

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**“EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO POR EL
PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE LOS MINERALES
AURÍFEROS DEL YACIMIENTO ISHIHUINCA DE LA COMPAÑÍA MINERA
CORIRE S.A.C.”
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADA POR:

Br. JOSE RAUL PINTO RIVAS

Br. FIDEL SULIN QUISPE MAMANI

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

ASESOR:

Mg. ELÍAS TEODORO PEÑA PEÑA

CUSCO-PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: "EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DEL YACIMIENTO OSHIHUINCA DE LA COMPAÑÍA MINGRA CORIRE S.A.C." (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)
Presentado por: JOSE RAUL PINTO RIVAS DNI N° 77708701
presentado por: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI DNI N° 72179562
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 Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 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 se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

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

Cusco, 10 de JULIO de 20 25



Firma

Post firma ELIAS TEODORO PEÑA PEÑA

Nro. de DNI 23965618

ORCID del Asesor 0000-0003-4529-0665

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:467882970

Jose Pinto/Fidel Quispe

**EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO
POR EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACION DE LOS
MINERALES AURÍFEROS DEL YACIMIENTO ISHIHUINCA DE
LA COMPAÑIA MINERA CORIRE S.A.C.**

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::27259:467882910

143 Páginas

Fecha de entrega

17 jun 2025, 6:45 p.m. GMT-5

28.271 Palabras

Fecha de descarga

17 jun 2025, 7:24 p.m. GMT-5

152.402 Caracteres

Nombre de archivo

**EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACION DE LOS MINERALES AURÍFEROS DEL YACIMIENTO
ISHIHUINCA DE LA COMPAÑIA MINERA CORIRE S.A.C.**

Tamaño de archivo

11.4 MB

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 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Distinguidos señores miembros del jurado.

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos vigente para optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico, presentamos a su consideración el siguiente informe de Tesis, titulado:

EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DEL YACIMIENTO ISHIHUINCA DE LA COMPAÑÍA MINERA CORIRE S.A.C.

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito la de optimizar la extracción de oro de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C., mediante la evaluación de las variables operacionales de granulometría, concentración de cianuro de sodio y tiempo de cianuración por agitación, con el fin de maximizar la eficiencia del proceso de cianuración, reduciendo costos operativos y mejorando la viabilidad económica del proceso. Este estudio incluyó pruebas experimentales de acuerdo al diseño factorial.

Con la seguridad de que esta tesis contribuirá al avance de la metalurgia extractiva de oro en nuestro país, quedamos atentos a sus valiosas observaciones y recomendaciones.

Br. PINTO RIVAS, José Raúl

Br. QUISPE MAMANI, Fidel Sulín

DEDICATORIAS

Este proyecto lo dedico principalmente a
Dios, por guiarme, protegerme y por darme
fuerza para seguir en el cumplimiento de
mis metas trazadas.

A mis padres Cerila Mamani y Serapio Quispe, por ser el
pilar fundamental de mis logros y todo lo que he llegado a
ser en mi formación como profesional, gracias al apoyo
moral y económico estoy dando por cumplido un anhelo
más de mi vida.

A Concepción, Hilda, Vianney, Cristian, Rufo,
mis hermanos que siempre están apoyándome
y por ser parte importante de esta vida.

FIDEL SULIN QUISPE MAMANI

A Yanet, mi madre, luz y motivo de mi vida.

A Dios, como autor maestro y guía, A todas las personas que me brindaron sus hombros para dar este importante paso, familia, amigos, por su apoyo y sobre todo a mis madres y mi hermano, Yanet Rivas Guevara, Antonia Guevara Marmanillo y Denilson Zambrano Rivas por su comprensión y ayuda constante.

Un especial agradecimiento a todas las personas e instituciones cuya colaboración, trabajo y aportes hicieron posible la realización de esta investigación. A nuestro asesor M.S.C Ing. Elías Teodoro Peña Peña, y nuestro gran mentor y amigo Ing. Darwin Carlos Quispe, nuestros amigos queridos, Gabriel, Luz Katherine, Milko, Manuel, Edwin Cartagena. A nuestra casa de estudios Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

JOSE RAUL PINTO RIVAS

INDICE

PRESENTACIÓN	i
DEDICATORIAS.....	ii
INDICE.....	iv
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. Justificación	2
1.3.1. Conveniencia.....	2
1.3.2. Relevancia social.....	3
1.3.3. Relevancia tecnológica	3
1.3.4. Relevancia ambiental	3
1.3.5. Relevancia económica	4
1.3.6. Valor teórico	4
1.3.7. Utilidad metodológica	4
1.4. Objetivos de investigación	5

1.4.1.	Objetivo general	5
1.4.2.	Objetivos específicos	5
CAPITULO II.....		6
MARCO TEÓRICO		6
2.1.	Antecedentes de la investigación	6
2.1.1	Antecedentes Internacionales.....	6
2.1.2	Antecedentes Nacionales	8
2.2.	Bases teóricas	10
2.2.1.	El oro.....	10
2.2.1.1.	Propiedades físicas	10
2.2.1.2.	Propiedades químicas	11
2.2.2.	El oro en la naturaleza	12
2.2.3.	Principales minerales auríferos	15
2.2.4.	Principales métodos en la extracción y recuperación del oro	16
2.2.5.	Selección del método de extracción de oro.....	19
2.2.6.	Principales factores que influyen en la determinación del método de extracción del oro	21
2.2.7.	Principios en la hidrometalurgia	23
2.2.8.	Cianuración del oro.....	25
2.2.9.	Termodinámica de cianuración del oro.....	26
2.2.10.	Cinética de cianuración del oro.....	30
2.2.11.	Método de cianuración por agitación.....	33
2.2.12.	Factores que afectan la extracción y la velocidad de disolución del oro en un sistema agitado	35
2.2.13.	Diseño experimental	39
2.2.13.1.	Diseño experimental en la investigación metalúrgica	39

