficiencia en la producción de zinc en el Perú.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

PG: ¿Qué porcentaje de Zinc se obtendrá del mineral de Smithsonita procedentes del Yacimiento de Parcco mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿Cuál es la concentración del ácido sulfúrico más óptima para la lixiviación ácida?

PE2: ¿A qué porcentaje de sólido se logrará una mejor extracción de Zinc?

PE3: ¿En qué tiempo se obtendrá una mejor extracción de Zinc?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Económica

La investigación propuesta se centra en llevar a cabo estudios y procesos metalúrgicos para extraer zinc de estos minerales mediante lixiviación ácida. Este enfoque permitirá aumentar los ingresos económicos y diversificar la producción, adaptándose mejor a las condiciones del mercado.

Actualmente, los ingresos provienen de la explotación y venta de minerales de broza de alta ley, obtenidos a través del método de pallaqueo. No obstante, este método genera una gran cantidad de minerales de baja ley que son descartados. Procesar estos minerales no solo generaría ingresos adicionales, sino que también convertiría un material considerado desecho en un producto comercializable.

1.3.2. Justificación Social

Se propone la implementación del proceso de lixiviación ácida para posibilitar nuevos puestos de trabajo para los pobladores de la comunidad de Parcco y sus alrededores, así como para técnicos y profesionales, cuando el proyecto se ejecute. Esta iniciativa no solo proporcionará oportunidades laborales, sino que también contribuirá a mejorar las condiciones de vida de la población local.

A si mismo se podría reducir la dependencia económica de métodos de explotación menos sostenibles como el pallaqueo, mejorando las condiciones laborales y promoviendo un desarrollo económico más equitativo.

1.3.3. Justificación Tecnológica

El estudio y aplicación de la lixiviación ácida por agitación en la extracción de zinc de minerales de smithsonita y minerales de óxidos de zinc de bajas leyes de la comunidad de Parcco representa un avance tecnológico significativo. Este método va mejorar la eficiencia y la extracción del zinc, comparado con técnicas tradicionales. Además, puede servir como base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la metalurgia extractiva.

1.3.4. Justificación Ambiental

Esta investigación ha demostrado que la lixiviación ácida por agitación es una tecnología limpia y sostenible por varias razones. En primer lugar, permite aprovechar minerales de baja ley que actualmente son considerados desechos, transformándolos en recursos valiosos y comercializables. Esto reduce la acumulación de residuos mineros y minimiza el impacto ambiental negativo asociado con la minería.

Además, la lixiviación ácida por agitación es una técnica más eficiente y menos contaminante en comparación con otros métodos tradicionales. Al optimizar el uso de los recursos minerales disponibles, se promueve una gestión ambiental responsable, reduciendo la contaminación del suelo y el agua y se cumplirá con las normativas ambientales que figuran en la Ley 28611 “Ley General del Ambiente” y D.S. N° 042-2017-EM “Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera”.

La mineralogía del yacimiento de Parcco, en donde abundan minerales carbonatos y óxidos de Zinc, que, a diferencia de la esfalerita, nos permite aplicar libremente el proceso de lixiviación sulfúrica, evitando generar en el transcurso del proceso gases tóxicos al medio ambiente, y la contaminación del aire.

1.3.5. Valor Teórico

El trabajo de investigación proporciona conocimiento lo que fortalece al conocimiento científico en el ámbito de la metalurgia extractiva sobre la eficacia de la lixiviación ácida por agitación como método para el procesamiento de minerales de carbonatos de zinc, específicamente la smithsonita. Al centrarse en los residuos mineros de baja ley, este estudio amplía el conocimiento sobre las posibilidades de extracción de zinc del yacimiento de Parcco.

Además, este estudio examina detalladamente la variable que influye en la extracción de zinc, proporcionando datos valiosos que pueden servir como referencia en investigaciones similares.

1.3.6 Utilidad Metodológica

El estudio, mediante la aplicación de la lixiviación ácida de la Smithsonita muestra las condiciones óptimas para ajustar los parámetros del proceso con el fin de maximizar la eficiencia y la extracción del zinc, como estrategia de control operativo y de calidad, y los resultados obtenidos pueden servir como base para investigaciones futuras y explorar nuevas áreas de mejora en el proceso de lixiviación ácida.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

OG: Determinar el porcentaje de Zinc que se obtendrá del mineral de Smithsonita procedentes del Yacimiento de Parcco mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación.

1.4.2. Objetivos Específicos

OE1: Determinar la concentración del ácido sulfúrico para una mejor extracción de Zinc.

OE2: Determinar el porcentaje de sólidos de las muestras de mineral para una mejor extracción de Zinc.

OE3: Determinar el tiempo de lixiviación ácida para una mejor extracción de Zinc.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Internacionales

Tamargo, F. J. (2012) en su trabajo de investigación titulado *Método hidrometalúrgico para la recuperación de zinc en medio sulfúrico a partir de concentrados de zinc sulfurados* aplica el proceso Jarosita, que consiste en la aplicación de los procesos de lixiviación neutra y ácida. En su trabajo explica las diferentes etapas desde la tostación de los concentrados sulfurados de Zinc para convertirlos en óxidos, posterior lixiviación neutra para disolver los óxidos de Zinc.

Posteriormente, se realiza la lixiviación ácida con ácido sulfúrico y electrolito agotado para lixiviar las ferritas de Zinc y obtener soluciones ricas de sulfato férrico y sulfato de zinc, a condiciones de 80 C° (y punto de ebullición de la solución) con concentración de ácido de entre 10 a 140 g/ L, obteniendo una solución con acidez de entre 10 a 70 g/L. Luego, se lleva a cabo la reducción de Fe férrico (+3) a ferroso (+2), donde la concentración de ácido y las temperaturas permanece constante a la anterior etapa. Después se neutraliza la solución ácida con calceína aumentando el pH hasta 5.2, para luego llevarlo a un tratamiento de separación o precipitación del arsénico y otras impurezas en cuya etapa se reduce el Fe férrico a ferroso, y pasar a la etapa de oxidación de Fe ferroso a férrico y precipitación de la Jarosita, para acelerar la oxidación se suministra oxígeno enriquecido y adición de álcali, a condiciones de 80 C° (y punto de ebullición de la solución), pH de 2, y acidez de 15 g/L, finalizando con la precipitación de la jarosita formada, obteniendo una extracción del 98% de Zinc.

Velasco Mier, G. D.(2018),en su proyecto *Diseño de una planta de recuperación de zinc a partir de los polvos de acería mediante lixiviación con ácido sulfúrico y deposición electrolítica*. Tesis de Licenciatura.

El objetivo fue crear una planta para la recuperación de zinc (Zn) de los polvos de acería de las industrias siderúrgicas.

Se utilizó una técnica de lixiviación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y deposición electrolítica posterior. La planta, diseñada para tener una capacidad de 19,43 toneladas por ciclo de proceso, consta de cinco etapas principales: lixiviación ácida, filtración, acondicionamiento de pH, cementación y fusión.

Los resultados obtenidos fueron que los polvos de acería se mezclan con una solución de H_2SO_4 con una concentración de 150 g/L para alcanzar un porcentaje de sólidos del 33%. Las etapas de filtración eliminan los desechos sólidos y metales de la solución. El zinc catódico producido por la electrólisis de la solución se funde en un horno de inducción a $550^{\circ}C$ con cloruro de amonio (NH_4Cl) como carga fundente. Basado en la recuperación de Zn, que representa 809,716 toneladas de Zn por año, el rendimiento total del proceso alcanza el 68%.

Se concluyó que con el precio internacional del Zn en 2 750 USD por tonelada (2017), el proyecto tiene indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN) que reporta un valor de 150 144,85 USD y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que reporta un valor de 19,3%, demostrando la rentabilidad del proceso.

En un estudio internacional, Ramazanov R.A. et al. (2021) llevaron a cabo una investigación titulada “*Research Of Kinetics Of Zinc Leaching With Sulfuric Acid From*

Smithsonite” [*Investigación de cinética de lixiviación de zinc con ácido sulfúrico de la smithsonita*] publicada en la revista Metalurgija.

El Objetivo de la investigación fue examinar la cinética de lixiviación de zinc a partir de la smithsonita usando ácido sulfúrico. La metodología fue experimental, el mineral se trituró y se sometió a lixiviación con ácido sulfúrico en diferentes concentraciones y temperaturas. Se midió la tasa de recuperación de zinc en función del tiempo y la temperatura de lixiviación. Los parámetros específicos incluyeron: Tamaño de partícula del mineral: 20 mm, concentración de ácido sulfúrico: 150 g/dm³, temperaturas de lixiviación: 20, 40, 60 y 80 °C y tiempo de lixiviación: 5, 10, 15 y 20 minutos. Los resultados indicaron que la extracción máxima de zinc, alcanzando un 73.52%, se logró en un tiempo de 20 minutos a una temperatura de 80 °C, la tasa de lixiviación aumentó con el incremento de la temperatura y la duración del proceso y la energía de activación "aparente" de la reacción de smithsonita con ácido sulfúrico se determinó en 2.633 kJ/mol, indicando que la reacción está controlada por la difusión. El estudio concluyó que la lixiviación de zinc a partir de smithsonita con ácido sulfúrico es más eficiente a temperaturas más altas y con tiempos de lixiviación más prolongados y que el ácido sulfúrico es fundamental para la lixiviación de la smithsonita, ya que facilita la disolución del zinc y controla la cinética del proceso.

En un estudio a nivel internacional también se encontró a Borda J. et al. (2021) , se realizó una investigación titulada “*Selective leaching of zinc and lead from electric arc furnace dust using citrate and H₂SO₄ solutions. A kinetic perspective*” [*Lixiviación selectiva de zinc y plomo del polvo de un horno de arco eléctrico utilizando soluciones de citrato y H₂SO₄. Una perspectiva cinética*] publicada en la Revista Mexicana de Ingeniería Química.

El objetivo del estudio fue analizar la velocidad de la lixiviación del polvo de horno de arco eléctrico (EAFD) empleando citrato de sodio y ácido sulfúrico a concentraciones de 12 g/l, 25 g/l y 50 g/l para la extracción de zinc y plomo, evaluando la eficiencia de ambos reactivos en diversas condiciones. La metodología utilizada fue experimental incluyó pruebas en reactores de vidrio Pyrex, variando la proporción sólido-líquido, la concentración de reactivos y la temperatura, con ensayos realizados a 500 rpm durante tres horas. Las muestras se analizaron mediante espectrometría para medir las concentraciones de zinc y plomo. Utilizando el modelo de núcleo retráctil, se estudió la cinética de lixiviación y se calcularon las energías de activación. Los resultados mostraron que el ácido sulfúrico era más eficiente, logrando hasta un 96% de extracción de zinc a 50°C, mientras que el citrato de sodio, aunque menos eficaz para el zinc, fue más selectivo para el plomo, alcanzando cerca del 80% de extracción. La conclusión principal es que el ácido sulfúrico es el reactivo más eficiente para extraer zinc del EAFD, aunque presenta desafíos debido a la disolución de hierro.

En el estudio también se visualizó que, de acuerdo a la cinética del proceso, el porcentaje de extracción de zinc aumentaba a medida que la concentración del ácido sulfúrico se incrementaba, demostrando la rápida reacción de las partículas de zinc y el ácido en las primeras horas de proceso, y que después de cierto tiempo de residencia el porcentaje de extracción no presenta muchos cambios, pero si lo hace a niveles de concentración de ácido mayores, concluyendo que la concentración del ácido es más significante.

2.2. Antecedentes Nacionales

En el contexto nacional Cardoza, O. F (2019). llevo a cabo un estudio titulado, ***Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en***

la empresa Nexa Resources Cajamarquilla, esta tesis fue presentada para obtener el título de Ingeniero Metalúrgico en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

El objetivo fue incrementar la recuperación de zinc mediante la metodología Seis Sigma, centrándose en minimizar las pérdidas en el proceso de producción. La metodología consistió en aplicar las cinco fases del ciclo DMAIC y se identificaron las mayores pérdidas en la etapa de lixiviación ácida. Se evaluaron las variables según su impacto y esfuerzo de implementación, utilizando herramientas como la Matriz de Esfuerzo e Impacto y el Diagrama de Pareto. Se implementaron acciones específicas con plazos y responsables para mejorar el control de estas variables. Se estandarizaron los parámetros del proceso y se capacitó al personal para mantener los resultados. Los resultados mostraron que el zinc está mayormente presente como sulfuros, lo que afecta la lixiviación de las ferritas de zinc, se logró proyectar la recuperación de 1.09% de zinc en el residuo Pb/Ag, lo que representa un 0.15% de la recuperación global de la planta y una ganancia de 1.03 millones de dólares anuales. Se concluye que la metodología Seis Sigma resultó ser una herramienta eficaz para la mejora continua, y la reducción de azufre en forma de sulfuros en la calcina ayudará a alcanzar la meta de recuperación de zinc.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Química del Zinc

El Zinc en la naturaleza se halla formando minerales como la Esfalerita (ZnS), Smithsonita ($ZnCO_3$), Hemimorfita ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$) y Franklinita ($ZnFe_2O_4$), y otros minerales poco comunes, pero con buen contenido de Zinc como la Wurtzita ($(Zn,Fe)S$) que según A. Torres (s.f.) menciona la composición química de “60,98% de Zinc, 33,23% de Sulfuro y 5,79% de Hierro” y la Marmatita ($(ZnFe)S$) que según McIntyre et. al (1980) menciona la composición química de

“Fe: 2,88%, S: 33,06% y Zn: 64,06%”; en la tabla 1 se puede ver el contenido del Zinc en diferentes minerales más abundantes.

Según Habashi, F. (2011), como se citó en Herrera Aldave & Chavez Diaz (2019), afirma que el Zinc puro es un metal cristalino, insoluble en agua caliente y fría, y soluble en alcohol, en los ácidos y en los álcalis. Es extremadamente frágil a temperaturas ordinarias, pero se vuelve maleable entre los 120 y los 150 °C, y se lamina fácilmente al pasarlo entre rodillos calientes. No es atacado por el aire seco, pero en aire húmedo se oxida, cubriéndose con una película carbonada que lo protege de una posterior corrosión.

El zinc según Pellicer Roig (2024) es el elemento químico de número atómico 30, lo que significa que cada átomo de zinc cuenta con 30 protones en su núcleo atómico. El nombre del elemento proviene del alemán zinke, sin embargo, se suele utilizar zinc, ya que su símbolo atómico es Zn. Se encuentra en el grupo 12 y el periodo 4 de la tabla periódica, por lo que pertenece al grupo de los metales de transición.

En la producción de Zinc a nivel mundial, China fue el mayor productor de Zinc con 4 millones de toneladas, seguida por Perú con un volumen de 1,4 millones de toneladas, en el 2023 (Fernández, 2024), y durante el mes de enero del 2024, la principal empresa productora de Zinc en el Perú fue la Compañía Minera Antamina S.A. con un 20 % a nivel nacional (OGPP, 2024).

Tabla 1

Porcentaje en peso de zinc en minerales más conocidos.

Minerales	Fórmula química	Zinc (%)
Esfalerita/blenda de Zinc	ZnS	67
Willemita	Zn_2SiO_4	58.6
Hemimorfita	$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$	56.15
Smithsonita/espato de zinc	$ZnCO_3$	52.14
Franklinita	$ZnFe_2O_4$	27.13

Nota. Los datos fueron obtenidos mediante cálculo.

Reactividad

El zinc muestra propiedades anfóteras, reaccionando tanto con ácidos como con bases.

Con ácidos: El zinc reacciona con ácidos diluidos, liberando hidrógeno y formando sales de zinc ejemplo de ello son las siguientes reacciones:

- $Zn + 2HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2 \uparrow$
- $Zn_{(s)} + H_2SO_{4(aq)} \rightarrow ZnSO_{4(aq)} + H_{2(g)}$

Con oxígeno: El zinc se oxida lentamente al aire, formando una capa protectora de óxido:

- $2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$

Con bases: Reacciona con bases fuertes para formar zincatos.



2.3.2. Procesos Hidrometalúrgicos

Según Ricaurte J. et. al (2014) la obtención de Zinc por vía pirometalúrgica implica una fusión reductora de los residuos hasta evaporar el Zn, extraerlo en forma de óxido del horno y recuperarlo en filtros, este método tiene la desventaja de generar altos niveles de Cd, Pb, Cr y Ni, los cuales se evaporan en conjunto con el Zinc, debiendo someter los óxidos a procesos de purificación previa al reciclaje del metal. (p. 1)

Por otro lado, la extracción de Zinc por vía hidrometalúrgica tiene la ventaja de extraer Zinc metálico de forma directa del zinc electrolítico. Se puede realizar lixiviación ácida inorgánica: por lixiviación sulfúrica, clorhídrica, amoniacal o cáustica, y lixiviación con ácidos orgánicos como el acético, tartárico y cítrico. (De La Torre E. et al., 2013)

2.3.2.1. Lixiviación Ácida Inorgánica

Se puede extraer Zinc usando como agente lixivante ácido generalmente como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico, este último por su buena selectividad hacia el Zinc, permitiendo bajas recuperaciones de impurezas, las cuales pueden afectar la recuperación del Zn en solución por electrólisis (electrodeposición) (Ricaurte J. et al., 2014).

Al utilizarse ácido sulfúrico y ácido clorhídrico grado técnico, el HCl posee más impurezas que podría generar mayores reacciones entre impurezas. Esto implica que mediante la lixiviación sulfúrica se logrará que el ácido se enfoque especialmente en la reacción con el Zn, esto se expresa en mayores recuperaciones de Zinc.

A. Lixiviación Sulfúrica

Según Espinoza G. (2012) La concentración de la solución ácido sulfúrico puede variar de entre 50 a 200 g/L, y esta se mezcla con el concentrado de Zinc, lixiviándolo por agitación, donde la temperatura puede variar desde temperatura ambiente hasta 80°C. con un pH de entre 1 a 3 aprox. con un tiempo mínimo de residencia de 1 hora, permitiendo recuperar el 80 al 90% de Zinc. (p. 40)

Se considera una lixiviación de ácido débil cuando el pH es de 4 y 6, a una concentración ácido próxima a 10g/L.

De este proceso de lixiviación ácida Espinoza G. (2012) afirma que se obtendrá la solución lixivante es llevada a un espesador y posteriormente se filtra con el fin de obtener la solución con Zinc disuelto (electrolito de sulfato de Zinc) y un residuo sólido (como ferritas de Zinc: $ZnO.Fe_2O_3$, hidróxido de hierro, etc.), este electrolito se purificará usando el método de cementación mediante adición de polvos de Zinc que se precipitará en conjunto con las impurezas. Luego, se continuará con el proceso de electrodeposición, obteniéndose cátodos de Zinc, los cuales serán sometidos a fusión y lingoteado, y finalmente obtener el Zinc en forma metálica. (p. 40)

Después de obtener la máxima extracción de zinc, la solución lixivante es llevada a un espesador y posteriormente se filtra con el fin de obtener la solución con Zinc disuelto (electrolito de sulfato de Zinc) y un residuo sólido (ferritas de Zinc: $ZnO.Fe_2O_3$). Si no existe presencia representativa de hierro en la solución lixiviada se procede al proceso de purificación y posteriormente electrolisis del Zinc, porque una mayor concentración de hierro en solución perjudica la extracción de Zinc.

B. Lixiviación Clorhídrica

Se puede llevar a cabo dos métodos:

- “Lixiviación en una sola etapa-. Debido a la presencia de impurezas significativas y el grado de recuperación de Zinc es aprox. 70%, por lo que es necesario una etapa posterior de purificación por medio de extracción de solventes con DEHPA” (Román, 1992 como se citó en Espinoza Gutiérrez (2012).
- “Lixiviación en autoclave (a presión)-. Con este método se puede obtener hasta un 98% de recuperación de Zinc en solución, y posterior purificación y electrólisis” (Román, 1992 como se citó en Espinoza Gutiérrez (2012).

2.3.2.2. Lixiviación Ácida Orgánica

El concentrado de Zinc se lixivia empleando ácidos orgánicos como el ácido acético (vinagre comercial), cítrico, oxálico, tartárico, etc. con concentraciones desde 50 a 150 g/L, siendo estos dos primeros buenos agentes lixiviantes superando el 70% en recuperación de Zinc en un tiempo de residencia de 4 horas a un porcentaje de sólidos de 10%, se trabaja con un pH de aprox. 3. (Quiroga Jara, 2014)

2.3.3. Lixiviación Ácida de la Smithsonita

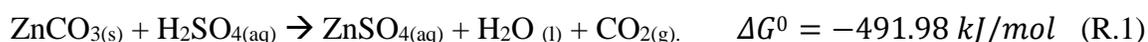
Es un proceso de extracción de Zinc que mediante una reacción de ácido – base, se disuelve el carbonato de zinc ($ZnCO_3$) y es convertido en sulfato de zinc ($ZnSO_4$), que es una forma soluble en agua.

Después de la preparación del mineral se obtienen partículas finamente molidas, generalmente de tamaños menores a 100 micrómetros o menores a 140 M, esto permitirá aumentar

el área de superficie y mejorar la eficiencia de la lixiviación, es decir, aumentará la tasa de reacción. Sin embargo, un tamaño de partícula muy fino puede causar problemas de manejo y sedimentación.

Reacción Principal

Cuando el carbonato de zinc se pone en contacto con ácido sulfúrico, ocurre una reacción de neutralización entre el carbonato (una base débil) y el ácido fuerte. La ecuación global es como la reacción R.1:



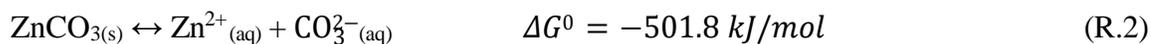
En esta reacción de ácido – base, el carbonato de zinc sólido reacciona con el ácido sulfúrico acuoso para formar sulfato de zinc soluble, dióxido de carbono gaseoso y agua.

Cuando la energía libre de Gibbs $\Delta G^0 < 0$ de una reacción es negativa, significa que la reacción puede ocurrir de forma espontánea bajo condiciones estándar, es decir, sin necesidad de un aporte energético externo significativo. Esto indica que la reacción tiene una tendencia natural a avanzar hacia la formación de los productos: sulfato de zinc, agua y dióxido de carbono.

Este proceso se lleva a cabo en varias etapas y cuyas reacciones parciales son:

1) Disolución del Carbonato de Zinc

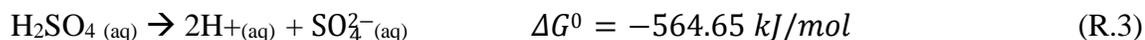
El ZnCO_3 se disuelve en el ácido sulfúrico, donde los iones de zinc (Zn^{2+}) y los iones carbonato (CO_3^{2-}) se separan, como se muestran en la reacción R.2 anteriormente vista:



El cálculo de energía libre de Gibbs muestra que esta reacción es espontánea bajo condiciones estándar. La reactividad del zinc puede representarse a partir de su capacidad para

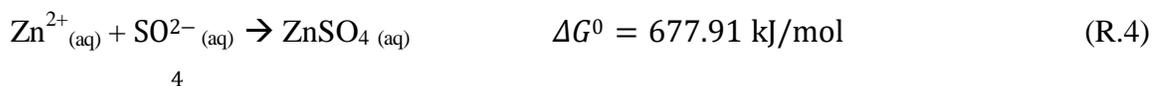
participar en diversas reacciones químicas, en este caso, reflejada en el proceso de disociación de carbonato de zinc.

