

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



TESIS

**EXTRACCIÓN DE LITIO DE BATERÍAS IÓN-LITIO POR LIXIVIACIÓN
CON ÁCIDO SULFÚRICO EN EL LABORATORIO DE
HIDROMETALURGIA EN LA CIUDAD DEL CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. SOLANGE PAIBA SANTI

Br. LISETH SHARMELY QUIHUI FLORES

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

ASESOR:

Mgt. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor EDUARDO MARCELO QUISPE NINA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: EXTRACCIÓN DE LITIO DE BATERÍAS
IÓN-LITIO POR LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO EN EL
LABORATORIO DE HIDROMETALURGIA EN LA CIUDAD DEL CUSCO

Presentado por: SOLANGE PAIRA SANTI DNI N° 76269332 ;
presentado por: LISETH SHARMELY QUIHUI FLORES DNI N°: 71557729

Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8%.

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 sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 22 de MAYO de 20 26.....


Firma

Post firma EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

Nro. de DNI 23967149

ORCID del Asesor 0000-0002-4473-1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistemade Detección de Similitud: oid: 27259 : 593782248

SOLANGE PAIBA SANTI – LISETH SHARMELY QUIHUI FLORES

EXTRACCIÓN DE LITIO DE BATERIAS IÓN-LITIO POR LIXIVIACIÓN CON ACIDO SULFÚRICO EN EL LABORATORIO DE HIDROMETALURGIA EN LA CIUDAD DEL CUSCO

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:593782248

Fecha de entrega
22 may 2026, 9:09 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
22 may 2026, 9:19 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS liseth y solange 20 DE MAYO.pdf

Tamaño del archivo
3.6 MB

119 páginas

19.682 palabras

116.837 caracteres




8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
 - ▶ Texto citado
 - ▶ Texto mencionado
 - ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)
 - ▶
-

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
 - 1%  Publicaciones
 - 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)
-

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

PRESENTACIÓN

Sr. Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica; señores docentes y distinguidos miembros del jurado:

De conformidad con los requisitos establecidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el propósito de optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, tuvimos el honor de presentar la tesis intitulada:

“EXTRACCIÓN DE LITIO DE BATERÍAS IÓN-LITIO POR LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO EN EL LABORATORIO DE HIDROMETALURGIA EN LA CIUDAD DEL CUSCO”

La presente investigación fue desarrollada considerando la creciente importancia del litio como recurso estratégico para la fabricación de baterías recargables y tecnologías de almacenamiento energético. Asimismo, el estudio surgió ante la necesidad de plantear alternativas de recuperación de este metal a partir de residuos tecnológicos, contribuyendo de esta manera al aprovechamiento sostenible de materiales y a la reducción del impacto ambiental generado por las baterías en desuso.

El trabajo experimental fue ejecutado a nivel de laboratorio en el área de Hidrometalurgia, donde se realizaron pruebas de lixiviación utilizando ácido sulfúrico como agente. Durante el desarrollo de la investigación, se evaluaron diferentes parámetros operacionales con la finalidad de determinar las condiciones más adecuadas para la extracción de litio presente en las baterías ión-litio, que será aplicada en el futuro a la escala industrial.

Br. Paiba Santi, Solange

Br. Quihui Flores, Liseth Sharmely

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios como fuente de sabiduría, fortaleza y guía en cada paso de mi vida. Agradezco profundamente por haberme dado la salud, la perseverancia y la luz necesaria para superar cada desafío en este camino académico.

A mis padres, Nelly y Serapio, quienes, con su amor incondicional, sacrificios y valores me han formado como persona y profesional. Gracias, mamá, por tus palabras de aliento en los momentos difíciles y por enseñarme la importancia de la perseverancia. Gracias, papá, por tu ejemplo de integridad y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

A mis hermanos, Jeferson y Almendra por su apoyo silencioso y por ser mi fuente constante de alegría y compañía durante este proceso. A mi familia extendida, quienes, aunque a la distancia, siempre me enviaron su cariño y buenos deseos.

A mis amigos, por comprender mis ausencias, animarme en los momentos de duda y celebrar conmigo cada pequeño logro. Su amistad ha sido fundamental para mantenerme motivado y enfocado.

A mis profesores, por su guía académica, paciencia y dedicación. Sus enseñanzas y consejos han sido clave en la culminación de este proyecto.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación y crecimiento personal. A todos, gracias por ser mi inspiración, mi apoyo y mi fortaleza en este camino académico.

Solange Paiba Santi

DEDICATORIA

A Dios, por estar siempre presente, especialmente en los momentos más difíciles, guiándonos con su luz y fortaleciendo nuestro espíritu. A mis padres, Máximo y Benedicta, por su amor incondicional, sacrificios y enseñanzas que han sido el pilar de mi vida. A mis hermanos, por su apoyo constante y por ser parte esencial en la realización de mis metas. Y a todas las personas excepcionales que me acompañaron en esta etapa, dejando huellas imborrables en mi formación profesional y personal. Cada palabra, logro y paso alcanzado también les pertenece. Gracias, de corazón, por ser parte de este camino.

Liseth Sharmely Quihui Flores

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expresamos nuestro agradecimiento a Dios por habernos permitido alcanzar este logro. Así también expresamos nuestro reconocimiento a la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, espacios donde fuimos formadas y que guardan muchas experiencias inolvidables.

Agradecemos profundamente a nuestro asesor, el Ing. Eduardo Marcelo Quispe Nina, por su colaboración en esta investigación, por sus consejos sabios y su guía constante. Gracias a su amplia experiencia profesional, que nos pudo guiar de manera acertada en el desarrollo de este trabajo.

De igual modo, extendemos nuestro agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes han sido fundamentales en nuestra formación, al descubrir y potenciar las capacidades que cada una de nosotras posee, y por ofrecernos el valioso don de la formación universitaria.

SOLANGE Y SHARMELY

RESUMEN

El proyecto de investigación tuvo como objetivo extraer litio de baterías de iones de litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad de Cusco.

Como parte de este estudio, se recolectó una población de 5 kg de baterías de iones de litio provenientes de teléfonos celulares y computadoras portátiles usadas. La muestra fue clasificada manualmente para eliminar componentes no metálicos y obtener el material utilizable. Posteriormente, este material se redujo manualmente para optimizar el proceso de lixiviación. De este lote se extrajo una muestra de 150 g, enviada a los Laboratorios Analíticos del Sur. El análisis químico indicó una concentración inicial de 4,05 % de Li.

Luego se realizaron pruebas preliminares para establecer el procedimiento óptimo de lixiviación para la extracción de litio. Estas pruebas permitieron identificar las variables de mayor impacto en el proceso: concentración de ácido sulfúrico, tiempo de lixiviación y temperatura. Asimismo, se determinó el modelo de regresión que mejor se ajusta al proceso de lixiviación con ácido sulfúrico para la recuperación de litio de baterías. El modelo obtenido evidenció que las variables del proceso influyen de manera directa y significativa en la extracción de litio, mejorando la eficiencia de recuperación y aumentando el porcentaje extraído. En el ensayo n.º 8 se obtuvo una extracción de 94,765 % de litio. Mediante un diseño factorial 2^3 , los parámetros más relevantes fueron 285,67 g/L de ácido sulfúrico, 60 °C y 120 minutos.

Palabras clave: Recuperación, Litio, Lixiviación, Concentración, Ácido sulfúrico.

ABSTRAC

The research project aimed to extract lithium from lithium-ion batteries by sulfuric acid leaching in the hydrometallurgy laboratory in Cusco.

As part of this study, a 5 kg sample of lithium-ion batteries was collected from used cell phones and laptops. The sample was manually sorted to remove non-metallic components and obtain usable material. This material was then manually reduced to optimize the leaching process. A 150 g sample was taken from this batch and sent to the Southern Analytical Laboratories. Chemical analysis indicated an initial concentration of 4.05% Li.

Preliminary tests were then conducted to establish the optimal leaching procedure for lithium extraction. These tests identified the variables with the greatest impact on the process: sulfuric acid concentration, leaching time, and temperature. Furthermore, the regression model that best fits the sulfuric acid leaching process for lithium recovery from batteries was determined. The resulting model showed that the process variables directly and significantly influence lithium extraction, improving recovery efficiency and increasing the percentage extracted. In trial #8, a lithium extraction rate of 94.765% was achieved. Using a 2³ factorial design, the most relevant parameters were 285.67 g/L of sulfuric acid, 60 °C, and 120 minutes.

Keywords: Recovery, Lithium, Leaching, Concentration, Sulfuric acid.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRAFICOS	xiii
SIMBOLOGÍA	15
INTRODUCCION	16
1.1 Situación Problemática	21
1.2 Formulación del problema.....	22
1.2.1 Problema general	22
1.2.2 Problemas específicos.....	22
1.3 Justificación	23
1.3.1 Conveniencia.....	23
1.3.2 Relevancia Social.....	23
1.3.3 Relevancia Tecnológica	23
1.3.4 Valor Teórico	23
1.3.5 Utilidad metodológica.....	24
1.4 Objetivos de Investigación.....	24
1.4.1 Objetivo general.....	24
1.4.2 Objetivos específicos	24
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	25
2.1. Antecedentes Internacionales	25
2.2. Antecedentes Nacionales	27
2.3. Antecedentes Locales	28

2.4. Bases Teóricas	29
2.3.1 Litio.....	29
2.3.2 Funciones del litio.....	30
2.3.3 Usos principales del litio.....	30
2.3.4 Usos potenciales energéticos del litio.....	31
2.3.5 Baterías de Ion Litio.....	31
2.3.6 Tipos de baterías	32
2.3.7 Baterías desechadas	35
2.3.8 Baterías comerciales	35
2.3.9 Lixiviación acida.....	36
2.3.10 Extracción de litio.....	37
2.3.11 Termodinámica de la lixiviación	38
2.3.12 Cinética de la lixiviación	42
2.3.13 Residuos de aparatos electrónicos RAEE.....	43
CAPITULO III: HIPOTESIS, VARIABLES E INDICADORES.....	45
3.1 HIPÒTESIS	45
3.1.1 Hipótesis General.....	45
3.1.2 Hipótesis Específicos.....	45
3.2 VARIABLES.....	45
3.2.1 Identificación de Variables	45
3.2.2 Operacionalización de Variables	46
3.3 INDICADORES	46
CAPITULO IV: METODOLOGÌA.....	47
4.1 Àmbito del Estudio: Localización Política y Geográfica	47
4.2 Diseño de investigación: Método, tipo, alcance	47

4.2.1	Método y Tipo de Investigación	49
4.2.2	Alcance de Investigación	49
4.3	Población de Estudio	49
4.3.1	Población.....	49
4.3.2	Muestra	50
4.4	Validez y confiabilidad de instrumentos	51
4.5	Plan de Análisis de datos	52
CAPITULO V: PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		
.....		53
5.1	Introducción.....	53
5.2	Recolección de Baterías Ion-litio de laptop y computadoras	54
5.3	Separación manual de elementos metálicos y polímeros.....	55
5.4	Reducción del tamaño de las baterías o cátodo	56
5.5	Análisis Químico	57
5.6	Pruebas exploratorias preliminares	59
5.7	PRUEBAS EXPERIMENTALES	59
5.7.1	Determinación del volumen de la solución lixivante y del agua	59
5.7.2	Determinación de las condiciones de la cinética de lixiviación	62
5.7.3	Determinación del porcentaje de extracción de Litio	65
5.7.4	Determinación del tiempo óptimo de lixiviación.....	73
5.7.5	Determinación del modelo cinetico	73
5.7.6	Determinación del consumo de ácido.....	75
5.8	PRUEBAS METALURGICAS DE LABORATORIO	77
CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		82
6.1	Resultados y discusión.....	82
6.2	Matriz de análisis y discusión de resultados por medio de Minitab	83

6.3	Análisis de los resultados del proceso de lixiviación.....	85
6.3.1	<i>Análisis de los resultados según el diseño factorial 2^3</i>	85
6.3.2	<i>Nuevo análisis de los resultados previo una corrección en el modelo</i>	89
6.3.2.1	<i>Diagrama de Pareto después de ajuste realizado</i>	90
6.3.2.2	<i>Grafica normal de los efectos en la extracción de Litio</i>	91
6.3.2.3	<i>Análisis de los efectos principales de cada variable en la extracción de litio</i>	92
6.3.2.4	<i>Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción de litio</i>	94
6.3.2.5	<i>Análisis de varianza</i>	96
6.3.2.6	<i>Coeficientes codificados para el modelamiento del proceso</i>	99
6.3.2.7	<i>Modelo de correlación para la optimización del proceso</i>	100
6.3.2.8	<i>Optimización de la extracción de litio</i>	101
6.3.2.9	<i>Grafica de superficie y contornos de respuesta</i>	102
	COSTO BENEFICIO.....	104
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES.....	107
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
	ANEXOS	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	46
Tabla 2 Diseño factorial 2^3	48
Tabla 3 Contenido metálico de batería Ion-litio	58
Tabla 4 Contenido de litio en la muestra	58
Tabla 5 Cantidad de ácido requerido a 100g/l de H_2SO_4	62
Tabla 6 Cantidad de ácido requerido a 200g/l de H_2SO_4	62
Tabla 7 Resultados de análisis químico en las pruebas de cinética de lixiviación	65
Tabla 8 Porcentaje de extracción de litio en las pruebas de cinética de lixiviación	72
Tabla 9 Modelamiento matemático de difusión controlada.....	74
Tabla 10 Relación de Consumo de ácido con concentración de litio	76
Tabla 11 Condiciones Operativas 01	77
Tabla 12 Condiciones Operativas 02	77
Tabla 13 Condiciones Operativas 03	78
Tabla 14 Condiciones Operativas 04	78
Tabla 15 Condiciones Operativas 05	78
Tabla 16 Condiciones Operativas 06	79
Tabla 17 Condiciones Operativas 07	79
Tabla 18 Condiciones Operativas 08	80
Tabla 19 Condiciones Operativas 09	80
Tabla 20 Condiciones Operativas 10	81
Tabla 21 Condiciones Operativas 11	81
Tabla 22 Matriz de diseño factorial y las respuestas	84
Tabla 23 Análisis de varianza (ANOVA).....	87
Tabla 24 Resumen del modelo en función de s y R.....	88
Tabla 25 Análisis de varianza (ANOVA) ajustada.....	96
Tabla 26 Resumen del modelo ajustado en función a R.....	98
Tabla 27 <i>Coficiente codificador</i>	99

ÍNDICE DE GRAFICOS

Figura 1 <i>El litio en su forma pura es un metal blando, de color blanco plateado y sumamente ligero</i>	29
Figura 2 <i>Principales usos del litio a nivel mundial, 2008 y 2018</i>	30
Figura 3 <i>Aumento del precio del litio 11 veces en los últimos dos años</i>	31
Figura 4 <i>Demanda mundial de baterías entre 2018 y 20230 (gigavatios hora)</i>	32
Figura 5 <i>Batería Ion-litio</i>	34
Figura 6 <i>Diagrama Eh-pH para el sistema litio-agua</i>	39
Figura 7 <i>Cinética de la lixiviación</i>	43
Figura 8 <i>Ubicación de la ciudad del Cusco</i>	47
Figura 9 <i>Baterías Ion-litio recopiladas de celulares y laptop</i>	54
Figura 10 <i>Baterías Ion-litio obtenidas de celulares y laptop</i>	54
Figura 11 <i>Separación manual de Baterías Ion-litio</i>	55
Figura 12 <i>Baterías Ion-litio descascarada</i>	55
Figura 13 <i>Láminas de Ion-litio de celulares y laptop</i>	56
Figura 14 <i>Reducción de tamaño manualmente</i>	56
Figura 15 <i>Material reducido</i>	57
Figura 16 <i>Lixiviación de litio con ácido sulfúrico</i>	64
Figura 17 <i>Tiempo vs porcentaje de extracción</i>	73
Figura 18 <i>XB vs t en la etapa de difusión</i>	75
Figura 19 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados</i>	86
Figura 20 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y ajustados</i>	90
Figura 21 <i>Gráfica normal de los efectos estandarizados</i>	91

Figura 22 Grafica de los efectos principales para la extracción de litio	92
Figura 23 Grafica de incidencia de las interacciones de las variables en la extracción de litio ..	94
Figura 24 Gráfica de la optimización	101
Figura 25 Gráfica de superficie de respuesta.....	102
Figura 26 Gráfica de contorno de respuesta	103

SIMBOLOGÍA

LIB	Lithium-ion batteries (baterías de iones de litio)
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
$LiCoO_2$	Oxido de litio-cobalto
NaOH	Hidróxido de sodio
HCl	Cloruro de hidrogeno
O/A	Razón volumen orgánico/volumen acuoso
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
Co	Cobalto
Li	Litio
cm	Centímetro
mm	Milímetro
g/l	gramo por litro
OMS	Organización mundial de la salud
ml	Mililitro
%	Porcentaje
MPa	Megapascal
°C	Centígrados
V	Voltaje

INTRODUCCION

El desarrollo científico y tecnológico de las últimas décadas ha transformado significativamente la vida cotidiana de la sociedad moderna. El crecimiento acelerado del uso de dispositivos electrónicos, como teléfonos celulares, laptops, tablets, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento energético, ha generado una creciente demanda de baterías ion-litio debido a su alta eficiencia energética, larga vida útil y reducido peso. Estas baterías se han convertido en componentes esenciales para el funcionamiento de múltiples tecnologías modernas, especialmente en el contexto de la transición energética mundial hacia fuentes más limpias y sostenibles.

Sin embargo, el incremento en el consumo de equipos electrónicos también ha provocado un aumento considerable de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), especialmente de baterías ion-litio en desuso. La rápida obsolescencia tecnológica, el reemplazo constante de dispositivos y la falta de sistemas adecuados de reciclaje han generado un problema ambiental de gran magnitud. Muchas baterías son desechadas de manera inadecuada junto con residuos domésticos, ocasionando contaminación del suelo, agua y aire debido a la presencia de metales pesados, compuestos tóxicos y sustancias inflamables que contienen en su composición.

En el Perú, el manejo de residuos electrónicos continúa siendo un desafío ambiental y tecnológico. El aumento del consumo de equipos electrónicos en ciudades como Cusco ha incrementado la generación de baterías agotadas que, en muchos casos, terminan acumuladas en botaderos informales o rellenos sanitarios sin un tratamiento adecuado. Esta problemática motivó el desarrollo de la presente investigación intitulada “Extracción de litio de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco”, la cual surge como una alternativa orientada a la recuperación de un recurso estratégico de alto valor económico y tecnológico a partir de residuos electrónicos.

El litio es considerado actualmente uno de los minerales más importantes del mundo debido a su amplia aplicación en la fabricación de baterías recargables, sistemas de almacenamiento energético y vehículos eléctricos. Además, posee propiedades físicas y químicas excepcionales, como alta conductividad eléctrica, bajo peso atómico y elevada capacidad electroquímica, lo que lo convierte en un elemento indispensable para el desarrollo de nuevas tecnologías. El incremento de la demanda mundial de litio ha generado preocupación respecto al agotamiento de recursos naturales y a la necesidad de implementar procesos sostenibles de recuperación y reciclaje.

Frente a esta realidad, la presente tesis tuvo como principal motivación contribuir al aprovechamiento sostenible de baterías ion-litio desechadas mediante el uso de técnicas hidrometalúrgicas. El estudio se enfocó específicamente en el proceso de lixiviación con ácido sulfúrico, debido a que este método presenta importantes ventajas operativas y ambientales, tales como una alta eficiencia de recuperación metálica, menor consumo energético y facilidad de aplicación a nivel experimental e industrial. La investigación buscó demostrar la viabilidad técnica de recuperar litio a partir de residuos tecnológicos presentes en la ciudad del Cusco, promoviendo así alternativas de economía circular y reducción del impacto ambiental generado por los RAEE.

El problema principal que originó esta investigación fue la ausencia de métodos adecuados y estudios locales relacionados con la recuperación de litio a partir de baterías ion-litio desechadas en la región Cusco. A pesar del incremento del consumo de dispositivos electrónicos, no existen procesos implementados a nivel regional para el tratamiento y valorización de estos residuos. Asimismo, la acumulación de baterías usadas representa un riesgo ambiental considerable debido a la liberación de sustancias tóxicas y metales contaminantes. Por ello, la investigación planteó la necesidad de desarrollar un proceso experimental capaz de recuperar litio mediante lixiviación ácida, evaluando variables

importantes como la concentración de ácido sulfúrico, el tiempo de lixiviación y la temperatura del proceso.

Durante el desarrollo de la investigación se logró resolver diversos problemas técnicos relacionados con el tratamiento de las baterías ion-litio. En primer lugar, se estableció un procedimiento adecuado para la recolección, clasificación y separación manual de los componentes metálicos y poliméricos de las baterías. Posteriormente, se optimizó el tamaño del material mediante reducción mecánica, permitiendo incrementar el área de contacto y mejorar la eficiencia de lixiviación. Además, se determinaron experimentalmente las condiciones óptimas del proceso para alcanzar una elevada recuperación de litio. Los resultados obtenidos demostraron que la concentración de ácido sulfúrico, la temperatura y el tiempo de lixiviación influyen significativamente en el porcentaje de extracción del metal.

La investigación permitió alcanzar una recuperación máxima de litio de 94.765%, utilizando una concentración de ácido sulfúrico de 285.67 g/L, una temperatura de 60 °C y un tiempo de lixiviación de 120 minutos, mediante un diseño factorial experimental 23

Estos resultados evidencian que la lixiviación con ácido sulfúrico constituye una alternativa eficiente para la recuperación de litio a partir de baterías ion-litio agotadas. Además, el estudio permitió desarrollar un modelo matemático de regresión que describe el comportamiento del proceso y la interacción entre las variables operacionales.