2.2.13.2.	Etapas en una investigación	40
2.2.13.3.	Variables en un proceso y su clasificación	41
2.2.13.4.	Principios básicos en la experimentación	42
2.2.13.5.	Diseños experimentales de primer orden.....	43
2.2.13.6.	Diseño factorial 2^k	45
2.2.14.	Definición de términos básicos.....	47
CAPITULO III		50
HIPOTESIS Y VARIABLES.....		50
3.1. Hipótesis		50
3.1.1.	Hipótesis general	50
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	50
3.2. Variables.....		50
3.2.1. Variable dependiente.....		50
3.2.1.2.	Variables independientes (Xi)	51
3.2.2.	Operacionalización de variables.....	52
CAPITULO IV		53
METODOLOGÍA.....		53
4.1. Ámbito de estudio: Localización Política y Geográfica		53
4.2. Metodología de la investigación		55
4.3. Población, selección de muestra y tamaño de muestra		56
4.3.1	Población.....	56
4.3.1	Muestra	57
4.3.1	Selección de la muestra.....	57
4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....		58
4.4.1.	Técnicas.....	58

4.4.2. Instrumentos.....	59
4.5. Equipos, materiales y reactivos requeridos	59
4.5.1 Equipos requeridos.....	59
4.5.2 Materiales requeridos.....	60
4.5.3 Reactivos	61
4.6. Técnicas de procesamiento de datos y plan de análisis de datos.....	61
4.7. Metodología aplicada a la investigación de tesis	62
CAPITULO V	64
DESARROLLO Y RESULTADOS EXPERIEMNTALES	64
5.1. Desarrollo del trabajo de investigación.....	64
5.1.1. Muestra y muestreo	64
5.1.2. Preparación mecánica de la muestra	64
5.1.2.1. Chancado primario y secundario	65
5.1.3. Cuarteo y homogenización.....	65
5.1.4. Caracterización de la muestra de mineral.....	66
5.1.4.1. Caracterización química.....	66
5.1.4.2. Caracterización mineralógica	67
5.1.4.3. Determinación del tiempo óptimo de molienda y análisis granulométrico.....	68
5.1.5. Determinación de la gravedad específica.....	73
5.1.6. Condiciones operacionales para el proceso de cianuración	74
5.1.6.1. Cantidad de mineral y volumen de solución requerida para cada prueba.....	75
5.1.6.2. Cantidad de cianuro de sodio requerido en su nivel bajo y alto	75
5.1.6.3. Condiciones operativas según la matriz codificada del diseño factorial.....	76
5.1.6.4. Planificación de las condiciones operacionales para las pruebas experimentales	77

5.1.6.5.	Preparación de solución AgNO_3 para la titulación por CN^-	78
5.1.6.6.	Preparación de yoduro de potasio al 5% como indicador en la titulación	80
5.1.6.7.	Pruebas de cianuración en botellas roladas	81
5.1.6.8.	Control de consumo de cianuro y reposición	81
5.1.6.9.	Registro de datos para el balance y resultados experimentales	83
CAPÍTULO VI		84
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		84
6.1.	Matriz de diseño factorial para el análisis y discusión de resultados por medio de Minitab	18.184
6.2.	Análisis de resultados	86
6.2.1.	Análisis de los resultados predeterminados según el diseño factorial 2^3	86
6.2.2.	Análisis de los resultados ajustados según el diseño factorial 2^3	89
6.2.2.1.	<i>Diagrama de Pareto ajustado de los efectos de las variables en la extracción de oro</i>	90
6.2.2.2.	Grafica normal de los efectos en la extracción de oro	91
6.2.2.3.	Análisis de los efectos principales de cada variable en la extracción de oro	91
6.2.2.4.	Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción de oro	92
6.2.2.5.	Análisis de varianza	93
6.2.2.6.	Coeficientes codificados para el modelo matemático de extracción de oro	96
6.2.2.7.	Modelo de correlación para la optimización del proceso	97
6.2.2.8.	Optimización de la extracción de oro	97
6.2.2.9.	Grafica de superficie y contornos de respuesta	99
6.3.	Discusión de los resultados	100
CONCLUSIONES		102
RECOMENDACIONES		103
BIBLIOGRAFÍA		104

ANEXOS	107
Anexo 1: Matriz de consistencia	107
Anexo 2: fotografías de la preparación mecánica de la muestra en el laboratorio	108
Anexo 3: fotografías de homogenización y cuarteo	108
Anexo 4: preparación de muestras para la caracterización química y mineralógica.....	108
Anexo 5: Reporte de análisis químico de cabeza	109
Anexo 6: caracterización mineralógica	110
Anexo 7: Fotos de molienda y gravead específica	116
Anexo 8: Fotos de montaje y pruebas de cianuración en botellas roladas	116
Anexo 9: fotografía del proceso de titulación por cianuro libre.....	116
Anexo 10: Resultados de titulación y reposición de cianuro de sodio para cada prueba experimental.	117
Anexo 11: informe de ensayo de las soluciones ricas y los ripios de cada prueba	122
Anexo 12: cálculo de los resultados de las pruebas experimentales utilizando Excel	124