Al mismo tiempo, el ácido sulfúrico se disocia en sus iones constituyente, como se muestran en la reacción R.3 anteriormente vista:



2) Formación de Sulfato de Zinc

Los iones de zinc (Zn^{2+}) reaccionan con los iones sulfato (SO_4^{2-}) para formar sulfato de zinc:



El Sulfato de zinc es soluble en agua y permanece en la solución, la solubilidad en agua de este producto es de 577 g/L a 25 °C (Heredia, 2016). De la reacción R. 4, el valor positivo de la energía libre de Gibbs indica que la reacción no es espontánea, aunque la reacción se puede dar si se considera que los iones Zn^{2+} y SO_4^{2-} tienen una fuerte afinidad que puede compensar parte de la barrera energética teórica, facilitando la formación de ZnSO_4 en solución acuosa, y aplicando la agitación mecánica mejora la interacción entre los reactivos iónicos.

Esta característica facilita la separación del zinc disuelto de los residuos sólidos no reactivos. Esto es fundamental para obtener una solución rica en zinc que puede ser procesada posteriormente, tales como la precipitación química, la electrólisis (electroobtención) o la cristalización. Estos métodos permiten la producción de zinc metálico o compuestos de zinc purificados.

La solubilidad del sulfato de zinc en agua facilita la purificación del zinc. Los procesos de purificación, como el ajuste del pH para precipitar impurezas o el uso de resinas de intercambio iónico, son más efectivos cuando el zinc está en solución acuosa.

3) Liberación de Dióxido de Carbono

Los iones carbonato (CO_3^{2-}) reaccionan con los iones hidrógeno (H^+) del ácido para formar ácido carbónico (H_2CO_3), el cual es inestable y se descompone rápidamente en agua y dióxido de carbono (desprende de la solución) vistas en la reacción R.5:



2.3.5. Factores Influyentes en el Proceso de Lixiviación

1) Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es el tiempo durante el cual el mineral permanece en contacto con la solución lixivante. En el proceso de lixiviación sulfúrica puede variar de 1 a 3 horas, el tiempo de residencia adecuado asegura que la reacción se complete.

Como expresa M. Tanaydın et al.(2021) “la tasa de disolución del zinc aumenta con el tiempo de lixiviación, alcanzando una disolución del 97% en 120 minutos bajo condiciones óptimas de concentración de ácido, temperatura y velocidad de agitación”.

Podemos considerar algunas influencias del tiempo en el proceso:

- Grado de Disolución del Metal: generalmente cuando el tiempo de residencia es mayor se obtendrá mayor disolución del metal, por lo que permitirá mayor extracción del zinc,

mientras que un tiempo excesivo puede no mejorar significativamente la disolución después de cierto punto óptimo.

- Cinética de la Reacción: La cinética de la reacción de formación del sulfato de zinc depende del tiempo. Al comienzo del proceso la velocidad es alta, pero a medida que el tiempo aumenta, la velocidad disminuye, debido a que la concentración de reactivos disminuye (hay menos reactivo disponible para continuar disolviendo el zinc del mineral) y a la posible aparición de superficies pasivantes.
- Un tiempo de residencia adecuado, ayuda a minimizar el consumo de reactivos con el fin de disolver la mayor cantidad de zinc sin desperdiciar el ácido.

“Se puede deducir que el tiempo repercute en la extracción del metal hasta un cierto punto límite, que a partir del cual el porcentaje de extracción permanece invariable” (División de materiales, 1957), debido a que la solución puede saturarse, es decir, que el ácido ya no puede disolver más zinc, porque se alcanza la cantidad de soluto máx. (zinc disuelto) que puede mantenerse en solución. En el punto de saturación, la solución está en equilibrio, y cualquier zinc adicional que intente disolverse no se integrará en la solución y puede empezar a precipitarse como sólido.

A tiempos excesivamente largos pueden no ser eficientes en términos de productividad y costos, y puede favorecer la disolución de impurezas presentes en el mineral, como el hierro. Un tiempo demasiado corto puede resultar en una lixiviación incompleta, esto se expresa en bajos porcentajes de extracción de zinc.

2) Concentración del Ácido Sulfúrico

Como menciona Napo et al (2011) “el ácido sulfúrico es un agente de lixiviación muy eficaz, con concentraciones más altas suelen resultar en una mayor extracción de zinc” (p.1).

También teniendo en cuenta a H. Xu et al. (2012) “la extracción de zinc aumenta con la concentración de ácido, alcanzando eficiencias de extracción superiores al 95% con concentraciones óptimas de ácido” (p.212).

La concentración del ácido sulfúrico influye en ciertos aspectos en el proceso:

- Cinética de la Reacción: Una mayor concentración de ácido implica mayor cantidad de iones de H^+ disponibles para reaccionar con el carbonato de zinc, por tanto, la velocidad de disolución del carbonato de zinc es mayor, y la extracción de zinc aumentará.
- La reacción de disolución como se muestra en la reacción R.5 tiene como producto al CO_2 gaseoso, si la concentración del ácido aumenta, la formación de burbujas de CO_2 aumentará lo que puede mejorar la disolución y, el contacto de $ZnCO_3$ y el ácido, acelerando la reacción de disolución; pero la formación de burbujas también puede ser deficiente si la concentración de ácido es excesiva, porque se produce arrastre de sólidos.
- Si la concentración del ácido está por debajo de la óptima, el proceso de lixiviación será deficiente y por tanto se presentará una baja extracción de zinc, pero si la concentración del ácido está por encima de la óptima, se llegará a la extracción deseada, pero ello conllevará mayores gastos operativos, y también la disolución de impurezas presentes en el mineral.

Además de mejorar la extracción de zinc, como expresa H. Xu et al. (2012) “una mayor concentración de ácido puede ayudar a minimizar la disolución de impurezas como el hierro y la sílice, facilitando la separación sólido-líquido”

3) El pH de la Solución Acida

pH Bajo (Alta Acidez):

- Mantener el pH entre 1 y 3 proporciona suficiente acidez para la completa disolución del carbonato de zinc, porque asegura que el ácido sulfúrico esté en su forma más reactiva.
- Una mayor concentración de H^+ acelera la disolución del $ZnCO_3$, ya que los iones de hidrógeno son reactivos clave en la reacción. Con un exceso de H^+ , la reacción tiende a completarse más rápidamente.
- Un pH extremadamente bajo (menor a 1) puede ser corrosivo y aumentar los costos debido al uso excesivo de ácido.

pH Moderado a Alto (Menor Acidez):

- A medida que el pH de la solución aumenta (menor concentración de H^+), la cantidad de iones H^+ disponibles para reaccionar con el carbonato de zinc disminuye.
- Esto puede llevar a una lixiviación incompleta del carbonato de zinc, ya que no hay suficientes iones H^+ para mantener la reacción, y la solubilidad del $ZnCO_3$ disminuye significativamente.
- En pH moderadamente ácido, la disolución es menos eficiente y puede requerir más tiempo o una mayor concentración de ácido sulfúrico para completar la reacción.

4) Porcentaje de Sólidos

- Si el porcentaje de sólidos es alto, las partículas de $ZnCO_3$ pueden aglomerarse, reduciendo la superficie de reacción disponible, al haber mayor viscosidad la eficiencia de la agitación, la tasa de disolución y porcentaje de extracción disminuyen.

- Debido a la alta densidad de sólidos, se forman capas límite más gruesas alrededor de las partículas, limitado la difusión del H^+ hacia las superficies de las partículas y que los productos de reacción se difundan más lento, disminuyendo la tasa de disolución.
- Con un bajo porcentaje de sólidos el espacio entre las partículas es más amplia, lo que puede permitir que el contacto entre el ácido y el $ZnCO_3$ sea más efectivo, por que facilita el acceso del ácido a todas las superficies de $ZnCO_3$, mejorando la disolución y con ello el porcentaje de extracción de zinc.
- Como expresa M. Tanaydın et al. (2021)“la tasa de disolución del zinc aumenta con una menor relación sólido-líquido. Esto se debe a una mayor disponibilidad de ácido para reaccionar con el mineral, lo que facilita una mayor disolución del zinc”.

5) Velocidad de agitación.

Existen 2 tipos de mecanismos de agitación más comunes:

Agitación mecánica aplica rotores (hélices o paletas planas) en el fondo del tanque, lo que permite una rotación continua (Ramírez & Martínez, 2014).

Agitación neumática se realiza en tanques cilíndricos verticales con un fondo cónico, por el cual se inyecta aire comprimido (Boni, 2018).

- Afecta directamente la cinética de disolución del mineral. Una buena agitación mejora el contacto entre el sólido (mineral) y el líquido (solución ácida).
- Favorece la transferencia de masa (movimiento del ión metálico desde el sólido hacia el líquido), evitando la sedimentación del material. Cuando la tasa de lixiviación esta limitada por difusión de los reactivos a la superficie del mineral (Misira, 2024).

2.3.6. Termodinámica del Proceso

2.3.6.1. Diagrama de Pourbaix

“El diagrama tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos, y define el dominio de estabilidad para el electrolito (normalmente agua), el metal y los compuestos relacionados, por ejemplo, óxidos, hidróxidos e hidruros” (Muñoz Portero, 2011a).

También se las conoce como diagramas de Eh-pH, por la representación de sus ejes, donde el eje vertical está representado por valores de Eh, cuyos valores son calculados aplicando las siguientes ecuaciones termodinámicas:

- Ecuación de Nernst

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (1)$$

Donde:

- E= potencial de electrodo bajo condiciones no estándar.
- E^0 = potencial de electrodo estándar
- R= constante universal de los gases = 0.001987 Kcal/mol*K
- T= temperatura (K)
- F= constante de Faraday = 23.06 Kcal/voltio

Expresión del cociente de reacción (Q), supóngase la siguiente en la reacción química: $aA_{(ac)} + bB_{(ac)} \rightarrow cC_{(ac)} + dD_{(ac)}$

$$Q = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2)$$

- Cambio de la energía libre de Gibbs

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (3)$$

Donde:

- ΔG^0 = energía libre de Gibbs estándar (kcal/mol).
- n = número de moles de electrones transferidos en la reacción redox.

En su eje horizontal se encuentran valores de pH, la cual es representada por la ecuación:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (4)$$

- Bajo condiciones de equilibrio: $\Delta G^0 = 0$; $Q = K$, entonces tenemos la ecuación 5:

$$\Delta G^0 = -RT \ln Q = -RT \ln K \quad (5)$$

En estos diagramas, las líneas representan las fronteras de equilibrio entre las diferentes regiones de estabilidad de las especies químicas, es decir, las líneas representan “un equilibrio entre dos especies” (Muñoz Portero, 2011a) y existen 3 tipos de líneas de equilibrio, que están relacionadas con el tipo de reacción; podemos ordenarlas en la tabla 2.

Tabla 2

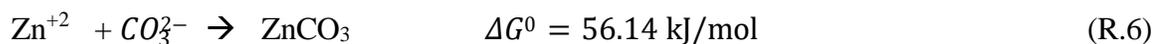
Líneas de equilibrio en relación al tipo de reacción.

Tipo de reacción	Descripción	Tipos de líneas de equilibrio
Reacciones electroquímicas con H ⁺ .	Las reacciones dependen del potencial y del pH.	Líneas oblicuas.
Reacciones electroquímicas sin H ⁺ .	Solo dependen del potencial	Líneas horizontales.
Reacciones químicas con H ⁺ .	Estas reacciones solo dependen del pH.	Líneas verticales.
Reacciones químicas sin H ⁺ .	Las reacciones son independientes del potencial del pH.	No tienes que representarlas en un diagrama.

Nota. Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metal-agua, p. 5. Por Muñoz Portero (2011b).

2.3.6.2. Química de la Smithsonita en Medio Acuoso

Los iones Zn⁺² se forman en solución a un pH ácido en un Eh ligeramente oxidante como es mostrada en la semirreacción del par ZnCO₃/Zn⁺²:



$$E = 0.3034 - 0.059\text{pH}$$

La línea horizontal del par Zn⁺²/Zn nos indica que la formación de iones Zn⁺² no puede extenderse más allá de un valor de pH = 6.6 debido a que los iones Zn⁺² son inestables a valores de pH más alcalinos.

En un rango de pH básico hasta un pH máximo de 11, y a potenciales relativamente altos se observa la formación de la hidrocincita insoluble Zn₅(OH)₆(CO₃)₂, la cual puede actuar como

capas pasivadoras en la superficie del mineral de zinc durante la lixiviación, impidiendo o ralentizando la disolución del zinc, y al ser un mineral básico, puede afectar la acidez del medio, para determinar su línea de equilibrio se utilizaron dos reacciones importantes:

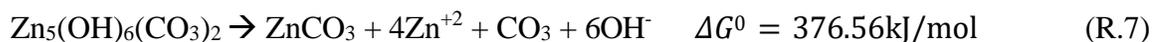
- 1) Reacción en solución ácida, representada por la reacción R.5 a una concentración $[CO_2]=1 \text{ atm}$:



Aplicando la ecuación 5, resulta:

$$\lg[CO_3] = 2pH - 18.15 \quad (6)$$

- 2) Reacción global del par $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2 / ZnCO_3$:



Se aplica la ecuación 6 en la reacción R.7 y se encuentra la línea de equilibrio:

$$E = 0.433 - 0.0786pH$$

La transición entre iones Zn^{+2} y $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ sucede en una pequeña región con pH ligeramente ácida, cuya línea de equilibrio es:

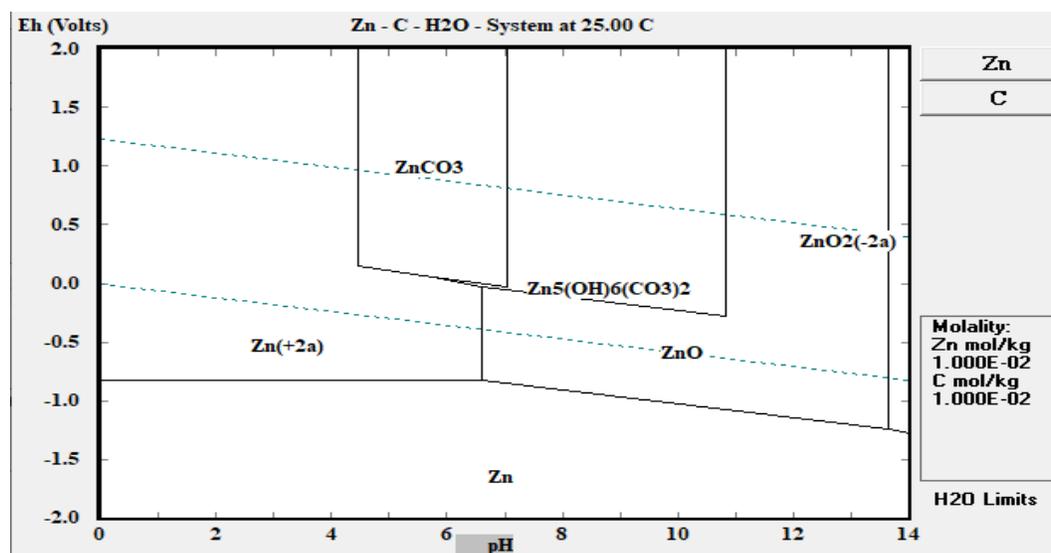
$$E = 0.5334 - 0.0983pH$$

La línea de equilibrio del par $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2 / Zn^{+2}$ intercepta con la línea de equilibrio del par $ZnCO_3 / Zn^{+2}$, en un pH de 5.9, entonces podemos deducir que el pH de formación de iones Zn^{+2} más óptima se halla a un pH inferior al 5.9.

La Smithsonita no es reactivo en agua pura, debido a que prácticamente es insoluble en agua, y estable en solución acuosa a condiciones donde el pH es moderadamente ácido a neutro y el Eh es positivo a moderadamente oxidante, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Diagrama Eh-pH del sistema Zn-C-H₂O, T= 25°C.



Nota. Elaboración propia. HSC Chemistry.

De la figura 1 se observa que la hidrocincita ($Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$), es una especie estable a un pH ligeramente más alto (alcalino) y en condiciones de Eh moderado. La transición entre $ZnCO_3$ y $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ indica que a medida que el pH aumenta y el Eh disminuye, puede ocurrir una transformación de la smithsonita a hidrocincita. Durante la lixiviación ácida se debe de evitar la formación de fases menos solubles como la hidrocincita, que podrían dificultar la extracción de zinc, ello implica manejar las condiciones de pH, evitando que el pH aumente, para que así la smithsonita no pueda transformarse en hidrocincita.

Los iones Zn^{2+} son la especie predominante bajo condiciones más ácidas y Eh variable, indicando que, en medios ácidos, la smithsonita se disuelve, liberando iones Zn^{2+} .

En cuanto a las condiciones para el proceso de la Lixiviación de Smithsonita, podemos indicar:

- a) En medio ácido y Eh moderadamente oxidante: A $\text{pH} < 5.9$, la smithsonita se disuelve fácilmente, liberando iones Zn^{2+} . Esta es una condición favorable para la lixiviación de zinc de la smithsonita, ya que facilita la extracción del metal en solución, cabe resaltar que en el instante en que el zinc del mineral se disuelve, los gases de CO_2 se formarán en más abundancia en un medio muy ácido, por tanto, el pH más adecuado para el proceso debe ser moderado, de entre 1 a 3, lo que coincide con la figura 1.
- b) Medio Neutro a Ligeramente Alcalino y Eh oxidante: La smithsonita es estable, es decir que, en este rango de pH, la smithsonita no se disolverá fácilmente, lo que podría no ser ideal para procesos de lixiviación.

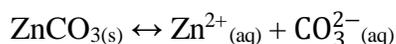
2.3.6.3. Solubilidad de la Smithsonita en Ácido Sulfúrico

“El carbonato de zinc es insoluble en agua, alcohol y acetona, y solo ligeramente soluble en amoníaco. Es completamente soluble en álcalis y ácidos” (Norkem).

Se considera que una sustancia es soluble en agua, si:

- Soluble; $S > 0.02 \text{ M}$
- Relativamente soluble; $S = 0.02$
- Poco soluble; $S < 0.02$

Dado que el K_{sp} de ZnCO_3 en agua es 1.46×10^{-11} , de la reacción R.2:



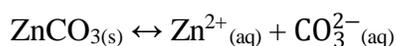
Podemos deducir;

$K_{sp} = S^2 \rightarrow S = \sqrt{1.46 \times 10^{-11}} \rightarrow S = 3.82 \times 10^{-6} < 0.02$, esto explica que la $ZnCO_3$ es poco o no soluble en agua, a condiciones normales de neutras a ligeramente básicas.

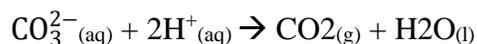
Para determinar la solubilidad de $ZnCO_3$ en ácido sulfúrico de concentración 1 M, se considera la reacción ocurrida durante la disolución de $ZnCO_3$ en presencia de H_2SO_4 de concentración 1 M, y el equilibrio químico resultante.

➤ **Reacciones Químicas:**

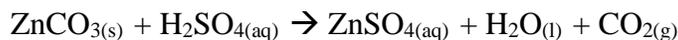
- Disolución de $ZnCO_3$, reacción R.2:



- Reacción del carbonato con el ácido, reacción R.5:



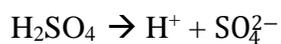
- Reacción de la disolución de $ZnCO_3$ en el ácido, reacción R.1:



➤ **Datos a considerar:**

- La constante de solubilidad (K_{sp}) de $ZnCO_3$ en agua pura es 1.46×10^{-11}
- Consideremos una concentración de H_2SO_4 del 1 M, entonces la concentración de H^+ será de 2 M.
- **Efecto del Ácido Sulfúrico en la Solubilidad**

Cuando H_2SO_4 está presente, se ioniza completamente en solución acuosa:



La alta concentración de H^+ causa que el CO_3^{2-} reaccione rápidamente para formar CO_2 y H_2O , disminuyendo la concentración de CO_3^{2-} en la solución. Esto aumenta la solubilidad del $ZnCO_3$, por lo que la reacción desplazará el equilibrio de disolución de $ZnCO_3$ hacia la derecha, como figura en la reacción R.5:



Dado que la concentración de H^+ es alta, todo el CO_3^{2-} producido será neutralizado inmediatamente por que será consumido casi completamente por la reacción con H^+ .

➤ **Cálculo de la Solubilidad**

1) Escribir la expresión de la constante de solubilidad (K_{sp}) según a la reacción R.2:

$$K_{ps} = [Zn^{2+}] [CO_3^{2-}]$$

2) Determinación aproximada de la concentración del CO_3^{2-} :

Según tabla de constantes de disociación del H_2CO_3 a $25C^0$ es necesario aplicar la 2da disociación,

$$K_{a2} = 4.69 \times 10^{-11}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_{a2}}{[H^+]^2} = \frac{4.69 \times 10^{-11}}{[2]^2} = 1.17 \times 10^{-11} M$$

3) Resolviendo para la concentración de Zn^{2+}

La concentración de Zn^{2+} es aproximadamente igual a la solubilidad molar (S) de $ZnCO_3$, por tanto, se resume en la siguiente ecuación:

$$K_{ps} = S \times [CO_3^{2-}]$$

Se procede a reemplazar;

$$S = \frac{K_{ps}}{[CO_3^{2-}]} = \frac{1.46 \times 10^{-11}}{1.17 \times 10^{-11}}$$

$S = 1.25$ indica que la Smithsonita es soluble en el ácido sulfúrico.

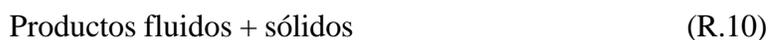
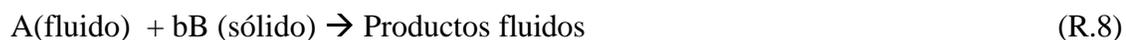
2.4. Cinética del Proceso de Lixiviación

“La termodinámica determina el alcance de la transformación de las especies químicas, pero la cinética química interviene en el estudio cuantitativo de la velocidad y los mecanismos de transformación de especies” (Jarabo Friedrich & Marrero Hernández, 2001), donde un soluto se disuelve en un disolvente durante el proceso de lixiviación.

Mientras que la velocidad de reacción expresa la relación de una “cantidad de un reactivo o producto transformado por unidad de tiempo” (Jarabo Friedrich & Marrero Hernández, 2001) y se puede expresar en términos de concentración (por ejemplo, moles por litro por segundo) o en términos de masa (por ejemplo, gramos por segundo), etc.

2.4.1. Reacción Heterogénea

Los procesos hidrometalúrgicos, en especial en la lixiviación, interviene reacciones heterogéneas por la interacción sólido – fluido, cuyas reacciones están representadas según Octave Levenspiel (2004):



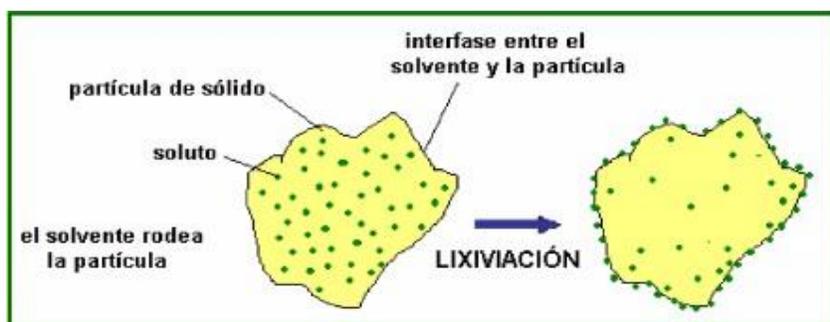
La reacción global que describe la lixiviación ácida es la reacción R.1 eue concuerda con la estructura de la reacción R.8:



La lixiviación es un proceso de transferencia de masa donde el solvente y el soluto contenido en una partícula de sólido entran en contacto, es decir, que el metal se transfiere hacia la solución acuosa, separándola de la fase sólida de sus acompañantes menos solubles que la contiene.