En el aspecto científico, esta investigación aporta conocimientos relacionados con la aplicación de procesos hidrometalúrgicos en el reciclaje de residuos electrónicos. Asimismo, contribuye al estudio de la cinética y termodinámica de la lixiviación del litio utilizando ácido sulfúrico como agente lixivante. La investigación también fortalece el conocimiento sobre el comportamiento químico de las baterías ion-litio durante el proceso de recuperación metálica, sirviendo como referencia para futuros estudios orientados al reciclaje de metales estratégicos.

Desde el punto de vista tecnológico, el estudio representa un aporte importante para el desarrollo de alternativas sostenibles de reciclaje de baterías ion-litio en el Perú. La implementación de procesos de recuperación de litio puede contribuir a disminuir la dependencia de recursos minerales primarios, reducir la contaminación ambiental y fomentar el aprovechamiento de residuos electrónicos como fuente secundaria de metales valiosos. Asimismo, la investigación puede servir como base para futuros proyectos industriales relacionados con la recuperación de litio y otros metales presentes en baterías agotadas.

Durante la ejecución de la investigación se presentaron diversas dificultades técnicas y operativas. Una de las principales limitaciones fue la obtención y recolección de baterías ion-litio en desuso para el desarrollo experimental. Asimismo, el desmontaje manual de las baterías requirió procedimientos cuidadosos debido a la presencia de componentes peligrosos y materiales inflamables. Otra dificultad importante fue el control preciso de variables experimentales como temperatura, tiempo y concentración de ácido durante el proceso de lixiviación. Además, se enfrentaron limitaciones relacionadas con la disponibilidad de equipos especializados y análisis químicos de laboratorio. Sin embargo, estas dificultades fueron superadas mediante la aplicación rigurosa de procedimientos experimentales y medidas de seguridad adecuadas.

La presente tesis se encuentra estructurada en seis capítulos. En el Capítulo I se desarrolla el planteamiento del problema, donde se describe la situación problemática, formulación del problema, justificación y objetivos de la investigación. El Capítulo II presenta el marco teórico y los antecedentes nacionales e internacionales relacionados con la extracción de litio y procesos de lixiviación. Además, se exponen conceptos fundamentales sobre baterías ion-litio, residuos electrónicos y termodinámica de la lixiviación.

El Capítulo III comprende las hipótesis, variables e indicadores empleados en la investigación, definiendo las variables independientes y dependientes del proceso

experimental. El Capítulo IV describe la metodología utilizada, incluyendo el tipo y diseño de investigación, población, muestra, técnicas de recolección de datos y procedimientos experimentales aplicados durante el estudio.

En el Capítulo V se detallan los procedimientos experimentales y el análisis de resultados obtenidos durante las pruebas de lixiviación. Se describen las etapas de recolección de baterías, separación manual, reducción de tamaño, análisis químico y pruebas metalúrgicas de laboratorio. Finalmente, en el Capítulo VI se realiza el análisis y discusión de resultados mediante herramientas estadísticas y diseño factorial, evaluando el comportamiento de las variables y optimizando las condiciones de extracción de litio.

En conclusión, la presente investigación demuestra que la recuperación de litio a partir de baterías ion-litio mediante lixiviación con ácido sulfúrico constituye una alternativa viable, eficiente y ambientalmente sostenible. El estudio contribuye al desarrollo de tecnologías de reciclaje de residuos electrónicos y promueve el aprovechamiento responsable de recursos estratégicos, fortaleciendo además la investigación científica y tecnológica en el área de la hidrometalurgia y recuperación de metales en el Perú.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación Problemática

Se conoce que el litio es un metal ampliamente utilizado en la fabricación de baterías de ion-litio para dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos debido a sus propiedades químicas y energéticas. Asimismo, diversos estudios indican que el incremento del consumo de equipos electrónicos ha generado una mayor producción de baterías desechadas, ocasionando contaminación ambiental y riesgos para la salud pública. También se sabe que la lixiviación con ácido sulfúrico constituye una alternativa eficiente para recuperar litio y otros metales presentes en baterías usadas, logrando altas tasas de recuperación mediante procesos químicos especializados.

En el Perú y especialmente en la ciudad del Cusco, existe una creciente acumulación de baterías desechadas de teléfonos celulares debido al incremento del uso de dispositivos electrónicos. Sin embargo, el manejo inadecuado de estos residuos y la limitada implementación de procesos de reciclaje provocan contaminación del suelo, agua y aire, además de la pérdida de materiales valiosos como el litio. Esta problemática se agrava por el aumento mundial de la demanda de baterías de ion-litio y la generación masiva de residuos electrónicos.

La investigación es importante porque permitirá contribuir a la reducción de la contaminación ambiental ocasionada por las baterías de ion-litio desechadas y promover el aprovechamiento de recursos estratégicos mediante procesos de reciclaje. Además, la recuperación de litio mediante lixiviación con ácido sulfúrico puede aportar al desarrollo sostenible, disminuir la dependencia de recursos naturales y fortalecer alternativas tecnológicas aplicables en la región del Cusco.

El principal problema radica en la creciente acumulación de baterías desechadas de teléfonos celulares y en la ausencia de procesos eficientes y sostenibles para la

extracción y recuperación de litio en la ciudad del Cusco, situación que genera contaminación ambiental y desaprovechamiento de recursos valiosos.

A pesar de que existen investigaciones internacionales sobre recuperación de litio mediante lixiviación química, en la ciudad del Cusco son escasos los estudios enfocados en la extracción de litio de baterías desechadas utilizando ácido sulfúrico. Por ello, existe la necesidad de desarrollar investigaciones orientadas a optimizar procesos de reciclaje adaptados al contexto local.

Se propone realizar un estudio sobre la extracción de litio de baterías desechadas de teléfonos celulares mediante lixiviación con ácido sulfúrico, con la finalidad de recuperar recursos estratégicos, reducir el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles de reciclaje y aprovechamiento de residuos electrónicos en la ciudad del Cusco.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Se podrá extraer litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué concentración de ácido sulfúrico se usará dentro del proceso de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?
- ¿Cuál es tiempo necesario de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?

- ¿Cuál es la temperatura óptima para la extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?

1.3 Justificación

1.3.1 Conveniencia

Con el presente trabajo se permitirá llevar a cabo una investigación sobre el proceso de lixiviación con ácido sulfúrico aplicado a baterías de ion-litio agotadas, para la extracción de litio en la ciudad del Cusco. El cual se enfoca en baterías usadas como fuente secundaria de litio, un metal importante para la industria de almacenamiento energético, permitiendo encontrar una técnica experimental donde se establezcan los parámetros que favorezcan la obtención eficiente del concentrado de litio.

1.3.2 Relevancia Social

En la actualidad, el estudio se justifica de manera social ya que debido a la aplicación del proceso de recuperación del litio se logrará que la sociedad se beneficia no solamente económicamente sino también de forma ambiental de esta manera se fomentará el uso de recursos obsoletos para generar nuevas tecnologías.

1.3.3 Relevancia Tecnológica

Las implicancias prácticas del estudio radican, en que los resultados servirán de diagnóstico, para poder realizar diferentes experimentos en la recuperación de litio. Permitirá no solamente ayudar al medio ambiente sino también, un adecuado desarrollo económico en la zona que se ocupe del proceso.

1.3.4 Valor Teórico

El estudio se desarrollará utilizando estudios de investigación de extracción de litio desde baterías y lixiviación con ácido sulfúrico, orientadas a solucionar la

problemática de la asociación en estudio, generando nuevos conocimientos y que den el soporte para comprender de la mejor manera los resultados que se obtendrán, lo cual servirán como fuente científica y teórica para otras investigaciones de carácter académico, para profundizar en el tema.

1.3.5 Utilidad metodológica

Esta justificación de estudio, radica en que se desarrollará de acuerdo con el método científico- tecnológico que involucra aspectos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos.

1.4 Objetivos de Investigación

1.4.1 Objetivo general

Extraer litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de ácido sulfúrico se usará dentro del proceso de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.
- Determinar el tiempo necesario de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.
- Determinar la temperatura óptima para la extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes Internacionales

- (Meza, 2021), La tesis titulada “EXTRACCIÓN DE COBALTO EN BATERÍAS DE ION LITIO MEDIANTE LIXIVIACIÓN CON CÁSCARA DE LIMÓN (CITRUS × AURANTIFOLIA)” de la Universidad Agraria del Ecuador tuvo como objetivo recuperar cobalto de baterías de ion-litio utilizando cáscara de limón como agente lixivante. El estudio analizó la composición de los cátodos, determinando que el 61.54% correspondía a LiCoO_2 de baterías Samsung y Nokia. Asimismo, se comprobó que partículas pequeñas de cáscara de limón (0.550 mm–0.390 mm) mejoran la eficiencia de la reacción debido al incremento de la superficie de contacto. Los mejores resultados de lixiviación se obtuvieron utilizando 2.5 g y 3 g de cáscara de limón con 10% de peróxido de hidrógeno, alcanzando eficiencias de 50% y 52%, respectivamente. Sin embargo, el uso de NaOH en el pretratamiento no eliminó completamente el aluminio del cátodo, reduciendo la eficiencia esperada. Finalmente, se concluyó que la cáscara de limón es un reactivo eficiente para la recuperación de cobalto de baterías de ion-litio desgastadas.
- (Cortéz, 2019), Tesis “RECUPERACIÓN DE COBALTO A PARTIR DE BATERÍAS DE LITIO POR MEDIO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE CON EXTRACTANTE ANIÓNICO”, Universidad Andrés Bello de Chile, en el cual el objetivo general es explorar la viabilidad de recuperar cobalto de baterías de ion litio mediante un proceso hidrometalúrgico de extracción por solvente como objetivos específicos se planteó desarrollar un método de extracción por solvente para cobalto utilizando un extractante aniónico, investigar la recuperación de otros elementos de las baterías y examinar la función del peróxido de hidrógeno en el proceso de extracción, por lo tanto se llegó a la conclusión que la extracción de

cobalto se logró eficazmente usando un extractante aniónico con concentraciones de 6 M de HCl y 20 ml de Alamine 336, obteniendo una extracción de cobalto de 6 ppm, donde se recuperó cobre como subproducto utilizando 4 M de HCl y 10 ml de Alamine 336, alcanzando una recuperación de 1206 ppm de cobre, en el cual el peróxido de hidrógeno facilitó la separación de fases durante el proceso, ayudando a limpiar las interfaces entre las fases acuosa y orgánica.

- (Vásquez, 2021), Tesis “EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS”. Universidad de San Carlos de Guatemala, como objetivo general se planteó realizar un análisis a nivel laboratorio para la extracción de metales y la recuperación de cobre en tarjetas de circuitos de dispositivos móviles descartados, utilizando técnicas de lixiviación ácida, identificación por fluorescencia de rayos X y electrodeposición y como objetivos específicos plantearon analizar la recuperación de metales en tarjetas de dispositivos electrónicos mediante lixiviación ácida, establecer la cantidad de metales recuperados a través de diferentes concentraciones del agente lixivante, identificar los metales presentes tras la lixiviación utilizando fluorescencia de rayos X, evaluar el proceso de electrodeposición para optimizar la recuperación de cobre y finalmente determinar el tamaño óptimo de muestra que maximiza la recuperación de metales, por lo tanto se llegó a la conclusión de que el agua regia demostró ser el agente lixivante más efectivo, extrayendo una mayor cantidad de metales, incluyendo cantidades mínimas de metales valiosos como el oro y la plata, donde las mejores recuperaciones de metales se lograron con una relación de agua regia de 3:1, excepto para oro y plomo, que mostraron mejores resultados con una relación de 2:2 y en muestras de 0.5 y 1.0 cm de manera correspondiente, en el cual

el hierro presentó el mínimo índice de recuperación por espectroscopia de rayos X por fluorescencia, mientras que el cobre fue el metal más prevalente en las tarjetas analizadas, finalmente el método de electrodeposición resultó ser efectivo para la obtención de cobre, especialmente con una relación de agua regia de 1:3 y un tamaño de muestra de 0.5 cm.

- (Olivas, 2019), Tesis” PURIFICACIÓN DE SOLUCIÓN LIXIVIADA DE LITIO UTILIZANDO RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO”, Universidad de Sonora de Mexico, dentro de la tesis mencionada se planteó como objetivo general utilizar resinas de intercambio iónico para purificar y concentrar soluciones de litio y como objetivos específicos se planteó determinar experimentalmente los efectos del pH, la concentración, la velocidad de agitación, y la temperatura en la adsorción de litio usando resinas de intercambio, obtener isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich con la resina Aquatrol CAT100E y evaluar experimentalmente el flujo en columnas para optimizar la concentración final de la solución de litio, donde finalmente se llegó a la conclusión que las condiciones óptimas para la adsorción de litio fueron pH 11.5, temperatura de 25°C y agitación constante, alcanzando una capacidad de adsorción de 1.4512 mg/g, lo cual se ajustó adecuadamente al modelo de Langmuir.

2.2. Antecedentes Nacionales

- (Nina, 2022), Tesis “EXTRACCIÓN DE LITIO POR LIXIVIACIÓN CON FLUORURO SODIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN AUTOCLAVE A PARTIR DE MINERAL DE LITIO EN ROCA YACIMIENTO FALCHANI MACUSANI – PUNO”. Universidad Nacional del Altiplano de Puno, donde se planteó como objetivo general analizar el proceso de extracción de litio mediante lixiviación con fluoruro sódico y ácido sulfúrico en autoclave, utilizando minerales de roca del

yacimiento Falchani Macusani en Puno y como objetivos específicos se plantearon verificar la efectividad de la relación volumen de ácido/masa de fluoruro como agente lixivante, determinar la temperatura óptima para la lixiviación en autoclave y por ultimo identificar el tiempo ideal de lixiviación para maximizar la recuperación de litio, donde se llegaron a la conclusión que la extracción de litio alcanzó un rendimiento del 91% bajo condiciones de alta temperatura y presión, con una proporción de volumen a masa de 4:4 ml/g, en el cual la temperatura ideal encontrada para la lixiviación fue de 125°C y el tiempo de lixiviación de 3 horas a 250°C fue el más efectivo, aumentando significativamente la recuperación de litio.

2.3. Antecedentes Locales

- (Allende & Llonto, 2021), Tesis “EXTRACCIÓN DEL COBRE A PARTIR DE TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS DE COMPUTADORAS POR LIXIVIACIÓN ÁCIDA EN LA CIUDAD DE CUSCO”. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, como objetivo general se planteó realizar la extracción de cobre de tarjetas de circuitos integrados de computadoras a través de lixiviación ácida por agitación en Cusco y como objetivos específicos plantearon establecer la concentración ideal de agua oxigenada necesaria para maximizar la extracción de cobre, definir la concentración adecuada de ácido sulfúrico para optimizar el proceso de extracción e identificar el tiempo óptimo necesario para la lixiviación ácida y asegurar la máxima eficacia, por lo tanto se llegó a la conclusión de que en la ciudad del Cusco no se cuenta con un sistema de manejo para las computadoras descartadas; estas suelen acumularse en entidades o se mezclan con residuos comunes, acabando en el deficiente relleno sanitario de Jaquira o en vertederos informales, donde al realizar el proceso de lixiviación ácida por agitación se logró recuperar el 52.61% de cobre de las tarjetas de circuito,

utilizando una concentración de agua oxigenada del 30%, durante 48 horas y con una concentración de ácido sulfúrico de 400g/l y finalmente el modelo matemático $\hat{y} = 31.084 + 14.849x_1 + 5.141x_2$ se confirmó como el más efectivo para describir el proceso de lixiviación ácida por agitación aplicado a las tarjetas de circuito de computadoras.

2.4. Bases Teóricas

2.3.1 Litio

El litio, simbolizado como Li y clasificado en la tabla periódica junto a otros metales como sodio, potasio, entre otros, se sitúa en la corteza terrestre en formas sólidas como rocas y en estado líquido en aguas marinas y continentales (Bravo, 2018).

Este metal, el más ligero de la tabla periódica, se vende inicialmente en formas Li_2CO_3 , LiCl , LiOH . Es conocido por su excelente conductividad térmica y eléctrica, características esenciales para el almacenamiento de energía, lo que ha incrementado su demanda en tiempos recientes (Jerez, 2018).

Figura 1

El litio en su forma pura es un metal blando, de color blanco plateado y sumamente ligero



Fuente: Forma natural del litio de color plateado, y metal ligero (Artega Bernal, 2019)

2.3.2 Funciones del litio

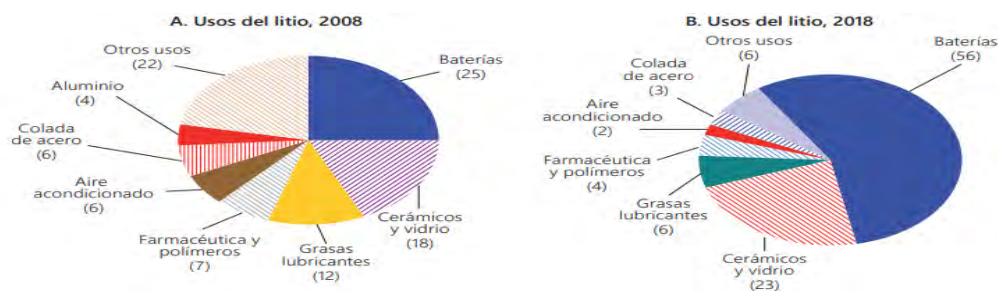
El litio destaca por su versatilidad, utilizándose en múltiples formas: como mineral concentrado, metal y compuesto químico, tanto orgánico como inorgánico (Bravo, 2018). Debido a sus características físicas y químicas singulares, como ser el elemento sólido más ligero y electropositivo, el litio ha cultivado un mercado diverso y en crecimiento. Predominantemente, se usa en la generación de compuestos no orgánicos como el Li_2CO_3 y el LiOH , empleados en la fabricación de vidrio, esmaltes cerámicos, aluminio metálico, tubos de televisión, grasas lubricantes, metal de litio, absorbentes de CO_2 en la industria espacial y submarina, baterías y medicamentos (Jerez, 2018).

2.3.3 Usos principales del litio

Tradicionalmente, el litio ha sido fundamental en la producción de vidrios, cerámicas, lubricantes y medicamentos psiquiátricos, entre otros. Sin embargo, ha experimentado un crecimiento exponencial en la demanda debido a su rol en la industria electrónica, especialmente en dispositivos portátiles energéticamente recargables como celulares y computadoras. El uso más destacado del litio en la actualidad es en la elaboración de vehículos electrónicos e híbridos, en la cual su elaboración ha visto un aumento significativo (Jerez, 2018).

Figura 2

Principales usos del litio a nivel mundial, 2008 y 2018



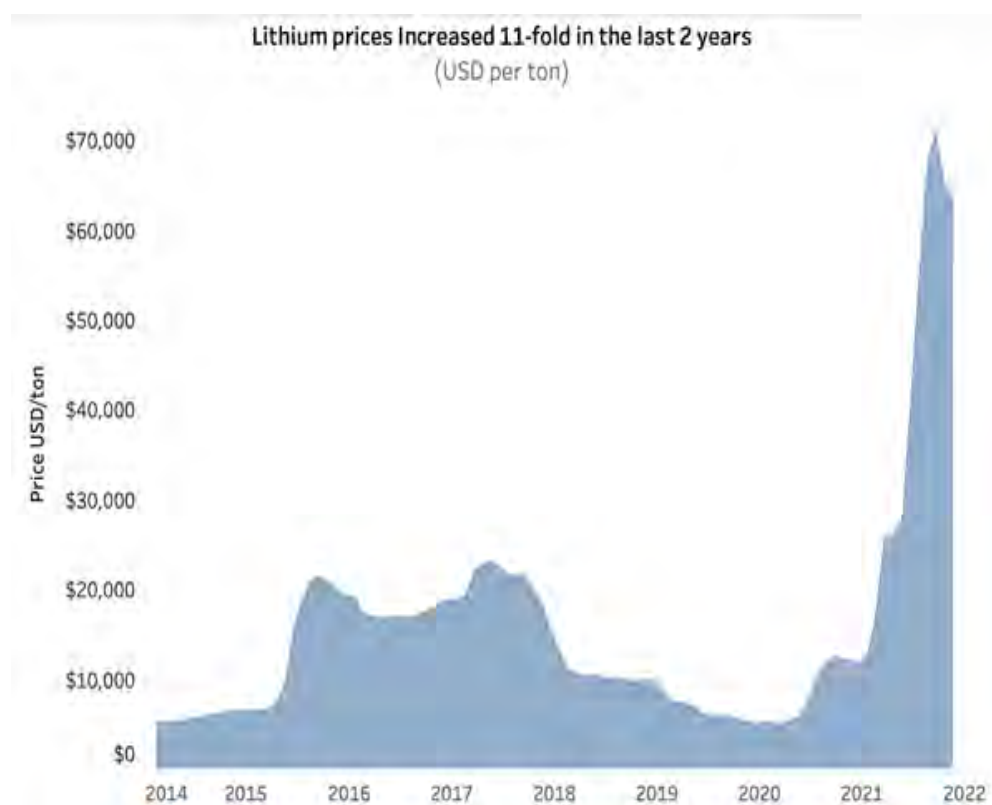
Fuente: Estadísticas de uso de litio a nivel mundial (U.S. GEOLOGICAL SERVICE, 2023)

2.3.4 Usos potenciales energéticos del litio

El litio, un elemento con un notable potencial energético emergente, se está explorando para aplicaciones aún no plenamente desarrolladas que muestran un crecimiento acelerado en su demanda. Esto incluye baterías a gran escala para la regulación y depósito energético en sistemas de distribución eléctrica, destacándose por su alta densidad energética y la utilización en aleaciones ligeras y turbinas (Bravo, 2018).