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principales minerales portadores de oro	16
Figura 2: Factores que inciden en el proceso de selección	21
Figura 3: Química de la reacción de oro	24
Figura 4: Representación esquemática del proceso del mecanismo de cianuración de oro	26
Figura 5: Diagrama Eh-pH para el oro y el aurocianuro, mostrando además las de operación para los distintos otros procesos industriales de extracción del oro.	28
Figura 6: Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea .	30
Figura 7: Agitación mecánica y neumática	35
Figura 8: Tipos de variables en un proceso.....	41
Figura 9: Ubicación geográfica de la municipalidad distrital de Caraveli.....	54
Figura 10: Ubicación del yacimiento minero ISHIHUINCA	55
Figura 11: Diagrama de flujo del desarrollo experimental	63
Figura 12: Etapas de la preparación mecánica de la muestra.....	66
Figura 13: Procedimiento de la moliendabilidad.....	70
Figura 14: Grafica %-200m vs tiempo	71
Figura 15: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	87
Figura 16: Diagrama de Pareto ajustado de los efectos estandarizados.....	90
Figura 17: Gráfica normal de los efectos estandarizados.....	91
Figura 18: Grafica de los efectos principales en la extracción de oro.....	91
Figura 19: Grafica de la incidencia de las interacciones de las variables en la extracción de oro	92
Figura 20: Gráfica de la optimización de la extracción de oro	98
Figura 21: Gráfica de superficie de respuesta	99
Figura 22: Gráfica de contorno	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables independientes y sus niveles	51
Tabla 2: Operacionalización de variables.....	52
Tabla 3: Reporte de análisis químico de cabeza.....	67
Tabla 4: Composición mineralógica de la muestra	68
Tabla 5: Condiciones operativas del molino de bolas	69
Tabla 6: Resultados de las pruebas de molienda	70
Tabla 7: Datos y resultados de la gravedad específica	73
Tabla 8: Matriz codificada y completa para el diseño factorial 2^3	77
Tabla 9: Planificación detalla de las 8 pruebas y 2 réplicas en el punto central	78
Tabla 10: Resumen de los resultados experimentales	83
Tabla 11: Condiciones experimentales y las respuestas según el diseño factorial 2^3 ..	85
Tabla 12: Análisis de la varianza (ANOVA)	88
Tabla 13: Resumen del modelo en función a R.....	89
Tabla 14: Análisis de varianza (ANOVA)	93
Tabla 15: Resumen del modelo ajustado en función a R.....	95
Tabla 16: Coeficientes codificados	96

LISTA DE ABREVIATURAS

Au: Oro

Au(CN)₂⁻: Dicianuro de oro

CN⁻: Ion cianuro

°C : Grados Celsius.

g/l : Gramos por litro.

gAu./t : gramos de oro por tonelada.

Kg/t : Kilogramos por tonelada.

L.A.S.: Laboratorio analítica del sur.

l/h.m³: Litros por hora y metro cúbico.

NaCN: Cianuro de sodio

NaAu(CN)₂: Dicianoaurato de sodio o cianuro de sodio y oro

HCN: Cianuro de hidrogeno

NaOH: Hidróxido sódico

OH⁻: Ion oxidrilo

O₂: Oxigeno molecular.

ppm: Partes por millón.

µm: Micrómetros.

> : Mayor

< : Menor.

”: Pulgadas.

-200 M: Menos doscientas mallas.

RESUMEN

La presente tesis abordó uno de los retos fundamentales en el procesamiento de minerales auríferos: evaluar las variables operaciones en la extracción de oro mediante la cianuración por agitación. Este proceso fue aplicado a los minerales provenientes del yacimiento Ishihuinca, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C., que fue caracterizado por su alta ley de 10.76 g Au/TM. A pesar de las ventajas económicas de estos minerales, su tratamiento metalúrgico planteó desafíos relacionados con la influencia de variables operativas, como la granulometría, la concentración de cianuro de sodio (NaCN) y el tiempo de cianuración.

El objetivo de esta tesis es resolver este problema mediante la evaluación de variables en la extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento ISHITUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C. Se evaluará y analizará constantemente la granulometría, la concentración de cianuro, y el tiempo de lixiviación necesario para optimizar la extracción de oro.

Utilizando como tipo de investigación el método experimental, se basa en las pruebas realizadas a nivel de laboratorio, para dar respuesta a dicha problemática, se realizaron ensayos experimentales que permitieron determinar las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia del proceso de cianuración, alcanzando un porcentaje de extracción de oro del 96.81%. Los resultados evidenciaron que, aunque la granulometría del mineral tuvo un impacto limitado debido a su buena porosidad, una molienda a 65% malla -200 fue suficiente para optimizar la extracción del oro. Asimismo, se encontró que una concentración de 800 ppm de NaCN fue ideal para balancear una alta eficiencia sin generar costos excesivos por reactivos.

Palabras clave: Mineral, cianuración, extracción de oro, optimización y eficiencia.

ABSTRACT

The present thesis addressed one of the fundamental challenges in the processing of gold-bearing minerals: optimizing gold extraction through cyanidation by agitation. This process was applied to minerals from the Ishihuinca deposit, owned by Compañía Minera CORIRE S.A.C., characterized by its high grade of 10.76 g Au/TM. Despite the economic advantages of these minerals, their metallurgical treatment posed challenges related to the influence of operational variables such as particle size, sodium cyanide (NaCN) concentration, and cyanidation time.

The objective of this thesis is to solve this problem by evaluating variables in the extraction of gold by the agitation cyanidation process of the gold minerals of the ISHIHUINCA deposit of the mining company CORIRE S.A.C. The granulometry, cyanide concentration, and the leaching time necessary will be constantly evaluated and analyzed to optimize gold extraction.

Using the experimental method as a type of research, it is based on tests carried out at the laboratory level, to address this issue, experimental tests were conducted to determine the optimal conditions for maximizing the efficiency of the cyanidation process, achieving a gold extraction rate of 96.81%. The results showed that although the particle size of the mineral had a limited impact due to its good porosity, grinding to 65% -200 mesh was sufficient to optimize gold extraction. Additionally, a NaCN concentration of 800 ppm was found to be ideal for balancing high efficiency without incurring excessive reagent costs. Finally, a cyanidation time of 72 hours was determined to be the optimal point, achieving maximum extraction without compromising the economic feasibility of the process.

Keywords: Ore, cyanidation, gold extraction, optimization, and efficiency.

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro a partir de minerales auríferos mediante el proceso de cianuración por agitación es una de las técnicas más utilizadas en la industria minera, gracias a su alta eficiencia y a su capacidad para procesar minerales con un alto valor comercial. Sin embargo, este proceso no está exento de desafíos, ya que factores como las características mineralógicas, la ley del mineral y las condiciones operativas pueden afectar considerablemente su desempeño. Por ello, es fundamental evaluar y optimizar variables clave como la granulometría del mineral, la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración para asegurar que el proceso sea lo más eficiente y económico posible.