Figura 2

Proceso de transferencia de masa.



Nota. Introducción a la lixiviación. Slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/introduccion-a-la-lixivacion/251829233#3>

Podemos identificar que, en el transporte de una sustancia o componente de una fase hacia otra, pueden existir 2 tipos de transporte: un transporte de materia a través de la interfase y la otra a través de cada una de las fases, según Jarabo Friedrich y Marrero Hernández (2001) lo explica en los incisos 1) y 2):

- 1) Transporte de materia a través de la interfase: El equilibrio se alcanza en la interfase de forma instantánea, en esta suceden procesos de:

- Absorción (solubilidad del gas en el líquido), el estado de equilibrio se basa en la siguiente expresión: $P_A = f(C_A)$;

P_A : presión parcial del soluto **A** en el gas [atm]

C_A : concentración molar del soluto **A** en el líquido [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]

- Adsorción (transporte entre fase gas y sólido), el estado de equilibrio se basa en la siguiente expresión: $C_A/C_v = f(P_A)$;

C_A : moles de adsorbato **A** en el sólido por unidad de masa de sólido

C_v : moles de huecos en el sólido por unidad de masa de sólido

P_A : presión parcial del adsorbato **A** en el gas [atm]

- 2) Transporte de materia a través de la interfase de cada una de las fases: “Cuando una fase contiene dos o más componentes cuya concentración varía de un punto a otro, se produce un transporte de materia que tiende a igualar las concentraciones” Jarabo Friedrich y Marrero Hernández (2001), cuya expresión es la ley de Fick”: $J_A = -D_A (dC_A/dx)$

C_A : concentración del componente que se transfiere o “soluto” [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]

J_A : velocidad de transporte de materia, o “densidad de flujo” [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

D_A : constante de proporcionalidad a temperatura constante o “difusividad” [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

2.4.2. Selección del Modelo Cinético

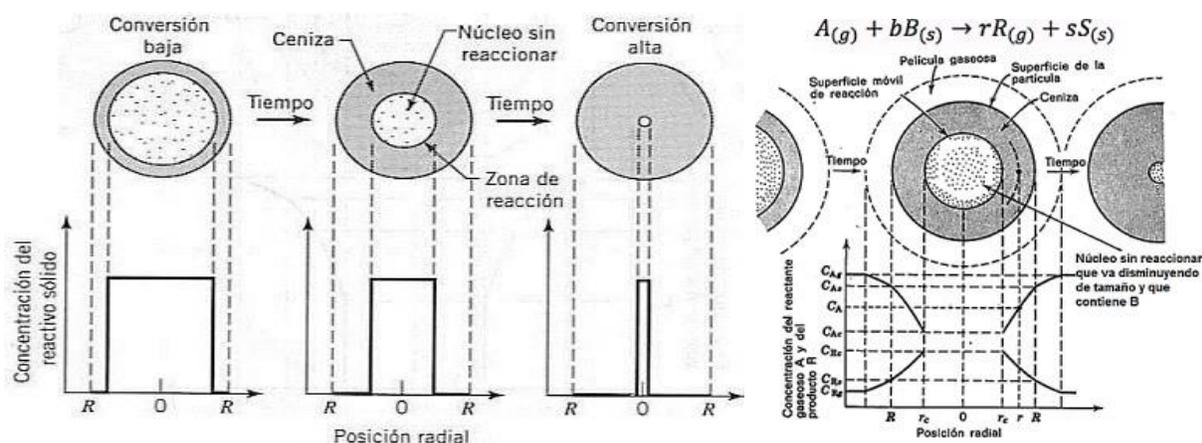
2.4.2.1. Modelo de Núcleo Decreciente (Shrinking Core Model - SCM)

Conocido como el modelo del núcleo central que se encoge sin reaccionar, Octave Levenspiel (2004), firma que la primera reacción sucede en la superficie externa de la partícula sólida, la zona de reacción se desplaza al interior del sólido, dejando tras de sí un material completamente convertido y sólido inerte denominado ceniza; en cualquier instante existe un núcleo de material sin reaccionar que se reduce durante la reacción. (p. 569)

Durante la reacción el tamaño de las partículas sólidas disminuye, según Jarabo Friedrich y Marrero Hernández (2001) indican que pueda deberse a “la formación de productos fluidos o de los productos sólidos, o las cenizas no son adherentes (combustión de sustancias carbonosas)”.

Figura 3

Modelo del núcleo que se encoge sin reaccionar.



Nota. Ingeniería de las Reacciones Químicas. 3ra Edición, p. 569. Por Octave Levenspiel (2004).

De la figura 3 podemos ver como sucede la reacción heterogénea para la lixiviación, según Ramírez Torres y Villegas Fajardo (2018):

- 1) Transporte por difusión externa de los reactantes desde una fase fluida, a través de la capa acuosa o gaseosa y por último hacia la superficie (interface de reacción) del sólido.
- 2) Adsorción (penetración y difusión) de los reactantes (ácido sulfúrico) a través de la capa de ceniza hasta la superficie del núcleo no reaccionado (superficie de reacción, interfase).
- 3) Reacción de los reactantes con el sólido sobre la superficie de reacción.
- 4) Liberación (difusión) de los productos acuosos formados a través de la capa de ceniza hasta la superficie exterior del sólido.
- 5) Transporte de los productos acuosos de reacción por difusión hacia el seno del fluido a través de la capa acuosa o gaseosa.

Ballester et al (2000) afirmó lo siguiente:

El transporte a la interfase es el primer requisito para que se verifique la reacción. Si las etapas químicas del proceso son rápidas (etapa 2, 3 y 4), la velocidad de reacción depende esencialmente de la velocidad de transporte. En este caso se tiene un control por transporte y por tanto las variables hidrodinámicas (velocidad del fluido, viscosidad, etc.) afectan a la velocidad de reacción.

Caso contrario, si la velocidad de las etapas químicas mencionadas es lenta comparada con la velocidad de transporte se tiene un control químico. (p. 171)

2.4.2.1.1. Modelo de Jander

El modelo de Jander como expresa Souza et al. (2007) “es un modelo matemático utilizado para describir la difusión a través de una capa de producto sólido durante procesos de reacción en sólidos”. Este modelo es particularmente relevante en la lixiviación de minerales, donde se forma una capa de producto sólido alrededor de las partículas del mineral que puede influir en la tasa de

reacción, hace que la velocidad de reacción dependa de qué tan rápido las especies puedan difundirse a través de ella, medida que la capa de producto se vuelve más gruesa, el proceso de difusión se vuelve más lento, reduciendo la velocidad de la reacción. lo que indica (residuos de ceniza que cubre las partículas) que dicho residuo debe de difundirse los reactantes como los productos. A medida que la reacción avanza, el material de partida se va convirtiendo en producto, formando una barrera (capa de producto) que rodea el núcleo del sólido que aún no ha reaccionado

Teniendo en cuenta a (Sethurajan, et al., 2017) utiliza ecuaciones matemáticas para modelar la tasa de reacción en función del tiempo y la concentración de reactivos.

La ecuación cinética de Jander es:

$$((1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}})^2 = kt \quad (7)$$

Donde:

- α = fracción de conversión
- k =constante de velocidad de la reacción.
- t =tiempo de lixiviación.

2.4.2.1.1. Modelo de Jander Modificado

Es una adaptación del modelo de Jander que busca ajustar mejor los datos experimentales en ciertos sistemas de reacciones en sólidos, se utiliza para describir reacciones en sólidos que están controladas por la difusión a través de una capa de producto, pero en condiciones donde el comportamiento de difusión no se ajusta perfectamente a la formulación original de Jander.

Es adecuado para materiales donde la porosidad, tamaño de partícula o estructura no son homogéneos, permitiendo una descripción más precisa de la cinética de reacción.

La ecuación cinética de Jander modificado es:

$$1 - \frac{2}{3}\alpha - ((1 - \alpha)^{\frac{1}{3}})^2 = kt \quad (8)$$

Donde:

- α = fracción de conversión
- k = constante de velocidad de la reacción.
- t = tiempo de lixiviación.

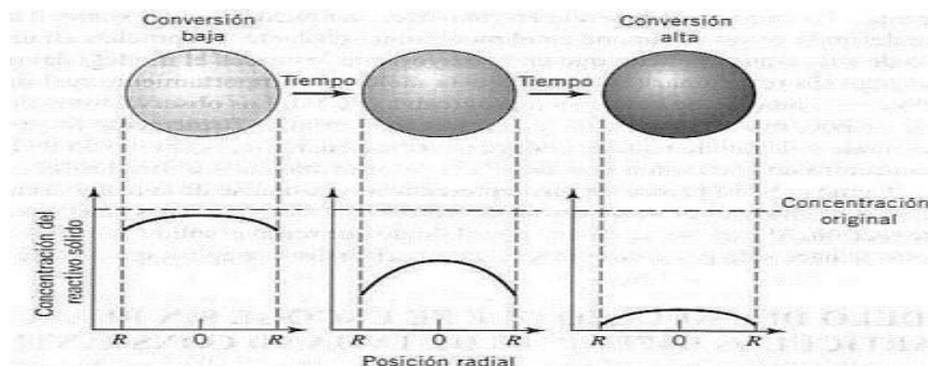
2.4.2.2. Modelo de Conversión Progresiva (Progressive- Conversión Model – PCM)

En este modelo, Octave Levenspiel (2004) indica que “el reactante entra y reacciona a través de toda la partícula sólida en todo momento, lo que genera diferentes velocidades de reacción en los distintos lugares de la partícula, el reactivo sólido se está convirtiendo continua y progresivamente en toda la partícula”, tal como se muestra en la figura 4.

Durante la reacción, el tamaño de las partículas sólidas no cambia, “porque se forman productos sólidos o bien porque contienen impurezas que quedan adheridas como cenizas (oxidación de minerales sulfurados, reducción de óxidos)” (Jarabo Friedrich & Marrero Hernández, 2001).

Figura 4

Modelo de conversión progresiva PCM.



Nota. Ingeniería de las reacciones Químicas. 3ra Edición, p. 569. Por Octave Levenspiel (2004).

2.4.2.2.1. Modelo de Reacción de Superficie Controlada -Modelo Topoquímico

Este modelo asume que la velocidad de reacción está controlada por la reacción química en la superficie del sólido.

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = kt \quad (9)$$

Donde:

- α = Fracción de Zinc extraído.
- k = constante de velocidad de la reacción.
- t = tiempo de lixiviación.

Este modelo se basa en la difusión de los reactivos en la superficie del sólido. Se enfoca en cómo los reactivos penetran y reaccionan en la superficie del mineral, lo que es crucial para entender la velocidad de lixiviación en las primeras etapas del proceso.

La reacción ocurre de manera más uniforme en toda la partícula sólida, o bien, el frente de reacción se desplaza de forma controlada por la velocidad de la reacción en la interfaz sin una capa de producto restrictiva. La velocidad de reacción no depende de la difusión a través de una capa de producto, sino de la reacción en la interfaz misma, por lo que la reacción avanza sin formación de núcleos internos.

2.5. Marco Conceptual

2.5.1. Acidez

La acidez de una sustancia es el grado en el que es ácida. La acidez libre, en el caso de un medio acuoso, se mide como la concentración de H_2SO_4 en la solución y es el KPI más usado para el control de procesos. Para soluciones muy bajas en H_2SO_4 se mide el pH. (Cardoza Ramos, 2019)

2.5.2. Ácido Fuerte

Son ácidos que tienen la capacidad de liberar una gran cantidad de iones hidrógeno (H^+) en solución, estos iones hidrógeno son responsables de la acidez de la solución.

Estos ácidos fuertes son utilizados en la lixiviación ácida para disolver minerales metálicos. La presencia de iones hidrógeno en alta concentración facilita la ruptura de enlaces en los minerales, permitiendo que los iones metálicos sean liberados en la solución.

Ejemplo de ellos son: Ácido clorhídrico (HCl), Ácido sulfúrico (H_2SO_4), Ácido nítrico (HNO_3), etc.

2.5.3. Ácidos Orgánicos

Son compuestos químicos que contienen al menos un grupo funcional ácido en su estructura molecular (unido a un átomo de carbono dentro de una cadena de carbono), es decir, que llevan en su composición una cadena de carbono y un grupo funcional ácido (grupo carboxilo). Por lo que son considerados como “ácidos débiles incapaces de disociación completa en el agua” (Fisher Scientific, s.f.).

El grupo carboxilo ($-\text{COOH}$), que consiste en un átomo de carbono unido a un átomo de oxígeno mediante un doble enlace y a otro átomo de oxígeno mediante un enlace sencillo. La fórmula general de un ácido orgánico es $\text{R}-\text{COOH}$, donde R representa una cadena de carbono. Ejemplo de estos ácidos: Ácido acético (CH_3COOH), Ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), Ácido fórmico (HCOOH), etc.

2.5.4. Ácidos Inorgánicos

Su composición química contiene átomos de hidrógeno unidos directamente a elementos electronegativos (generalmente no metales) en su estructura molecular. Estos ácidos son llamados inorgánicos porque no contienen cadenas de carbono y no son derivados de compuestos orgánicos.

Los ácidos inorgánicos comunes suelen liberar iones hidrógeno (H^+) cuando se disuelven en agua, lo que los hace ácidos según la teoría de Brønsted-Lowry.

2.5.5. Regiones de Estabilidad

Las áreas delimitadas por las líneas representan las condiciones de pH y Eh bajo las cuales una especie química específica es estable.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

HG: Mediante la lixiviación ácida de minerales de smithsonita, se logra obtener más del 80 % de zinc.

3.1.2. *Hipótesis Específicas*

HE1: Se obtiene una mayor extracción de zinc al emplear una concentración de ácido sulfúrico de 200 g/L.

HE2: El porcentaje de extracción de zinc mediante lixiviación ácida se incrementa con un porcentaje de sólidos del 25%.

HE3: Un tiempo de lixiviación superior a 2 horas incrementa el porcentaje de extracción de zinc mediante lixiviación ácida.

3.2. Variables

3.2.1. *Identificación de Variables*

A. Variable dependiente

- Porcentaje de extracción de Zinc

B. Variables independientes

- Concentración del ácido sulfúrico

- Porcentaje de sólidos de la pulpa
- Tiempo de lixiviación

C. Variables intervinientes

- Caracterización del mineral

3.2.2. Operacionalización de Variables

Tabla 3

Operacionalización de Variables.

Variable	Tipo	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Unidad	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Porcentaje de extracción de Zinc	Dependiente	Cantidad porcentual de metal (Zinc) extraído a partir del total de alimento de mineral de cabeza, en el proceso de lixiviación ácida por agitación Bustamante Rúa et al (2008).	Determinar el porcentaje en peso del Zinc extraído mediante balances metalúrgicos, obtenidos en el proceso de lixiviación ácida por agitación.	0 a >80	%	Relación porcentual del contenido de Zinc presente en un volumen de solución rica.	<ul style="list-style-type: none"> • Balance metalúrgico de materia en Hoja de cálculo Excel. • Análisis químico por el método de ensayo por digestión multiácida-volumetría, en laboratorio LAS.
Concentración de Ácido Sulfúrico	Independiente	Cantidad de reactivo de ácido sulfúrico (en peso) disuelto en una cantidad dada de solución. (Salas & Mojhadet, 2015)	Medición de la fuerza de ácido libre por titulación.	100 a 200	g/l	Peso de ácido sulfúrico en relación con el volumen total de la solución.	<ul style="list-style-type: none"> • Volumetría. • Bureta graduada, matraz de Erlenmeyer. • Titulación.
Porcentaje de solidos en pulpa	Independiente	Esta medida describe la concentración de minerales o partículas en una suspensión líquida, como una pulpa de mineral. Cuanto mayor sea esta medida mayor será la concentración de partículas sólidas en la mezcla. (Andrea Blanco, S.F)	Determinar cantidad de mineral expresado en porcentaje para el volumen de agua para obtener la pulpa.	25 a 35	%	Contenido de materia sólida en relación con el volumen total de la pulpa.	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculos matemáticos en relación a la densidad del mineral o pesos. • Cálculos en Excel.
Tiempo de lixiviación	Independiente	Periodo de tiempo donde el mineral entra en contacto con un agente lixivante ácido o alcalino, con el fin de disolver o extraer componentes solubles del mineral. (Cortéz Canaza, 2012)	Medición de periodo de residencia para lograr la transferencia de los componentes deseados desde la fase sólida a la solución.	1.5 a 2.5	Horas	Contenido de Zinc extraído en función al tiempo de residencia.	<ul style="list-style-type: none"> • Cronómetro.

Nota: Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. **Ámbito del Estudio: Localización Política, Geográfica**

4.1.1. *Localización Política*

En esta investigación, el material de estudio fue el mineral proveniente del yacimiento de Parcco, situado en la comunidad campesina de Parcco, entre los distritos de Accha y Colquemarca, en la provincia de Paruro, departamento de Cusco, Perú. Este yacimiento es conocido por su abundancia de smithsonita de minerales de baja ley, como se muestra en la figura 5, un carbonato de zinc con un gran potencial para la extracción de este mineral mediante lixiviación ácida por agitación.

Las pruebas metalúrgicas se llevaron a cabo en el laboratorio de concentración de minerales e hidrometalurgia de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC.

Figura 5

Fotografía de reserva de mineral de smithsonita.



Nota. Elaboración propia.

4.1.2. Localización Geográfica

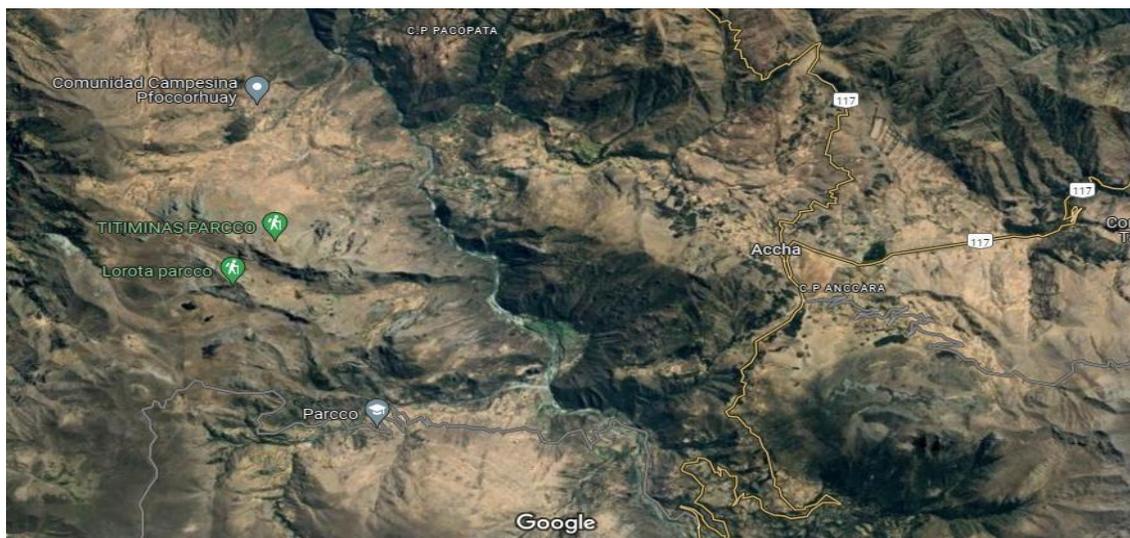
Geográficamente, el yacimiento de Parcco se encuentra en la cordillera de los Andes, a una altitud que varía entre los 3,500 y 4,000 metros sobre el nivel del mar, en una zona caracterizada por su terreno montañoso por un clima frío y seco. La región presenta una geología diversa con formaciones rocosas que contienen depósitos significativos de smithsonita, lo que la convierte en un sitio ideal para la extracción de zinc mediante lixiviación ácida por agitación.

Coordenadas Geográficas:

- Latitud: 13° 59' 56.1" S
- Longitud: 71° 53' 15.5" O
- Altitud: 3484 m s. n. m.

Figura 6

Ubicación Geográfica.



Nota. Figura recopilada de Google Maps. <https://www.google.com/maps/@-13.9814202,-71.8657141,11243m/data=!3m1!1e3?hl=es-US&entry=ttu>

4.2. Diseño de Investigación

4.2.1. Método de Investigación

La investigación se llevó a cabo utilizando método analítico y deductivo. El método analítico nos permitió examinar los cambios en las variables independientes y dependiente en cada etapa, facilitando la comprensión y explicación de sus relaciones y conexiones entre las variables. Por otro lado, el método deductivo fue esencial para especificar los resultados finales de la investigación. A partir de datos generales y teorías basadas en principios y leyes generales, se pudieron deducir conclusiones específicas.

4.2.2. Tipo de Investigación

En lo que respecta al tipo de investigación, corresponde a la investigación tecnológica con carácter cuantitativa experimental, según Carrasco (2005) la investigación tecnológica perfecciona las actividades productivas de la realidad aplicando nuevos modelos o técnicas, tomando en consideración leyes y principios que explican la realidad .

Se adoptó un enfoque cuantitativo, basado en valores numéricos obtenido a través de experimentos. Se empleó un diseño experimental para evaluar las variables independientes y sus causas, con el objetivo de determinar los efectos sobre la variable dependiente. Según Sanchez & Reyes (2015) la investigación cuantitativa utiliza procedimientos estadísticos para procesar datos, empleando estadística. La investigación experimental busca demostrar hipótesis mediante experimentos que establecen relaciones causa-efecto inmediatas. (p. 47)

En este diseño de investigación, se manipuló variables independientes como la concentración de ácido sulfúrico (g/l), el porcentaje de sólidos(%), y el tiempo de lixiviación (h) para observar su efecto en la variable dependiente, que fue el porcentaje de extracción de zinc.

Mientras tanto, se controlaron otras variables potencialmente influyentes para asegurar que cualquier cambio en el porcentaje de extracción de zinc se debiera únicamente a la manipulación de las variables independientes. Este enfoque permitió entender cómo cada una de las variables independientes afectó el proceso de extracción de zinc. Para las pruebas experimentales, se utilizó un diseño factorial con una matriz codificada, basado en un diseño experimental (2^3). Se desarrolló 8 pruebas experimentales con tres puntos centrales, corriendo un total de 11 pruebas de lixiviación.

El diseño de investigación se puede representar de la siguiente manera

$$X \rightarrow Y$$

CAUSA → *EFEECTO*

- | | |
|--|-------------------------------|
| • Concentración de ácido sulfúrico $\frac{g}{l}$. | • Porcentaje de extracción de |
| • Porcentaje de sólidos(%). | Zinc(%). |
| • Tiempo de lixiviación (h). | |

Donde:

- X : Variable independiente.
- Y : Variable dependiente.

Este diseño permitió entender cómo la causa (Variable Independiente) afectó al efecto (Variable Dependiente).