Figura 3

Aumento del precio del litio 11 veces en los últimos dos años



Fuente: Cuadro estadístico de los precios de litio a lo largo de los años (U.S. GEOLOGICAL SERVICE, 2023)

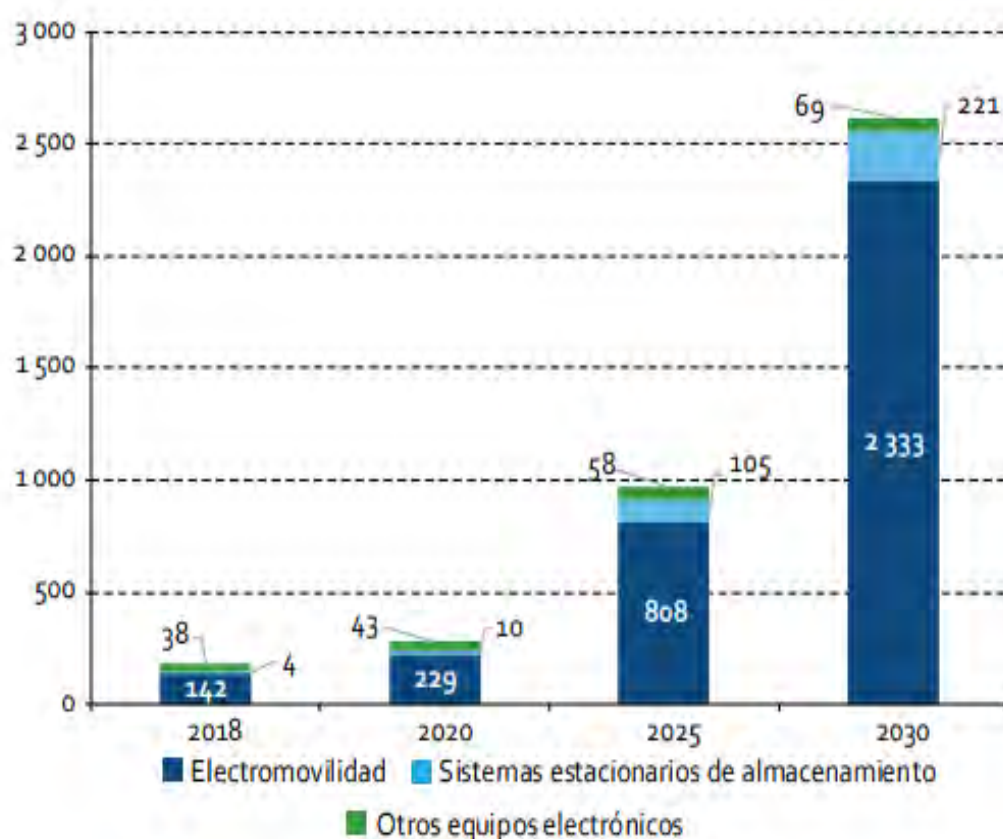
2.3.5 Baterías de Ion Litio

Las baterías de iones de litio, comúnmente conocidas como baterías Li-Ion, son aparatos elaborados con el fin de acumular energía eléctrica de manera eficiente. Estas baterías utilizan una sal de litio como electrolito para facilitar las reacciones

electroquímicas reversibles entre el cátodo y el ánodo. Su diseño permite la creación de baterías ligeras, de tamaño reducido y formas variadas, altamente eficientes y especialmente adecuadas para dispositivos electrónicos de consumo masivo. Sus atributos incluyen ligereza, alta capacidad energética, resistencia a la descarga y mínima pérdida de memoria, además de soportar numerosos ciclos de regeneración (Bravo, 2018).

Figura 4

Demanda mundial de baterías entre 2018 y 2030 (gigavatios hora)



Fuente: Cuadro estadístico que muestra la demanda de litio entre los años 2018 y una proyección al 2030 (Obaya & Cespedes, 2021)

2.3.6 Tipos de baterías

a) Baterías usadas en Tablet y celulares

Las baterías de óxido de cobalto de litio (LiCoO₂) son una opción moderna, compuesta por electrodos de litio, oxígeno y cobalto y un electrolito

de sal de litio. Estas baterías ofrecen altas energías específicas y eficiencia, no requieren mantenimiento y son fáciles de reciclar. Ofrecen el doble de capacidad energética en comparación con los dispositivos de almacenamiento de energía de níquel-cadmio y resultan un tercio más pequeñas. Sin embargo, son susceptibles a explosiones si se sobrecalientan, por lo que deben almacenarse en condiciones controladas y a una carga parcial para garantizar su seguridad (Valenzuela, Rojas , & Segovia, 2017).

b) Baterías usadas en computadores y baterías de motos o autos

Las baterías NCM están compuestas por níquel, cobalto, manganeso y litio ($\text{Li}_{1+x}(\text{Ni}_x \text{Co} \text{ y } \text{Mn}_z)(1-x)\text{O}_2$). Estas baterías buscan reducir la cantidad de cobalto, un mineral escaso y costoso, para disminuir los costos de producción y mantener el precio del kilovatio por debajo de los 100 dólares (Valenzuela, Rojas , & Segovia, 2017).

c) Composición de las baterías de celulares

Las baterías de celulares, compuestas de iones de litio (Li-ion), están compuestas por varios materiales esenciales y organizados en diferentes componentes:

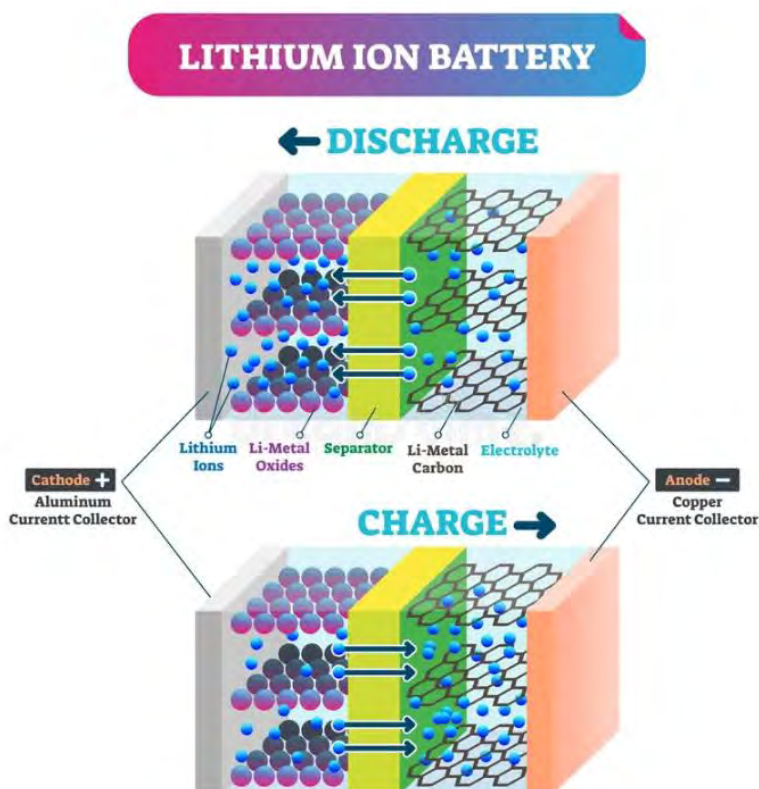
- **Ánodo:** Generalmente hecho de grafito, que permite la intercalación reversible de iones de litio para almacenamiento y liberación de energía.
- **Cátodo:** Compuesto por óxidos metálicos de litio, como óxido de litio-cobalto (LiCoO_2), óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC) o fosfato de hierro-litio (LiFePO_4), que determina la capacidad y estabilidad.
- **Electrolito:** Solución líquida formada por sales de litio (usualmente hexafluorofosfato de litio, LiPF_6) disueltas en solventes orgánicos apróticos, que facilita la movilidad iónica entre ánodo y cátodo.

- Separador: Membrana porosa de polímero (polipropileno o polietileno) que previene el contacto directo entre ánodo y cátodo para evitar cortocircuitos, permitiendo el paso de iones de litio.
- Carcasa externa y colectores de corriente: Fabricados con aluminio y cobre para proteger y conducir la electricidad de la batería.
- Circuitos de protección: Incluyen sistemas de gestión de baterías (BMS) para evitar sobrecargas, sobrecalentamientos y prolongar la vida útil.

Esta composición permite un alto rendimiento energético y ciclos de carga eficientes en móviles y otros dispositivos electrónicos. (Baterías CEA, 2022)

Figura 5

Batería Ion-litio



Fuente: La figura representa el funcionamiento de una batería ion-litio durante los procesos de carga y descarga. (Jungheinrich Profishop. 2022)

2.3.7 Baterías desechadas

Las baterías desechadas son procesadas para recuperar materiales valiosos y reducir el efecto ambiental (OMS, 2017).

Descomposición de baterías: Se lleva a cabo de manera manual o automática con el fin de separar los componentes ácidos y otros materiales. Las baterías de plomo se envían a hornos de fundición para retirar la escoria y refinar el plomo no purificado, que se moldea o mantiene fundido para su refinamiento posterior (OMS, 2017).

Objetivo de procesos

- Producir plomo de alta pureza o aleaciones con adición de elementos traza específicos para su uso en nuevas baterías de plomo.
- Recuperar y reutilizar el electrolito, o neutralizarlo para eliminar el plomo y otros contaminantes antes de su disposición en sistemas de alcantarillado.
- En sistemas automatizados, las baterías de plomo son descompuestas en molinos de martillos. Los materiales más pesados se asientan en el fondo de tanques de agua, mientras que los más ligeros flotan, facilitando su separación. El líquido, incluido el electrolito de ácido sulfúrico, es extraído para su tratamiento (OMS, 2017).

2.3.8 Baterías comerciales

Las baterías comerciales, especialmente las de ion litio y litio-polímero, han transformado el almacenamiento de energía en dispositivos portátiles, como ordenadores portátiles y celulares, ofreciendo múltiples ventajas (Bravo, 2018):

- Alta densidad energética: Estas baterías almacenan una gran cantidad de energía en comparación con su peso y volumen, superando a las tecnologías Ni-MH, Ni-Cd y plomo.
- Peso y volumen reducidos: Son ideales para dispositivos delgados debido a su perfil compacto.
- Alta tensión por célula: Cada celda ofrece 3.7 voltios, lo que es equivalente a la energía de tres baterías Ni-MH o Ni-Cd.
- Mínima pérdida de capacidad: Exhiben una tasa de auto-descarga baja, menor al 6% mensual, lo que es significativamente inferior a otras tecnologías.
- Larga durabilidad: En vehículos eléctricos, pueden soportar hasta 3,000 ciclos de carga y descarga con solo una pérdida del 20% de capacidad.
- Fácil monitorización del estado de carga: Se puede determinar la carga restante midiendo la tensión en reposo de la batería.
- Estas características hacen de las baterías de litio una opción superior para una amplia gama de aplicaciones electrónicas y eléctricas (Bravo, 2018).

2.3.9 Lixiviación acida

Durante el proceso de lixiviación del litio, se utiliza comúnmente ácido sulfúrico como agente lixivante para disolver el litio contenido en las baterías de ion-litio desechadas. Generalmente, este proceso se realiza empleando determinadas concentraciones de ácido y condiciones controladas de temperatura, tiempo y agitación, con la finalidad de maximizar la recuperación del metal. Mediante la lixiviación, el litio pasa desde la fase sólida del material catódico hacia una solución acuosa, permitiendo su posterior recuperación y purificación.

Posteriormente, la solución lixiviada es sometida a procesos de separación y purificación para eliminar impurezas y otros metales presentes, como cobalto, níquel o manganeso. Finalmente, el litio puede recuperarse en forma de compuestos como carbonato de litio o hidróxido de litio mediante procesos químicos de precipitación, obteniéndose productos de alta pureza que pueden ser reutilizados en la fabricación de nuevas baterías y otros materiales industriales. (De la Torre, 2013).

Además, la combinación de H_2SO_4 y H_2O_2 es común en la lixiviación de las LIB, facilitando la reducción de compuestos como el Co^{3+} a Co^{2+} , aumentando su solubilidad en soluciones ácidas gracias al efecto reductor del H_2O_2 . Este mismo agente también actúa como oxidante para el cobre, transformándolo en Cu^{2+} y permitiendo su disolución en la reacción con H_2SO_4 y H_2O_2 para formar $CuSO_4$ (Tshipeng, Smith, & Brown, 2017).

2.3.10 Extracción de litio

El litio se puede obtener de tres tipos principales de depósitos: salmueras, pegmatitas (roca dura) y rocas sedimentarias (Wiker, 2021).

a) Salmueras: Las salmueras, con variaciones en la concentración de litio y otros elementos como potasio, sodio y magnesio, son actualmente la fuente más rentable de litio. Aunque anteriormente la producción dominante era de roca dura, hoy en día el carbonato de litio se produce mayormente partiendo de soluciones salinas continentales debido a costos de producción más bajos. Estos depósitos se encuentran principalmente en cuencas continentales de desiertos salinos, cerca de zonas volcánicas y contienen altas concentraciones de sales (Wiker, 2021).

- b) Las pegmatitas son rocas ígneas de textura gruesa originadas por la cristalización del material magmático en el interior de la capa externa del planeta. Contienen litio, estaño, niobio y tantalio, y representan aproximadamente el 26% de los recursos de litio conocidos mundialmente. La extracción se lleva a cabo en canteras a cielo abierto o subterráneas y, a pesar de ser más costosa comparada con las salmueras, la alta concentración de litio en las pegmatitas puede hacerla económicamente viable (Wiker, 2021).
- c) Rocas Sedimentarias: Constituyen aproximadamente el 8% de los recursos de litio reconocidos. Estos depósitos se sitúan en arcillas y evaporitas lacustres, donde el litio es un componente del armazón cristalino del mineral esmectita (Wiker, 2021).

2.3.11 Termodinámica de la lixiviación

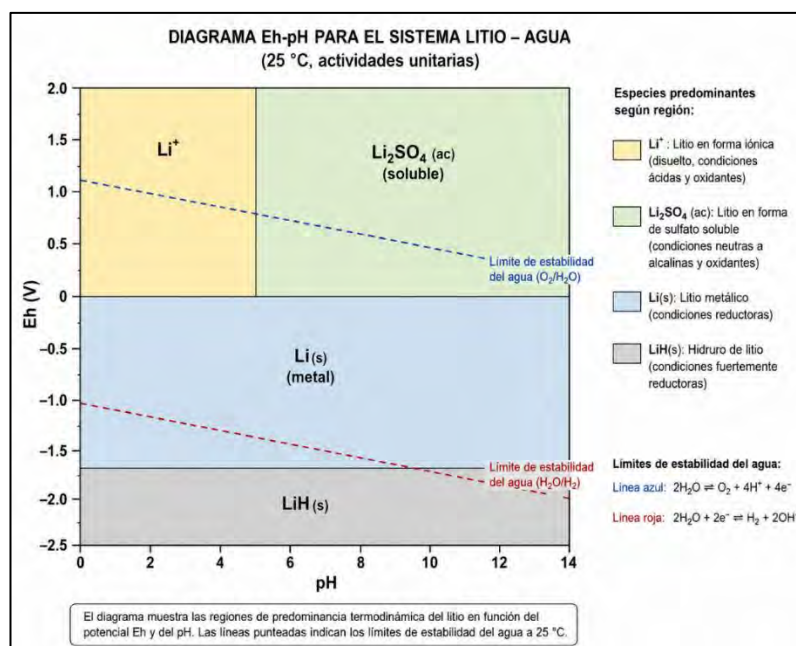
La lixiviación con ácido sulfúrico para litio se basa en reacciones de disolución ácida y conversión a sulfatos solubles (principalmente Li_2SO_4). La factibilidad termodinámica se evalúa mediante ΔG° (energía libre de Gibbs < 0 para espontaneidad), constantes de equilibrio, diagramas Eh-pH y modelos cinéticos (control por difusión, reacción química o mixto) (Beiza, 2023).

- ❖ **Constante de equilibrio** es un parámetro que indica la capacidad de una reacción química para disolver un metal y formar productos en estado de equilibrio. En la lixiviación del litio con ácido sulfúrico, esta constante permite determinar si la reacción favorece la formación de sulfato de litio soluble (Li_2SO_4), facilitando la recuperación del metal. Valores altos de la constante de equilibrio indican mayor eficiencia y espontaneidad en el proceso de lixiviación. (Beiza, 2023).
- ❖ **Diagrama Eh-pH** es una representación termodinámica que permite evaluar la estabilidad química de los elementos en función del potencial de oxidación-

reducción (Eh) y del pH de la solución. En la lixiviación del litio, este diagrama ayuda a identificar las condiciones adecuadas para favorecer la disolución y recuperación del metal, así como la formación de compuestos solubles o insolubles durante el proceso. (Beiza, 2023)

Figura 6

Diagrama Eh-pH para el sistema litio-agua



Fuente: Adaptado de Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications y Beiza (2023)

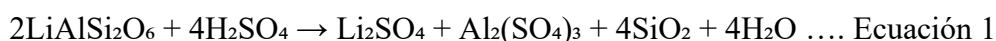
- ❖ **Modelos cinéticos** es una herramienta que permite describir y analizar la velocidad de las reacciones químicas durante el proceso de lixiviación. En la extracción de litio, este modelo ayuda a determinar los mecanismos que controlan la disolución del metal, los cuales pueden estar dominados por difusión, reacción química o un proceso mixto, permitiendo optimizar las condiciones de recuperación del litio (Beiza, 2023)
- ❖ **Pretratamiento térmico** (para espodumeno $\alpha \rightarrow \beta$ a $\sim 1000\text{-}1100$ °C): Cambia la estructura cristalina (de monoclinica a tetragonal), haciendo el Li más accesible al

ataque ácido, ya que en α -espodumeno el Li está en sitios tetraédricos estables y poco reactivos.

- ❖ **Sulfatación/lixiviación:** El mineral calcinado se mezcla con H_2SO_4 concentrado (96-98%) a 200-280 °C, formando Li_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y otros sulfatos. Luego, lixiviación acuosa a 50-90 °C disuelve Li^+ (recuperaciones >90-97% en condiciones óptimas).

- ❖ **Reacciones principales** (ej. espodumeno $\beta\text{-LiAlSi}_2\text{O}_6$):

Sulfatación:



Disolución: $\text{Li}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{Li}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ (alta solubilidad).....Ecuación 2

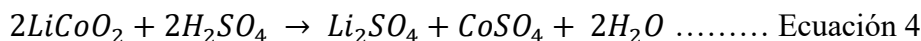
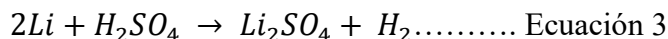
- ❖ **Cinética:** Modelos como Shrinking Core (control difusional o químico), ecuación de Arrhenius para E_a (energía de activación ~30-50 kJ/mol en muchos casos), dependiente de T, $[\text{H}_2\text{SO}_4]$, tiempo, % sólidos y tamaño de partícula.
- ❖ **Impurezas y selectividad:** Al, Fe, Mg, Ca se co-lixivian; se neutralizan con CaCO_3 o se separan por precipitación/filtración/nanofiltración. En arcillas o lepidolita, puede requerir aditivos (ej. HF o sales) para mejorar cinética.
- ❖ **Ventajas termodinámicas:** ΔG° negativo en condiciones ácidas y altas T favorece la disolución; sin embargo, consumo alto de energía (tostado) y ácido, generación de yeso (CaSO_4) y residuos. (Beiza, 2023)

- ❖ **Termodinámica del litio**

La termodinámica del litio proporciona una comprensión esencial sobre el comportamiento de este elemento en aplicaciones tecnológicas, especialmente en baterías de ion litio. Según (Rand, 2011) el estudio de la termodinámica es crucial para entender la cinética y la estabilidad de los materiales en las baterías de ion litio,

lo que a su vez contribuye a optimizar su rendimiento y durabilidad en condiciones de uso real.