El desarrollo de este estudio está estructurado en seis capítulos. El **Capítulo I** describe la problemática de la investigación, estableciendo el contexto y la justificación del trabajo. En el **Capítulo II** se desarrolla el marco teórico y se analizan los antecedentes relevantes. El **Capítulo III** plantea las hipótesis y variables de estudio. **Capítulo IV** detalla la metodología utilizada. Los resultados experimentales se presentan en el **Capítulo V**, seguidos por el análisis y discusión de los mismos en el **Capítulo VI**.

Esta tesis se centra en estudiar cómo influyen estas variables en la extracción de oro de los minerales auríferos del Yacimiento Ishihuinca, que pertenece a la Compañía Minera Corire S.A.C. A través de un enfoque cuantitativo, se han recolectado y analizado datos numéricos utilizando herramientas estadísticas, con el objetivo de comprender cómo interactúan las variables operativas (granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) y su impacto en el porcentaje de extracción de oro.

El propósito de este trabajo es encontrar las mejores condiciones operativas para optimizar la extracción de oro de los minerales del Yacimiento Ishihuinca, evaluando cuidadosamente cada una de las variables mencionadas. El objetivo fue maximizar la eficiencia del proceso de cianuración, reducir los costos operativos y, en última instancia, mejorar la viabilidad económica de la operación, contribuyendo así a una minería más eficiente y sostenible.

Se logra evaluar las variables operacionales para la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHITUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C., mediante la evaluación de las variables operacionales de granulometría, concentración de cianuro de sodio y tiempo de cianuración por agitación. Siendo la extracción máxima de 96. 81 % de oro. Con una extracción optimizada de 96.83% según el modelo matemático que representa al proceso.

Las interacciones entre granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración son determinantes en la extracción de oro. Las condiciones óptimas combinadas de 65% malla -200, 800 ppm de NaCN y 72 horas de cianuración resultaron en la mayor eficiencia, demostrando que las variables no actúan de manera independiente, sino interrelacionadas.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática

En la planta de la compañía minera CORIRE S.A.C. que procesa minerales auríferos, se están desarrollando mejoras en los procesos convencionales de extracción de oro, considerando las características mineralógicas, las leyes del mineral, y la procedencia de otras materias primas. Las condiciones de operación, como la concentración de cianuro y tiempo, y la granulometría, son factores críticos para la optimización del proceso.

En el yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la compañía minera CORIRE S.A.C., se han descubierto vetas con alta ley de 10.76 g Au/TM y 93 g Ag/TM. Estos minerales del yacimiento presentan un nuevo comportamiento en su tratamiento metalúrgico mediante el proceso de cianuración. Someter estos minerales al proceso de cianuración bajo las condiciones actuales de la planta podría implicar riesgos y dificultades en la obtención de una extracción aceptable de oro y plata. Por tanto, es necesario realizar ensayos a nivel de laboratorio para evaluar las variables que tienen mayor incidencia en la extracción de oro, y determinar los costos de reactivos, hasta encontrar las condiciones operacionales adecuadas que permitan una alta eficiencia en la extracción de oro.

El objetivo de esta tesis fue resolver este problema mediante la evaluación de variables en la extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C. Se evaluará y analizará constantemente la granulometría, la concentración de cianuro, y el tiempo de lixiviación necesario para optimizar la extracción de oro, considerando que este método de lixiviación es empleado en minerales de alto valor comercial.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo afectará las variables operacionales de granulometría del mineral, concentración de cianuro de sodio y tiempo del proceso de cianuración por agitación, en incrementar la eficiencia de la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.?

1.2.2. Problemas específicos

PE 1: ¿Cuál será la granulometría óptima del mineral que maximiza la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.?

PE 2: ¿Cuál será la concentración óptima de cianuro de sodio que permite una máxima extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.?

PE 3: ¿Cuál será el tiempo óptimo de cianuración que asegura una máxima extracción de oro, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

Esta tesis es conveniente porque aborda un problema crítico en la minería aurífera: la necesidad de optimizar la extracción del metal precioso (oro) de minerales de alta ley. Dado que el yacimiento ISHIHUINCA presenta vetas con alto contenido de oro y plata, encontrar las condiciones óptimas para su tratamiento es indispensable para mejorar la eficiencia de la planta minera CORIRE S.A.C. Además, este estudio permitirá obtener datos valiosos que podrán ser

aplicados a otros yacimientos con características similares, lo que incrementa la aplicabilidad de la investigación.

1.3.2. Relevancia social

La relevancia social de esta tesis reside en el impacto positivo que puede generar en las comunidades cercanas a la mina. La optimización de la extracción de oro bajo condiciones controladas no solo incrementará la producción de la planta, sino que también impulsará la creación de empleo, fomentando el desarrollo económico local. Además, la mejora en los procesos de extracción contribuirá a la estabilidad económica de la región al promover una minería responsable y sostenible. El mayor aprovechamiento de los recursos naturales fortalecerá el crecimiento económico en las áreas de influencia, elevando la calidad de vida de sus habitantes.

1.3.3. Relevancia tecnológica

El estudio de tesis es relevante desde una perspectiva tecnológica, ya que tiene como objetivo optimizar un proceso crucial para la industria aurífera: la cianuración. La investigación permitirá evaluar el comportamiento de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA bajo diferentes condiciones controladas de laboratorio, como la granulometría, la concentración de cianuro y el tiempo de lixiviación. Al determinar las condiciones óptimas, se podrá implementar un proceso más eficiente y rentable, lo que representa una mejora tecnológica significativa en la extracción de oro.

1.3.4. Relevancia ambiental

La relevancia ambiental de esta tesis radica en la optimización del proceso de extracción de oro mediante cianuración, minimizando el uso de cianuro y reduciendo la generación de residuos tóxicos. Esto contribuirá a una minería más limpia y sostenible, con un enfoque en la

protección de los recursos hídricos y la mitigación de los riesgos de contaminación. Además, se asegura el cumplimiento estricto de las normativas ambientales vigentes, promoviendo un equilibrio entre la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental, lo que favorecerá la conservación del entorno natural y la sostenibilidad a largo plazo.