4.2.3. Nivel de Investigación (Alcance)

Como dice Hernández & Mendoza (2018) los estudios explicativos buscan entender las causas de fenómenos y relaciones entre variables, explicando por qué ocurren y en qué condiciones se manifiestan o por qué se relacionan dos o más variables (p.110). En

consecuencia, el alcance de esta investigación es explicativo por que se centró en identificar y comprender las causas, razones y efectos detrás de las variables que influyeron en la extracción de zinc mediante lixiviación ácida por agitación de la smithsonita del yacimiento de Parcco. Específicamente, se buscó determinar cómo la concentración de ácido sulfúrico, el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación afectaron el porcentaje de extracción de zinc.

4.3. Población de Estudio

4.3.1. Población

La población de estudio para esta investigación fue el mineral de smithsonita de baja ley, proveniente del Yacimiento Parcco.

4.3.2. Tamaño de Muestra

Se utilizó una muestra representativa de mineral de smithsonita de baja ley mediante el método manual de cono y cuarteo. Esta técnica estándar asegura que la muestra sea representativa del Yacimiento Parcco en las pruebas de laboratorio. Por lo tanto, para determinar el tamaño de muestra adecuado para esta investigación, se aplicó la fórmula del tamaño de muestra para un diseño experimental, optando por un tamaño de muestra infinito.

$$n = \frac{Z^2 \times \sigma^2}{\varepsilon^2}$$

Donde:

- *n: Tamaño de muestra.*
- *Z: Nivel de confianza.*
- *σ: Desviación estandar.*

- ε : *Error maximo tolerable.*

$$n = \frac{(1.96)^2 \times (0.68)^2}{(0.297)^2}$$

$$n = \frac{3.84 \times 0.46}{0.088}$$

$$n = 20 \text{ kg}$$

La elección de nuestro tamaño de muestra necesario para esta investigación era de aproximadamente 20 kg considerando la disponibilidad del material y cálculos aplicando la densidad de pulpa y otros. Este tamaño de muestra fue suficiente para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados, permitiendo evaluar el porcentaje de extracción de zinc mediante lixiviación ácida por agitación de la smithsonita del yacimiento Parcco.

4.3.3. Técnicas de Selección

Se consideró técnicas de muestreo probabilístico estratificado, recolectando muestras de diversos puntos dentro de la reserva mineral. Mediante la técnica de cuarteo, se seleccionó una muestra representativa hasta alcanzar la cantidad necesaria para el estudio.

Según Hernández &Fernandez (2010) las unidades de análisis o los elementos muestrales se eligen siempre aleatoriamente para asegurarnos de que cada elemento tenga la misma probabilidad de ser elegido .

4.3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad

4.3.4.1. Técnica

- ✓ Investigación bibliográfica (libros, tesis, revistas y páginas web)
- ✓ Preparación de muestras.

- ✓ Análisis granulométrico.
- ✓ Pruebas de lixiviación acida por agitación.
- ✓ Pruebas experimentales en laboratorio y reporte de análisis químico.

4.3.4.2. Instrumentos

- ✓ Informes de ensayo en laboratorio, obtenidos de Laboratorios Analíticos del Sur.
- ✓ Softwares: Microsoft Excel y Minitab, aplicando técnicas de estadística.

Dentro de los instrumentos empleados para la recolección de datos se incluyeron equipos, materiales, herramientas y reactivos de laboratorio. Estos fueron suministrados por el laboratorio de concentración de minerales y procesos hidrometalúrgicos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC, y se especifican detalladamente en las Tablas 4, 5 y 6. Dichos recursos fueron utilizados para llevar a cabo el proceso de lixiviación ácida por agitación.

Tabla 4*Equipos de laboratorio para las Pruebas de Lixiviación.*

Equipos para la lixiviación			
Ítem	Equipos	Características	Aplicaciones
1	Balanza analítica	Rango de pesaje: 200 g x 0.01 mg. Menor lectura: 0.01 mg. Tiempo de respuesta: ≤ 3 segundos. Dimensiones: 210x280x80mm. Pantalla: LCD. Unidades: Kg, g, oz, oz troy, quilates, entre otras.	Se utilizó para medir con precisión las muestras de smithsonita y los reactivos, asegurando exactitud en las cantidades necesarias para el proceso.
2	Chancadora de rodillos	Tamaño de alimentación: 30 mm. Dimensiones: 254 x 355.6 mm. Producto final: <1 mm. Velocidad del rodillo: 380 RPM. Potencia: 1.1 kW (3x400V/50Hz). Peso aproximado: 400 kg.	Se utilizó para la molienda de muestras de mineral de smithsonita durante el procesamiento.
3	Molino de Bolas	Bolas de acero: 66 unidades, de tamaños entre 1" y 1 1/2". Capacidad: 1 kg.	Se utilizó para reducir las muestras de mineral de smithsonita a partículas de tamaño más pequeño.
4	Horno de Secado	Temperatura máxima 200 °C.	Se utilizó en el laboratorio para calentar las muestras de mineral y acelerar el proceso de secado.
5	Ro-tap	Modelo: RX-29. Dimensiones: 710x540x640mm. Velocidad: 1725 RPM. Capacidad: 8 tamices de altura completa.	Se utilizó para tamizar el mineral hasta una malla de -200, asegurando que el material alcanzara el tamaño adecuado para el proceso de lixiviación ácida.

Equipos para la lixiviación

Ítem	Equipos	Características	Aplicaciones
6	Reactores para lixiviación en botellas roladas:	Volumen: 1.2 – 1.5 litros. Motor: 220 V, 2800 RPM. Cantidad: 11 unidades.	Se empleó para realizar pruebas de lixiviación ácida del mineral de smithsonita, garantizando una mezcla uniforme del mineral con el ácido y mejorando la eficiencia del proceso.

Nota. Las características presentadas fueron recopiladas a partir de las fichas técnicas de cada equipo, complementadas con información obtenida de fuentes en internet.

Tabla 5

Materiales y herramientas de laboratorio.

Ítem	Materiales	Características	Aplicaciones
1	Recipientes para las muestras	Material: plástico. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Para almacenar las 11 muestras con diferentes pesos en g.
2	Espátula	Material: Acero inoxidable con mango de madera. Características: Cuchilla flexible, práctica y versátil. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Usada en el cuarteo y otras tareas de laboratorio.
3	Probetas	Material: Vidrio borosilicato o plástico resistente a productos químicos. Característica: Permiten mediciones precisas de soluciones líquidas. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Se emplean para medir volúmenes de líquidos en el laboratorio.

Ítem	Materiales	Características	Aplicaciones
4	Fiolas	Material: Vidrio borosilicato. Características: Cuello largo para un vertido preciso. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Utilizadas para medir densidades de sustancias.
5	Vaso precipitado	Material: Vidrio borosilicato. Características: Forma cónica con fondo plano, ideales para la agitación. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Para medir volúmenes y observar precipitados.
6	Bolsas para muestras	Material: Plástico resistente con cierre hermético. Características: Evitan fugas y contaminación. Tamaño: Disponibles en distintos tamaños.	Para almacenar muestras de manera segura.
7	Reloj cronometro.	o Características: Alta precisión, preferentemente con al menos 0.1 segundos.	Para medir tiempos durante procesos como molienda o lixiviación.
8	Propipetas pipeteador	o Material: Goma resistente. Características: Disponibles en distintos tamaños.	para facilitar el trasvase preciso de líquidos.
9	Brochas	Material: Mango de madera o polipropileno, con cerdas finas.	Para limpiar equipos y superficies.
10	bandejas	Material: Acero inoxidable. Características: Forma rectangular, tamaños variados.	Usadas para transportar y almacenar minerales en el proceso.

Ítem	Materiales	Características	Aplicaciones
11	Embudos	Material: Vidrio borosilicato o plástico resistente. Características: Cuello largo y tamaños variables según la necesidad.	Para la transferencia controlada de líquidos y muestras.
12	Papel filtro	Tipo: Papel de filtro cualitativo o cuantitativo. Porosidad: Depende del tamaño de partículas a retener. Resistencia: Suficiente para soportar la filtración sin romperse o desintegrarse.	Para realizar la filtración en soluciones.

Nota. Las características presentadas fueron recopiladas con información obtenida de fuentes en internet.

Tabla 6

Reactivos de laboratorio.

Ítem	Reactivos	Características	Aplicaciones
1	Ácido sulfúrico	Formula: H_2SO_4 Concentración: 604g/l. Pureza: Generalmente de grado analítico o reactivo. Almacenamiento: Recipientes de vidrio o plástico resistente a productos químicos.	Solución lixivante.
2	Reactivos	Especificaciones: Dependen del tipo de reacción o análisis a realizar. Almacenamiento: Según las recomendaciones específicas de cada reactivo (temperatura, luz, humedad, etc.).	Se utilizo para llevar a cabo reacciones químicas y análisis, como la titulación, entre otros.

Nota. Las características presentadas fueron recopiladas con información obtenida de fuentes en internet.

4.3.4.3. Validez y Confiabilidad de Instrumentos.

Los equipos, materiales y herramientas empleados en las pruebas experimentales fueron proporcionados por el laboratorio de concentración de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC, que cuentan con certificados de calibración lo que hace que dichos resultados obtenidos sean veraces y confiables.

4.4. Plan de Análisis de Datos

Para el presente trabajo de investigación, los datos fueron obtenidos mediante pruebas de lixiviación por agitación en laboratorio, que incluyeron la observación, el uso de equipos de medición y análisis químico.

Nuestro plan de análisis de datos incluyó los siguientes pasos:

- a) Se registraron las masas de las muestras de smithsonita y los reactivos utilizando una balanza analítica.
 - b) Se documentaron las condiciones experimentales, incluyendo el porcentaje de sólidos, la concentración de ácido, y el tiempo de agitación.
 - c) Los datos brutos fueron organizados en tablas para facilitar su análisis.
 - d) Con los datos obtenidos en cada prueba experimental de lixiviación ácida por agitación, se realizaron balances de materia para determinar el porcentaje de extracción de zinc de la smithsonita.
 - e) Se utilizaron métodos estadísticos para procesar los datos, permitiendo desarrollar un modelo matemático que identificara los efectos y las interacciones de las variables.
- Además, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar las diferentes

condiciones experimentales y su impacto en la eficiencia de la lixiviación. Para ello, se empleó un diseño de experimentos factorial de tres niveles (2^3).

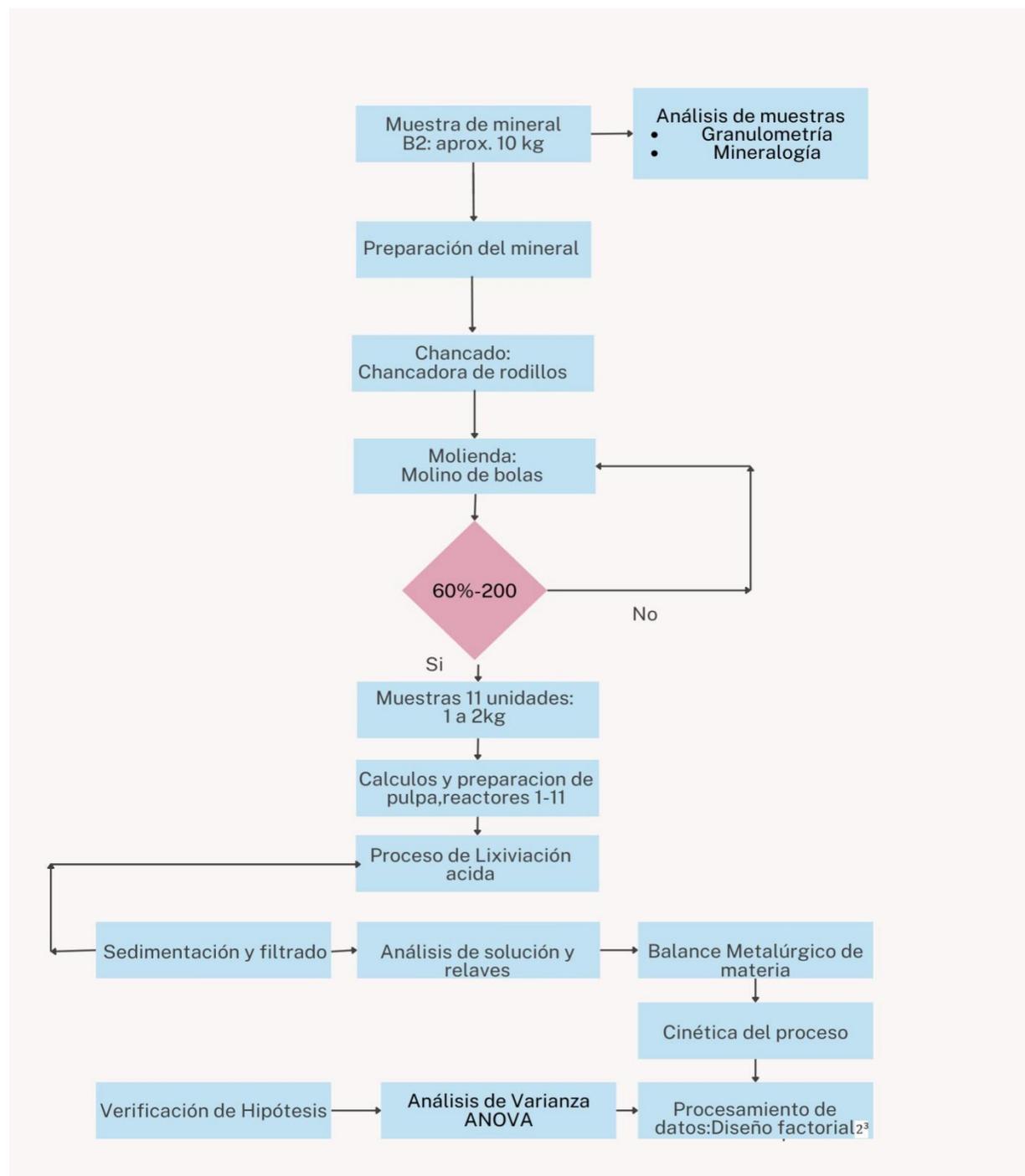
- f) Los datos se interpretaron basándose en la teoría de la lixiviación ácida.
- g) Se identificaron las condiciones óptimas para la extracción de zinc, basadas en los resultados experimentales.
- h) Los resultados se presentaron en gráficos y tablas, resaltando las tendencias observadas y las conclusiones obtenidas.

4.5. Diagrama de Bloques de la Prueba Experimental

El proceso del presente trabajo de investigación, que se centró en la extracción de zinc a partir de la smithsonita mediante lixiviación ácida por agitación en el yacimiento de Parcco-Accha-Paruro, se representó de manera esquemática en el diagrama de bloques presentado en la figura 7. Este diagrama proporcionó una visualización clara y secuencial de las etapas fundamentales del procedimiento experimental, destacando los pasos principales desde la preparación de la muestra del mineral hasta la verificación de la hipótesis.

Figura 7

Diagrama de bloque de la prueba experimental.



Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Muestreo

Es una etapa importante porque influye de forma directa en la precisión de los resultados obtenidos en los análisis posteriores, por lo que se desea obtener una muestra lo más representativamente posible capaz de reflejar la variabilidad de la población, para cumplir ese objetivo se utilizó el método de cuarteo.

5.1.1. Preparación de Muestra Representativa

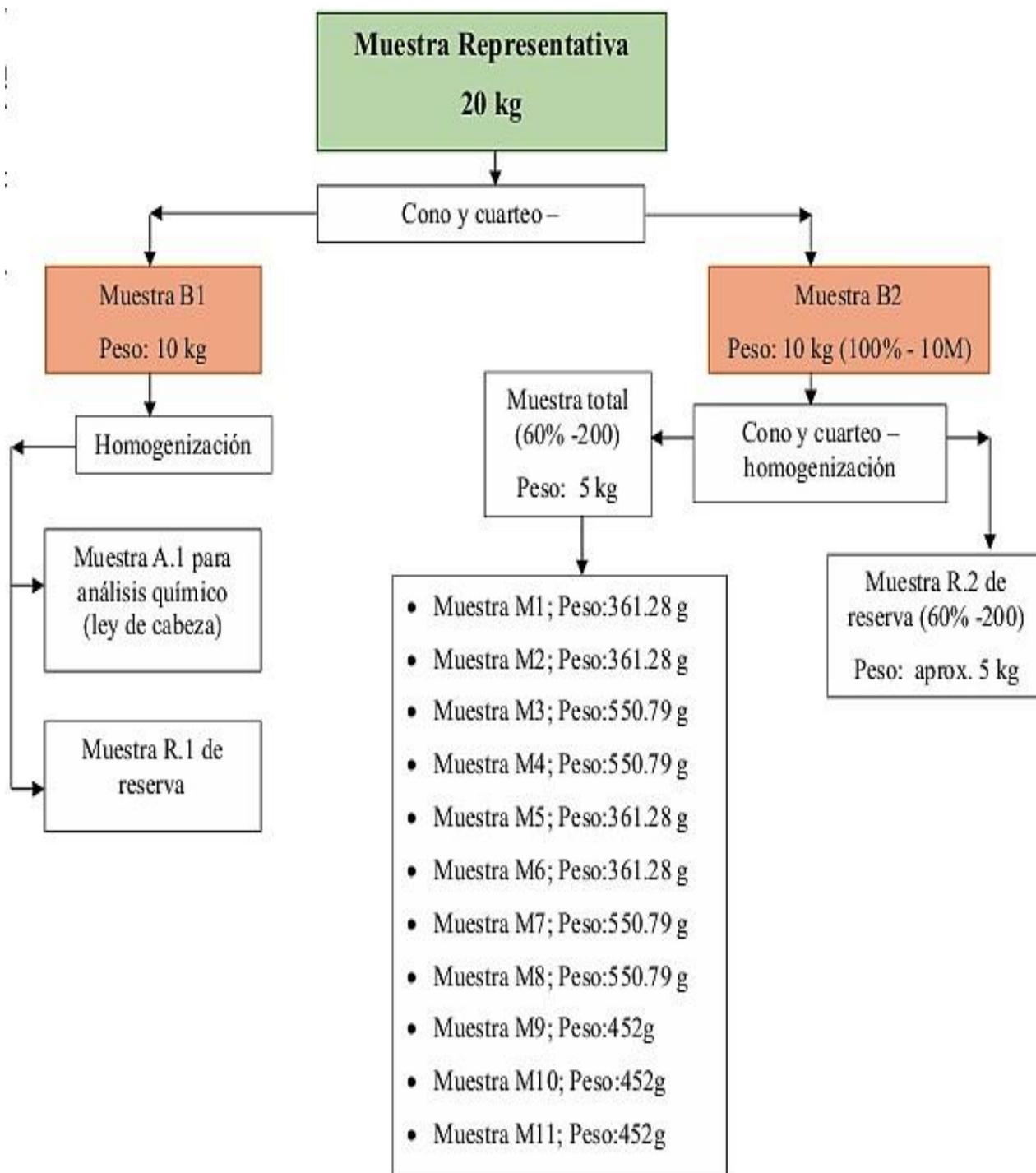
Inicialmente se tomó una muestra por cada zona de aproximadamente 30 kg de las reservas de mineral de zinc del yacimiento de Parcco, de forma estratificada según la ubicación geográfica o por zonas, de forma que cada una de estas 6 zonas esté adecuadamente representada en la muestra.

Una vez obtenidos las 6 muestras de origen, se continuó con el muestreo por cuarteo, hasta obtener una muestra representativa de 20 kg, posteriormente se realizaron el análisis químico para determinar la ley de cabeza.

Se tomará una muestra de 10 kg de mineral chancado, que posteriormente se llevará a molienda, y esta se distribuirán en 11 muestras representativas para las pruebas experimentales en botellas roladas y se dejará una muestra de reserva de 5 kg, por si hay algún fallo en las pruebas o pérdida de mineral durante el procesamiento de mineral, se puede apreciar con mayor detalle en la distribución de muestra plasmada en la figura 8, cabe mencionar que al momento de realizar que las muestras se han empaquetado en sus respectivas bolsas herméticamente cerradas y rotuladas.

Figura 8

Distribución de muestras para pruebas preliminares.



Nota: Elaboración propia.

5.2. Pruebas Preliminares

Se realizaron pruebas previas al procesamiento de mineral y proceso de lixiviación, según el orden que se muestra.

5.2.1. Análisis Mineralógico

Se realizaron análisis cualitativo, tomando como muestra el mineral en bruto centrado en el reconocimiento de las especies minerales que compone la muestra y el análisis cuantitativo, donde la muestra de mineral preparado fue pasada por 3 mallas correspondientes a la malla 10, malla 100 y malla 200, obteniéndose 4 muestras incluyendo mineral pasante de la malla 200, de las cuales se obtuvieron el porcentaje de cada mineral contenida en la muestra, así como lo detalla en el anexo 3, y se ve plasmada en la tabla 7.

Tabla 7

Análisis mineralógico del mineral del yacimiento de Parcco.

	Minerales	Fórmula química	Porcentaje (%)
Mena	SMITHSONITA	ZnCO ₃	15 – 20%
	FRANKLINITA	ZnFe ₂ O ₄	4 - 5%
	ZINCITA	ZnO	< 1%
	HEMIMORFITA	Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·H ₂ O	1 – 2%
Ganga	HEMATITA	Fe ₂ O ₃	4 – 5%
	CALCITA	CaCO ₃	12 -15%
	DOLOMITA	CaMg(CO ₃) ₂	4 – 5%
	SÍLICE	SiO ₂	50 – 60%
	OTROS	arcilla	< 2%

Nota. Reporte del análisis mineralógico del mineral del Yacimiento de Parcco

5.2.2. Análisis Químico

Se tomó una muestra de 3 kg, de las cuales 1 kg aprox. se usó para realizar el análisis y 2 kg adicionales como muestra dirimente como una referencia adicional para confirmar o aclarar resultados por si surge alguna discrepancia sobre la precisión del análisis previo.

Se aplicó el análisis químico por el método de Espectrometría de absorción atómica (AAS), con el fin de determinar la ley de cabeza del mineral procedente del yacimiento de Parcco, para lo cual se llevó al laboratorio de L.A.S. (anexo 4), obteniéndose una ley de cabeza de 11.2% de zinc, como se detalla en la tabla 8.

Tabla 8

Ley de Cabeza del Mineral de zinc.

Código Interno L.A.S	Nombre de la Muestra	Procedencia de la muestra	Descripción de la muestra	*2113	*519	*542	*551	*501
				ZnAcS	CaCO ₃	Zn	Au	Ag
				%	%	%	gr/TM	gr/TM
MN23023195	Muestra-1	Latitud:13°31'20''S Longitud:71°57'24''W	Mineral Gran	5.05	12.6	11.2	^a <0.100	^b <3

Nota. *2113 Método de ensayo para el zinc soluble en ácido sulfúrico por Absorción atómica; *519 Método de ensayo para carbonatos como carbonatos de calcio retro titulación acido-base; *542 Método de ensayo para zinc por Absorción atómica; *551 Método de ensayo a fuego para oro por reconocimiento absorción atómica; *551 Método de ensayo para plata por absorción atómica, Método desarrollado (validado) – 2023 (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO); ^a<valor numérico = límite de detección del método; ^b< valor numérico = límite de cuantificación del método . Informe de ensayo. *Laboratorios Analíticos de Sur, 2023.*

5.2.3. Cálculo del Porcentaje de Humedad

Determinar el porcentaje de humedad es importante debido a que durante el proceso de lixiviación ácida un alto contenido de humedad en el mineral puede reducir la concentración de reactivos, por lo que se requeriría más reactivo ácido para compensar la dilución y variaría el peso total del mineral de alimentación al proceso que se había previsto según cálculos, para lo cual se aplicó la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{\text{Peso mineral húmedo} - \text{Peso mineral seca}}{\text{Peso mineral húmedo}} \times 100 \quad (10)$$

Se tomaron 3 muestras de mineral de 10 gr cada uno y se realizaron las pruebas para determinar la humedad aplicando la ecuación 10, y se obtuvo los resultados plasmados en la tabla 9.