Ecuación Química:

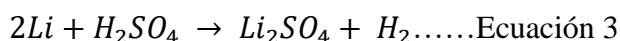


Determinando la ΔH , ΔG , ΔS de la ecuación 1 y 2

DATOS TERMODINÁMICOS ESTÁNDAR (298 K)			
Valores típicos de tablas (kJ/mol, J/mol·K):			
Sustancia	ΔH°	ΔG°	S°
Li(s)	0	0	29.1
H ₂ (g)	0	0	130.7
H ₂ O(l)	-285.8	-237.1	69.9
H ₂ SO ₄ (l)	-814.0	-690.0	156.9
Li ₂ SO ₄ (s)	-1436	-1280	164
CoSO ₄ (s)	-771	-680	115
LiCoO ₂ (s)	-734	-650	85

Fuente: Cuadro que muestra los datos termodinámicos a una temperatura de 298 K <https://es.slideshare.net/slideshow/pdf-tabladeentalpiasenergialibredegibbsyentropia-compress/250471153#1>

Desarrollando de la ecuación 3



Por lo tanto:

$$[Li_2SO_4 + H_2] - [2Li + H_2SO_4]$$

$$\Delta H^\circ = [(-1436) + 0] - [2(0) + (-814)] \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

$$\Delta H^\circ = -622 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ = \text{Exotermica}$$

$$\Delta G^\circ = [(-1280) + 0] - [2(0) + (-690)] \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

$$\Delta G^\circ = -590 \text{ kJ/mol}$$

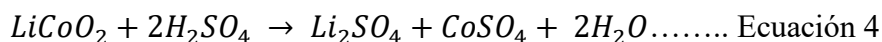
$$\Delta G^\circ = \text{Espontánea}$$

$$\Delta S^\circ = [(164 + 130.7)] - [2(29.1) + (156.9)] \dots\dots \text{Ecuación 7}$$

$$\Delta S^\circ = 294.7 - 215.1$$

$$\Delta S^\circ = +79.6 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Desarrollando la ecuación 4



Por lo tanto:

$$[\text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{CoSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}] - [\text{LiCoO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4]$$

$$\Delta H^\circ = [(-1436) + (-771) + 2(-285.8)] - [2(-814) + (-734)] \dots\dots \text{Ecuación 8}$$

$$\Delta H^\circ = -417 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ = \text{Exotermica}$$

$$\Delta G^\circ = [(-1280) + (-680) + 2(-237.1)] - [2(-690) + (-650)] \dots\dots \text{Ecuación 9}$$

$$\Delta G^\circ = (-2434.2) - (-2030)$$

$$\Delta G^\circ = -404 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S^\circ = [(164) + (115) + 2(69.9)] - [2(156.9) + (85)] \dots\dots \text{Ecuación 10}$$

$$\Delta S^\circ = 418.8 - 398.8$$

$$\Delta S^\circ = +20.0 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

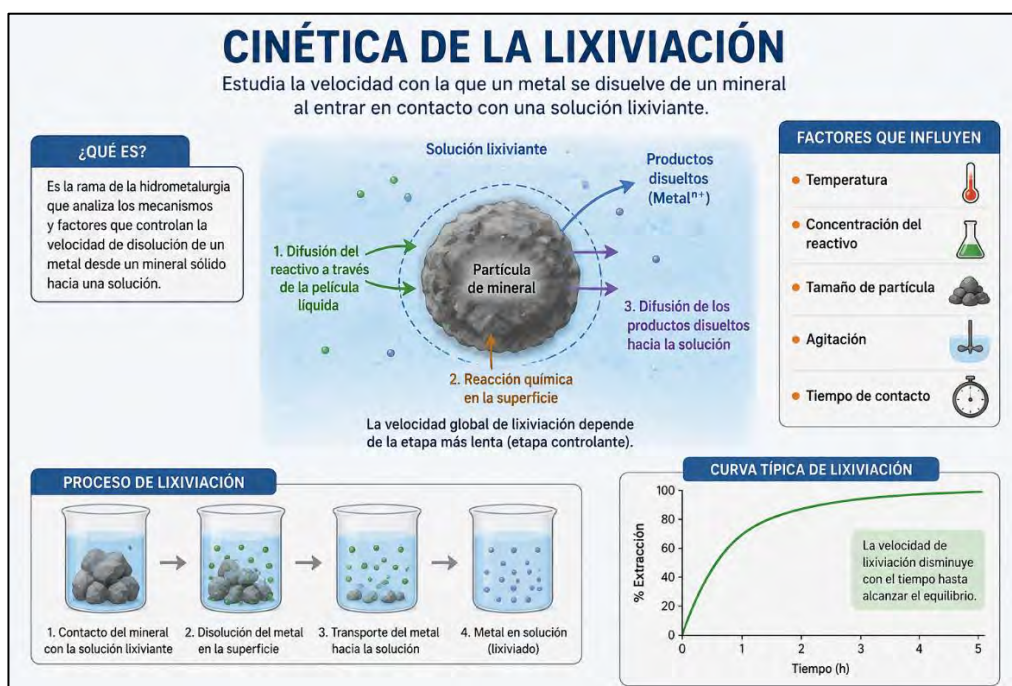
2.3.12 Cinética de la lixiviación

La cinética de la lixiviación estudia la velocidad con la que un metal contenido en un mineral se disuelve al entrar en contacto con una solución química denominada agente lixivante. Su análisis permite comprender los mecanismos que controlan el proceso de extracción metálica y determinar las condiciones óptimas para maximizar la recuperación del metal. En hidrometalurgia, la velocidad de lixiviación depende de diversos factores, entre ellos la temperatura, concentración del reactivo, tamaño de partícula, agitación y tiempo de reacción. Asimismo, el proceso puede estar controlado por fenómenos de difusión, transferencia de masa

o reacción química superficial, siendo importante identificar la etapa más lenta debido a que esta controla la velocidad global del sistema. (Habashi, 1999)

El estudio cinético resulta fundamental para el diseño y optimización de procesos industriales de extracción, ya que permite predecir el comportamiento del mineral frente al reactivo lixiviante y mejorar la eficiencia operativa. Además, el conocimiento de la cinética facilita la reducción de costos y tiempos de procesamiento, contribuyendo al desarrollo de tecnologías hidrometalurgias más eficientes y sostenibles. (Habashi, 1999)

Figura 7
Cinética de la lixiviación



Fuente: (Habashi, 1999)

2.3.13 Residuos de aparatos electrónicos RAEE

Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en el Perú incluyen baterías de iones de litio, que son considerados residuos peligrosos debido a su alta densidad energética ya la presencia de elementos tóxicos como níquel, cobalto y electrolitos

inflamables. Su manejo inadecuado puede provocar contaminación ambiental y riesgos de incendios, además de liberar sustancias tóxicas como metales pesados y gases venenosos, lo que hace imprescindible su correcta segregación, almacenamiento y disposición final conforme a la normativa vigente. La gestión adecuada de estas baterías contribuye a reducir la extracción de litio virgen, un recurso con alta demanda en la región (Decreto Supremo N° 009-2019-MINAM; Ministerio del Ambiente del Perú, 2019; estudios sobre reutilización y reciclaje de baterías de litio en América Latina). (Ministerio del Ambiente, 2019)

CAPITULO III: HIPOTESIS, VARIABLES E INDICADORES

3.1 HIPÒTESIS

3.1.1 Hipótesis General

- Se extrae litio a partir de bacterias ion-litio por lixiviación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.

3.1.2 Hipótesis Específicos-

- Con la adecuada concentración del ácido sulfúrico en la lixiviación para la extracción de litio a partir de bacterias ion-litio en el laboratorio de hidrometalurgia, mejorara el porcentaje de extracción de litio en la ciudad del Cusco.
- Con el tiempo necesario durante el proceso de extracción de litio a partir de bacterias ion-litio por lixiviación en el laboratorio de hidrometalurgia, se obtendrá mayor porcentaje de extracción de litio.
- Optimizando la temperatura adecuada en el proceso de extracción de litio a partir de bacterias ion-litio por lixiviación en el laboratorio de hidrometalurgia, se mejorará la extracción de litio.

3.2 VARIABLES

3.2.1 Identificación de Variables

Variable Dependiente

- Extracción de litio

Variable Independiente

- Las variables más importantes son:
 - Concentración de ácido sulfúrico
 - Tiempo de lixiviación
 - Temperatura

3.2.2 Operacionalización de Variables

Tabla 1 Operacionalización de variables

VARIABLES		DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR FINAL
Variable Dependiente	Extracción de litio	Es el proceso de separacion de litio atraves de metodos metalurgicos y Quimicos.	Se realiza mediante pruebas de Laboratorio Quimico-Metalurgico.	Metodo Analitico Experimental Lixiviacion	Porcentaje de Recuperacion	Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo
Variable Independiente	Concentracion del ácido sulfúrico	Es la valorizacion de acido sulfurico que se usara para extracción de litio.	Determinacion de la cantidad de acido sulfurico.	Preparacion de solucion	g/L	
	Tiempo de lixiviación.	Es la duracion del proceso de extracción de litio.	Determinacion de la duracion del proceso de extracción lixiacion	Cronometro	Horas	
	Temperatura	Son los grados centigrados necesarios para el proceso de extracción de litio.	Determinacion de los grados centigardos en el proceso de extracción de litio.	Termometro	°C	

Fuente: Propia del autor

3.3 INDICADORES

- Porcentaje de recuperación
- Gramos por litro
- Horas y Grados centígrados

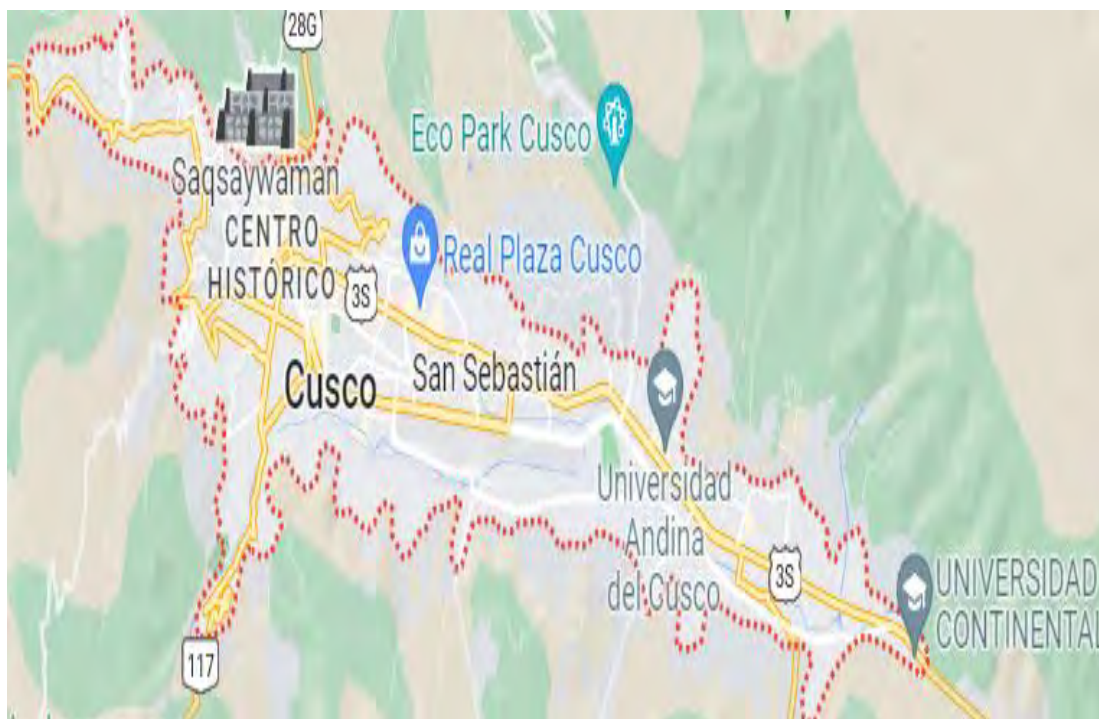
CAPITULO IV: METODOLOGÍA

4.1 **Ámbito del Estudio: Localización Política y Geográfica**

Este estudio sobre la extracción de litio a partir de baterías desechadas de celulares mediante lixiviación con ácido sulfúrico se llevó a cabo en los laboratorios de Procesamiento de Minerales y Análisis Químico de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC. Las muestras utilizadas se obtuvieron en la ciudad del Cusco.

Figura 8

Ubicación de la ciudad del Cusco



Fuente: Imagen adaptada de Google Earth

4.2 **Diseño de investigación: Método, tipo, alcance**

El diseño aplicado en el estudio a tratar es el experimental porque se manipula el comportamiento de las variables, a través de la lixiviación con ácido sulfúrico. Es decir, este diseño permite trabajar de forma simultánea con dos o más variables independientes, denominadas factores, en un mismo estudio. Esta investigación se llevó

a cabo de manera experimental, con el propósito de extraer litio por un proceso de lixiviación con ácido sulfúrico. En el presente estudio, se analizará la importancia relativa de las variables, así también desarrollando modelos matemáticos bajo el enfoque de “caja negra” Como se muestra en la tabla N° 2 se seleccionó el diseño factorial 2^k

Tabla 2 Diseño factorial 2^3

N	X ₁	X ₂	X ₃	Y
(1)	-	-	-	Y ₁
A	+	-	-	Y ₂
B	-	+	-	Y ₃
Ab	+	+	-	Y ₄
C	-	-	+	Y ₅
Ac	+	-	+	Y ₆
Bc	-	+	+	Y ₇
Abc	+	+	+	Y ₈

Fuente: Propia del autor

Donde X_1 , X_2 , X_3 son las variables independientes que corresponden a la concentración de ácido sulfúrico, la temperatura y el tiempo de lixiviación y “Y” viene a ser la variable que representa al porcentaje de extracción de litio mediante la lixiviación con ácido sulfúrico.

4.2.1 Método y Tipo de Investigación

Esta se clasifica como aplicada y/o tecnológica, orientada a resolver problemas prácticos mediante métodos científicos. Es de naturaleza explicativa, puesto que intenta establecer conexiones causales entre las variables analizadas con el fin de entender las razones de los eventos observados.

4.2.2 Alcance de Investigación

Las metodologías aplicadas en este estudio experimental incluyen:

- a) Analítico: Descomposición de un fenómeno en partes para su estudio individual, buscando un entendimiento detallado de cada componente.
- b) Deductivo: Se llega a obtener conclusiones específicas a partir de las teorías generales mediante la lógica y la evidencia.
- c) Experimental: Manipulación controlada de variables para observar sus efectos en otras variables.

4.3 Población de Estudio

4.3.1 Población

La población de la presente investigación estuvo conformada por aproximadamente 5 Kg de baterías ion-litio en desuso, recolectadas en diferentes puntos de acopio y residuos electrónicos de la ciudad del Cusco. Estas baterías constituyeron el material de estudio utilizado para el desarrollo de los análisis y pruebas experimentales relacionadas con el proceso de lixiviación para la recuperación de litio.

4.3.2 Muestra

Para el desarrollo experimental de la investigación se recolectó una población aproximada de 5 kg de aparatos electrónicos y baterías ion-litio en desuso provenientes de diferentes puntos de acopio de la ciudad del Cusco. Posteriormente, mediante un proceso de segregación, desmontaje y separación manual de los componentes de interés, se seleccionó únicamente el material correspondiente a las baterías ion-litio aptas para el proceso experimental. Utilizando una balanza de laboratorio para garantizar precisión en el pesado, se obtuvo una muestra homogénea de 150 g, equivalente al 3 % de la población total recolectada, la cual fue empleada en los ensayos de lixiviación con ácido sulfúrico.

Población total:

5 kg

Convirtiendo a gramos:

$$5 \text{ kg} \times 1000 = 5000 \text{ g}$$

Posteriormente, las baterías y aparatos electrónicos fueron sometidos a un proceso de clasificación y separación manual, donde únicamente se seleccionaron los componentes correspondientes a las baterías ion-litio útiles para el proceso de lixiviación.

Durante esta etapa, utilizando una balanza de laboratorio, se realizó el pesado del material seleccionado hasta obtener una muestra homogénea de 150 g

Cálculo de la muestra obtenida:

La cantidad de muestra seleccionada se determinó mediante:

$$M = P \times f$$

Donde:

M = muestra obtenida

P = población total recolectada

f = fracción seleccionada

Reemplazando:

$$M=5000 \times 0.03$$

$$M=150 \text{ g}$$

Por lo tanto, la muestra experimental utilizada representa el 3 % de la población total recolectada.

4.3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de nuestras muestras representativas se empleó la técnica de muestreo estadístico. Esto facilitará la evaluación precisa de parámetros como la media, la varianza y la desviación estándar.

➤ TÉCNICA

- Investigación bibliográfica.
- Pruebas experimentales de laboratorio.
- Recolección de información y procesamiento de datos.

➤ INSTRUMENTOS

- Revisión de páginas web y revisión de tesis
- Balanza, tijeras, cuchilla para baterías, arco de sierra, reactores, equipos y materiales de laboratorio, etc.
- Guías de análisis de observación, programa de diseño factorial 2^k (MINITAB Y EXCEL), Word.

4.4 Validez y confiabilidad de instrumentos

Se asegurarán mediante técnicas de muestreo estadístico que permitirán recolectar datos representativos y confiables para el estudio.

4.5 Plan de Análisis de datos

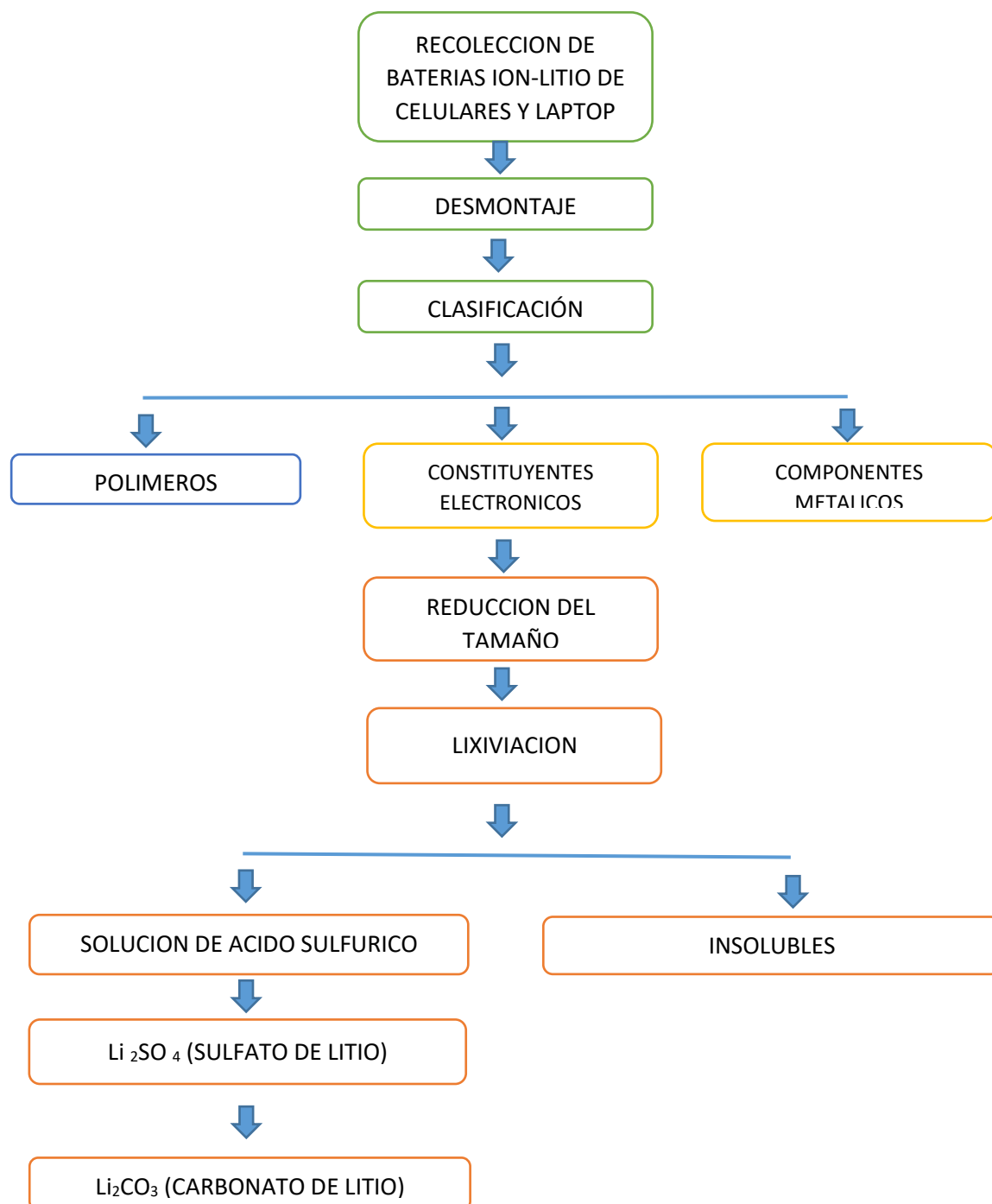
Se realizará mediante:

- Análisis Descriptivo: Observación del comportamiento de la muestra de litio durante la lixiviación con ácido sulfúrico.
- Análisis Exploratorio: Profundización en los datos para desarrollar un modelo cinético que describa adecuadamente el proceso observado.

CAPITULO V: PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

El diagrama a continuación ilustra el procedimiento de la fase experimental de la investigación.



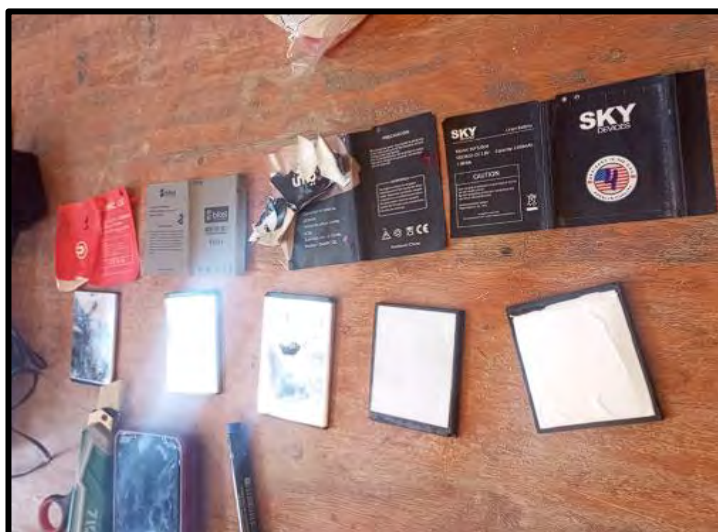
Fuente: Propio del autor

5.2 Recolección de Baterías Ion-litio de laptop y computadoras

La recopilación de baterías Ion-litio de celulares y laptop se llevó a cabo en la ciudad de Cusco, teniendo un total 15 baterías de celular y 5 de laptop donde se obtuvo un peso total de 5Kg, los cuales fueron desmantelados para analizar su composición y recuperar el litio presente.

Figura 9

Baterías Ion-litio recopiladas de celulares y laptop



Fuente: Propio del autor

Figura 10

Baterías Ion-litio obtenidas de celulares y laptop



Fuente: Propio del auto

5.3 Separación manual de elementos metálicos y polímeros.

Las baterías Ion-litio están compuestas por metales, polímeros y separadores y adhesivos, para lo cual se hizo una separación de forma manual, donde se utilizaron alicates, tijeras, arco de sierra y otros. Estas partes ocupan un aproximado de 30% del total de las baterías como se muestra en la figura 6.

Figura 11

Separación manual de Baterías Ion-litio



Fuente: Propio del autor

Figura 12

Baterías Ion-litio descascarada



Fuente: Propio del autor

Figura 13

Láminas de Ion-litio de celulares y laptop



Fuente: Propio del autor

5.4 Reducción del tamaño de las baterías o cátodo

Se reduce el tamaño mediante una operación manual cortando los cátodos hasta un tamaño menos de un centímetro, esto con el propósito de reducir el contenido de polímeros, y solo quedarnos con los componentes metálicos para su posterior análisis y extracción de litio.