1.3.5. Relevancia económica

La relevancia económica de esta tesis es significativa para la compañía minera CORIRE S.A.C., ya que optimizar el proceso de cianuración permitirá aumentar la recuperación de oro y plata, incrementando las ganancias de la empresa. Al ajustar la granulometría, la concentración de cianuro y el tiempo de lixiviación, se reducirán los costos operativos, mejorando la viabilidad económica del proceso. Además, dado el alto valor del oro en el mercado, esta optimización no solo aumentará la rentabilidad y competitividad de la operación, sino que también servirá como referencia para otras empresas mineras que enfrenten desafíos similares, amplificando su impacto en el sector.

1.3.6. Valor teórico

La tesis contribuyó al conocimiento científico y técnico sobre la extracción de oro mediante cianuración, ofreciendo una comprensión más profunda de las variables operacionales que afectan el rendimiento del proceso. Además, proporcionará valiosos aportes a la literatura en metalurgia extractiva, específicamente en el tratamiento de minerales auríferos de alta ley. Los resultados servirán como base para futuras investigaciones y podrán aplicarse a otros yacimientos con características similares.

1.3.7. Utilidad metodológica

Desde el punto de vista metodológico, esta tesis ofrecerá una metodología clara, rigurosa y replicable para la optimización de procesos de cianuración en la extracción de oro. El enfoque

experimental, que abarca desde la caracterización inicial del mineral hasta los ensayos de cianuración, evaluando variables como la granulometría, concentración de cianuro y tiempo de lixiviación, garantiza resultados confiables. Además, este diseño experimental puede ser adaptado a otros procesos de lixiviación, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en la industria metalúrgica.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar las variables operacionales de granulometría del mineral, concentración de cianuro de sodio y tiempo del proceso de cianuración por agitación, en la maximización de la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

1.4.2. Objetivos específicos

OE 1: Determinar la granulometría óptima del mineral que maximice la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

PE 2: Determinar la concentración óptima de cianuro de sodio que permite una máxima extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.

PE 3: Establecer el tiempo óptimo de cianuración que asegura una máxima extracción de oro, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes Internacionales

(Palma, 2019), en su tesis titulada "Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto" realizada en la Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago – Chile, el objetivo principal fue aplicar la lixiviación por agitación en columnas utilizando cianuro para la extracción de oro en la Minera Pullalli. Para ello, se trabajó con muestras provenientes del chancado terciario, con una granulometría de 8 mm. Los resultados demostraron que es posible extraer aproximadamente el 70% del oro contenido en el mineral y el 30% de la plata. Asimismo, se estableció que el pH óptimo para el proceso es de 11 y la tasa de riego adecuada es de 12 L/h m².

El estudio concluye que la aglomeración del mineral mejora significativamente la extracción de oro, ya que favorece condiciones óptimas de porosidad y permeabilidad, lo que a su vez facilita el contacto eficiente entre el lixivante y las partículas del mineral, incrementando la eficiencia del proceso de lixiviación.

(Aguilar, 2014), en su tesis titulada "Mejoramiento y simulación de una planta de recuperación de oro por concentración gravimétrica, flotación y cianuración ubicada en Piñas, provincia de El Oro", desarrollada en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, tuvo como objetivo principal evaluar las operaciones de la planta de recuperación de oro. La investigación se centró en el muestreo de material proveniente de la cancha de almacenamiento en Cazaderos, cantón Piñas, recolectando 50 kilogramos de mineral para su análisis.

Los resultados del estudio revelaron que la planta procesa aproximadamente 20 toneladas diarias de mineral, ingresando a una molienda en húmedo con un 60% de sólidos. El rendimiento obtenido indicó una recuperación de oro del 89%, de cobre del 96% y de plata del 46%, cumpliendo así con los requisitos para la comercialización de los concentrados. Asimismo, la investigación concluyó que la cianuración resulta favorable cuando se emplea una concentración de NaCN de 2 g/L, lo que permitió alcanzar una recuperación de oro del 44,3%.

Aguilar también señaló que la disminución del tamaño de partícula incrementa el grado de liberación del oro, lo que mejora su afinidad para reaccionar con el cianuro de sodio, favoreciendo así un aumento en la recuperación del metal. Esto sugiere que la optimización de la granulometría es clave para mejorar el rendimiento del proceso de cianuración.

(Yañez, Garcia, Pedraza, & Laverde, 2004), en su investigación titulada ***“Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar - Colombia), para la selección de los procesos de extracción”***, desarrollada en la Universidad Industrial de Santander, tuvieron como objetivo mejorar el porcentaje de disolución del oro para superar el 80% y, con ello, aumentar la eficiencia en la extracción de dicho metal. Los minerales auro-argentíferos utilizados en el estudio fueron extraídos de la zona minera de San Pedro Frío.

Los resultados de la investigación mostraron que el uso del proceso de concentración gravimétrica, para eliminar las arcillas antes de la cianuración, no es adecuado para este tipo de mineral, ya que provoca pérdidas significativas de oro en las fracciones finas.

En conclusión, se determinó que el oro presente en el mineral se encuentra principalmente en tamaños muy finos y en su mayoría está expuesto o como oro libre. Por esta razón, se recomienda que el mineral sea molido finamente para permitir su tratamiento directo mediante el proceso de cianuración, optimizando así la recuperación del metal.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

(Cahuana, 2021), en su tesis titulada "***Evaluación de la cianuración de concentrados de oro y plata***", realizada en el distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, en el departamento de Arequipa, bajo la supervisión de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, tuvo como objetivo principal evaluar la recuperación de oro y plata mediante el proceso de cianuración de concentrados. El estudio también buscó identificar y determinar las principales variables y parámetros que influyen en dicho proceso, abarcando toda el área de la concesión de beneficio.