Tabla 9

Resultados del porcentaje de humedad.

Muestra	Peso mineral húmedo (g)	Peso mineral seco (g)	Humedad (%)
1	10	9.69	3.1
2	10	9.68	3.2
3	10	9.70	3.00
Promedio	10	9.690	3.100

Nota. Elaboración propia

5.2.4. Cálculo de la Gravedad Específica

La gravedad específica del mineral es necesaria para determinar el volumen de la solución lixivante, volumen de la muestra y su peso en gramos. El principio de Arquímedes se emplea para

comparar el peso de un volumen de mineral seco con el peso del agua desplazada por un volumen igual, concepto que se expresa en la ecuación.

$$G. E. = \frac{\text{Peso mineral seco}}{\text{Peso del agua desplazada}} \quad (11)$$

$$\text{Peso del agua desplazada} = V_i - V_f \quad (12)$$

Donde:

V_i = capacidad de la fiola (200ml)

V_f = agua usada para enrase (ml)

A partir del cálculo previo, se han obtenido tres muestras de mineral seco para realizar las pruebas destinadas a determinar la gravedad específica del mineral. Los resultados obtenidos se calcularon utilizando las ecuaciones 11 y 12 y se presentan en la tabla 10.

Tabla 10

Resultados de la gravedad específica del mineral.

Prueba	Peso mineral seco (g)	V_i (ml)	V_f (ml)	Peso del agua desplazada (ml)	Gravedad específica
1	9.69	200	196.88	3.12	3.10577
2	9.68	200	196.91	3.09	3.13269
3	9.7	200	196.87	3.13	3.09904
Promedio	9.690	200	196.89	3.113	3.112

Nota. Elaboración propia

Se verifico el resultado final de la gravedad específica mostrada en la tabla 10, y aplicando la ecuación 11.

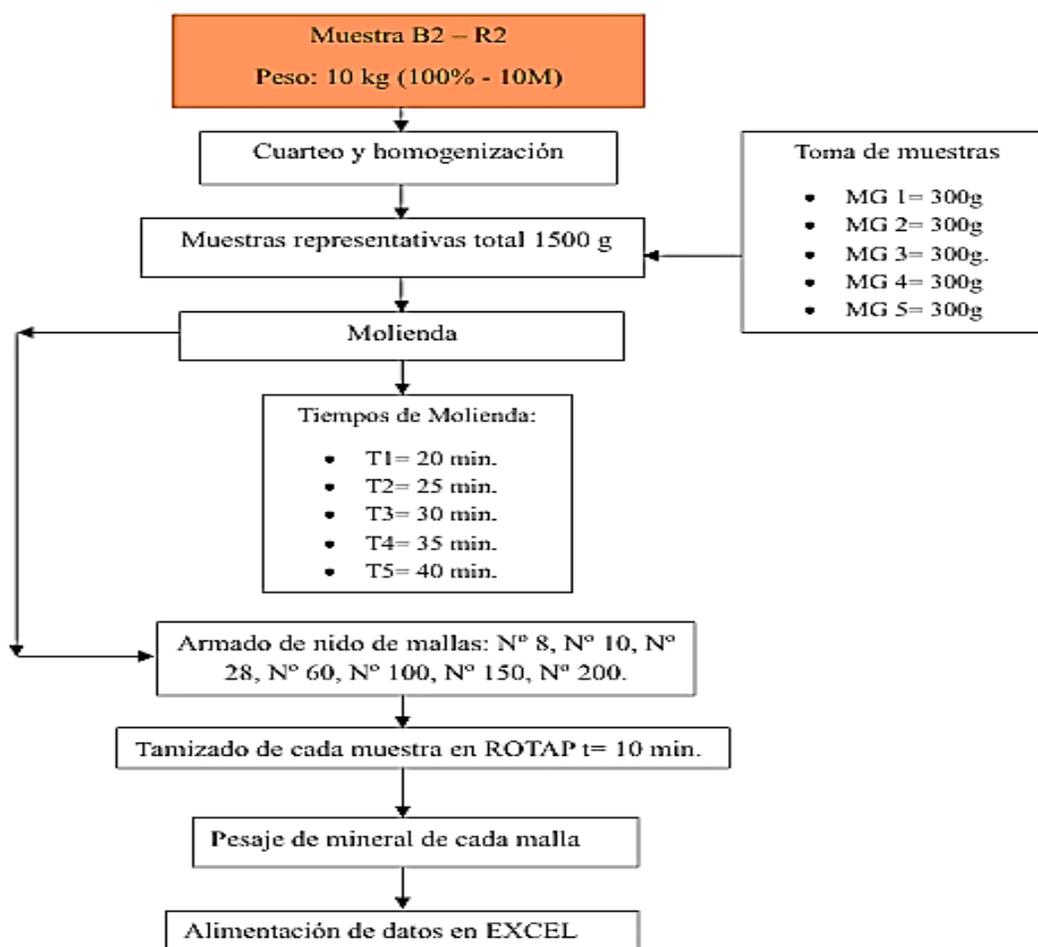
$$G. E. = \frac{\text{Peso mineral seco}}{\text{Peso del agua desplazada}} = \frac{9.69 \text{ g}}{3.113 \text{ ml}} = 3.112$$

5.3. Prueba de Molienda y Análisis Granulométrico

Para las pruebas correspondientes se tomaron muestras de 300 gr, a tiempos de molienda de 20, 25, 30, 35 y 40 minutos de residencia en el molino de bolas, para lo cual se siguió el procedimiento visto en la figura 8 y la cual tiene relación con la figura 9.

Figura 9

Procedimiento para pruebas de análisis granulométrico.



Nota. Elaboración propia.

El análisis granulométrico nos permite medir el porcentaje del mineral pasante según a la distribución de tamaños de partículas de mineral. Las partículas más pequeñas ofrecen una mayor área de superficie para la reacción, pero si son demasiado finas, pueden generar problemas operacionales, como una aglomeración excesiva o pérdida de material. Este método nos ayuda a asegurar que las partículas estén en el rango ideal para la disolución eficiente de los metales, para ello se elaboraron tablas de análisis granulométrico y sus curvas de distribución de tamaños.

Tabla 11

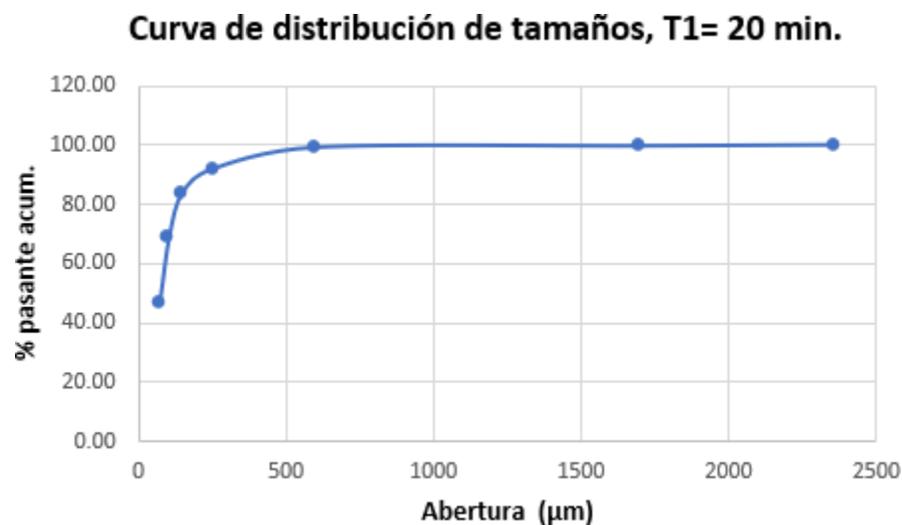
Prueba de análisis granulométrico de la muestra MG 1, T1= 20 minutos.

Malla N°	Abertura en µm (x)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Ret. Acumulado (%)	Pasante acum. en % (y)
8	2360	0	0.00	0.00	100.00
10	1700	1	0.34	0.34	99.66
28	600	1.5	0.50	0.84	99.16
60	250	22.00	7.37	8.21	91.79
100	149	24.00	8.04	16.25	83.75
150	106	42.50	14.24	30.49	69.51
200	74	66.50	22.28	52.76	47.24
BASE	-74	141.00	47.24	100.00	0.00
TOTAL		298.50			

Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Curva de distribución de tamaños de muestra MG 1.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

Tabla 12

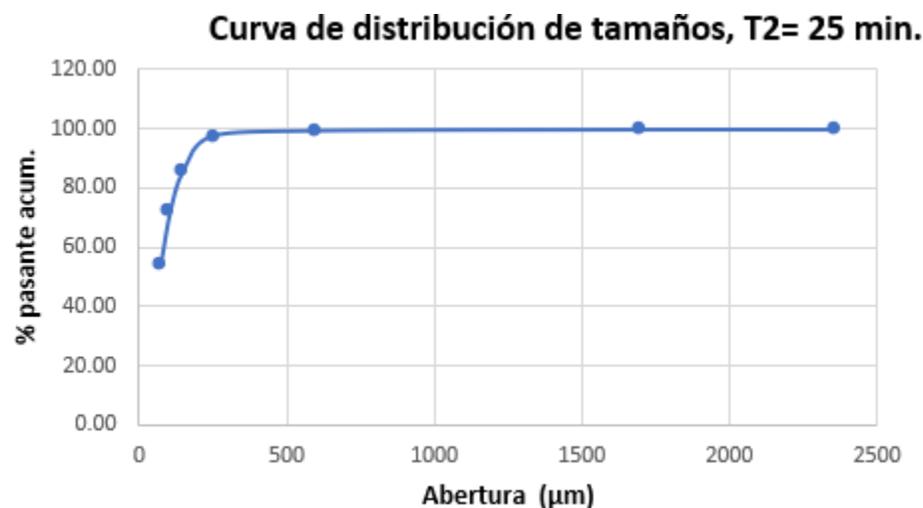
Prueba de análisis granulométrico de la muestra MG 2, T2= 25 minutos.

Malla N°	Abertura en μm (x)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Ret. Acumulado (%)	Pasante acumu en % (y)
8	2360	0	0.00	0.00	100.00
10	1700	0	0.00	0.00	100.00
28	600	1.1	0.37	0.37	99.63
60	250	5.20	1.74	2.10	97.90
100	149	35.60	11.89	14.00	86.00
150	106	39.80	13.30	27.30	72.70
200	74	53.40	17.84	45.14	54.86
BASE	-74	164.20	54.86	100.00	0.00
TOTAL		299.30			

Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Curva de distribución de tamaños de muestra MG 2.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

Tabla 13

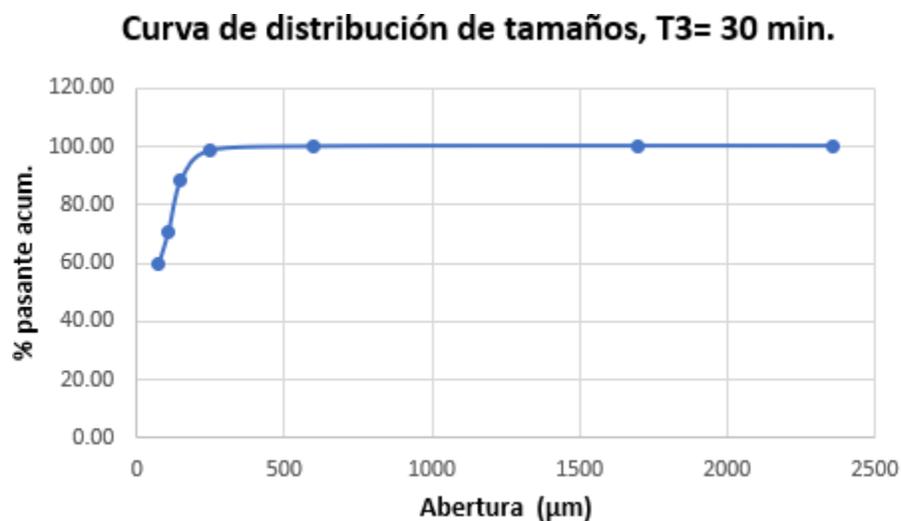
Prueba de análisis granulométrico de la muestra MG 3, T3= 30 minutos.

Malla N°	Abertura en µm (x)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Ret. Acumulado (%)	Pasante en % (y)
8	2360	0.00	0.00	0.00	100.00
10	1700	0.00	0.00	0.00	100.00
28	600	0.50	0.17	0.17	99.83
60	250	4.00	1.35	1.52	98.48
100	149	29.80	10.05	11.57	88.43
150	106	52.40	17.68	29.25	70.75
200	74	32.50	10.96	40.22	59.78
BASE	-74	177.20	59.78	100.00	0.00
TOTAL		296.40			

Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Curva de distribución de tamaños de muestra MG 3.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

Tabla 14

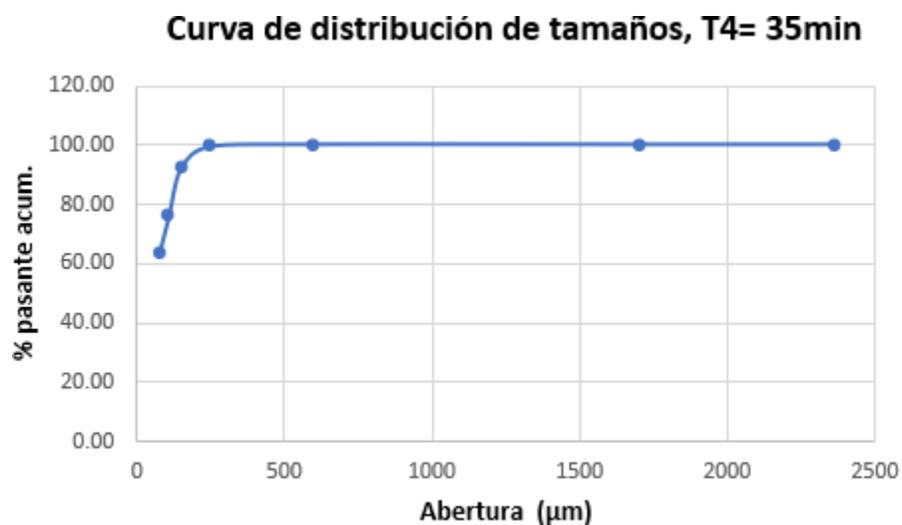
Prueba de análisis granulométrico de la muestra MG 4, T4= 35 minutos.

Malla N°	Abertura en μm (x)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Ret. Acumulado (%)	Pasante en % (y)
8	2360	0	0.00	0.00	100.00
10	1700	0	0.00	0.00	100.00
28	600	0	0.00	0.00	100.00
60	250	2.00	0.67	0.67	99.33
100	149	21.30	7.14	7.81	92.19
150	106	50.00	16.76	24.56	75.44
200	74	36.70	12.30	36.86	63.14
BASE	-74	188.40	63.14	100.00	0.00
TOTAL		298.40			

Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Curva de distribución de tamaños de muestra MG 4.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

Tabla 15

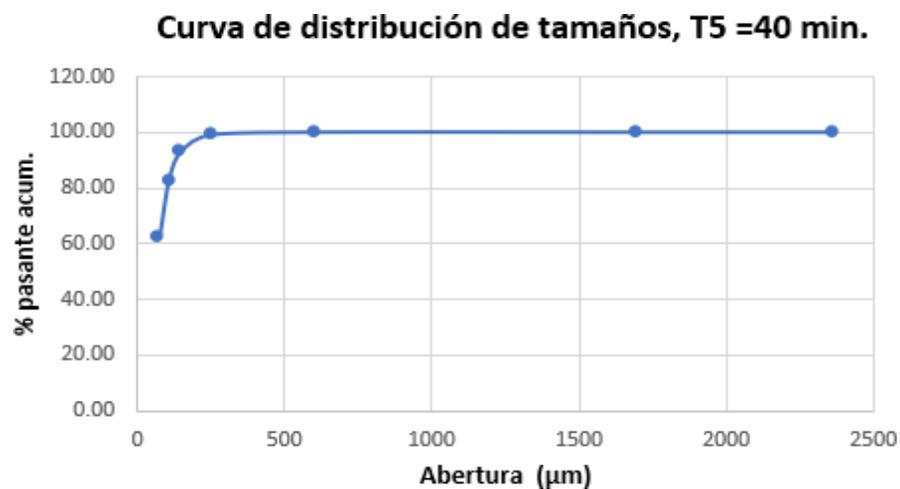
Prueba de análisis granulométrico de la muestra MG 5, T5= 40 minutos.

Malla N°	Abertura en μm (x)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Ret. Acumulado (%)	Pasante en % (y)
8	2360	0	0.00	0.00	100.00
10	1700	0	0.00	0.00	100.00
28	600	0	0.00	0.00	100.00
60	250	2.70	0.91	0.91	99.09
100	149	16.80	5.65	6.56	93.44
150	106	30.00	10.09	16.64	83.36
200	74	61.20	20.58	37.22	62.78
BASE	-74	186.70	62.78	100.00	0.00
TOTAL		297.40			

Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Curva de distribución de tamaños de muestra MG 5.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

Para determinar la cinética de la molienda se considera los datos de la tabla 16, las cuales nos permite obtener un modelo o ecuación matemática que nos ayudará a determinar el tiempo óptimo de molienda.

Tabla 16

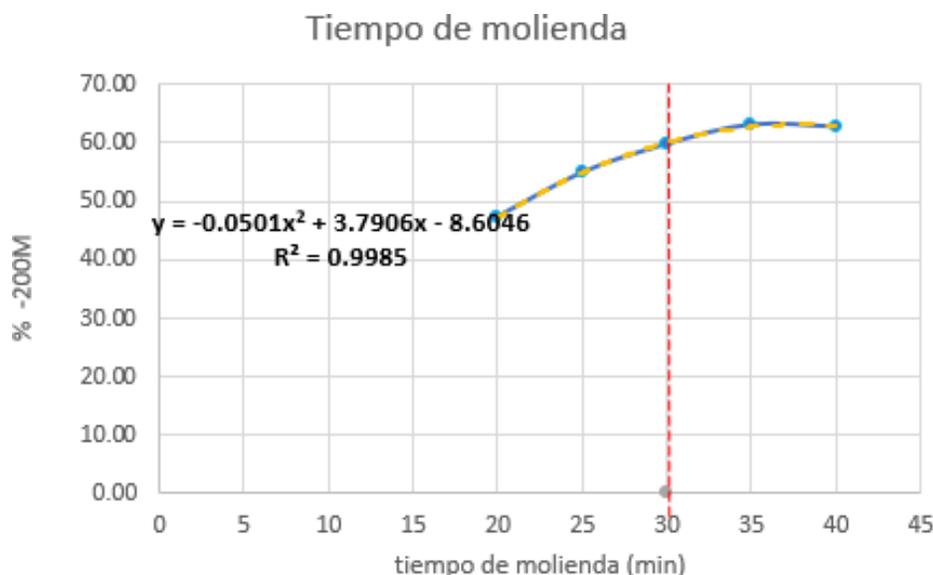
Recolección de datos para la cinética de la molienda.

Nº	tiempo (min) (x)	peso pasante (g)	% -200 M acumulado (y)
1	20	141	47.24
2	25	164.2	54.86
3	30	177.2	59.78
4	35	188.4	63.14
5	40	186.7	62.78
TOTAL		857.5	

Nota. Elaboración propia.

Figura 15

Curva de cinética de molienda.



Nota. Elaboración propia (software Excel).

De la figura 15 se apreció que la curva que relaciona el tiempo de molienda con el porcentaje de pasantes acumulado muestra una tendencia inicial ascendente, pero desde el tiempo de 35 min. el porcentaje acumulado de pasantes comienza a descender progresivamente, indicando una disminución en la eficiencia de la molienda a medida que el proceso avanza, debido principalmente a la aglomeración de partículas finas que por el tiempo de molienda más prolongado genera partículas ultrafinas difíciles de manejar, provocando una cohesión de partículas finas.

Aplicando el modelo matemático obtenido y vista en la gráfica podemos determinar el tiempo óptimo de molienda aplicando la ecuación 13 y 14.

$$Y = -0.0501X^2 + 3.7906X - 8.6046 \quad (13)$$

Donde:

- $Y = \% -200M$
- $X = \text{tiempo de molienda}$

La ecuación cuadrática para la forma $aX^2 + bX + c = 0$, se puede resolver utilizando la Fórmula general de la ecuación cuadrática.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (14)$$

La ecuación 13 es aplicado para reemplazar, $Y = 60$:

$$60 = -0.0501X^2 + 3.7906X - 8.6046$$

$$0 = -0.0501X^2 + 3.7906X - 68.6046 \quad (15)$$

Se aplica la ecuación 14 en la ecuación 15.

$$x = \frac{-3.7906 \pm \sqrt{3.7906^2 - 4(-0.0501 * - 8.6046)}}{2(-0.0501)}$$

$$X_1 = 45.69$$

$$X_2 = 30.05$$

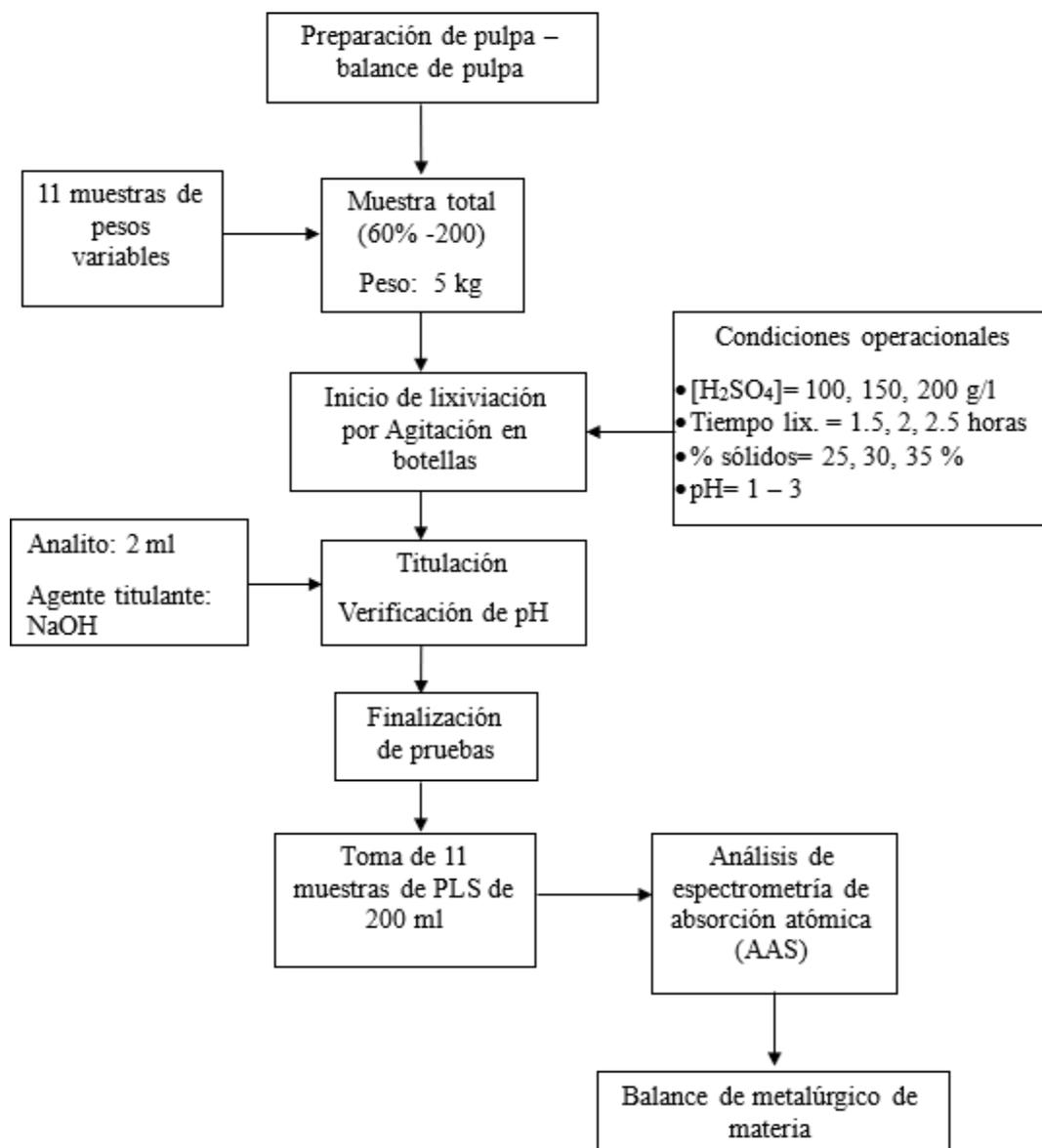
Mediante prueba de resultados de X , el tiempo necesario para una granulometría de 60% - 200 Malla es de 30 minutos con 05 segundos, la cual se puede representar en la figura 15 con una línea vertical.