Figura 14

Reducción de tamaño manualmente



Fuente: Propio del autor

Figura 15*Material reducido*

Fuente: Propio del autor

5.5 Análisis Químico

El análisis químico realizado tuvo como finalidad determinar la composición metálica presente en las baterías de ion-litio recolectadas, así como cuantificar la ley de cabeza correspondiente al contenido de litio en la muestra estudiada. Para ello, se obtuvo una muestra representativa de 150 g, la cual fue preparada y enviada al Laboratorio Analítico del Sur para su respectiva caracterización química.

Los resultados obtenidos permitieron identificar un contenido de litio equivalente al 4.05 %, valor que representa la concentración inicial del metal de interés presente en las baterías analizadas. Esta información constituye un parámetro fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación y establecer las condiciones adecuadas para la recuperación del litio durante el tratamiento hidrometalúrgico. Los resultados detallados del análisis se presentan en las Tablas N° 3 y N° 4

Tabla 3 Contenido metálico de batería Ion-litio

Elemento	Símbolo Químico	Función Principal	% en peso aproximado	Contenido por kWh (g/kWh aprox.)
Litio	Li	Ion activo (ánodo/cátodo)	1.5 – 2.5%	150 – 250 g
Níquel	Ni	Cátodo (energía y densidad)	4 – 10%	400 – 1000 g
Manganeso	Mn	Cátodo (estabilidad)	3 – 6%	300 – 600 g
Cobalto	Co	Cátodo (estabilidad térmica)	1 – 4%	100 – 400 g
Aluminio	Al	Colector de corriente (cátodo)	2 – 3%	200 – 300 g
Cobre	Cu	Colector de corriente (ánodo)	10 – 15%	1000 – 1500 g
Grafito (Carbono)	C	Material del ánodo	10 – 15%	1000 – 1500 g
Hierro	Fe	Presente en carcasas / estructuras	1 – 2%	100 – 200 g

Fuente: Cuadro que muestra los porcentajes de los compuestos presentes en las baterías ion-litio (Laboratorio Analíticos del sur, 2024)

Tabla 4 Contenido de litio en la muestra

PESO DE MUESTRA	NOMBRE DE MUESTRA	Li %
150gr	Baterías agotadas de Ion-litio	4.05

Fuente: Propio del autor

5.6 Pruebas exploratorias preliminares

Estas pruebas se realizaron con el fin de evaluar la influencia de las variables planteadas. Nuestras variables fueron: concentración de ácido sulfúrico, temperatura y tiempo de lixiviación.

CALCULOS PARA PRUEBAS PRELIMINARES CON 20 g DE MUESTRA DE IÓN-LITIO

Determinando el volumen operativo:

El reactor lixivante es una botella rolad (botella dama juana pequeña), el que supuestamente debe tener un galón americano (3.785 litros) sin embargo toda botella es distinto volumen muy cercana al galón indicado

Procedimiento:

- Se escoge una botella.
- Se le determina su volumen total, para lo cual se le llena de agua y 20 g de muestra de mineral, se le pone en forma horizontal, vertiéndose el exceso y quedando un volumen en la botella de 2.404 litros.
- Como volumen operativo se le aplica el factor de 80%, multiplicándose el valor anterior por 0.80

$$V_{Total} = 2.404 L (80\%)$$

$$V_{Total} = 2.404 L \frac{80}{100}$$

$$V_{Total} = 1.923 L$$

5.7 PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.7.1 Determinación del volumen de la solución lixivante y del agua

5.7.1.1 Titulación de ácido base para lixiviación

1. Tomamos una muestra de ácido sulfúrico de 1ml(alícuota), se depositó en un vaso precipitado, agitamos y homogenizamos

2. Agregamos una gota de indicador, anaranjado de metilo, de manera que la solución quede de color rosa, debido a la acidez de esta.
3. Para titular se utiliza una solución de NaOH a 1 N
4. Esta solución es agregada en una bureta graduada en centésimas de 50 ml, donde la función del NaOH es subir el pH el cual al principio se observa de color rosado, de esta manera al agregar gota a gota la solución NaOH se observará que al cambiar al color anaranjado se finalizará el proceso.

Por lo tanto, determinaremos la concentración del ácido con la siguiente expresión:

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = \frac{\text{ml de NaOH} * 49 * \text{Normalidad de NaOH}}{\text{Volumen de alicuota}}$$

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = \frac{8.163 * 49 * 1N \text{ NaOH}}{1 \text{ ml } H_2SO_4}$$

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = 400 \frac{g}{l} \text{ de } H_2SO_4$$

El ácido sulfúrico que utilizamos para nuestras pruebas experimentales tiene una concentración de 400g/l, expresado como 8.163 N. la cual se encontraba disponible en el laboratorio. A partir de esta solución concentrada se realizaron las respectivas diluciones para obtener concentraciones de 200 g/L y 100 g/L de H₂SO₄, empleadas durante el desarrollo de los ensayos de lixiviación y recuperación de litio en la investigación.

5.7.1.2 Preparación de ácido a concentración de 100 y 200g/l

A partir de la concentración del ácido sulfúrico de 400g/l, se determina la concentración a 100 y 200 g/l, las cuales son las variables con las que vamos a trabajar. Utilizaremos la ecuación.

CALCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE ACIDO SULFURICO A 100g/l

- $H_2SO_4 = 400g/l$
- $C_1 = 400g/l$
- $V_2 = 1923ml$
- $C_2 = 100 g/l$

DESARROLLO

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{\frac{100g}{l} * 1923ml}{\frac{400g}{l}}$$

$$V_1 = 480.75ml$$

- Por lo tanto, la cantidad de agua que agregaremos será:

$$H_2O = 1923ml - 480.75ml = 1442.25ml$$

CALCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE ACIDO SULFURICO A 200g/l

- $H_2SO_4 = 400g/l$
- $C_1 = 400g/l$
- $V_2 = 1923ml$
- $C_2 = 200 g/l$

DESARROLLO

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{\frac{200g}{l} * 1923ml}{\frac{400g}{l}}$$

$$V_1 = 961.5ml$$

- Por lo tanto, la cantidad de agua que agregaremos será:

$$H_2O = 1923ml - 961.5ml = 961.5ml$$

A partir de los datos obtenidos se construyó las siguientes tablas:

Tabla 5 Cantidad de ácido requerido a 100g/l de H_2SO_4

CONCENTRACION DE SOLIDOS	VOLUMEN ml	VOLUMEN DE H_2SO_4 ml	VOLUMEN DE H_2O ml
20%	1923	480.75	1442.25

Fuente: Propio del autor

Tabla 6 Cantidad de ácido requerido a 200g/l de H_2SO_4

CONCENTRACION DE SOLIDOS	VOLUMEN ml	VOLUMEN DE H_2SO_4 ml	VOLUMEN DE H_2O ml
20%	1923	961.5	961.5

Fuente: Propio del autor

5.7.2 Determinación de las condiciones de la cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación se desarrolló con la finalidad de estimar el tiempo de lixiviación. Los resultados se pueden observar en la Tabla N° 7

A. CONDICIONES OPERATIVAS

- Tiempo = 120 minutos
- Porcentaje de sólido = 20%
- Concentración de ácido sulfúrico = 400 g/l
- Ley de cabeza = 4.05%

- Peso del mineral = 150 gr

B. MATERIALES Y EQUIPOS

- Cronómetro
- Muestras de baterías agotadas de Ion-litio
- Agitador de...
- Reactivo H₂SO₄
- Pipeta
- Vaso precipitado
- Balanza
- Embudos
- Baqueta
- Termómetro
- Cocina eléctrica
- Olla de acero inoxidable

C. PROCEDIMIENTO

- Agregar la muestra al recipiente de acero inoxidable
- Vertimos agua seguidamente
- Vertimos el ácido sulfúrico posteriormente
- Colocamos un termómetro dentro del recipiente que sea visible
- Encendemos la cocina
- Tomamos el tiempo preestablecido a cada una de nuestras muestras
- Finalmente enviamos nuestras muestras a analizar

Figura 16

Lixiviación de litio con ácido sulfúrico



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7 Resultados de análisis químico en las pruebas de cinética de lixiviación

Tiempo de Lixiviación (min)	Li (g/l)	H ₂ SO ₄ Consumido g/l
60	2.437	278.61
60	2.666	282.22
60	2.690	282.05
60	2.867	284.95
120	2.567	279.39
120	2.769	283.61
120	2.743	282.77
120	2.994	285.67

Fuente: Laboratorio Analítico del Sur

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar que entre los 60 y 120 minutos de la prueba 2 y 7 la extracción de litio y el consumo de ácido sulfúrico no varía en gran proporción, es decir la recuperación es mínima.

5.7.3 Determinación del porcentaje de extracción de Litio

Con los datos obtenidos se determinará el porcentaje de extracción de litio, por lo cual primero determinaremos la cantidad de litio extraído, para que seguidamente obtengamos el valor porcentual de extracción de litio.

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

Solución para la prueba n° 1

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.437g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 4.686g$$

$Li_{Total} = \text{Peso del mineral} * \text{ley de cabeza}$

$$Li_{Total} = 150g * \frac{4.05}{100}$$

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{4.686g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 77.13$$

Solución para la prueba n° 2

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.666g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.1267g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.1267g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 84.39$$

Solución para la prueba n° 3

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixiviante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.690}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.1729g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.1729g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 85.15$$

Solución para la prueba n° 4

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixiviante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.867g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.5132g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.5132g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 90.75$$

Solución para la prueba n° 5

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixiviante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.567g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 4.936g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{4.936g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 81.256$$

Solución para la prueba n° 6

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixiviante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.769g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.325g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.325g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 87.65$$

Solución para la prueba n° 7

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.743g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.275g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.275g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 86.83$$

Solución para la prueba n° 8

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.994g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.757g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.757g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 94.765$$

Solución para la prueba n° 9

$$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.861g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.501g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°1

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.501g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 90.441$$

Solución para la prueba n° 10

$$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.880g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.538g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°10

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.538g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 91.04$$

Solución para la prueba n° 11

$Li_{extraido} = \text{Volumen de solución lixivante} * \text{concentración de litio}$

$$Li_{extraido} = 1.923Lt * \frac{2.805g}{Lt}$$

$$Li_{extraido} = 5.394g$$

El litio total será el mismo que obtuvimos en la solución de la prueba n°11

$$Li_{Total} = 6.075g$$

$$\%E = \frac{Li_{extraido}}{Li_{Total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{5.394g}{6.075g} * 100\%$$

$$\%E = 88.32$$

Tabla 8 Porcentaje de extracción de litio en las pruebas de cinética de lixiviación

Tiempo de Lixiviación (min)	Li (g/l)	Li _{extraído} (g)	Porcentaje de Litio extraído (%)
60	2.437	4.6860	77.13
60	2.666	5.1267	84.39
60	2.690	5.1729	85.15
60	2.867	5.5132	90.75
120	2.567	4.9360	81.26
120	2.769	5.3247	87.65
120	2.743	5.2750	86.83
120	2.994	5.7570	94.765
90	2.861	5.501	90.441
90	2.880	5.538	91.040
90	2.805	5.394	88.320

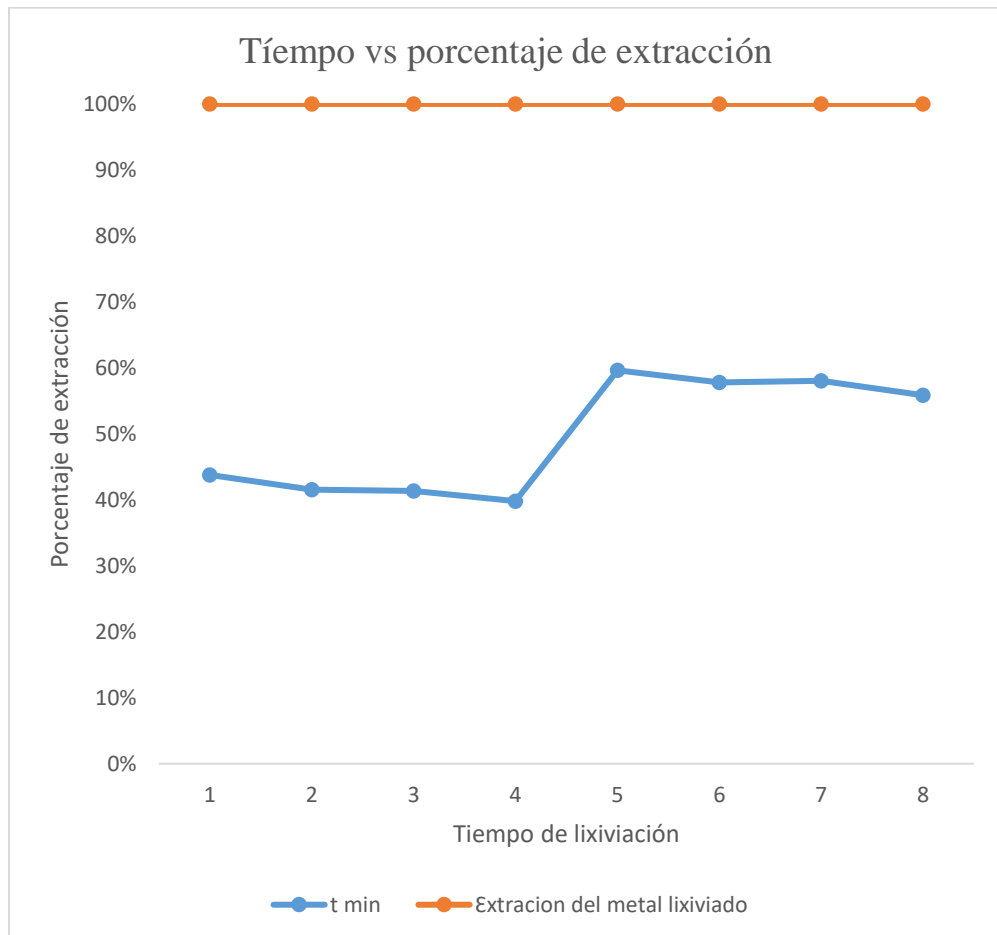
Fuente: Propia del autor

5.7.4 Determinación del tiempo óptimo de lixiviación

Determinaremos en qué tiempo se extrae el mayor porcentaje de litio.

Figura 17

Tiempo vs porcentaje de extracción



Fuente: Propia del autor

5.7.5 Determinación del modelo cinético

Entonces se utilizará el siguiente modelo matemático, ecuación:

$$\frac{1}{t} = 1 - 3(1 - X_B)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_B)$$

Por lo tanto, en la tabla n° 9 se muestra los valores de la ecuación matemática de difusión controlada para cada valor de la fracción del sólido reaccionado.

Tabla 9 Modelamiento matemático de difusión controlada

Tiempo min	Porcentaje de extracción de litio	X_B	$1 - X_B$	$\frac{1}{t} = 1 - 3(1 - X_B)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_B)$
60	77.13	0.7713	0.2287	2.981
60	84.39	0.8439	0.1561	2.260
60	85.15	0.8515	0.1485	2.194
60	90.75	0.9075	0.0925	1.750
120	81.26	0.8126	0.1874	2.549
120	87.65	0.8765	0.1235	1.988
120	86.83	0.8683	0.1317	2.054
120	94.765	0.94765	0.05235	1.460

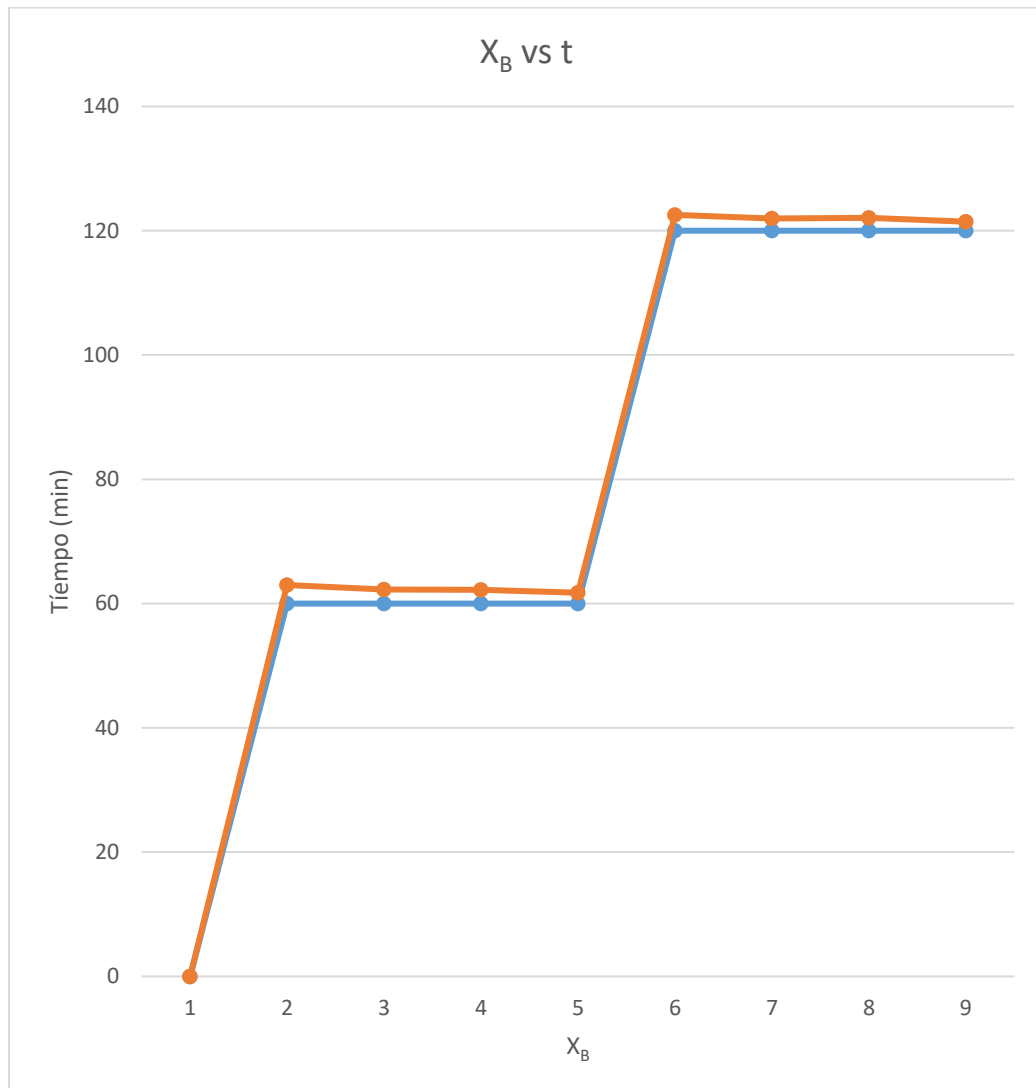
Fuente: Propia del autor

Donde:

τ = es el tiempo necesario para la conversión completa de una partícula

$1 - X_B$ = Fracción del sólido o material sin reaccionar

Figura 18
XB vs t en la etapa de difusión



Fuente: Propia del autor (Excel)

5.7.6 Determinación del consumo de ácido

Para determinar el consumo de ácido usamos la siguiente ecuación consumo de ácido= (concentración de ácido–concentración de ácido libre)

a) Para 60 minutos

$$\text{Consumo de ácido} = (400 - 278.61) * 0.6666 = 80.845$$

Realizando el mismo procedimiento para todas las variables, se tiene a continuación el siguiente cuadro:

Tabla 10 Relación de Consumo de ácido con concentración de litio

Tiempo (min)	Concentración de H ₂ SO ₄ g/l	Concentración de Li (g/l)	Consumo de ácido (g/L)	Relación de Consumo de ácido con concentración de litio
60	278.61	2.437	80.92	33.20
60	282.22	2.666	78.51	29.45
60	282.05	2.69	78.63	29.23
60	284.95	2.867	76.69	26.75
120	279.39	2.567	80.40	31.32
120	283.61	2.769	77.59	28.02
120	282.77	2.743	78.15	28.49
120	285.67	2.994	76.21	25.46
90	284.21	2.861	77.19	26.98
90	284.57	2.880	76.95	26.72
90	283.30	2.805	77.79	27.73

Fuente: Elaboración propia

5.8 PRUEBAS METALURGICAS DE LABORATORIO

PRUEBA N° 01

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico:100 g/L
- Tiempo de lixiviación: 60 min

Tabla 11 Condiciones Operativas 01

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	7.029 g/L	0.6666 L	4.686 g	77.13%
Residuo			1.389 g	22.87%

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 02

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico:200 g/L
- Tiempo de lixiviación: 60 min

Tabla 12 Condiciones Operativas 02

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	7.691g/L	0.6666 L	5.127 g	84.39%
Residuo			0.948 g	15.61 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 03

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico:100 g/L
- Tiempo de lixiviación: 60 min

Tabla 13 Condiciones Operativas 03

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	7.760 g/L	0.6666 L	5.173 g	85.15%
Residuo			0.902 g	14.85 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA Nª 04

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico:200 g/L
- Tiempo de lixiviación: 60 min

Tabla 14 Condiciones Operativas 04

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100 %
PLS	8.270 g/L	0.6666 L	5.513 g	90.75 %
Residuo			0.562 g	9.25 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA Nª 05

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico:100 g/L
- Tiempo de lixiviación: 120 min

Tabla 15 Condiciones Operativas 05

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100 %
PLS	7.406 g/L	0.6666 L	4.937 g	81.26 %
Residuo			1.138 g	18.74 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 06

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico: 200 g/L
- Tiempo de lixiviación: 120 min

Tabla 16 Condiciones Operativas 06

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	7.988 g/L	0.6666 L	5.325 g	87.65%
Residuo			0.750 g	12.35 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 07

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico: 100 g/L
- Tiempo de lixiviación: 120 min

Tabla 17 Condiciones Operativas 07

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	7.913 g/L	0.6666 L	5.275 g	86.83%
Residuo			0.800 g	13.17 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 08**CONDICIONES OPERATIVAS**

- Concentración de ácido sulfúrico: 200 g/L
- Tiempo de lixiviación: 120 min

Tabla 18 Condiciones Operativas 08

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	8.636 g/L	0.6666 L	5.757 g	94.77%
Residuo			0.318 g	5.23 %

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 09**CONDICIONES OPERATIVAS**

- Concentración de ácido sulfúrico: 150 g/L
- Tiempo de lixiviación: 90 min

Tabla 19 Condiciones Operativas 09

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100 %
PLS	8.636 g/L	0.666 L	5.501 g	90.441 %
Residuo			0.574	9.56%

Fuente: Propio del autor

PRUEBA N° 10

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de ácido sulfúrico: 150 g/L
- Tiempo de lixiviación: 90 min

Tabla 20 Condiciones Operativas 10

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	8.308 g/L	0.6666 L	5.538 g	91.040 %
Residuo			0.537	8.96%

Fuente: Propio del autor

PRUEBA Nª 11**CONDICIONES OPERATIVAS**

- Concentración de ácido sulfúrico: 150 g/L
- Tiempo de lixiviación: 90 min

Tabla 21 Condiciones Operativas 11

PRODUCTO	LEY	PESO DEL MATERIAL	CONTENIDO DE LITIO	PORCENTAJE DE EXTRACCION
Alimento	4.05%	150 g	6.075 g	100%
PLS	8.092 g7L	0.6666 L	5.394 g	88.320 %
Residuo			0.681	11.68%

Fuente: Propio del autor

CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Resultados y discusión

Se realizó un análisis químico de una muestra de 150 gr de material para la determinación de porcentaje de litio presente en el Laboratorio Analítico del Sur, donde se obtuvo un resultado de ley de litio, considerando muestras líquidas y sólidas, lo que muestra un alto contenido de litio presente en las baterías y hace factible su extracción por lixiviación.