En la fase experimental, los resultados indicaron que, a mayor finura en la molienda, mejor es la eficiencia en el proceso de cianuración, lo que destaca la importancia de la granulometría en la recuperación de los metales preciosos.

La investigación concluyó que la cianuración de los concentrados de oro y plata es factible siempre que se mantengan controladas las variables clave del proceso. Entre las variables más relevantes se destacan la concentración de cianuro, la dosificación de cal, el tiempo de cianuración y la granulometría, todas ellas cruciales para maximizar la eficiencia del proceso y lograr una recuperación óptima de los metales valiosos.

(Escalante, 2016), en su investigación titulada "***Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación, Cachachi-Cajamarca 2016***", realizada en la Universidad Privada del Norte, tuvo como objetivo optimizar la recuperación de oro a través del proceso de lixiviación por agitación. El estudio se centró en evaluar los parámetros clave de granulometría y concentración de cianuro para mejorar la eficiencia del proceso.

La investigación utilizó como muestra mineral oxidado con alta ley de oro proveniente del distrito de Cachachi, recolectándose medio kilogramo de mineral para los ensayos de lixiviación. Los resultados demostraron que la mayor recuperación de oro, con un 92.37%, se logró utilizando una granulometría de malla 140. Esto se debe a que, con una granulometría de malla 100, las partículas de oro aún no se encuentran completamente liberadas, lo que limita el ataque del cianuro.

En conclusión, la investigación evidenció que la interacción entre la granulometría y la concentración de cianuro tiene un impacto significativo en la recuperación de oro, siendo esencial optimizar ambos parámetros para maximizar la eficiencia del proceso de lixiviación por agitación.

(Mamani, 2021), en su investigación titulada "***Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales oxidados auríferos de la comunidad Chalhuanca – Apurímac***", realizada en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, tuvo como objetivo evaluar alternativas para el proceso de lixiviación de minerales oxidados auríferos utilizando los reactivos Gold Max, Sandioss, y cianuro de sodio. El estudio se enfocó en determinar cuál de estos reactivos ofrece una mejor recuperación de oro, considerando tanto la eficiencia del proceso como el consumo de reactivos.

Las muestras de mineral oxidado aurífero se obtuvieron de lotes representativos de la comunidad de Chalhuanca para ser sometidas a pruebas de lixiviación por agitación. Los resultados indicaron que, aunque el reactivo Gold Max mostró un mayor consumo de reactivo, el reactivo Sandioss ofreció una mayor recuperación de oro, superando al Gold Max en rendimiento. Además, se observó que el consumo de cianuro de sodio fue significativamente menor en comparación con los otros reactivos probados.

En conclusión, el estudio sugiere que el uso del reactivo Sandioss es una alternativa prometedora para la lixiviación de minerales oxidados auríferos, ya que no solo ofrece una mayor recuperación de oro, sino que también presenta ventajas ambientales debido a su menor impacto contaminante y propiedades similares al cianuro en términos de capacidad de lixiviación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El oro

El oro es un elemento químico con número atómico 79, cuya abundancia promedio en la corteza terrestre es de aproximadamente 0.004 ppm. Desde un punto de vista geoquímico, se clasifica como un elemento siderófilo, debido a su capacidad para disolverse fácilmente en hierro fundido y su baja afinidad con el oxígeno y el azufre. El oro suele estar asociado con elementos como la plata, arsénico, antimonio, selenio y telurio en depósitos de minerales preciosos, y con hierro, zinc y cobre en depósitos de sulfuros.

“El oro se presenta predominantemente en la naturaleza en su forma metálica, razón por la cual se le denomina "oro nativo". En raras ocasiones se encuentra formando minerales específicos. Etimológicamente, el término "oro" proviene del latín "aurum," que significa "aurora brillante," reflejando su característico brillo y valor desde tiempos antiguos” (Linares G., 2010, pág. 4).

2.2.1.1. Propiedades físicas

El oro es un metal de color amarillo que brilla intensamente cuando refleja la luz. En láminas extremadamente delgadas puede mostrar tonalidades azul o verde. Es el metal más maleable y dúctil, lo que lo hace único entre los metales. Sin embargo, en su forma pura es demasiado blando para ser utilizado en joyería o para acuñar monedas, por lo que suele aleársele

con plata o cobre para estos usos. Su punto de fusión es de $1,073^{\circ}\text{C}$, y su volatilización ocurre a $2,600^{\circ}\text{C}$.

El oro tiene un número atómico de 79 y un peso atómico de 197.0. Su densidad es de 19.42, pero disminuye cuando contiene mayores proporciones de plata. Cristaliza en el sistema cúbico y su ductilidad se ve notablemente reducida por la presencia de pequeñas cantidades de impurezas, como el plomo. A altas temperaturas, el oro se volatiliza, emitiendo un vapor rojizo, y esta volatilización aumenta en presencia de otros metales.

“En cuanto a su conductividad térmica, el oro tiene un valor de 103 según Depretz, 98 según Calvert y Johnson, y 60 según Wiedeman y Franz. Su calor específico varía entre 0.0298 (Dulong y Petit) y 0.03244 (Regnault). Además, su conductividad eléctrica es de 73 a 21.8°C , comparada con la plata, que tiene un valor de 100 a 0°C ” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 9)

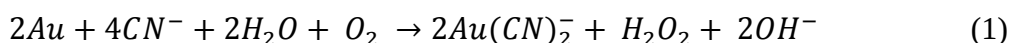
“El oro se alea frecuentemente con metales como la plata, el cobre y el paladio. La cantidad de oro en estas aleaciones se expresa en quilates. El oro puro tiene 24 quilates, mientras que las monedas de oro inglesas suelen ser de 22 quilates (91.66% de oro) y las monedas norteamericanas de 21.6 quilates (90% de oro y 10% de cobre)” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 9).