5.4. Pruebas Experimentales

El procedimiento de las pruebas experimentales que se siguió se observará en la figura 16, en relación con la figura 8.

Figura 16

Procedimiento de pruebas experimentales.



Nota. Elaboración propia.

5.4.1. Preparación de Pulpa

Para la preparación de pulpa se tomaron en consideración los siguientes parámetros operacionales:

- Porcentajes de sólidos de 25, 30 y 35%.
- Gravedad específica = 3.112.
- Capacidad del reactor = 1500 ml, considerando el 80% el vol. del reactor = 1200 ml.

a) Para una pulpa al 25 % de sólidos

Podemos visualizar el balance de pulpa en la tabla 17.

Tabla 17

Balance de pulpa para 25% de sólidos.

Concepto:	P=25%		Pruebas Experimentales, 1200 ml	
	Peso (g)	Volumen (ml)	Peso (g)	Volumen (ml)
Mineral	25	8.04	361.28	116.17
Sol. Lix=agua + H ₂ SO ₄	75	75.00	1083.83	1083.83
PULPA	100	83.04	1445.11	1200.00

Nota. Elaboración propia.

Para determinar el volumen de la solución lixiviante:

$$V \text{ sol.} = 75 \text{ ml} * \frac{1200 \text{ ml}}{83.04 \text{ ml}} = 1083.83 \text{ ml}$$

Para determinar el peso del mineral:

$$W_s = 116.17 \text{ ml} * 3.112 = 361.28 \text{ g}$$

Estos cálculos se desarrollaron para todos los balances de pulpa obtenidos.

b) Para una pulpa al 30 % de sólidos

Tabla 18

Balance de pulpa para 30% de sólidos.

Concepto:	P=30%		Pruebas Experimentales, 1200 ml	
	Peso (g)	Volumen (ml)	Peso (g)	Volumen (ml)
Mineral	30	9.65	452.00	145.34
Sol. Lix=agua + H ₂ SO ₄	70	70.00	1054.66	1054.66
PULPA	100	79.65	1506.66	1200.00

Nota. Elaboración propia.

c) Para una pulpa al 35 % de sólidos

Tabla 19

Balance de pulpa para 35% de sólidos.

Concepto:	P=35%		Pruebas Experimentales, 1200 ml	
	Peso (g)	Volumen (ml)	Peso (g)	Volumen (ml)
Mineral	35	11.25	550.79	177.10
Sol. Lix=agua + H ₂ SO ₄	65	65.00	1022.90	1022.90
PULPA	100	76.25	1573.69	1200.00

Nota. Elaboración propia.

5.4.2. Preparación de Solución Lixivante

Como primer paso se determinó la concentración del ácido sulfúrico inicial mediante la titulación ácido – base (acidimetría):

1. Se preparó 1000 cc de solución de NaOH al 0.1 N, para ser utilizado como agente titulante.
2. Se tomó una muestra de analito de 1 ml y se vertió en un balón de vidrio de base esférica.
3. Se añadió 2 gotas de indicador anaranjado de metilo al analito y se procedió con la titulación hasta llegar al punto final o cambio de viraje.
4. Se tomaron notas del gasto de NaOH y se procedió con los cálculos respectivos obteniéndose, $[H_2SO_4] = 604 \text{ g/l}$.
5. En función a la concentración inicial del ácido, se dividió en 3 grupos según a la variable independiente de concentración del ácido en el orden de 100, 150 y 200 g/l.
6. En la tabla 20 se mostrará la preparación de la solución lixivante.

Tabla 20

Preparación de solución lixivante.

Nº muestra	% de sólidos	$[H_2SO_4]$ g/l	V sol. lix total (ml)	Volumen ácido a agregar (ml)	Agua a agregar (ml)
4	2 de 25% y 2 de 35%	100	4300.00	711.92	3588.08
4	3 de 25% y 2 de 35%	200	4300.00	1423.84	2876.16
3	3 de 30%	150	3200.00	794.70	2405.30
TOTAL		-	11800.00	2930.46	8869.54

Nota. Elaboración propia.

Para determinar el volumen de la solución lixivante a preparar según las concentraciones de $[H_2SO_4] = 100, 150$ y 200 g/l, y cuyos datos nos ayudaran a construir la tabla 20, seguimos los siguientes pasos:

→Para $[H_2SO_4] = 100$ g/l.

a) Volumen total de la solución lixivante para las 4 muestras, con 2.05 % de exceso:

$$V \text{ sol. lix.} = 2 * 1083.83 \text{ ml} + 2 * 1022.90 \text{ ml}$$

$$= (4213.46 \text{ ml} * 2.05\%) + 4213.46 \text{ ml} = 4300 \text{ ml}$$

b) Volumen de ácido sulfúrico a agregar:

$$V H_2SO_4 = \frac{4300 \text{ ml} * 100 \text{ g/l}}{604 \text{ g/l}} = 711.92 \text{ ml } H_2SO_4$$

c) Agua a agregar:

$$H_2O = 4300 \text{ ml} - 711.92 \text{ ml} = 3588.08 \text{ ml}$$

5.4.3. Determinación del Porcentaje de Extracción

Para continuar con la determinación del porcentaje de extracción por muestra se consideran los resultados obtenidos del reporte de análisis químico, donde resaltan las leyes de zinc de la cabeza (11.2 %) y concentrados.

Los relaves obtenidos por prueba experimental, fueron secados y pesados, y los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21*Pesos de relaves de las 11 muestras.*

Nº de muestra relave	Peso (g)
R1	290
R2	210
R3	455
R4	500
R5	310
R6	210
R7	310
R8	405
R9	345
R10	330
R11	325

Nota. Elaboración propia.

Teniendo en consideración los resultados de la tabla 21 respecto a los relaves, podemos determinar los porcentajes de extracción obtenidos en cada prueba experimental, cuyos resultados se plasmarán en las tablas de balance de materia.

Tabla 22*Balance de materia para muestra 1.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo ley Zn	contenido metálico Zn (g)	distribución elemental Zn %	ratio de concentración	% de extracción Zn
Cabeza	361.28	100	11.20%	40.46336	100		100.000
Concentrado	71.28	19.730	25.60 g/l	27.746048	68.571	5.068	68.571
Ripios	290	80.270	4.385%	12.717312	31.429		31.429

Nota. Elaboración propia.

Tabla 23*Balance de materia para muestra 2.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	361.28	100	11.20%	40.46336	100		100.000
Concentrado	151.28	41.873	36.0 g/l	39.01788	96.428	2.388	96.428
Ripios	210	58.127	0.688%	1.44548	3.572		3.572

Nota. Elaboración propia.**Tabla 24***Balance de materia para muestra 3.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	550.79	100	11.20%	61.68848	100		100.000
Concentrado	95.79	17.391	24.10 g/l	24.651649	39.962	5.750	39.962
Ripios	455	82.609	8.140%	37.036831	60.038		60.038

Nota. Elaboración propia.**Tabla 25***Balance de materia para muestra 4.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	550.79	100	11.20%	61.68848	100		100.000
Concentrado	50.79	9.221	53.0 g/l	54.21317	87.882	10.844	87.882
Ripios	500	90.779	1.495%	7.47531	12.118		12.118

Nota. Elaboración propia.

Tabla 26*Balance de materia para muestra 5.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo ley	contenido metálico	distribución elemental	ratio de concentración	% de extracción Zn
			Zn	Zn (g)	Zn %		
Cabeza	361.28	100	11.20%	40.46336	100		100.000
Concentrado	51.28	14.194	26.60g/l	28.829878	71.249	7.045	71.249
Ripios	310	85.806	3.753%	11.633482	28.751		28.751

Nota. Elaboración propia.**Tabla 27***Balance de materia para muestra 6.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo ley	contenido metálico	distribución elemental	ratio de concentración	% de extracción Zn
			Zn	Zn (g)	Zn %		
Cabeza	361.28	100	11.20%	40.46336	100		100.000
Concentrado	151.28	41.873	33.0g/l	35.76639	88.392	2.388	88.392
Ripios	210	58.127	2.237%	4.69697	11.608		11.608

Nota. Elaboración propia.**Tabla 28***Balance de materia para muestra 7.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo ley	contenido metálico	distribución elemental	ratio de concentración	% de extracción Zn
			Zn	Zn (g)	Zn %		
Cabeza	550.79	100	11.20%	61.68848	100		100.000
Concentrado	240.79	43.717	23.10g/l	23.628759	38.303	2.287	38.303
Ripios	310	56.283	12.277%	38.059721	61.697		61.697

Nota. Elaboración propia.

Tabla 29*Balance de materia para muestra 8.*

Concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	550.79	100	11.20%	61.68848	100		100.000
Concentrado	145.79	26.469	49.0g/l	50.12161	81.250	3.778	81.250
Ripios	405	73.531	2.856%	11.56687	18.750		18.750

Nota. Elaboración propia.**Tabla 30***Balance de materia para muestra 9.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	451.99	100	11.20%	50.62288	100		100.000
Concentrado	106.99	23.671	37.0g/l	39.02242	77.085	4.225	77.085
Ripios	345	76.329	3.362%	11.60046	22.915		22.915

Nota. Elaboración propia.**Tabla 31***Balance de materia para muestra 10.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo	contenido	distribución	ratio de	% de
			ley	metálico	elemental		
			Zn	Zn (g)	Zn %		Zn
Cabeza	451.99	100	11.20%	50.62288	100		100.000
Concentrado	121.99	26.990	43.0g/l	45.35038	89.585	3.705	89.585
Ripios	330	73.010	1.598%	5.2725	10.415		10.415

Nota. Elaboración propia.

Tabla 32*Balance de materia para muestra 11.*

concepto	Peso (g)	Peso (%)	ensayo ley	contenido metálico	distribución elemental	ratio de concentración	% de extracción Zn
			Zn	Zn (g)	Zn %		
Cabeza	451.99	100	11.20%	50.62288	100		100.000
Concentrado	126.99	28.096	37.0g/l	39.02242	77.085	3.559	77.085
Ripios	325	71.904	3.569%	11.60046	22.915		22.915

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 34 nos indica el resumen de los resultados obtenidos en los balances de materia realizados para cada prueba, en la cual nos muestra el porcentaje de extracción.

Tabla 33*Resumen de porcentaje de extracción y ley de concentrado por prueba metalúrgica M1 – M8.*

Nº de muestra	Concentración del ácido sulfúrico (g/l)	Extracción (%)	Ley de Zinc (g/l)
M1	100	68.57	25.60
M2	200	96.43	36.00
M3	100	39.96	24.10
M4	200	87.88	53.00
M5	100	71.25	26.60
M6	200	88.39	33.00
M7	100	38.30	23.10
M8	200	81.25	49.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 34

Resumen de porcentaje de extracción y ley de concentrado por prueba metalúrgica M9 – M11.

Nº de muestra	Concentración del ácido sulfúrico (g/l)	Extracción (%)	Ley de Zinc (g/l)
M9	150	77.08	37.00
M10	150	89.58	43.00
M11	150	77.08	37.00

Nota. Elaboración propia.

5.5. Cinética del Proceso

Se consideran los modelos matemáticos de Jader, Jader modificado y Topoquímico para determinar cuál modelo matemático se ajusta mejor a la cinética del proceso, y con ello también determinar el modelo cinético, y poder concluir como es la forma de difusión del ácido sulfúrico como reactante en relación al material sólido.

Para lo cual es necesario considerar los siguientes datos operativos tomadas teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, y en la tabla 35 se mostrarán la data obtenida de la prueba de cinética y se tiene en cuenta las ecuaciones 7, 8 y 9 mostradas en la sección 2.4.2 del marco teórico.

Datos operativos para la cinética del proceso:

- Granulometría: Malla -200
- Peso Muestra: 361.28 g
- Volumen sol.liq.: 1.08383 l
- P %solidos: 25 %

- [H₂SO₄]: 200 g/l
- zinc C: 11.20 %
- Contenido de zinc C: 40.46 g

Tabla 35

Data obtenida para determinar modelo cinético.

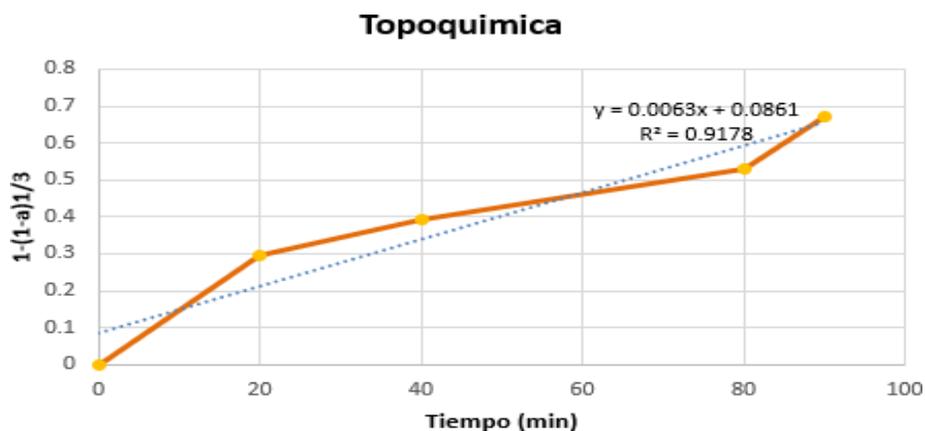
Exp.	Tiempo (min.)	Conc. De zinc (g/l)	%Ext.	α	$1-\alpha$	Topoquímica	Jander	Dif. Controlada o Jander modificado
						$1-(1-\alpha)^{1/3}$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	$1-(2/3*\alpha) - ((1-\alpha)^{2/3})$
1	0	0	0.00	0.00	1	0	0.000	0.00
2	20	24.27	65.00	0.65	0.35	0.30	0.087	0.07
3	40	28.92	77.46	0.77	0.23	0.39	0.153	0.11
4	80	33.42	89.53	0.90	0.10	0.53	0.280	0.18
5	90	36.00	96.43	0.96	0.04	0.67	0.450	0.25

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla 35 podemos graficar e identificar el modelo más ajustado a los valores obtenidos, en las gráficas 17,18 y 19.

Figura 17

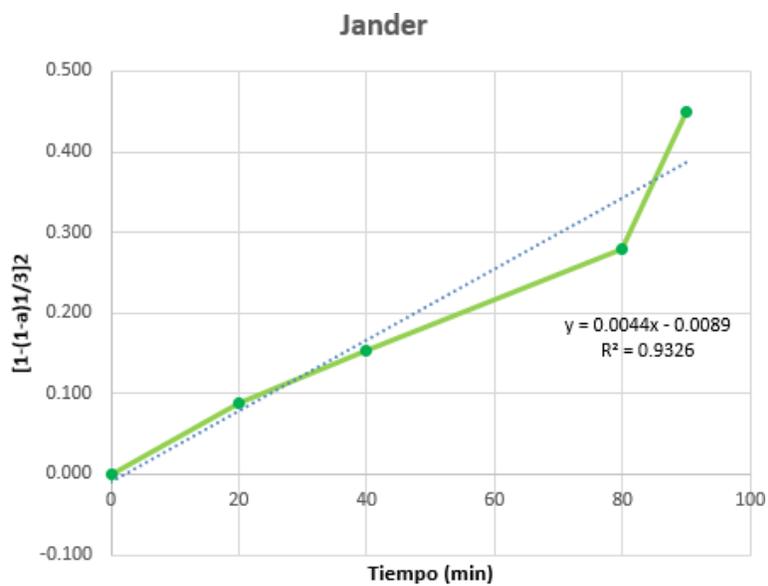
Modelo matemático Topoquímico.



Nota. Elaboración propia.

Figura 18

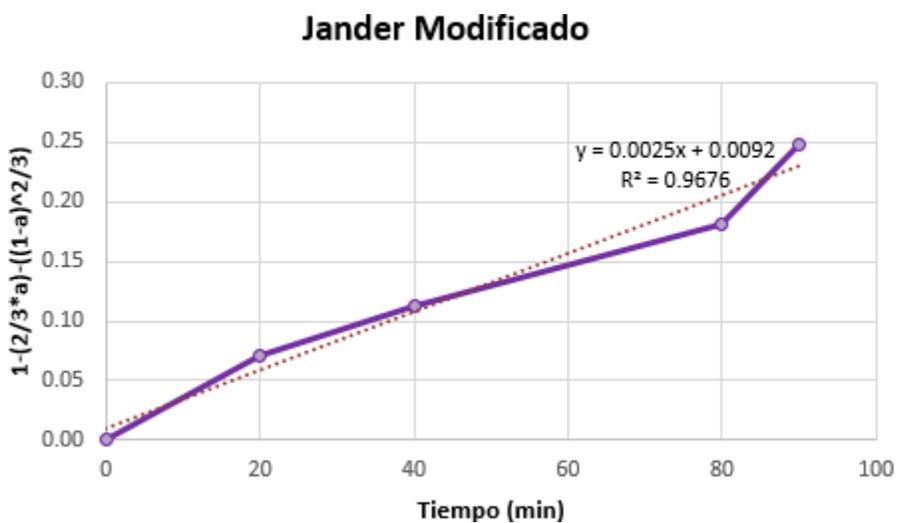
Modelo matemático de Jander.



Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Modelo matemático de Jander Modificado.

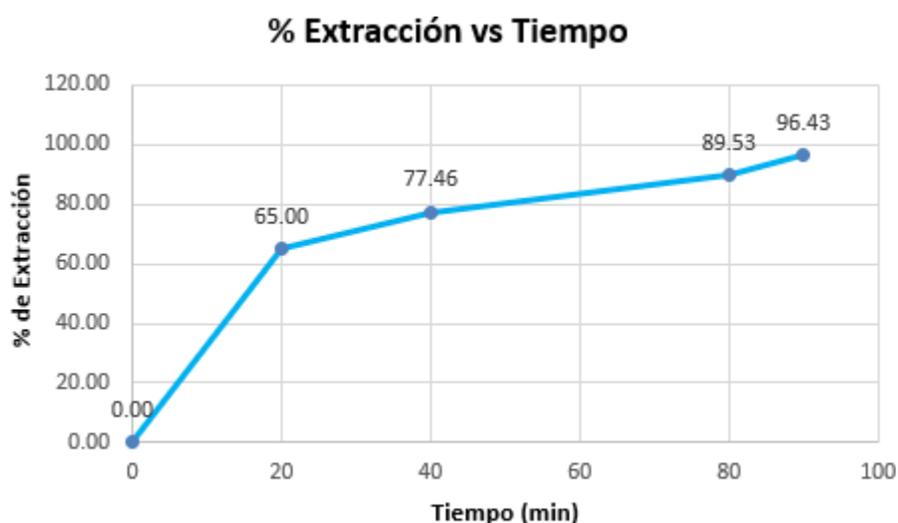


Nota. Elaboración propia.

Viendo la data y en la Figura 19 se observa que el modelo matemático que más se adecua es el modelo de Jander Modificado, que sigue un modelo cinético de núcleo decreciente o sin reaccionar, convirtiéndose en un modelo más flexible para nuestros datos.

Figura 20

Porcentaje de extracción vs el tiempo.



Nota. Elaboración propia.

De la figura 20 podemos ver que en el minuto 20 se obtiene un porcentaje de extracción de 65 % de zinc y llega a un máximo porcentaje de extracción en el minuto 90 o a 1.5 horas.

5.6. Diseño Factorial 2^3 con Puntos Centrales con Minitab.

El propósito de este diseño factorial es estudiar el efecto de tres factores, cada uno con dos niveles (mínimo y máximo), sobre la respuesta de la extracción de Zinc. El diseño factorial se implementó para analizar las interacciones y efectos principales de los factores involucrados en el proceso de lixiviación ácida. Estos factores son:

A: Concentración del ácido sulfúrico (g/L)

B: Porcentaje de sólidos (%)

C: Tiempo de lixiviación (horas)

La hipótesis general es que la lixiviación ácida con agitación de la smithsonita permitirá lograr una extracción de Zinc (Y) superior al 80% bajo las condiciones adecuadas. Para ello, se llevaron a cabo 8 corridas factoriales más 3 puntos centrales, resultando en un total de 11 pruebas metalúrgicas.

5.7. Variables Evaluadas

Tabla 36

Valores mínimos y máximos utilizados en el proceso de lixiviación.

	Inferior (-)	Intermedio (0)	Superior (+)
Variable	Mínimo	Centro	Máximo
A: Concentración de ácido sulfúrico (g/L)	100	150	200
B: Porcentaje de sólidos (%)	25	30	35
C: Tiempo de lixiviación (horas)	1.5	2.0	2.5

Nota. Elaboración propia

Estos rangos fueron seleccionados para optimizar el proceso de lixiviación y maximizar el porcentaje de extracción de Zinc como se muestra en la tabla 37.

Tabla 37

Variables en escala natural y codificada con replicas en el centro.

Columnas	Escala codifica			Escala natural			Respuesta
	X1	X2	X3	A	B	C	Y
C-1	-1	-1	-1	100	25	1,5	68,57
C-2	1	-1	-1	200	25	1,5	96,43
C-3	-1	1	-1	100	35	1,5	39,96
C-4	1	1	-1	200	35	1,5	87,88
C-5	-1	-1	1	100	25	2,5	71,25
C-6	1	-1	1	200	25	2,5	88,39
C-7	-1	1	1	100	35	2,5	38,3
C-8	1	1	1	200	35	2,5	81,25
C-9	0	0	0	150	30	2	77,08
C-10	0	0	0	150	30	2	89,58
C-11	0	0	0	150	30	2	77,08

Nota. Elaboración propia

Donde:

- A: Concentración del ácido sulfúrico $\frac{g}{(/ l)}$.
- B: Porcentaje de sólidos(%).