Para determinar la cantidad de ácido en el proceso de lixiviación se realizaron pruebas preliminares, considerando un promedio de 150 g/L de H_2SO_4 , donde se pudo observar de acuerdo a las variables que su consumo en el proceso es de forma rápida, haciendo pruebas en distintos tiempos.

Realizando los cálculos de diseño factorial, a partir de los cuales es posible determinar los efectos de las variables involucradas:

- El efecto de la concentración de H_2SO_4 considerando un consumo 285.67, lo que indica que al incrementar la concentración de 100 g/L a 200g/L, se observa un aumento significativo en la recuperación de litio de las baterías. Por lo tanto, esta variable se considera como la de mayor impacto en el proceso de lixiviación.
- El efecto de la temperatura es de 60°C, considerando 2 tiempos de prueba de 20°C y 60°C, se da un mayor porcentaje de extracción de litio por lixiviación, lo que indica la relevancia de esta variable en el proceso de extracción.
- El efecto de tiempo es de 60(min), se considera esta variable con menor importancia en el proceso de lixiviación para la extracción de litio, teniendo menor relevancia.

- El efecto que se la de la interacción entre las variables de concentración de H₂SO₄ en g/L y la temperatura(T°), se observa un efecto positivo para en incremento de la extracción de litio.
- El efecto de la interacción de concentración de H₂SO₄ en g/L y el tiempo (min) muestra un efecto moderado, teniendo en cuenta que el tiempo incrementa de manera ligera el porcentaje de extracción.
- El efecto de la temperatura en °C y el tiempo(min), tiene un impacto menos pronunciado en comparación con las otras interacciones, considerando que no tiene gran relevancia en el porcentaje de extracción.
- El efecto de la interacción entre la concentración de ácido sulfúrico, la temperatura y el tiempo de lixiviación. Se puede decir que la variable con mayor influencia en el proceso de lixiviación para recuperar litio de baterías en el ácido sulfúrico, teniendo mayor relevancia en el porcentaje de extracción de litio.

6.2 Matriz de análisis y discusión de resultados por medio de Minitab

Para analizar y discutir los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se utilizó un diseño factorial 2^3 con tres réplicas en el punto central. La información generada se detalla en la tabla 22. Los porcentajes de extracción de litio obtenidos en cada prueba experimental fueron utilizados para construir esta matriz, la cual resume las condiciones experimentales y las respuestas obtenidas en el proceso de recuperación de litio a partir de baterías de ion-litio, utilizando el proceso de lixiviación con ácido sulfúrico.

Las variables codificadas (X1, X2, X3) corresponden a las condiciones reales del diseño factorial, que incluyen la concentración de ácido sulfúrico (g/L), la temperatura del proceso (°C) y el tiempo de lixiviación (min). Estas pruebas experimentales se planificaron considerando diferentes combinaciones de los tres

factores según el diseño factorial, con el objetivo de identificar su impacto en la eficiencia de extracción de litio.

El software Minitab fue utilizado para generar y analizar la matriz, convirtiéndose en una herramienta esencial para procesar los datos y realizar un análisis estadístico de los resultados. Este diseño factorial no solo permitió evaluar los efectos individuales de cada variable, sino también las interacciones entre ellas, ofreciendo un panorama más completa y detallada del proceso.

Gracias a esta metodología, se logró identificar de manera fundamentada los factores que más influyen en la extracción de litio, facilitando una interpretación clara y bien sustentada de los resultados.

Tabla 22 Matriz de diseño factorial y las respuestas

Prueba	Variables codificadas			Variables reales		% Extracción Y	
	X1	X2	X3	[H ₂ SO ₄] (g/l)	T (°C)		T (min)
1	-1	-1	-1	100	20	60	77.13
2	+1	-1	-1	200	20	60	84.39
3	-1	+1	-1	100	60	60	85.15
4	+1	+1	-1	200	60	60	90.75
5	-1	-1	+1	100	20	120	81.26
6	+1	-1	+1	200	20	120	87.65
7	-1	+1	+1	100	60	120	86.83
8	+1	+1	+1	200	60	120	94.77
9	0	0	0	150	40	90	90.44
10	0	0	0	150	40	90	91.04
11	0	0	0	150	40	90	88.32

Fuente: Elaboración propia

Matriz del diseño para cada prueba experimental y los resultados de cada prueba experimental. Tomado de la data del Software MINITAB.

Según los datos de la tabla 10, la prueba experimental número 8 logró la mayor extracción de litio a partir de baterías de ion-litio en la ciudad de Cusco, alcanzando un porcentaje de 94.77%. Este rendimiento se obtuvo bajo las siguientes condiciones de operación: una concentración de ácido sulfúrico ($[H_2SO_4]$) de 200 g/L, una temperatura de 60 °C y un tiempo de proceso de 120 minutos.

Sin embargo, los resultados reflejados en la tabla 10 no permiten determinar con precisión el grado de incidencia de cada factor ni sus interacciones en la eficiencia del proceso. Por ello, resulta fundamental realizar un análisis estadístico detallado de los datos obtenidos, a fin de comprender mejor la influencia de las variables evaluadas y optimizar el proceso de lixiviación.

6.3 Análisis de los resultados del proceso de lixiviación

Se realizó un análisis de los resultados con el software Minitab, para identificar las variables más influyentes en la extracción de litio y las interacciones entre ellas. Este análisis incluyó un ANOVA para determinar la significancia estadística de los factores y sus interacciones, así como la obtención de un modelo matemático y de correlación para optimizar el proceso. Además, se generaron gráficos de superficies de respuesta para visualizar el impacto de las variables en la extracción de litio. Los resultados y sus interpretaciones se desarrollan en detalle en las secciones siguientes.

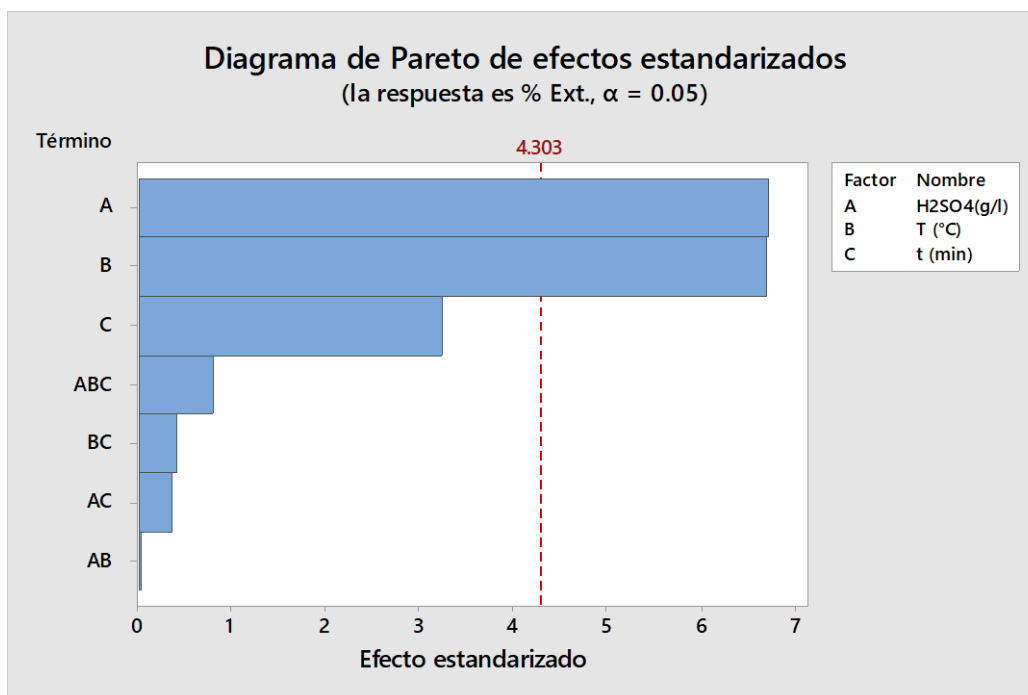
6.3.1 Análisis de los resultados según el diseño factorial 2^3

Las variables seleccionadas se eligieron considerando su potencial influencia en el proceso de recuperación de litio mediante lixiviación ácida a partir de baterías de ion-litio en la ciudad de Cusco. Para determinar el grado de impacto de cada variable en la eficiencia de

recuperación, se llevó a cabo un análisis de efectos empleando un diagrama de Pareto, presentado en la figura 19.

Figura 19

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



Fuente: Elaboración propia

Nota. A= [H₂SO₄] (g/l), B = T (°C) y C = t(min). Tomado de la data de Minitab.

En la figura 19 se observa que los efectos estandarizados de los factores [H₂SO₄] (g/l) y T (°C) superan el nivel de significancia establecido en 4.303, lo que indica que estos factores tienen una alta incidencia en el proceso. En contraste, el factor t (min) no muestra un impacto significativo, ya que no alcanza el umbral de significancia del modelo, lo mismo ocurre con las interacciones entre los factores.

Para confirmar los resultados mostrados en el diagrama de Pareto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar con mayor precisión el nivel de influencia de los factores individuales y sus interacciones en el proceso. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 22.

Tabla 23 Análisis de varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	241.251	30.1563	14.77	0.065
Lineal	3	205.429	68.4762	33.53	0.029
H2SO4(g/l)	1	92.412	92.4120	45.25	0.021
T (°C)	1	91.598	91.5981	44.85	0.022
t (min)	1	21.419	21.4185	10.49	0.084
Interacciones de 2 términos	3	0.629	0.2095	0.10	0.951
H2SO4(g/l)*T (°C)	1	0.002	0.0015	0.00	0.981
H2SO4(g/l)*t (min)	1	0.270	0.2701	0.13	0.751
T (°C)*t (min)	1	0.357	0.3570	0.17	0.716
Interacciones de 3 términos	1	1.288	1.2880	0.63	0.510
H2SO4(g/l)*T (°C)*t (min)	1	1.288	1.2880	0.63	0.510
Curvatura	1	33.906	33.9055	16.60	0.055
Error	2	4.084	2.0421		
Total	10	245.335			

Fuente: Propia del autor

En la tabla 23 se tiene los resultados del análisis estadístico de la varianza. Tomado de la data de Minitab.

En la tabla 23 se observa que, para que las variables y sus interacciones sean significativas, deben presentar un valor de p inferior a 0.05. El análisis de los valores p revela que únicamente la concentración de [H₂SO₄] (g/l) y la temperatura (T °C) son factores estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95%, ya que poseen valores de p menores a 0.05. Por otro lado, el tiempo del proceso (t) y las interacciones muestran valores de p por debajo del umbral de significancia, lo que indica que su efecto en el proceso es poco relevante.

Para evaluar la calidad del ajuste del modelo estadístico a los datos experimentales, se elaboró un resumen del modelo. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 24.

Tabla 24 Resumen del modelo en función de s y R

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.42903	98.34%	91.68%	*

Fuente: Propia del autor

La tabla 24 contiene un resumen del modelo estadístico en función a la desviación estándar y el factor de correlación. Tomado de la data de Minitab.

El modelo presenta un alto nivel de ajuste estadístico, con un R-cuadrado de 98.34% y un R-cuadrado ajustado de 91.68%, lo que indica que explica gran parte de la variabilidad observada en los datos experimentales. No obstante, la ausencia de un valor de R-cuadrado de predicción señala la necesidad de evaluar la capacidad del modelo para generalizar fuera del conjunto de datos utilizados en el análisis.

Adicionalmente, el análisis de significancia estadística de las variables, basado en los valores p previamente discutidos, sugiere que el modelo podría estar considerando factores o interacciones que no son estadísticamente relevantes. Por ello, es imprescindible revisar el modelo para eliminar estos elementos no significativos, optimizar su estructura y realizar validaciones adicionales que aseguren su robustez y capacidad predictiva en el contexto del proceso de lixiviación.

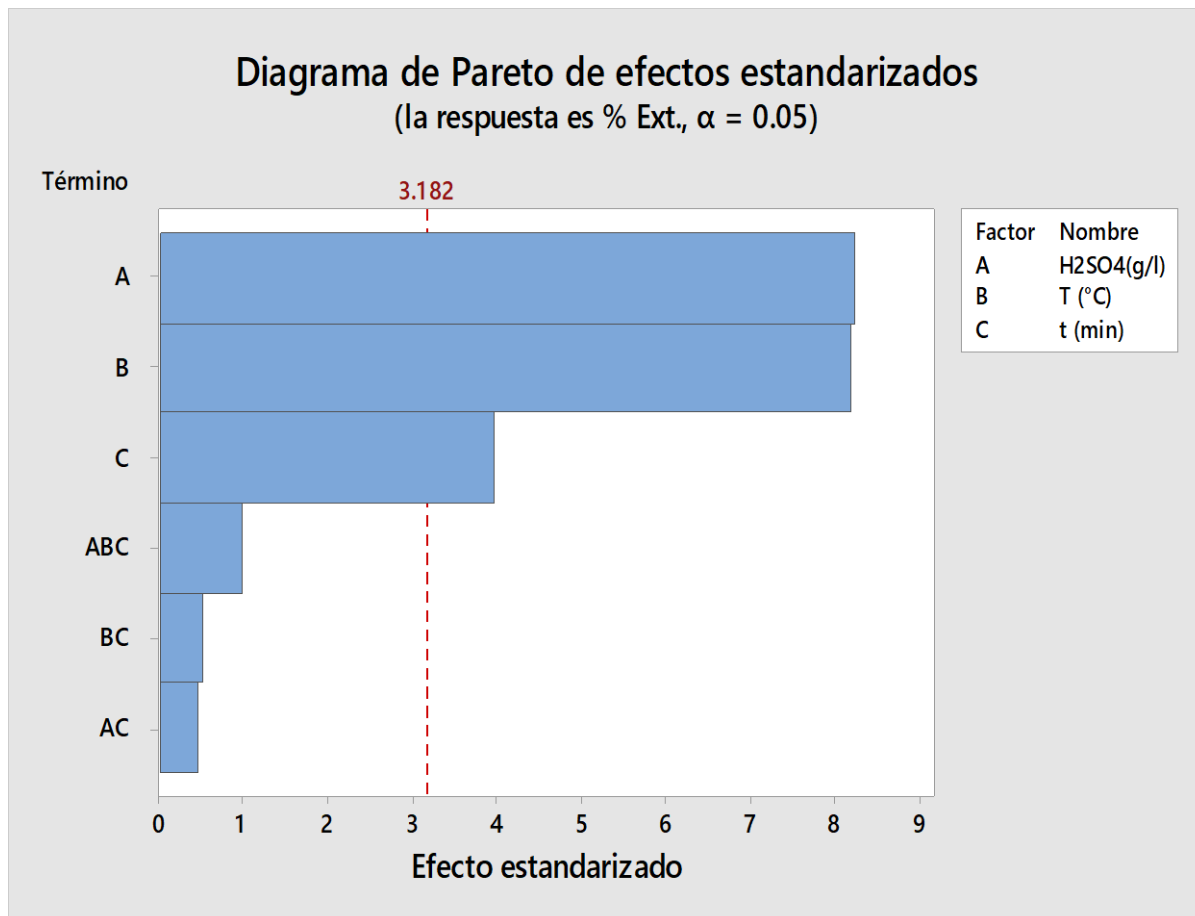
6.3.2 Nuevo análisis de los resultados previo una corrección en el modelo

A partir del análisis de la tabla 24, se concluye que es necesario realizar ajustes para optimizar el modelo estadístico. En particular, se ha identificado que la interacción entre las variables concentración de $[H_2SO_4]$ (g/l) y T ($^{\circ}C$) tiene un impacto mínimo en el proceso de lixiviación de las pilas de ion-litio. Por ello, se recomienda excluir esta interacción del análisis con el objetivo de mejorar la precisión y confiabilidad del modelo. Los resultados obtenidos tras este ajuste se presentan en los ítems siguientes:

6.3.2.1 Diagrama de Pareto después de ajuste realizado

Figura 20

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y ajustados



Fuente: Propia del autor

La figura 20 muestra los efectos de A = [H₂SO₄] (g/l), B = T (°C) y C = t (min) tras realizar un ajuste estadístico, basado en los datos procesados con el software Minitab.

El diagrama de Pareto de la figura 18 muestra los efectos estandarizados de las variables y sus interacciones en el proceso experimental de lixiviación para la extracción de litio. Los factores [H₂SO₄] y T (°C) destacan como las variables de mayor impacto, ya que sus efectos superan el umbral de significancia ($\alpha = 0.05$), establecido en 3.182. Esto indica que ambas variables tienen una influencia estadísticamente significativa en el porcentaje de extracción de litio. Por otro lado, el tiempo (t) presenta un efecto menor y no alcanza el nivel de significancia,

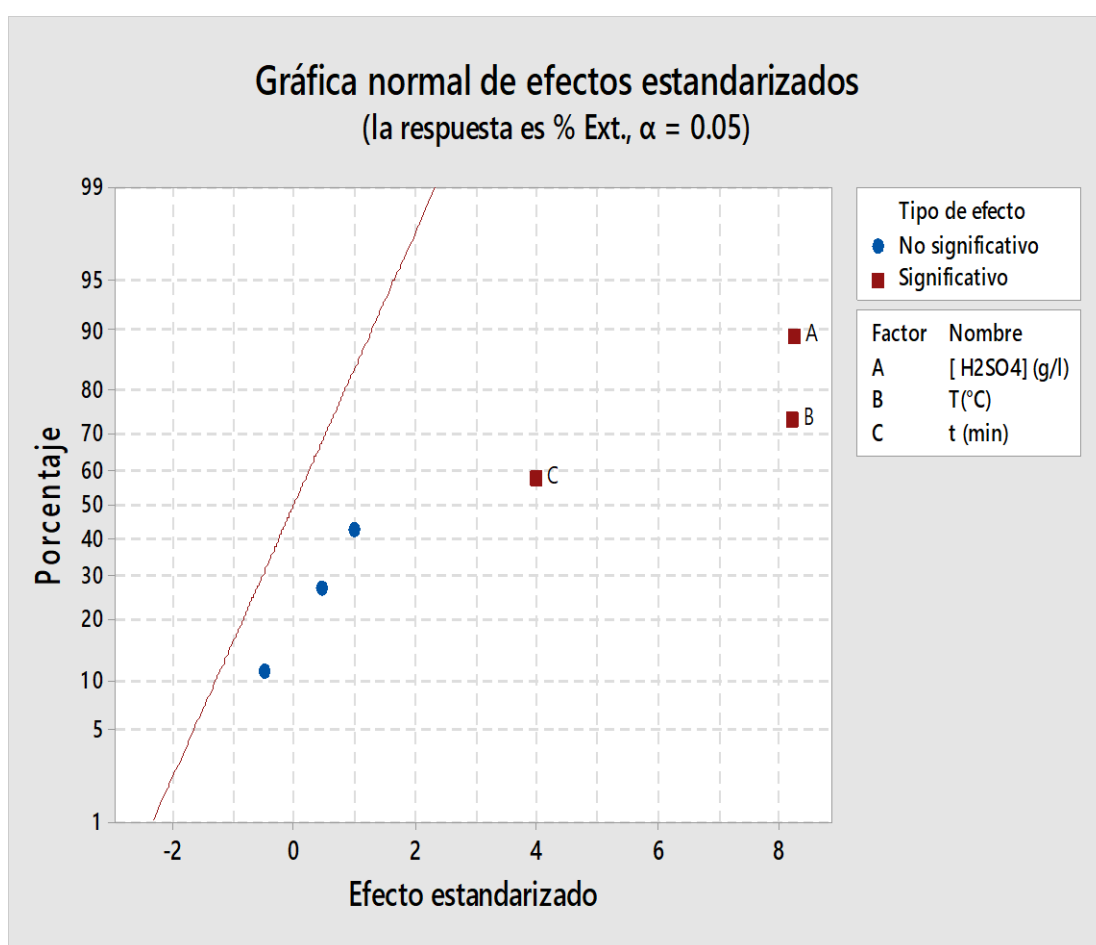
lo que sugiere que su contribución al proceso, aunque presente, es limitada y no crítica dentro de los rangos estudiados.