2.2.1.2. Propiedades químicas

El oro es resistente a los ácidos comunes, “ya que no es soluble en ácido sulfúrico, sulfato férrico, ácido clorhídrico ni cloruro férrico. Sin embargo, puede disolverse en una mezcla concentrada de ácido nítrico y ácido clorhídrico, conocida como agua regia, así como en ácido selénico” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 10). También se disuelve en soluciones de ácido sulfúrico que contengan cloruros y dióxidos de manganeso, o en tiosulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio.

Las soluciones que transforman el oro en cloruro atacan a minerales como los carbonatos y la calcosina, que reducen la acidez, permitiendo que el oro se deposite como oro amarillo de alta pureza.

“El oro no se oxida a temperatura ambiente ni al calentarse al rojo vivo. La reacción química que se produce entre el oro y el cianuro puede representarse mediante la siguiente ecuación” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 10):



Aunque el oro no se combina con azufre libre, forma aleaciones con la mayoría de los metales. Con el mercurio, en particular, forma amalgamas en todas las proporciones, las cuales son solubles en mercurio.

“Según los experimentos de A.D. Brokaw, el oro no se disuelve en HCl, $Fe_2(SO_4)_3$ o $FeCl_3$. Sin embargo, sí se disuelve a 38°C en una solución concentrada que contenga sulfato férrico y ácido clorhídrico, o en una solución concentrada de cloruro cúprico y ácido clorhídrico” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 10). “Las soluciones diluidas no son eficaces para disolver el oro. Brokaw también demostró que el oro puede disolverse mediante la acción del cloro naciente en presencia de dióxido de manganeso” (Vargas Gallardo, 1980, pág. 10).

2.2.2. El oro en la naturaleza

El oro es un elemento que, aunque está ampliamente distribuido en la naturaleza, suele encontrarse en concentraciones muy bajas. Se ha identificado en una gran variedad de materiales como granito, carbón, caliza, arcilla, rocas ígneas ácidas e incluso en el agua de mar. Es comúnmente hallado en asociación con depósitos de minerales básicos, especialmente aquellos que contienen sulfuros de cobre. “A diferencia de otros metales, el oro no suele encontrarse en forma de sulfuros o compuestos similares, con la excepción de los telururos. Predomina en su

forma nativa, ya sea en la superficie o disperso en la matriz de otros minerales” (Domic, 2001, pág. 188).

El oro se manifiesta en diversos ambientes geológicos, los cuales pueden clasificarse en:

1. **Oro libre:** Cuando no está incluido en otros minerales. Este tipo de oro es de fácil extracción mediante separación gravimétrica, amalgamación o cianuración directa. Se encuentra como partículas discretas de oro nativo (Au) que no están químicamente combinadas con otros elementos.
2. **Oro asociado a sulfuros de hierro:** Se encuentra diseminado bajo la forma de partículas finas en los cristales de pirita (FeS_2) o pirrotita (Fe_{1-x}S , donde $x = 0$ a 0.2). La extracción de este oro requiere un proceso más complejo, que incluye la preconcentración, calcinación y posterior cianuración para liberar el oro contenido.
3. **Oro asociado a minerales de arsénico o antimonio:** Estos minerales suelen incluir arsenopirita (FeAsS) o estibina (Sb_2S_3). La presencia de arsénico o antimonio complica el tratamiento, ya que la cianuración clásica, precedida por concentración y calcinación, puede resultar en bajas recuperaciones de oro, haciendo el proceso económicamente inviable.
4. **Oro asociado a minerales de cobre, plomo y zinc:** “En este caso, el oro puede ser un subproducto de la minería de otros metales” (Uceda H., 2020, pág. 76). Los minerales de cobre, como la calcopirita (CuFeS_2) y la bornita (Cu_5FeS_4), son ejemplos donde el oro puede seguir al cobre hasta el proceso de afino electrolítico, siendo finalmente recuperado en los lodos anódicos durante la refinación electrolítica del cobre.
5. **Oro en menas refractarias:** Aquí, el oro es visible solo al microscopio, atrapado dentro de sulfuros metálicos como la pirita (FeS_2) o la arsenopirita (FeAsS), y no puede ser liberado

por métodos tradicionales de cianuración. Estas menas presentan grandes dificultades en su procesamiento, o un costo excesivo para lograr una cianuración efectiva.

6. **Oro asociado a telururos:** En este caso, el oro se encuentra combinado con telurio en minerales como la calaverita (AuTe_2) y la silvanita (AuAgTe_4). Estos telururos son altamente refractarios, requiriendo procesos de oxidación a alta temperatura o bajo presión antes de proceder a la cianuración.
7. **Oro en depósitos aluviales:** Se encuentra en sedimentos sueltos, como arenas y gravas, depositado por la acción del agua. Este tipo de oro, al estar libre de matriz rocosa, es recuperado principalmente mediante métodos gravimétricos, como el uso de bateas o canaletas. La ley de estos depósitos suele ser baja, pero pueden ser procesados a gran escala.
8. **Oro encapsulado en minerales de ganga:** En algunos casos, el oro se encuentra finamente encapsulado en minerales no sulfurados o en la ganga, lo que dificulta su liberación incluso después de la molienda. Este oro requiere una molienda ultrafina o el uso de lixiviantes alternativos, como el tiosulfato o el bromuro, para su recuperación.
9. **Oro en depósitos carbonáceos:** Este tipo de depósitos presenta el desafío del "preg-robbing," donde el carbono natural o el carbono orgánico adsorbe el oro disuelto durante la cianuración, reduciendo significativamente la eficiencia de la extracción. Este problema se puede mitigar pre-oxidando el material o utilizando resinas en lugar de carbón activado.
10. **Oro en depósitos complejos polimetálicos:** En estos yacimientos, el oro está asociado con una mezcla compleja de minerales, incluyendo sulfuros de hierro, cobre, plomo, zinc, y otros metales. Estos depósitos requieren una combinación de flotación para separar los metales base y lixiviación para la recuperación del oro.