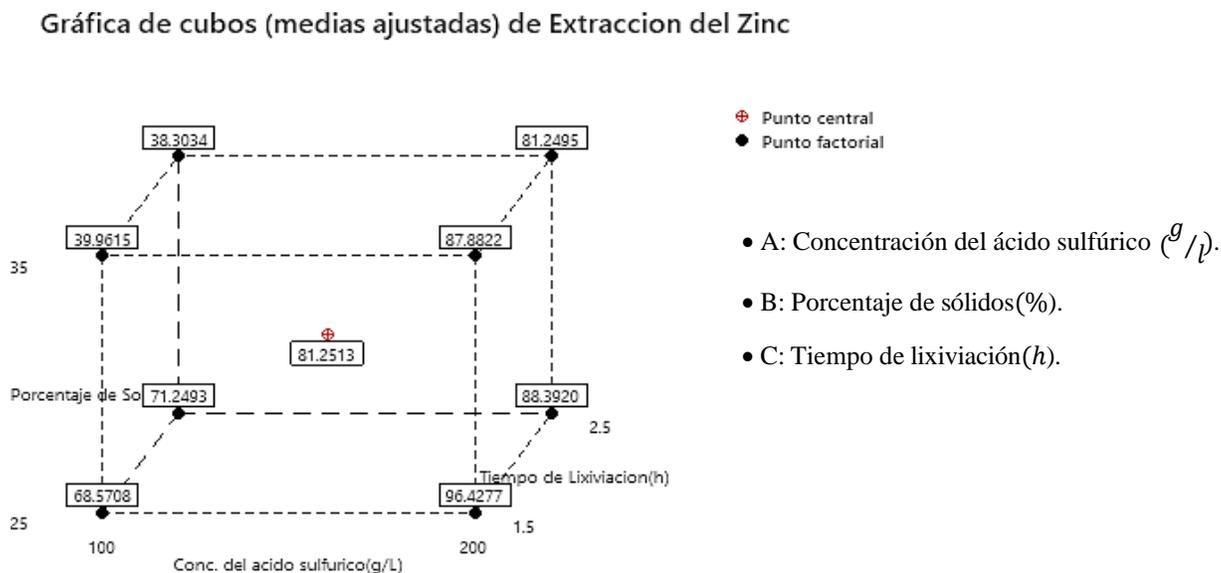
- C: Tiempo de lixiviación(h).
- Y : Porcentaje de extracción de Zn (%).

5.8. Representación Geométrica de las Combinaciones

La región experimental se puede visualizar como un cubo regular, cuyos vértices representan las ocho combinaciones posibles de los factores estudiados. Este enfoque ha permitido analizar siete efectos en total: tres efectos principales (A, B, C), tres interacciones dobles (AB, AC, BC) y una interacción triple (ABC), tal como se visualiza en la figura 21. El análisis se enfocó en la influencia de los factores controlables sobre la variable de respuesta, que en este caso es el porcentaje de extracción de Zinc. Este enfoque permitió estudiar el efecto de tres factores, cada uno en dos niveles (mínimo y máximo), sobre la variable de respuesta, lo que ayudó a identificar las combinaciones más eficientes para maximizar la extracción de Zinc.

Figura 21

Representación geométrica de las variables en 2^3 puntos centrales.



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

Tabla 38

Efectos estimados para la extracción del Zinc (unidades codificadas).

Término	Efecto
A	33,97
B	-19,31
C	-3,41
A*B	11,47
A*C	-3,92
B*C	-0,73
A*B*C	1,43

Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

Efecto de A (Concentración de ácido sulfúrico):

- Efecto: 33.97, lo que indica que la concentración de ácido tiene un efecto positivo significativo en la extracción de Zinc, indicando que son directamente proporcionales.
- Valor T: 6.66 (significativo).
- Valor p: 0.022, indicando que es estadísticamente significativo al nivel de 95%.
- La concentración de ácido sulfúrico es el factor más influyente en el proceso.

Efecto de B (Porcentaje de sólidos):

- Efecto: -19.31, lo que sugiere que el aumento en el porcentaje de sólidos disminuye la extracción de Zinc.
- Valor T: -3.78 (moderadamente significativo).
- Valor p: 0.063, lo que sugiere que está cerca de ser significativo al 90%.

- Aunque no es tan fuerte como el factor A, el porcentaje de sólidos tiene un impacto negativo notable en el proceso.

Efecto de C (Tiempo de lixiviación):

- Efecto: -3.41, lo que muestra un efecto menor y negativo del tiempo de lixiviación sobre la extracción.
- Valor p: 0.573, indicando que no es significativo.

Interacción A*B (concentración de ácido y el porcentaje de sólidos):

- Efecto: 11.47, indicando que la interacción entre la concentración de ácido y el porcentaje de sólidos tiene un impacto positivo moderado.
- Valor p: 0.154, lo que sugiere que no es estadísticamente significativo.
- Aunque no significativo, esta interacción podría tener un impacto moderado cuando se ajustan ambos factores.

Interacción A*C (concentración de ácido y el tiempo de lixiviación):

- Efecto: -3.92, una interacción negativa entre la concentración de ácido y el tiempo de lixiviación, pero no significativa.
- Valor p: 0.522, indicando que no es importante en este modelo.

Interacción B*C:

- Efecto: -0.73, una interacción muy baja entre el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación.
- Valor p: 0.899, no significativa.

Interacción triple A*B*C:

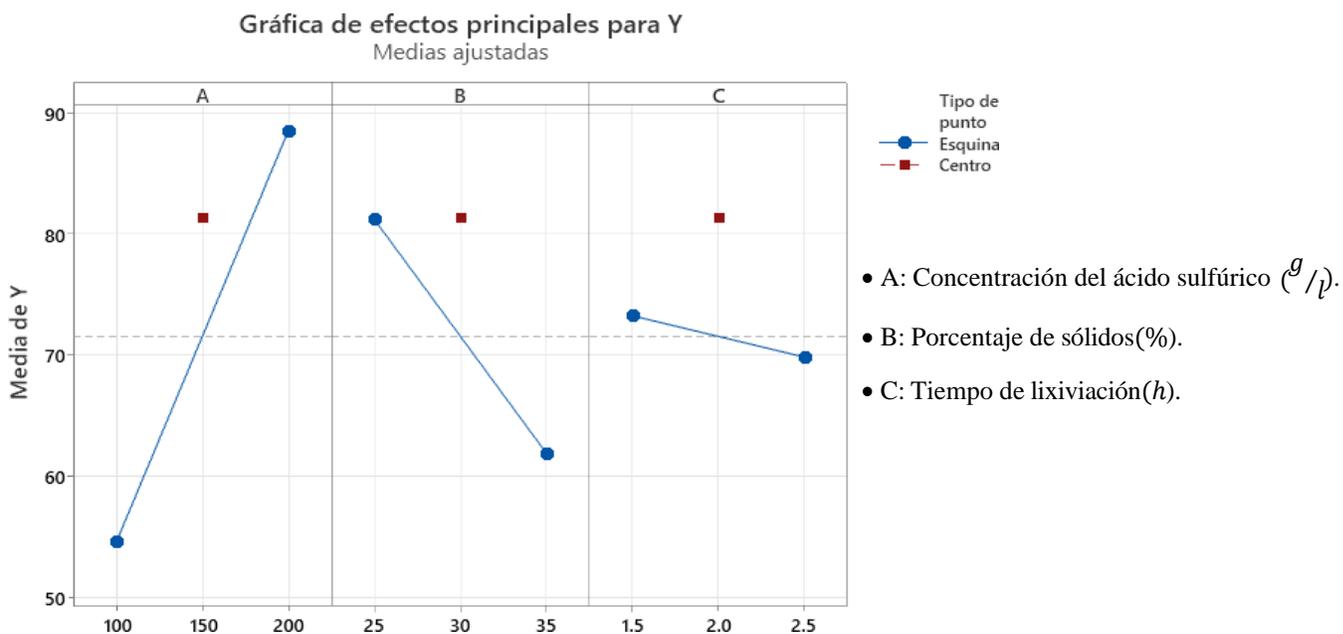
- Efecto: 1.43, una interacción muy pequeña entre los tres factores.
- Valor p: 0.805, indicando que esta interacción no tiene un impacto significativo.

5.9. Análisis de los Efectos Principales y de Interacción

La gráfica de efectos principales y de interacción nos permiten evaluar si los factores A, B y C, y las de interacción tienen efectos significativos o no sobre la variable de respuesta Y, como podemos ver en las figuras 22 y 23 con sus respectivas interpretaciones.

Figura 22

Efectos principales para la extracción de Zinc.

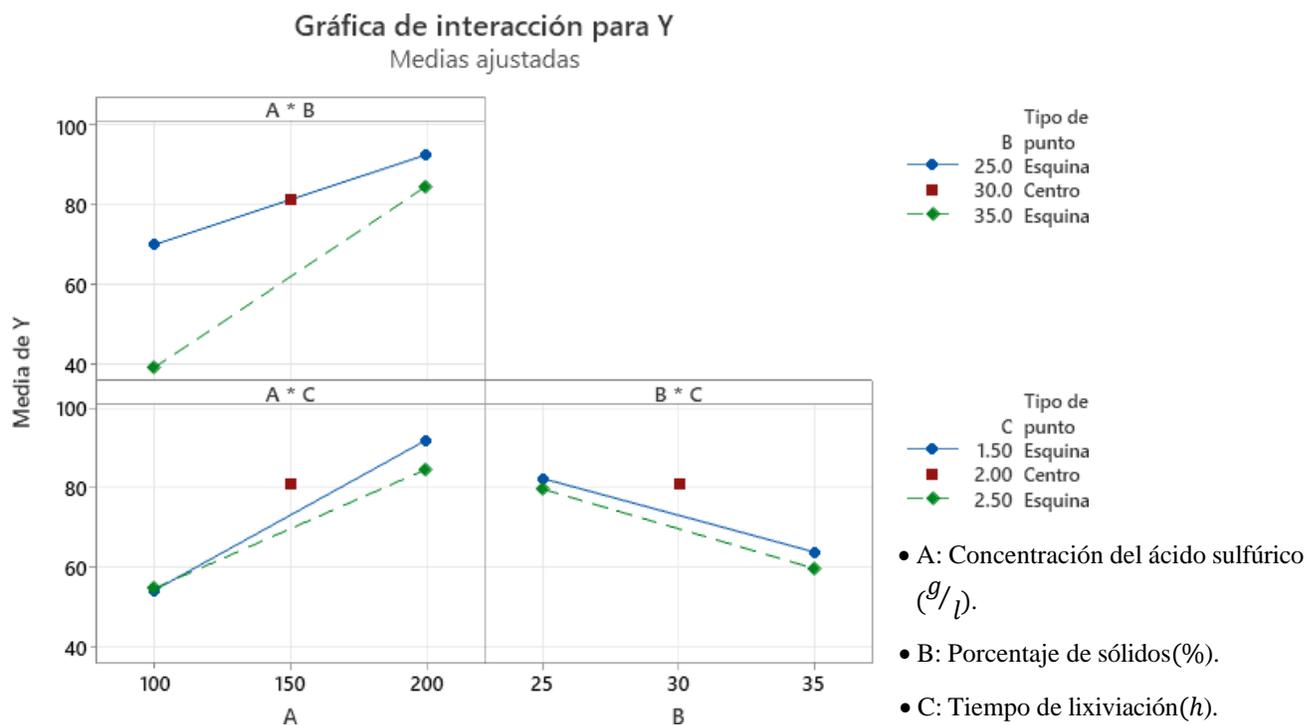


Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

- La figura 14 muestra que el factor más influyente es la concentración de ácido sulfúrico (A), debido a que tiene una tendencia positiva y significativa en relación al porcentaje de extracción (Y).
- Mientras que los factores de porcentaje de sólidos (B) y el tiempo de lixiviación (C) tienen pendientes negativos y son inversamente proporcionales a la variable de extracción (Y), pero tienen un efecto menos relevante, en especial el tiempo.
- Para maximizar la extracción de Zinc, se debe aumentar la concentración de ácido y reducir el porcentaje de sólidos.

Figura 23

Efectos de interacción para la extracción de Zinc.



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

- La figura 15 muestra que los factores de concentración de ácido sulfúrico (A) y el porcentaje de sólidos (B), son relevantes para la extracción.
- Las interacciones entre B y C son menos significativas y presentan pendientes positivas, varían desde el nivel alto al nivel bajo, por lo que son inversamente proporcionales a la variable Y.
- Y se puede afirmar que cuando la concentración de ácido se encuentra en el nivel bajo, el tiempo no afecta de forma significativa al porcentaje de extracción (Y).

5.10. Análisis de Varianza

El análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo a (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008) es una herramienta estadística clave utilizada para determinar qué variables o combinaciones de variables tienen un impacto significativo en el proceso de lixiviación ácida de la smithsonita. (p.62). El objetivo de este análisis es identificar cuáles de los efectos principales e interacciones influyen significativamente en el porcentaje de extracción de Zinc.

Este análisis nos ayuda a discernir si los factores estudiados, como la concentración de ácido, el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación, junto con sus interacciones, tienen un efecto real sobre la respuesta de extracción o si sus variaciones son producto del azar.

Tabla 39*Análisis de la varianza.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	3582.77	447.85	8.60	0.108
Lineal	3	3076.56	1025.52	19.69	0.049
A	1	2307.46	2307.46	44.30	0.022
B	1	745.82	745.82	14.32	0.063
C	1	23.28	23.28	0.45	0.573
Interacciones de 2 términos	3	294.82	98.27	1.89	0.365
A*B	1	262.98	262.98	5.05	0.154
A*C	1	30.77	30.77	0.59	0.522
B*C	1	1.08	1.08	0.02	0.899
Interacciones de 3 términos	1	4.12	4.12	0.08	0.805
A*B*C	1	4.12	4.12	0.08	0.805
Curvatura	1	207.27	207.27	3.98	0.184
Error	2	104.17	52.08		
Total	10	3686.94			

Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

En la tabla 38, El análisis de varianza (ANOVA) muestra que la concentración de ácido sulfúrico (A) es el factor más significativo en la extracción de Zinc, con un p-valor de 0.022 es inferior a 0.05, lo que indica que su aumento mejora considerablemente el proceso, y que son significativos al 95% de nivel de confianza. Por lo tanto, existe una relación significativa entre la variable (A) concentración de ácido sulfúrico.

El porcentaje de sólidos (B) no muestra un efecto notable, con un p-valor de 0.06, sugiriendo que niveles más bajos de sólidos favorecen la extracción.

El tiempo de lixiviación (C) no tiene un impacto relevante, como lo refleja su p-valor de 0.573.

Las interacciones entre los factores no son significativas, lo que indica que los efectos principales son los que realmente influyen en la respuesta.

El modelo explica un 97.17 % de la variabilidad de los datos, aunque el R-cuadrado ajustado es del 85.87 %, lo que sugiere que el modelo es adecuado, pero podría mejorarse; con un error estándar de 7.21699.

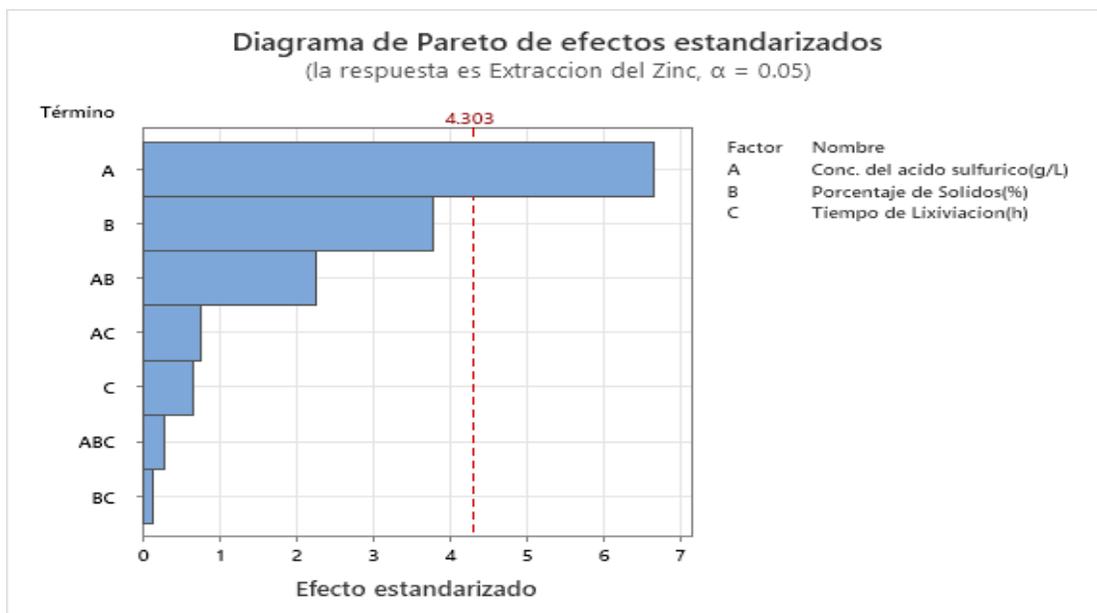
5.11. Análisis de Reportes Gráficos

5.11.1. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diagrama de Pareto determina la magnitud de los efectos sobre la variable de respuesta (Y), como se muestra en la figura 24, el punto crítico de T de Student es $t_{025,2} = 4.303$, según a ello podemos realizar las interpretaciones respectivas.

Figura 24

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

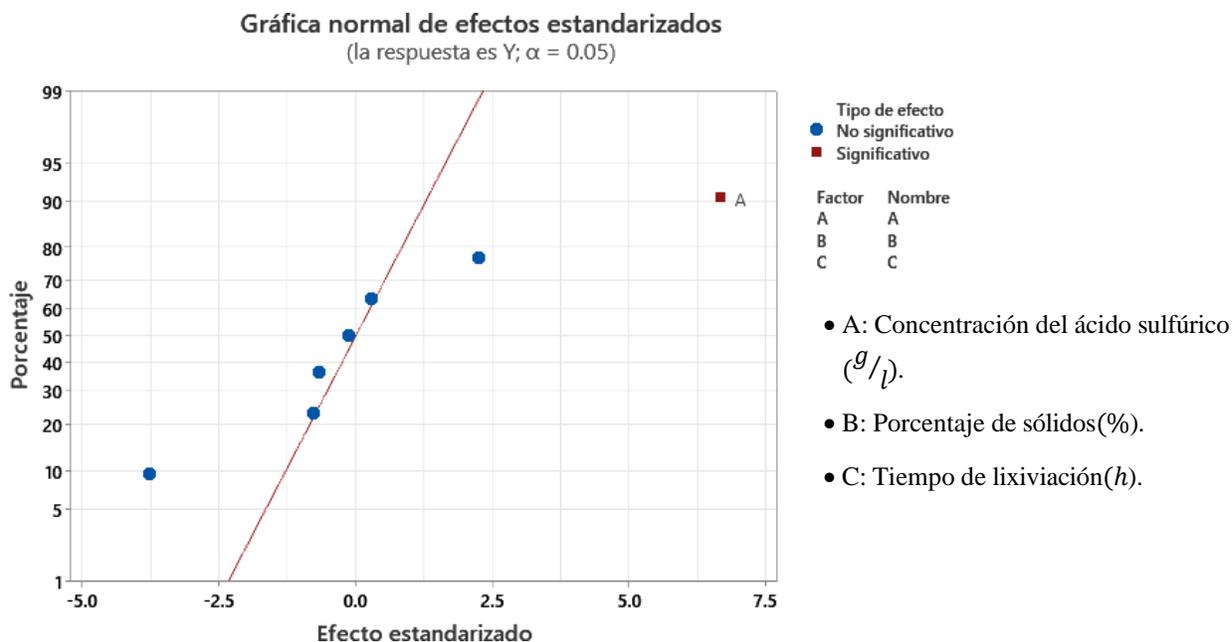
- El factor A (concentración de ácido sulfúrico) tiene el mayor efecto significativo sobre la variable de respuesta (extracción de zinc).
- El factor B (porcentaje de sólidos) también tiene un efecto considerable, aunque menor.
- Las interacciones y el factor C (tiempo) no son significativos.

5.11.2. Gráfica Normal de Efectos Estandarizados

La gráfica se utiliza para determinar la dirección, importancia y la magnitud de los efectos. En la figura 17 mientras los efectos estén más distantes de 0, son más significativos. También según a la dirección en el lado izquierdo de la gráfica muestran los efectos negativos y en el lado derecho de la gráfica se hallan los efectos positivos.

Figura 25

Gráfica normal de efectos estandarizados.



Nota. Elaboración propia (Software Minitab)

De la figura 25 vemos que el factor de concentración del ácido (A) es significativo y tiene un efecto estandarizado en dirección positiva indicando que cuando el factor cambia del nivel bajo al nivel alto en el proceso de lixiviación ácida, el porcentaje de extracción aumenta.

5.12. Modelo Matemático

A partir del análisis de varianza y los efectos determinados en el proceso de lixiviación ácida para la extracción de Zinc, se puede construir un modelo matemático lineal que representa cómo los factores controlados influyen en la variable de respuesta (porcentaje de extracción de Zinc).

El modelo lineal se basa en los coeficientes estimados para cada factor y sus interacciones, obtenidos a través del análisis factorial 2^3 con puntos centrales. Estos coeficientes permiten predecir la respuesta en función de las variables A (concentración de ácido sulfúrico), B (porcentaje de sólidos) y C (tiempo de lixiviación), así como sus interacciones.

Los resultados sugieren que la concentración de ácido sulfúrico es el factor más importante para mejorar la extracción, mientras que el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación tienen un efecto menor. Las interacciones entre los factores no son muy significativas, excepto por la interacción entre la concentración de ácido y el porcentaje de sólidos, que tiene un impacto moderado en la respuesta.