En cuanto a las interacciones entre variables ($[H_2SO_4]$ t (min), T ($^{\circ}C$) t (min), $[H_2SO_4]$ T t), estas no superan el nivel de significancia, evidenciando que los efectos combinados de las variables no tienen un impacto relevante en la variabilidad de los resultados.

6.3.2.2 Gráfica normal de los efectos en la extracción de Litio

Figura 21

Gráfica normal de los efectos estandarizados



Fuente: Propia del autor

Representación de la normal de los efectos los efectos de A = $[H_2SO_4]$ (g/l), B = T ($^{\circ}C$) y C = t (min) tras realizar un ajuste estadístico, basado en los datos procesados con el software Minitab.

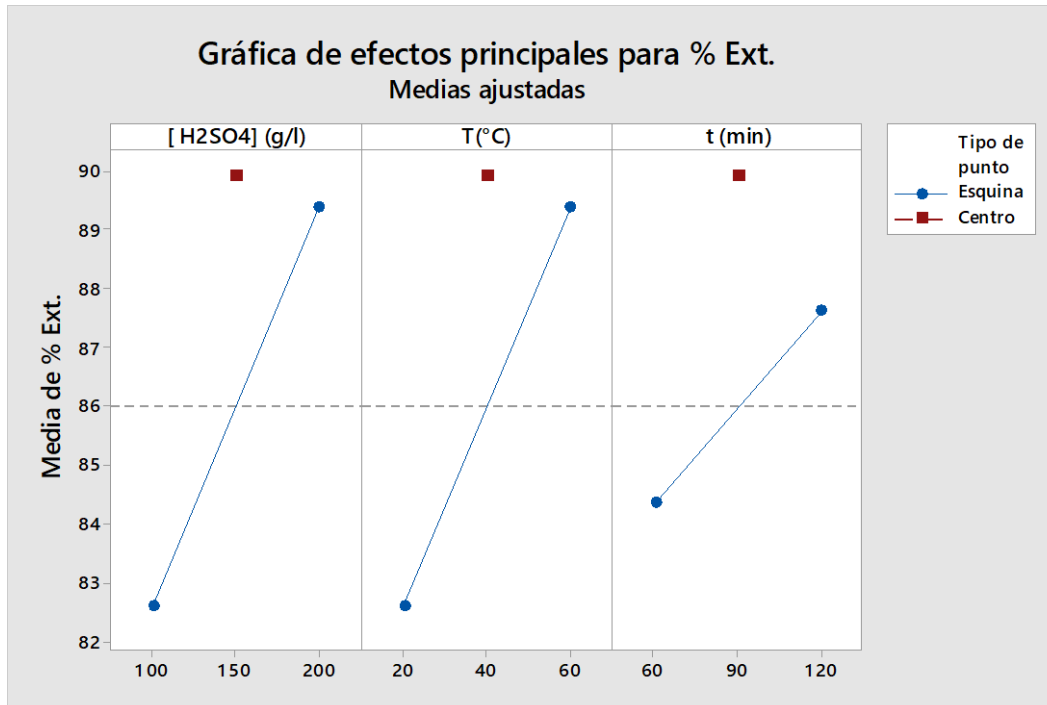
La figura 21 proporciona información sobre la influencia de los factores evaluados en el porcentaje de extracción de litio. En ella, se aprecia que los factores **[H₂SO₄] (g/L)** (A) y **Temperatura (T°C)** (B) son los más significativos, ya que sus puntos se ubican lejos de la línea de referencia, indicando una alta influencia en el proceso de lixiviación. En particular, la concentración de ácido destaca como el factor de mayor impacto, seguido por la temperatura.

Por otro lado, el **tiempo del proceso (t, en minutos)** (C) se identifica como no significativo, debido a su proximidad con la línea de referencia, lo que sugiere que, dentro de los rangos evaluados, su influencia en la eficiencia de extracción de litio es mínima. Asimismo, ninguna de las interacciones entre los factores muestra un efecto significativo, indicando que los efectos combinados no contribuyen de manera relevante al resultado del proceso.

6.3.2.3 Análisis de los efectos principales de cada variable en la extracción de litio

Figura 22

Gráfica de los efectos principales para la extracción de litio



Fuente: Propia del autor

La figura representa los efectos principales de $A = [\text{H}_2\text{SO}_4]$ (g/l), $B = T$ ($^{\circ}\text{C}$) y $C = t$ (min) en la extracción de litio tras realizar un ajuste estadístico, basado en los datos procesados con el software Minitab.

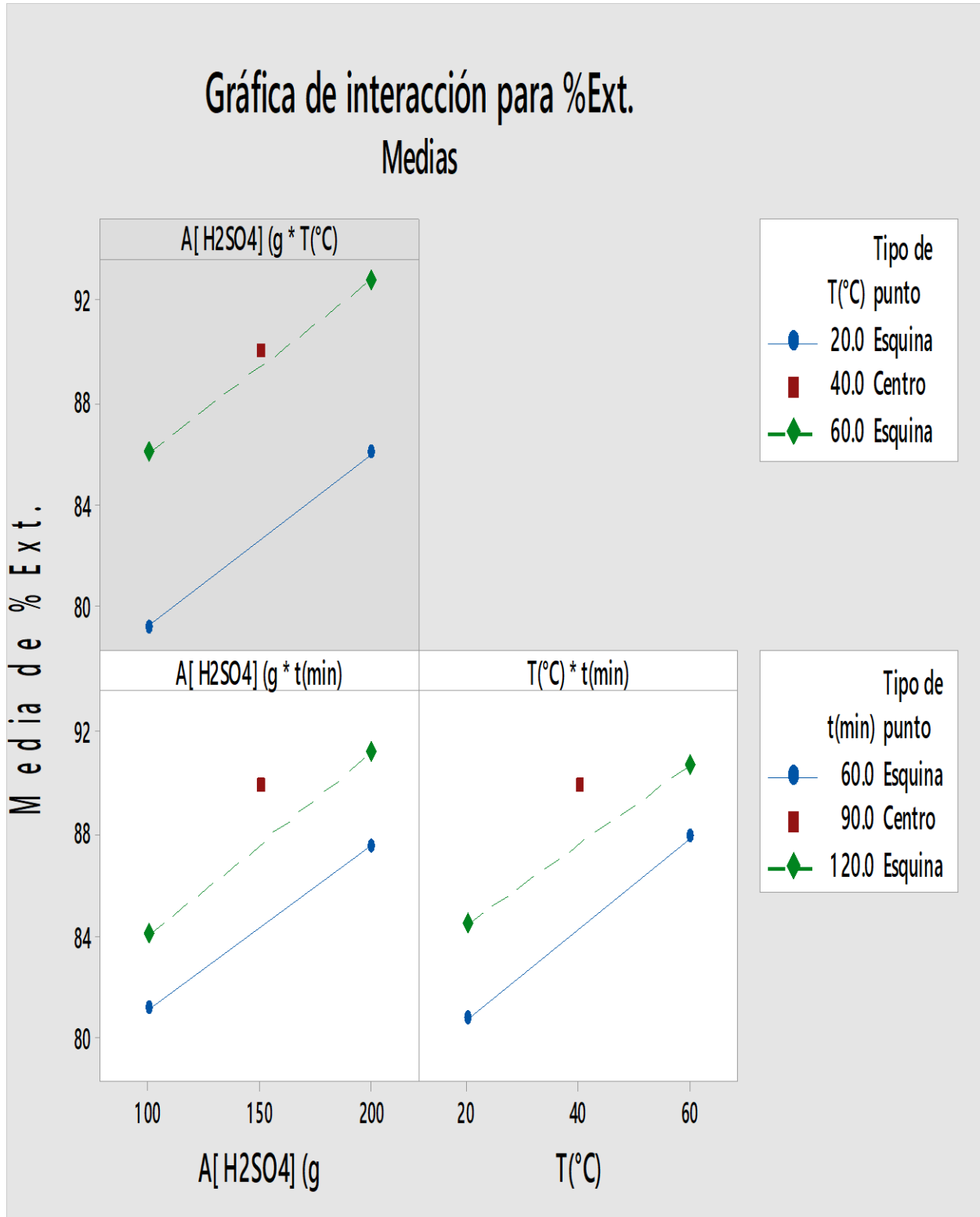
La figura 22 muestra cómo las variables concentración de H_2SO_4 (g/L), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y tiempo (t , en minutos) influyen en el porcentaje de extracción de litio (% Ext.) en el proceso de lixiviación. Se observa que tanto la concentración de H_2SO_4 como la temperatura tienen una relación positiva con la extracción de litio, es decir, a medida que aumentan estos factores, también lo hace el porcentaje de extracción. En particular, la concentración de H_2SO_4 y la temperatura muestran un mayor impacto en la mejora de la eficiencia del proceso, ya que un incremento en estos factores resulta en un aumento considerable en el porcentaje de extracción de litio.

Por otro lado, el tiempo de lixiviación, aunque también tiene una relación positiva con el porcentaje de extracción, muestra un efecto más limitado. A medida que se incrementa el tiempo, el porcentaje de extracción también aumenta, pero no de manera tan significativa como ocurre con la concentración de ácido y la temperatura.

6.3.2.4 Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción de litio

Figura 23

Grafica de incidencia de las interacciones de las variables en la extracción de litio



Fuente: Propia del autor

La figura 23 representa los efectos principales de las interacciones de los factores A = [H₂SO₄] (g/l), B = T (°C) y C = t (min) en la extracción de litio tras realizar un ajuste estadístico, basado en los datos procesados con el software Minitab.

La figura analiza las interacciones entre las variables independientes ([H₂SO₄] en g/L, T en °C y t en minutos) y su influencia en el porcentaje de extracción (% Ext.). En la interacción entre la concentración de [H₂SO₄] y la temperatura (T), se observa un efecto positivo significativo: al incrementar ambas variables, el % Ext. aumenta considerablemente, lo que evidencia que su combinación tiene un impacto relevante en el proceso. Por otro lado, la interacción entre la concentración de [H₂SO₄] y el tiempo (t) muestra un efecto moderado; aunque el tiempo incrementa ligeramente el % Ext., su interacción con la concentración no amplifica sustancialmente los resultados, como se refleja en las líneas relativamente paralelas. Finalmente, la interacción entre la temperatura y el tiempo tiene un impacto menos pronunciado, con una pendiente más suave que indica una influencia combinada discreta en comparación con las otras interacciones.

6.3.2.5 Análisis de varianza

Tabla 25 Análisis de varianza (ANOVA) ajustada

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	241.249	34.4642	25.31	0.011
Lineal	3	205.429	68.4762	50.28	0.005
[H ₂ SO ₄] (g/l)	1	92.412	92.4120	67.85	0.004
T(°C)	1	91.598	91.5981	67.26	0.004
t (min)	1	21.419	21.4185	15.73	0.029
Interacciones de 2 términos	2	0.627	0.3136	0.23	0.807
[H ₂ SO ₄] (g/l)*t (min)	1	0.270	0.2701	0.20	0.686
T(°C)*t (min)	1	0.357	0.3570	0.26	0.644
Interacciones de 3 términos	1	1.288	1.2880	0.95	0.403
[H ₂ SO ₄] (g/l)*T(°C)*t (min)	1	1.288	1.2880	0.95	0.403
Curvatura	1	33.906	33.9055	24.90	0.015
Error	3	4.086	1.3619		
Falta de ajuste	1	0.002	0.0015	0.00	0.981
Error puro	2	4.084	2.0421		
Total	10	245.335			

Fuente. Propio del autor

En la tabla se tiene los resultados del análisis estadístico de la varianza corregida. Tomado de la data de Minitab.

La tabla 25 muestra que el modelo general es estadísticamente significativo (valor $p = 0.011$), lo que indica que las variables independientes y sus combinaciones explican de manera adecuada la variación en el porcentaje de extracción (% Ext.) de litio. Entre los efectos principales, la concentración de ácido sulfúrico ($[H_2SO_4]$) y la temperatura (T) tienen una influencia altamente significativa en el proceso, con valores p de 0.003 y 0.004 respectivamente, mientras que el tiempo (t) también es relevante, pero con un impacto menor (valor $p = 0.029$).

En cuanto a las interacciones, tanto las de segundo orden ($[H_2SO_4]*t$ y $T*t$) como la de tercer orden ($[H_2SO_4]*T*t$) no resultan significativas, ya que presentan valores p superiores a 0.05 (0.807, 0.644 y 0.403 respectivamente). Esto sugiere que los efectos combinados entre estas variables no contribuyen de forma relevante al aumento del porcentaje de extracción.

Sin embargo, la curvatura del modelo es significativa (valor $p = 0.014$), lo cual indica que la relación entre las variables independientes y la respuesta no es completamente lineal, sugiriendo la posibilidad de efectos cuadráticos o más complejos en el sistema. Además, el análisis muestra que no existe falta de ajuste significativa (valor $p = 0.980$), lo que confirma que el modelo ajustado describe adecuadamente los datos experimentales.

Aunque el modelo es estadísticamente válido, podría ser útil explorar términos no lineales adicionales para mejorar la precisión del ajuste y optimizar el proceso.

Para validar todo el análisis después del ajuste realizado, se procede a determinar un resumen del modelo ajustado en función de s y R , los resultados se muestran en la tabla 26.

Tabla 26 Resumen del modelo ajustado en función a R

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.16702	98.33%	94.45%	96.21%

Fuente: Propia del autor

Resumen modelo ajustado. Según el software Minitab.

De la tabla 26, que muestra el modelo ajustado, proporciona indicadores importantes sobre la calidad del ajuste del modelo experimental. Los resultados son los siguientes:

1. Desviación estándar (S): El valor de 1.16702 refleja la variabilidad de los datos alrededor de los valores ajustados por el modelo. Un valor bajo indica que las predicciones del modelo están estrechamente alineadas con los datos experimentales.
2. Coeficiente de determinación (R-cuadrado): el valor de 98.33% indica que el modelo explica el 98.33% de la variabilidad en la respuesta de la extracción de litio a partir de las baterías ion-litio. Esto sugiere un excelente ajuste general del modelo a los datos experimentales.
3. R-cuadrado ajustado: el valor de 94.45% ajusta el R-cuadrado al número de variables en el modelo, discriminando por incluir factores irrelevantes. Este valor sigue siendo alto, lo que confirma que las variables incluidas en el modelo son relevantes para explicar la variabilidad en los resultados.
4. R-cuadrado predicho: el valor de 96.21% evalúa la capacidad del modelo para predecir nuevos datos. Este alto valor indica que el modelo es confiable para realizar predicciones fuera del conjunto de datos utilizados para el ajuste y su optimización.

6.3.2.6 Coeficientes codificados para el modelamiento del proceso

Tabla 27 Coeficiente codificador

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		85.991	0.413	208.41	0.000	
[H2SO4] (g/l)	6.798	3.399	0.413	8.24	0.004	1.00
T(°C)	6.767	3.384	0.413	8.20	0.004	1.00
t (min)	3.273	1.636	0.413	3.97	0.029	1.00
[H2SO4] (g/l)*t (min)	0.367	0.184	0.413	0.45	0.686	1.00
T(°C)*t (min)	-0.423	-0.211	0.413	-0.51	0.644	1.00
[H2SO4] (g/l)*T(°C)*t (min)	0.803	0.401	0.413	0.97	0.403	1.00
Pt Ctral		3.942	0.790	4.99	0.015	1.00

Fuente: Propia del autor

Coeficientes codificados del modelo estadístico para generar un modelo matemático del proceso. Extraído de la data de Minitab.

La tabla 27 permite identificar qué factores tienen mayor influencia en el porcentaje de extracción de litio. En primer lugar, la constante, con un valor de 85.991, representa el promedio del porcentaje de extracción cuando las variables independientes están en sus niveles centrales. Este valor es altamente significativo, lo que confirma su relevancia en el modelo.

Entre las variables principales, la concentración de H_2SO_4 , la temperatura y el tiempo de lixiviación destacan por su impacto positivo significativo. Esto se refleja en sus coeficientes (3.399, 3.384 y 1.636, respectivamente) y valores p (0.004, 0.004 y 0.029), indicando que son los factores clave para optimizar la extracción de litio. Es evidente que el aumento de estas variables mejora el rendimiento del proceso.

Por otro lado, las interacciones entre variables, como $[H_2SO_4]*t$ (min), $T(^{\circ}C)*t$ (min) y la interacción de tercer orden $[H_2SO_4]*T(^{\circ}C)*t$ (min), no muestran efectos significativos en la extracción. Esto implica que estas combinaciones no afectan de manera relevante el porcentaje de extracción, permitiendo simplificar el análisis al centrarse en los efectos principales.

Además, el punto central del diseño tiene un impacto positivo y significativo (coeficiente de 3.942, $p = 0.015$), lo que confirma la validez del modelo experimental. Los factores de inflación de la varianza (FIV), todos iguales a 1.00, indican que no existe multicolinealidad, es decir, las variables están bien seleccionadas y no interfieren entre sí.

6.3.2.7 Modelo de correlación para la optimización del proceso

El proceso de extracción de litio a partir de las baterías ion-litio puede optimizarse mediante la ecuación de regresión en unidades codificadas obtenida con el software Minitab.

La ecuación es la siguiente:

$$\%Ext.=85.991+ 3.399 [H_2SO_4] (g/l)+ 3.384 T(^{\circ}C)+ 1.636 t (min)+ 0.184 [H_2SO_4] (g/l)*t (min)- 0.211 T(^{\circ}C)*t (min)+0.401 [H_2SO_4] (g/l)*T(^{\circ}C)*t (min) + 3.942 Pt Ctral$$

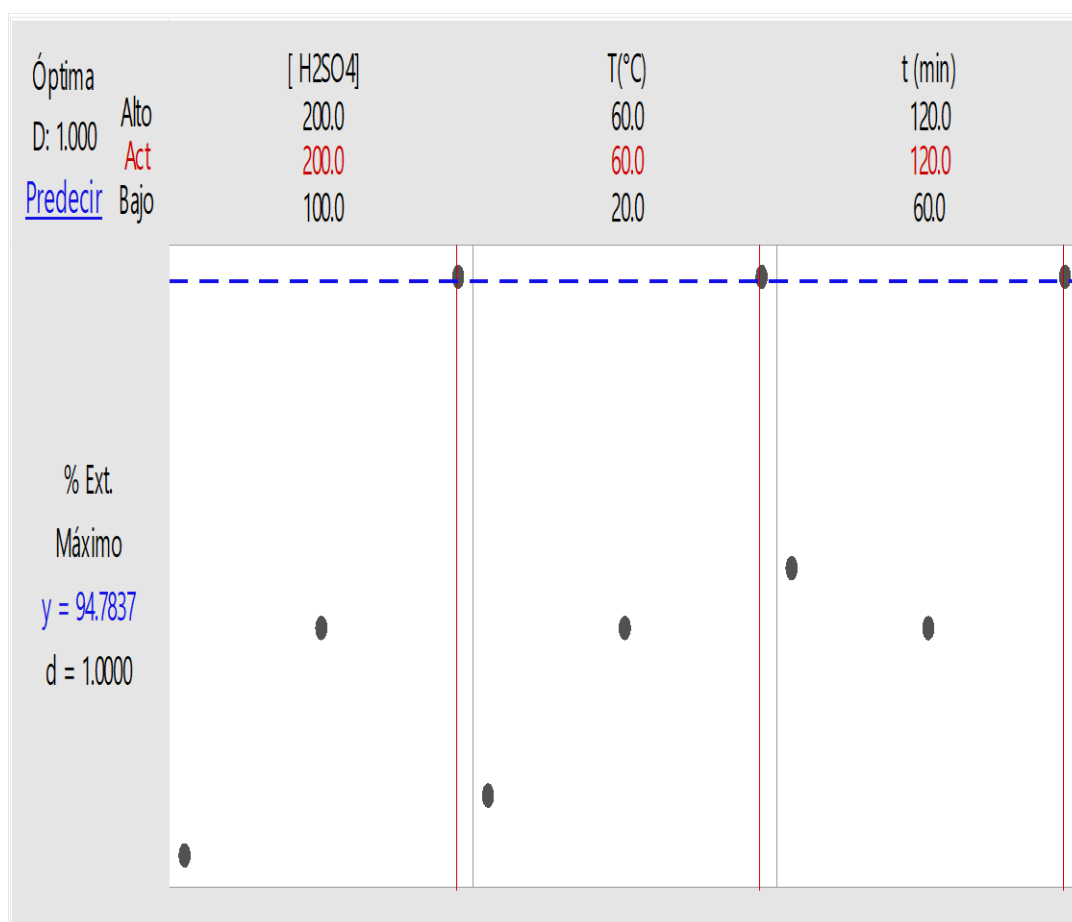
La ecuación representa de manera clara cómo las variables experimentales y sus interacciones influyen en el rendimiento del proceso, proporcionando una herramienta fundamental para identificar las condiciones óptimas que maximicen la extracción de litio.

6.3.2.8 Optimización de la extracción de litio

A partir de la ecuación de modelo correlacional obtenida en el apartado anterior, se llevó a cabo una simulación con el objetivo de identificar las condiciones óptimas para maximizar la extracción de litio. Los resultados obtenidos se ilustran en la figura correspondiente.

Figura 24

Gráfica de la optimización



Fuente: Propia del autor

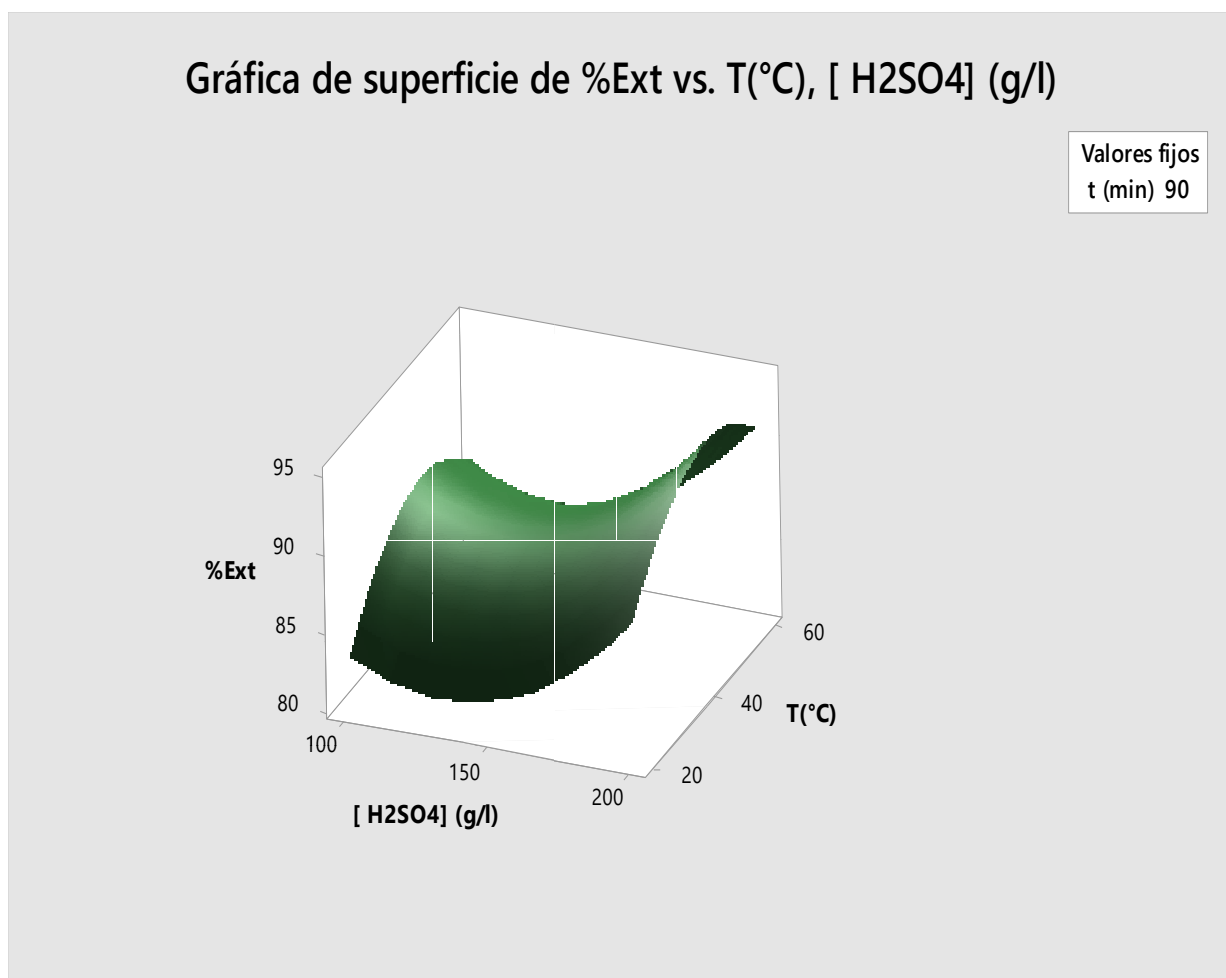
La figura representa la optimización del proceso de extracción de litio y las condiciones de cada factor. Tomado de la data de Minitab.

Según la figura 24, para alcanzar una extracción óptima de litio del 94.7837% a partir de baterías de ion-litio en la ciudad de Cusco, las variables experimentales deben ajustarse a los siguientes valores: concentración de ácido (200 g/l), temperatura (60°C) y tiempo (120 min).

6.3.2.9 Gráfica de superficie y contornos de respuesta

Figura 25

Gráfica de superficie de respuesta



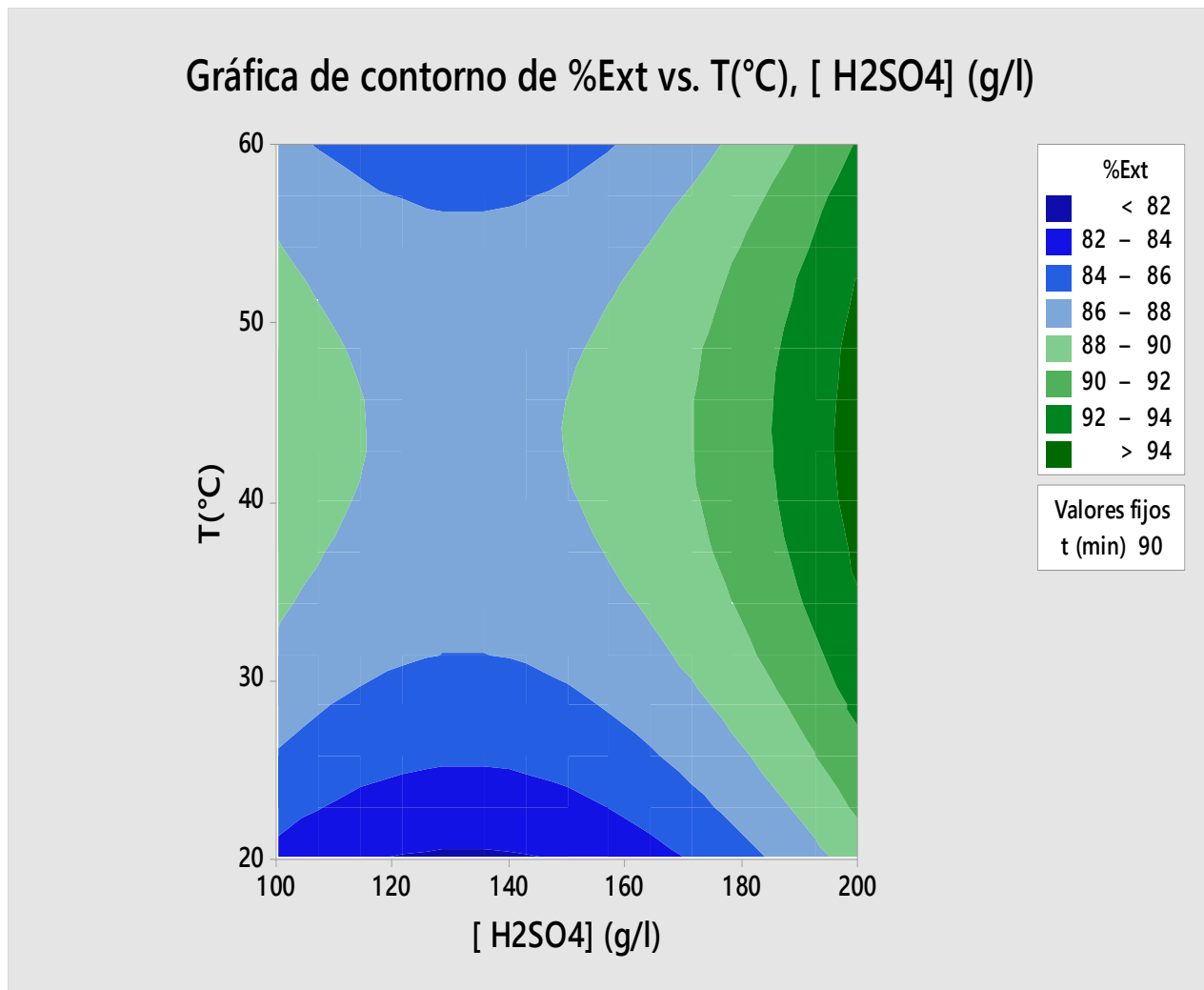
Fuente: Propia del autor

X₁: La figura es una representación del comportamiento de la respuesta a la acción de los factores. Esto según la data de minitab.

La figura 25 respalda todo el análisis realizado en los ítems anteriores, presentando una gráfica en 3D que mantiene la variable de menor incidencia, t(min), en el punto central.

Figura 26

Gráfica de contorno de respuesta



Fuente. Propia del autor

Gráfica de contorno del comportamiento de la extracción de litio, según la la data de Minitab.

La figura 26 respalda todo el análisis realizado en los ítems anteriores mediante una gráfica en 2D, en la cual se mantiene la variable de menor incidencia, t(min), en el punto central. Las áreas más oscuras, de color verde, indican que bajo esas condiciones se logra una alta extracción de litio, superior al 94%.

COSTO BENEFICIO

La presente investigación representa una alternativa viable para la recuperación de litio a partir de baterías ion-litio en desuso mediante lixiviación con ácido sulfúrico.

El análisis costo–beneficio del presente proyecto de investigación se realizó considerando los costos operativos utilizados durante el proceso de extracción de litio mediante lixiviación con ácido sulfúrico. Para el análisis económico se tomó como base la muestra experimental de 150 g de baterías ion-litio enviada al laboratorio químico, con una ley de cabeza de 4.05 % de litio y una recuperación máxima de 94.765 %.

1. Determinación del litio recuperado

Peso de muestra procesada: 150 g

Contenido de litio: 4.05 %

Entonces:

$$150 \times 0.0405 = 6.075 \text{ g de Li}$$

Aplicando el porcentaje de recuperación obtenido experimentalmente:

$$6.075 \times 94.765 \%$$

$$6.075 \times 0.94765 = 5.756 \text{ g de Li recuperado}$$

Por lo tanto, se recuperó aproximadamente:

$$5.76 \text{ g de litio}$$

2. Costos Operativos del Proceso

Recolección de baterías = S/. 5.00

Ácido sulfúrico H_2SO_4 = S/. 9.00

Agua destilada = S/. 3.00

Análisis químico laboratorio = S/. 120.00

Materiales de laboratorio = S/. 25.00

$$5 + 9 + 3 + 120 + 25 = 162.00 \text{ soles}$$

3. Beneficio Económico

Tomando como referencia el valor actual promedio del litio:

$$1 \text{ kg Li} \approx 16.5 \text{ dólares}$$

Tipo de cambio promedio:

$$1 \text{ US\$} = 3.45 \text{ soles}$$

Entonces:

$$16.5 \times 3.45 = 56.93 \text{ soles/kg}$$

Convirtiendo gramos recuperados a kilogramos:

$$5.756 \text{ g} = 0.005756 \text{ kg}$$

Finalmente:

$$0.005756 \times 56.93 = 0.33 \text{ soles}$$

Beneficio bruto obtenido:

$$0.33 \text{ soles}$$

4. Relación Beneficio/Costo

$$B/C = \text{Beneficio} / \text{Costo}$$

$$B/C = 0.33 / 162$$

$$B/C = 0.002$$

5. Interpretación del Resultado

El resultado de la relación beneficio/costo fue:

$$B/C = 0.002$$

Esto significa que por cada 1 sol invertido en el proceso experimental de extracción de litio, se recupera aproximadamente 0.002 soles considerando el precio actual del litio en el mercado internacional. El resultado económico obtenido es bajo debido a que el estudio fue desarrollado a nivel laboratorio y utilizando una pequeña cantidad de muestra (150 g), donde los costos de análisis químico y materiales representan la mayor parte del gasto experimental. Sin embargo, el proceso demuestra viabilidad técnica y ambiental, ya que permite recuperar litio a partir de residuos electrónicos y puede presentar mayor rentabilidad cuando se aplique a escala industrial con mayores volúmenes de procesamiento.

CONCLUSIONES

- ✓ Mediante el proceso de lixiviación por agitación se logró extraer el 94.77% de litio de las baterías de celulares, considerando un proceso adecuado y optimo para la extracción de este metal, teniendo en cuenta la importancia del reciclaje como economía circular dentro de los procesos metalúrgicos.
- ✓ Se logro determinar como una de las variables más importantes la concentración de ácido sulfúrico, considerando como la mas optima en una concentración de 200 g/l, viendo como este hace que sea mayor la extracción de litio.
- ✓ Al realizar el proceso de lixiviación, se logra evidenciar que las variables de temperatura y tiempo también influyen en la extracción de litio de baterías, considerando como optimas la temperatura de 60°C y un tiempo de 120 min, para una mejor extracción alcanzando el 94,77% de litio.
- ✓ Este estudio evidencia que la separación de los polímeros y metales contenidos en los residuos permite desarrollar un sistema de tratamiento orientado al reciclaje de estos materiales como insumos secundarios, con potencial de aprovechamiento en sectores industriales tanto metálicos como no metálicos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar un sistema integral de recolección selectiva, las autoridades municipales de Cusco deben establecer puntos de recolección específicos para aparatos electrónicos en desuso y baterías de ion-litio, diferenciados de la basura común. Esto podría incluir campañas de recolección periódica en barrios, centros educativos y empresas, inspiradas en modelos exitosos como los de ciudades europeas o programas piloto en América Latina.
- ✓ Colaborar con sistemas colectivos como Recolecc (que en 2025 expandió su campaña “Reciclamos para dejar huella” a Cusco, con jornadas en Wanchaq y recolección certificada) o con campañas como Reciclafest de Claro Perú (que en 2025 recolectó 4 toneladas de RAEE en Cusco y trabaja con operadores autorizados por el MINAM como Comimtel).
- ✓ Adoptar y escalar el proceso de lixiviación ácida: Dado que se logró una extracción del 94.77% de litio bajo condiciones específicas (120 minutos, 200 g/l de ácido sulfúrico, 60°C y agitación), se recomienda implementar este método en instalaciones piloto o industriales.
- ✓ Aprovechar la precisión del modelo de regresión multivariable para minimizar ensayos experimentales, en pruebas piloto local de recuperación de litio en Cusco, mediante simulación previa de escenarios y selección estratégica de condiciones óptimas, para mejorar el proceso o manipular las variables, buscando un mejor porcentaje de extracción de litio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allende, S., & Llonto, A. (2021). Extracción del cobre a partir de tarjetas de circuitos integrados de computadoras por lixiviación ácida en la ciudad de cusco. *Tesis pregrado*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco. Obtenido de http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5874/253T20210168_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arteaga Bernal, S. (2019). *Diseño de una planta de producción de litio a partir de salmueras residuales de la extracción de cloro proveniente de agua de mar*. LAMBAYEQUE: UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIS GALLO.
- Beiza, R. (15 de Mayo de 2023). *Recuperación de litio desde α -espodumeno por fluoración con NH_4HF_2* . Obtenido de https://ica.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/20260/alexander-resentera.pdf?referrer=grok.com
- Bravo, V. (2018). Algo sobre el litio. *Fundación bariloche*, 1-30. Obtenido de <https://fundacionbariloche.org.ar/wp-content/uploads/2021/06/Algosobreellitio.pdf>
- Chemistry, R. S. (2 de Enero de 2024). *Encyclopedia Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element?referrer=grok.com>
- Cortéz, G. (2019). Recuperación de cobalto a partir de baterías de litio por medio de extracción por solvente con extractante aniónico. *Tesis pregrado*. Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile. Obtenido de https://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/23799/a138312_Cort%C3%A9s

_G_Recuperaci%C3%B3n_de_cobalto_a_partir_2019_Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

De la Torre, R. (2013). *Efficacy of dietary polyphenols on cognitive function in aging: A systematic review and meta-analysis*. *Journal of Clinical Epidemiology*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.03.011>

Habashi, F. (1999). *Libro de hidrometalurgia (Textbook of Hydrometallurgy)*. Obtenido de <https://archive.org/details/textbookofhydrom0000haba>

Jerez, B. (2018). Impacto socioambiental de la extracción de litio en las cuencas de los salares altoandinos del cono sur. *Ocmal*, 1-55. Obtenido de <https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2018/08/Impacto-Sociambiental-Litio.pdf>

Meza, Y. (2021). Extracción de cobalto en baterías de ion-litio mediante lixiviación con cáscara de limón (*Citrus x aurantifolia*). *Tesis pregrado*. Universidad Agraria del Ecuador, Ecuador. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MEZA%20FREIRE%20YOLANDA%20STEFANIA.pdf>

MINAM. (7 de Noviembre de 2018). *Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos*. Obtenido de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5920515/?referrer=grok.com>

Nina, M. (2022). Extracción de litio por lixiviación con fluoruro sodio y ácido sulfúrico en autoclave a partir de mineral de litio en roca yacimiento Falchani macusani-Puno. *Tesis pregrado*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú. Obtenido de http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/18020/Nina_Gonzales_Maritz_a_Rosario.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Obaya, M., & Cespedes, M. (2021). Análisis de las redes globales de la producción de baterías de ion litio. *CEPAL*, 2021.
- Olivas, L. (2019). Purificación de solución lixiviada de litio utilizando resinas de intercambio iónico. *Tesis posgrado*. Universidad de Sonora, Mexico. Obtenido de <http://148.225.114.121/bitstream/unison/3344/1/olivasduranluzmercedesm.pdf>
- OMS. (2017). *Reciclaje de baterías de plomo ácido usadas: consideraciones sanitarias*. Suiza: Oms. Obtenido de file:///C:/Users/rouse/Downloads/9789243512853-spa.pdf
- OMS. (2017). *Reciclaje de baterías de plomo ácido usadas: consideraciones sanitarias*. suiza: Oms. Obtenido de file:///C:/Users/rouse/Downloads/9789243512853-spa.pdf
- Rand, D. (2011). *Lithium-Ion Batteries: Advanced Materials and Technologies*. Nueva York: Gianfranco Pistoia.
- Tshipeng, T., Smith, J., & Brown, A. (2017). Avances en prácticas agrícolas sostenibles. *Revista de Gestión Ambiental*, 123-134. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.012>
- U.S. GEOLOGICAL SERVICE. (11 de MAYO de 2023). *SERVICIO GEOLOGICO DE ESTADOS UNIDOS*. Obtenido de USGS: <https://www.usa.gov/es/agencias/servicio-geologico-de-estados-unidos>
- Valenzuela, M., Rojas, R., & Segovia, M. (2017). *Reciclaje de baterías de litio*. Chile: Core. Obtenido de file:///C:/Users/rouse/Downloads/LIBRO_LITIO.pdf
- Vásquez, S. (2021). Evaluación anivel laboratorio de la extracción de metañles y recuperación de cobre en tarjetas de dispositivos moviles descartos. *Tesis pregrado*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Obtenido de

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/16368/1/Sindy%20Francelly%20V%C3%A1squez%20Bran.pdf>

Wiker, J. (2021). Derecho minero. *Juridicas*, 1-31. Obtenido de <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/13/6393/10a.pdf>

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

EXTRACCIÓN DE LITIO DE BATERIAS IÓN-LITIO POR LIXIVIACIÓN CON ACIDO SULFÚRICO EN LA CUIDAD DEL CUSCO					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA	POBLACION
Problema General	Objetivo General	Hipotesis General	Variable Dependiente	Tipo de investigación	Población
¿ Se podrá extraer litio a partir de baterías ion-litio por lixiviación con ácido en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?	Extraer litio apartir de baterias ion-litio por lixivacion con acido sulfurico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco	Se extrae litio a partir de bacterias ion-litio por lixivación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.	Extracción de Litio	El tipo de investigación es aplicada y/o tecnologica.	La población de nuestra investigación estará constituida por baterías desechadas de celulares en la ciudad del Cusco.
Problemas Especificos	Objetivos Especificos	Hipotesis Especificos	Variables Independientes	Método de Investigación	Muestra
PE 1• ¿Qué concentración de ácido sulfúrico se usará dentro del proceso de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?	OE 1: • Determinar la concentración de ácido sulfúrico se usará dentro del proceso de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixivación en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco.	Con la adecuada concentración del ácido sulfúrico en la lixivación para la extracción de litio a partir de bacterias ion-litio en el laboratorio de hidrometalurgia, mejorara el porcentaje de extracción de litio en la ciudad del Cusco.	<ul style="list-style-type: none"> • Concentracion del acido sulfurico • Tiempo de Lixivacion • Temperatura 	El método de investigación es analítico deductivo y experimental	La muestra litio de baterías desechadas de celulares en la ciudad del Cusco, aproximadamente 100 Kg
PE 2• ¿Cuál es tiempo necesario de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixivación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?	OE 2: Determinar el tiempo necesario de extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixivación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco	Con el tiempo necesario durante el proceso de extracción de litio a partir de bacterias ion-litio por lixivación en el laboratorio de hidrometalurgia, se obtendrá mayor porcentaje de extracción de litio.	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje • Gramos • Horas y Grados centígrados 	El diseño aplicado en la investigación a tratar es el diseño experimental.	
PE 3• ¿Cuál es la temperatura óptima para la extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixivación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco?	OE 3: Determinar la temperatura óptima para la extracción de litio a partir de baterías ion-litio por lixivación con ácido sulfúrico en el laboratorio de hidrometalurgia en la ciudad del Cusco	Optimizando la temperatura adecuada en el proceso de extracción de litio a partir de bacterias ion-litio por lixivación en el laboratorio de hidrometalurgia, se mejorará la extracción de litio.			

Fuente: Propia del autor

El modelo de regresión que mejor se ajusta al proceso de lixiviación con ácido sulfúrico para la recuperación de litio de baterías es:

$$\begin{aligned} \%Ext. = & 85.991 + 3.399 [\text{H}_2\text{SO}_4] (\text{g/l}) + 3.384 T(^{\circ}\text{C}) + 1.636 t (\text{min}) + 0.184 [\text{H}_2\text{SO}_4] (\text{g/l}) * t (\text{min}) \\ & - 0.211 T(^{\circ}\text{C}) * t (\text{min}) + 0.401 [\text{H}_2\text{SO}_4] (\text{g/l}) * T(^{\circ}\text{C}) * t (\text{min}) \\ & + 3.942 \text{ Pt Ctral} \end{aligned}$$