5.12.1. Ecuación del Modelo Matemático a Escala Codificada

$$Y = 71.50 + 16.98 A - 9.66 B - 1.71 C + 5.73 A*B - 1.96 A*C - 0.37 B*C + 0.72 A*B*C + 9.75 \text{ Pt Ctral}$$

Donde:

- A : Concentración de ácido sulfúrico (en escala codificada, -1 a 1)
- B: Porcentaje de sólidos (en escala codificada, -1 a 1)
- C: Tiempo de lixiviación (en escala codificada, -1 a 1)

5.12.2. Ecuación del Modelo Matemático a Escala Natural (Modelo Matemático Lineal)

$$Y = 105 + 0.15 A - 3.36 B + 38.6 C + 0.0115 A*B - 0.251 A*C - 1.01 B*C + 0.0057 A*B*C + 9.75 \text{ Pt Ctral}$$

Donde:

- A : Concentración de ácido sulfúrico (en g/L, con un rango de 100 a 200 g/L)
- B: Porcentaje de sólidos (en %, con un rango de 25% a 35%)
- C: Tiempo de lixiviación (en horas, con un rango de 1.5 a 2.5 horas)

5.13. Optimización de Respuesta

Tabla 40

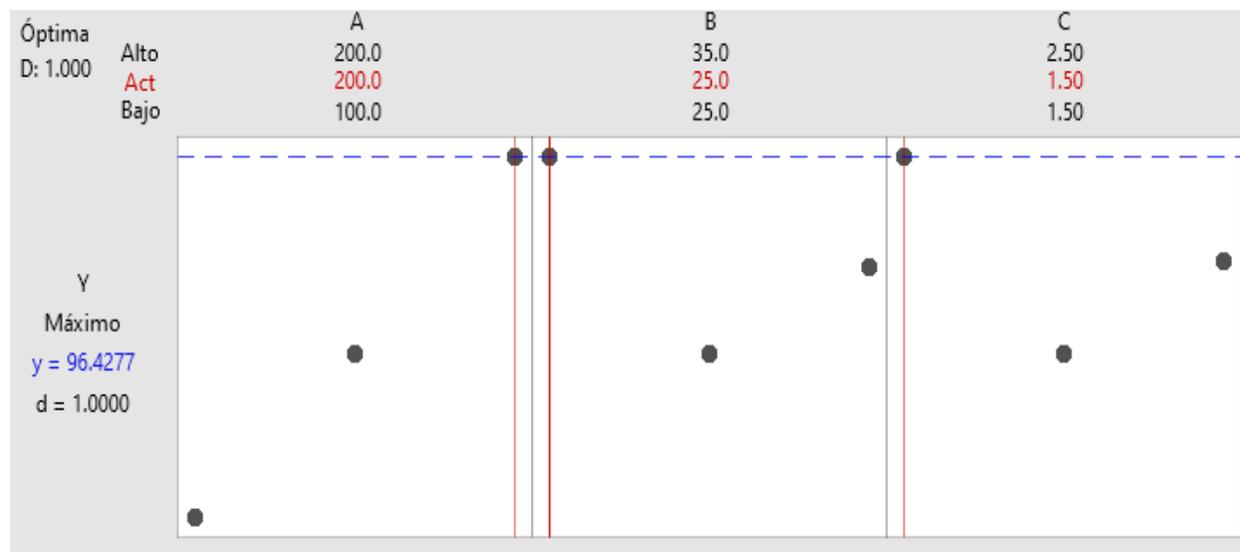
Factores óptimos para la extracción.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Concentración de ácido (g/l)	100	200	200
Porcentaje de sólidos (%)	25	35	25
Tiempo de lixiviación (horas)	1.5	2.5	1.5

Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Figura 26

Grafica de optimización de las tres variables para el modelo.



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Donde:

- A: Concentración del ácido sulfúrico $\frac{g}{l}$.
- B: Porcentaje de sólidos(%).
- C: Tiempo de lixiviación(*h*).

La predicción para maximizar la extracción de zinc con los valores configurados en Minitab indica que, utilizando una concentración de ácido de 200 g/L, un porcentaje de sólidos del 25% y un tiempo de lixiviación de 1,5 horas, se obtiene un valor estimado de extracción del 96.43%.

La deseabilidad compuesta de esta configuración es de 1, lo que refleja que estas condiciones optimizan la extracción de zinc.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Discusión de Resultados

En el presente estudio de investigación, los resultados obtenidos se comparan con investigaciones nacionales e internacionales relevantes. Ramazanova R.A. et al. (2021), en su investigación sobre la cinética de lixiviación de zinc a partir de smithsonita utilizando ácido sulfúrico, encontraron que una concentración de 150 g/dm³ y una temperatura de 80°C resultaron en una eficiencia máxima de extracción del 73.52%. Borda J. et al. (2021), en su estudio sobre la lixiviación selectiva de zinc y plomo, alcanzaron una eficiencia de extracción del 96% a 50 g/L de ácido sulfúrico a 50°C. En comparación, nuestro estudio evaluó concentraciones de 100, 150 y 200 g/L de ácido sulfúrico y encontró que 200 g/L era la concentración óptima, logrando una eficiencia de extracción del 96.43% con un 25% de sólidos y un tiempo de lixiviación de 1.5 horas. La rápida reacción entre las partículas de zinc y el ácido en las primeras horas del proceso es consistente con los hallazgos de Ramazanova y Borda.

Comparando estos estudios con nuestro trabajo de investigación, se observa que todos coinciden en la importancia de la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de lixiviación como factores críticos para la extracción eficiente de zinc. Sin embargo, nuestro estudio aporta nueva información al identificar una concentración óptima de 200 g/L bajo las condiciones experimentales evaluadas, optimizando el proceso de lixiviación para minerales con alto contenido de carbonatos.

Nuestros resultados confirman que el aumento de la concentración de ácido sulfúrico mejora la eficiencia de extracción de zinc, como también fue observado en estudios anteriores.

De acuerdo con el análisis de varianza, los efectos lineales presentan un valor p de 0.049, inferior al nivel de significancia de 0.05, lo que confirma su impacto significativo en la variable respuesta (Y). Además, se alcanzó un porcentaje máximo de extracción de zinc del 96.43%, demostrando que en el yacimiento de Parcco es factible trabajar con las variables incluidas en el estudio. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula.

Este trabajo no solo valida las conclusiones obtenidas en investigaciones previas, sino que también aporta nuevas perspectivas sobre las condiciones óptimas para la lixiviación de minerales ricos en carbonatos. Asimismo, identifica la concentración de ácido y el tiempo de lixiviación como variables clave para maximizar la eficiencia del proceso, estableciendo una base sólida para futuras aplicaciones industriales en la minería del zinc.

CONCLUSIONES

- El porcentaje de extracción de zinc que se ha obtenido en el presente trabajo de investigación es del 96.43% bajo estas condiciones utilizando una concentración óptima de ácido sulfúrico de 200 g/L, un porcentaje de sólidos del 25% y un tiempo de lixiviación de 1.5 horas.
- La concentración de ácido sulfúrico se identificó como un factor crítico en la extracción de zinc. Los resultados mostraron que una mayor concentración de ácido (200 g/L) aumentó significativamente la eficiencia de la extracción de zinc, confirmando la importancia de este parámetro en el proceso de lixiviación ácida.
- El porcentaje de sólido que permite una mejor extracción de zinc es del 25% en relación sólido-líquido. Este porcentaje equilibra la eficiencia de la lixiviación y la cantidad de reactivo utilizado, considerando así que el porcentaje de extracción se maximiza con la disminución del porcentaje de sólidos, lo cual valida la hipótesis planteada.
- El tiempo de lixiviación óptimo para lograr una mejor extracción de zinc es 1.5 horas. Los resultados obtenidos no confirman la hipótesis planteada, pero resulta favorable para el proceso y reducción de costos operativos porque empíricamente se visualizó en la gráfica 9 y figura 12, concerniente a la cinética del proceso, que dentro de un intervalo de tiempo más corto nos permite una disolución completa o casi completa en su totalidad del zinc sin un consumo excesivo de ácido, debido a que las partículas de zinc y el ácido sulfúrico tienen alta compatibilidad de disolución considerando su solubilidad molar de 1.25.

RECOMENDACIONES

- A los responsables del Yacimiento Parcco se recomienda implementar el proceso de lixiviación ácida para la extracción de zinc. Esta recomendación se basa en los considerables porcentajes de extracción obtenidos, superiores al 80% propuesto en la hipótesis nula. Se recomienda para mejorar la eficiencia de la extracción y tener un impacto positivo en los aspectos económicos, sociales y ambientales de la Comunidad de Parcco y de la Provincia de Paruro.
- A los Investigadores e Ingenieros Responsables de Operación de Procesos se recomienda realizar un estudio de análisis granulométrico y cinético más exhaustivo en intervalos de tiempos más cortos, considerando un tiempo máximo de 2 horas. Para poder visualizar con mayor precisión los tiempos en los que la extracción de zinc es casi constante y mejorar el proceso de lixiviación ácida, ya que se observó que en un menor tiempo de residencia se obtienen porcentajes de extracción considerables.
- Considerando el análisis granulométrico y la curva de cinética de molienda, se presentó una disminución del porcentaje de pasantes debido a la aglomeración de partículas, lo que dificulta la obtención del porcentaje de pasantes del 60% a -200M. Por lo tanto, se recomienda a los ingenieros de proceso realizar una molienda en húmedo para ayudar a reducir la aglomeración de partículas finas o un secado controlado antes de la molienda en seco para evitar la formación de aglomerados y la adherencia del material a los equipos.
- Finalmente, se recomienda a los estudiantes, investigadores, tesisistas y técnicos del laboratorio realizar un estudio cinético detallado para la lixiviación ácida por agitación de

la smithsonita, con el objetivo de optimizar las condiciones del proceso y mejorar la eficiencia de la extracción de zinc.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- A.Torres, J. (s.f.). *Wurtzita*. Obtenido de *Minerales en Castellano*:
<https://www.mineralesweb.es/sulfuros/wurtzita.htm>
- Andrea Blanco, E. (S.F). *Bloque I-Capitulo III.Pulpas*. [Universidad de Cantabria].
- Ballester et al., A. (2000). *Metalúrgia extractiva Fundamentos. Volumen I*. Síntesis, S.A.
- Boni, M. (2018). *Método de lixiviación [presentación PowerPoint]*.
- Borda, J., Torres, R., & Lapidus, G. (2021). *Lixiviación selectiva de zinc y plomo del polvo de hornos de arco eléctrico utilizando soluciones de citrato y H2SO4. Una perspectiva cinética. Mexicana de Ingeniería Química, 21*. Obtenido de 2606.
<https://doi.org/10.24275/rmiq/Cat2606>
- Bustamante Rúa. (2008). *Notas de clase de la asignatura:Concentracion de Minerales*. [Universidad Nacional de Colombia]. Colombia.
- Cardoza Ramos, O. (2019). *Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla*. Obtenido de [Informe Profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Carrasco Díaz, S. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Lima, Perú: San Marcos.
- Cortéz Canaza, F. (2012). *Diseño y construcción de una planta de Lix SX-TF-EW de minerales de cobre para la producción de 30 Ton/mes de catodos de cobre*. [Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohman. Tacna, Perú.

De La Torre E. et al. (2013). *Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis*. Obtenido de Revista Politécnica, Vol. 32, No. 1: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/12/pdf

División de materiales. (1957). *La lixiviación con ácido sulfúrico del mineral de venta de Cárdena (Córdoba). Estudio en escala de laboratorio*. Obtenido de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/003/41003511.pdf

Espinoza Gutiérrez, C. (2012). *Recuperación de zinc a partir de polvos de acería*. Obtenido de [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4731/1/CD-4366.pdf>

Fernández, R. (2024). *statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/635364/paises-lideres-en-la-produccion-de-zinc-a-nivel-mundial/>

Fisher Scientific. (s.f.). Obtenido de <https://www.fishersci.es/es/es/browse/80013650/%C3%A1cidosorg%C3%A1nicos?page=1>

FEDU 2022 - 2023. *Extracción del Zn por lixiviación del Yacimiento de Accha - Paruro Cusco - Perú - 2022*.

Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico: McGraw-Hill.

Heredia, U. N. (2016). *Hoja de seguridad Sulfato de Zinc MSDS*. Obtenido de <https://transqui.com/wp-content/uploads/2020/01/Sulfato-de-zinc.pdf>

- Hernandez Sampiere, R., Fernadez Collado , C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. Mexico: S.A. DE C.V.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Herrera Aldave, B., & Chavez Diaz, V. (2019). *Influencia de la temperatura y tiempo de residencia en la recuperación de zinc por lixiviación oxidante de esfalerita con persulfato de amonio, Cajamarca, 2019*. Obtenido de [Tesis de suficiencia profesional, Universidad Privada del Norte]:
<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/22310/Herrera%20Aldave%20Bella%20Luz%20-%20Chavez%20Diaz%20Victor%20Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- J. Sinclair, R. (2005). *The extractive metallurgy of zinc*. Obtenido de Spectrum Series, vol. 13:
https://www.academia.edu/39072251/Sinclair_Roderick_J_Extractive_Metallurgy_of_Zinc_The_Australasian_Institute_of_Mining_and_Metallurgy_The_AusIMM_
- Jarabo Friedrich, F., & Marrero Hernández, M. d. (2001). *Conceptos Basicos de Cinética Química aplicada*. Obtenido de [Universidad de La Laguna].
- London Metal Exchang. (2 de abril de 2025). *LME AN HKEX COMPANY*. Obtenido de <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Zinc#Summary>
- McIntyre et. al, G. (1980). *Factores de temperatura anarmónicos del seleniuro de zinc determinados por difracción de rayos X a partir de un cristal de cara extendida*. Obtenido de Acta Cryst. A 36 , 482-490.

Misira. (2024). *Lixiviación por agitación*. Obtenido de <https://misiratech.com/>

Muñoz Portero, M. (2011a). *Características y usos de los diagramas de Pourbaix*. Obtenido de [Universidad Politécnica de Valencia]: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13708/Caracter%C3%ADsticasyusos.pdf?sequence=3>

Muñoz Portero, M. (2011b). *Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metal-agua*. Obtenido de [Universidad Politécnica de Valencia]: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13709/Construcci%C3%B3n%20diagramas%20de%20Pourbaix.pdf?sequence=3%25253F>

Norkem. (s.f.). *Carbonato de zinc*. Obtenido de s.f.: <https://www.norkem.es/products/carbonato-de-zinc#:~:text=Este%20proceso%20de%20descomposici%C3%B3n%20t%C3%A9rmica,soluble%20en%20%C3%A1lcalis%20y%20%C3%A1cidos.>

Octave Levenspiel. (2004). *Ingeniería de las reacciones Químicas. 3ra Edición*. Limusa S.A.

OGPP. (2024). Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6133582/5418668-estadistica-subsector-mineria-enero-2024.pdf>

Pellicer Roig, D. (2024). *Propiedades del Zinc (Zn)*. Obtenido de National Geographic España: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-zinc-zn_22275

Quiroga Jara, B. (2014). *Diseño de una Planta de Lixiviación de Polvos de Acería con Ácido Orgánicos para Recuperación de Zinc*. Obtenido de Escuela Politécnica Nacional, Quito: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8120/4/CD-5706.pdf>

- Ramazanova, R. N. (2021). *Investigación de la Cinética de la lixiviación de zinc con ácido sulfúrico a partir de la smithsonita*. 407-410. Rusia: Melalurgija. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/352553431_RESEARCH_OF_KINETICS_OF_ZINC_LEACHING_WITH_SULFURIC_ACID_FROM_SMITHSONITE/citations
- Ramírez Torres, G., & Villegas Fajardo, V. (2018). *Estudio Comparativo de recuperación de oro, mediante dos procesos de lixiviación: cianuración y pretratamiento con NaCl*. Obtenido de [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/47433/1/D-CD70356.pdf>
- Ramírez, P., & Martínez, A. (2014). *Lixiviación de minerales por agitación y percolación* (tesis de pregrado). Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- Ricaurte J. et al. (2014). *Estudio Comparativo de la Recuperación de Zn de Polvos de Acería por Lixiviación con H₂SO₄ y HCl, electrodeposición electrolítica y bioelectrolítica*. Obtenido de REVISTA EPN, Vol. 33, No. 2.
- Salas, M., & Mojhadet, C. (2015). *Soluciones en Química y sus aplicaciones prácticas- Introducción Teórica*.
- Sanchez Carlessi, H., & Reyes Meza, C. (2015). *Metodologías y Diseños de la Investigación Científica*. Lima, Lima, Peru: Business Support Aneth SRL.
- Sanchez, H., & Carlos, R. (2021). *Metodología y diseños en la investigación científica*. Hugo Sanchez Carlessi.

Tamargo Garcia, F. J. (2012). *Método hidrometalúrgico para la recuperación de zinc en medio sulfúrico a partir de concentrados de zinc sulfurados*. Obtenido de <https://patentimages.storage.googleapis.com/2b/3a/30/69bbb8fc59c5eb/WO2012140284A1.pdf>

Universidad de Jaén. (s.f.). *Material Docente Multimedia en las Áreas de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/index.html>

Velazco Mier, G. D. (2018). *Diseño de una planta de recuperación de zinc a partir de los polvos de acería mediante lixiviación con ácido sulfúrico y deposición electrolítica*. Quito.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia: **EXTRACCIÓN DE ZINC POR LIXIVIACIÓN ÁCIDA POR AGITACIÓN DE LA SMITHSONITA DEL YACIMIENTO DE PARCCO – ACCHA – PARURO (Investigación Tecnológica)**

PROBLEMA DE INVESTIGACION	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGIA
PG: ¿Qué porcentaje de Zinc se obtendrá del mineral de Smithsonita procedentes del Yacimiento de Parcco mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación?	OG: Determinar el porcentaje de Zinc que se obtendrá del mineral de Smithsonita procedentes del Yacimiento de Parcco mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación.	HG: Mediante la lixiviación ácida de minerales de smithsonita, se logra obtener más del 80 % de zinc.	Variables Dependientes: Porcentaje de extracción de Zinc Dimensión: 0 a > 80 %	Tipo de investigación: Investigación experimental con enfoque cuantitativo. Nivel de investigación: Explicativo
PE1: ¿Cuál es la concentración del ácido sulfúrico más óptima para la lixiviación ácida?	OE1: Determinar la concentración del agente lixivante para una mejor extracción de Zinc.	HE1: Se obtiene una mayor extracción de zinc al emplear una concentración de ácido sulfúrico de 200 g/L.	Variable Independiente: • Concentración del ácido sulfúrico Dimensión: 100 a 200 g/l de solución	Población: Minerales de Zinc de baja ley provenientes del yacimiento de Parcco. Muestra: Aprox. 20 kg de una muestra representativa del mineral
PE2: ¿A qué porcentaje de sólido se logrará una mejor extracción de Zinc?	OE2: Determinar el porcentaje de sólidos de las muestras de mineral para una mejor extracción de Zinc.	HE2: El porcentaje de extracción de zinc mediante lixiviación ácida se incrementa con un porcentaje de sólidos del 25%.	Variable Independiente: • Porcentaje de sólidos de la pulpa. Dimensión: • 25 a 35%	Técnicas de recolección de información • Pruebas experimentales en laboratorio y reportes del análisis químico.
PE3: ¿En qué tiempo se obtendrá una mejor extracción de Zinc?	OE3: Determinar el tiempo de lixiviación ácida para una mejor extracción de Zinc.	HE3: Un tiempo de lixiviación superior a 2 horas incrementa el porcentaje de extracción de zinc mediante lixiviación ácida.	Variable Independiente: • Tiempo de lixiviación Dimensión: 1.5 a 2.5 horas	• Fuentes primarias y secundarias (libros, tesis, revistas y páginas web)

Nota. Elaboración propia.

Anexo 2

Reporte de análisis mineralógico.

Reporte del análisis mineralógico del mineral de zinc del yacimiento de Parco

Habiéndose preparado la muestra mineral proveniente yacimiento de Parco - Paruro - Cusco, fueron pasadas por 3 mallas correspondientes a la malla 10, malla 100 y malla 200, obteniéndose 4 muestras de malla +10, malla +100, malla +200 y malla -200; el análisis mineralógico se realizó empleándose el microscopio de luz reflejada N 16537 (donación de equipos de laboratorios Hungría), lupa de precisión 10x marca Caxton (Japón), lana de reloj y agua destilada.

Los resultados del análisis mineralógico son los siguientes:

Minerales	Fórmula química	Porcentaje (%)
SMITHSONITA	ZnCO ₃	15 - 20%
FRANKLINITA	Zn ₂ Fe ₂ O ₇	4 - 5%
ZINCITA	ZnO	< 1%
HEMIMORFITA	Zn ₅ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·H ₂ O	1 - 2%
HEMATITA	Fe ₂ O ₃	4 - 5%
CALCITA	CaCO ₃	12 - 15%
DOLOMITA	CaMg(CO ₃) ₂	4 - 5%
SÍLICE	SiO ₂	30 - 60%
OTROS	como la arcilla	< 2%

Es cuanto se puede informar.

Cusco, Perú, 25 de marzo del 2024.

Atentamente,



Handwritten signature and stamp of the analyst, likely a geologist or mineralogist, with a circular stamp containing text that is partially illegible but appears to include 'Instituto Tecnológico de Cusco'.

Anexo 3

Informe de análisis químico.



Laboratorio Analítico del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



INACAL 1712-000

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-23-03498

Fecha de emisión: 27/11/2023

Clave generada : 9A591D24

Página 1 de 1

Señores: PEDRO CAMERO HERMOSA
Dirección: UNSAAC - CUSCO
Atención: PEDRO CAMERO HERMOSA
Recepción: 23/11/2023
Realización: 23/11/2023
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

- *2113 Método de Ensayo para Zinc Soluble en Acido Sulfúrico por Absorción Atómica
- *519 Método de ensayo para carbonatos como carbonato de calcio negro titulación ácido-base
- *542 Método de ensayo para Zinc por absorción atómica
- *551 Método de ensayo a fuego para oro por reconocimiento absorción atómica
- 501 Método de Ensayo para Plata por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)

Código Informe L.A.S.	N° Muestra de Muestra	N° Procedencia de Muestra	N° Descripción de Muestra	*2113 ZnSolub %	*519 CaCO ₃ %	*542 Zn %	*551 Au g/TM	501 Ag g/TM
IMP0002302	2302302A1	LITIO (P) 30% LOS RIOS (P) 70%	Muestra (Litio)	5,05	12,8	11,2	40,100	40

Fin del informe

Laboratorio Analítico del Sur S.R.L.
Dijmar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M.Sc. Ingeniero Químico CP 19432

Informe de Laboratorio de Química Analítica, Gerente de Operaciones de la gran Minería CP 19432, Dirección de Operaciones: LIMA 12, 27/11/2023 14:24

Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

=Valor numérico=Límite de detección del método, **=Valor Numérico**=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.

Toda terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier uso indebido o conexión en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <http://www.laboratorioanaliticoelsur.com> Parque Ind. Rio Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Peru (054)-40294 - (054)-444502



Anexo 4

Informe de ensayo de zinc por absorción atómica en soluciones ácidas.



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00076

Fecha de emisión: 21/02/2024

Clave generada : 230F0F19

Página 1 de 1

Señores: PEDRO CAMERO HERMOSA
 Dirección: UNSAAC - CUSCO
 Atención: PEDRO CAMERO HERMOSA
 Recepción: 20/02/2024
 Realización: 20/02/2024
 Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*914 Método de ensayo para Zinc por absorción atómica en soluciones ácidas

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*914	
				Zn	mg/L
SS24000246	1	No proporcionado por el cliente.	Solución	25600	
SS24000247	2	No proporcionado por el cliente.	Solución	36000	
SS24000248	3	No proporcionado por el cliente.	Solución	24100	
SS24000249	4	No proporcionado por el cliente.	Solución	53000	
SS24000250	5	No proporcionado por el cliente.	Solución	26600	
SS24000251	6	No proporcionado por el cliente.	Solución	33000	
SS24000252	7	No proporcionado por el cliente.	Solución	23100	
SS24000253	8	No proporcionado por el cliente.	Solución	49000	
SS24000254	9	No proporcionado por el cliente.	Solución	37000	
SS24000255	10	No proporcionado por el cliente.	Solución	43000	
SS24000256	11	No proporcionado por el cliente.	Solución	37000	

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Sixto Vicente Juárez Neira
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a" < Valor numérico = Límite de detección del método. "b" < Valor Numérico = Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Validar el informe
vía web

Anexo 5

Evidencias fotográficas: Preparación mecánica y muestreo del mineral.



Anexo 6

Evidencias fotográficas: Etiquetado de envases y reactores - pesaje del mineral.



Anexo 7

Evidencias fotográficas: Método de fiola.

**Anexo 8**

Evidencias fotográficas: Preparación de soluciones.



Anexo 9

Evidencias fotográficas: Lixiviación ácida por agitación en botellas roladas.

**Anexo 10**

Evidencias fotográficas: Ripio de las muestras.