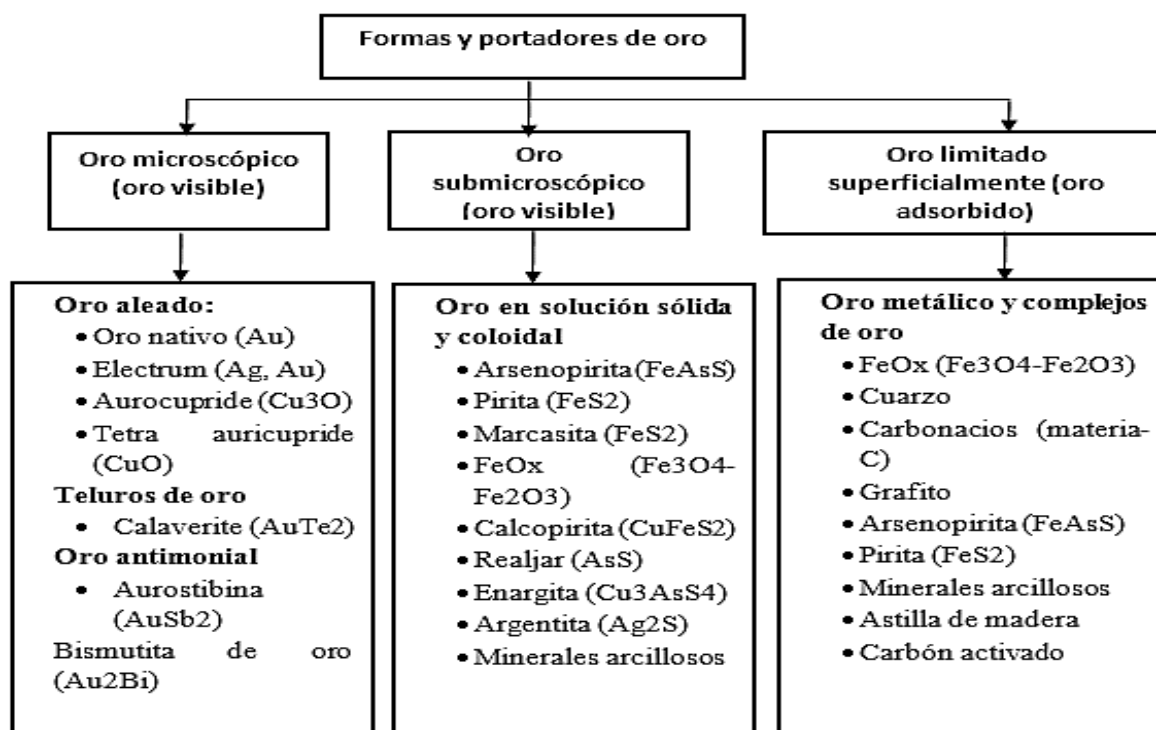
2.2.3. Principales minerales auríferos

“El oro se encuentra en la naturaleza predominantemente en estado nativo, a menudo en forma de pequeñas partículas o como aleación natural con plata, conocida como electrum, la cual puede contener entre un 25% y un 55% de plata” (Uceda H., 2020, pág. 75). Esta aleación es común en depósitos hidrotermales y epitermales, donde el oro y la plata se depositan conjuntamente por soluciones acuosas a temperaturas moderadas.

Además de su forma nativa, el oro se asocia frecuentemente con minerales de cuarzo en pizarras cristalinas y rocas graníticas, donde se encuentra en vetas o filones. En estos ambientes, el oro puede presentarse en forma de laminillas, granos finos, o como pepitas en depósitos aluviales, conocidos como placeres, que se acumulan en las arenas de algunos ríos y en terrones aluviales debido a la acción del agua que transporta y deposita las partículas más pesadas.

El oro también se encuentra asociado con sulfuros de hierro, como la pirita (FeS_2), sulfuros de plomo, como la galena (PbS), y sulfuros de zinc, como la esfalerita o blenda (ZnS). En algunos casos, el oro forma compuestos con telurio, como en la calaverita (AuTe_2), o con arsénico, como en la arsenopirita (FeAsS). Estos minerales pueden contener el oro de manera encapsulada, lo que a menudo requiere procesos de pretratamiento como la tostación o la oxidación a presión para liberar el oro antes de su recuperación por métodos como la cianuración.

Un extracto de los principales minerales portadores de oro se muestra en la figura 1, donde se destacan tanto las asociaciones primarias del oro con otros elementos como las formas en que se presenta en distintos ambientes geológicos.

Figura 1*Principales minerales portadores de oro*

Nota: La figura contiene principales minerales que contienen oro. Tomado de (Uceda H., 2020, pág. 74)

2.2.4. Principales métodos en la extracción y recuperación del oro

Existen diversos métodos para la extracción de oro, cada uno adecuado según las características del mineral y el tipo de depósito. Los principales métodos empleados a nivel global en la extracción de oro son los siguientes:

1. **Concentración gravimétrica:** Este método se basa en la diferencia de peso específico, tamaño y forma de las partículas de oro y otros minerales presentes. Utiliza la fuerza de gravedad para separar el oro libre de la pulpa en un fluido en movimiento continuo. El proceso genera estratificación, permitiendo que las partículas más pesadas, como el oro, se acumulen en la parte inferior. La concentración gravimétrica es ideal para operaciones de

pequeña minería, donde se busca una recuperación eficiente del oro libre sin necesidad de procesos químicos complejos.

2. **Amalgamación:** La amalgamación implica el uso de mercurio para capturar el oro libre presente en el mineral molido, arenas fluviales u otros materiales auríferos. El mercurio forma una amalgama con el oro, la cual es posteriormente separada mediante un proceso de calentamiento (refogado), donde se volatiliza el mercurio y queda el oro. Sin embargo, este método tiene un impacto ambiental significativo debido a la liberación de mercurio al medio ambiente, lo que representa riesgos graves tanto para los operadores como para los ecosistemas.
3. **Lixiviación:** Este es el proceso más ampliamente utilizado a nivel industrial para la extracción de oro a partir de minerales molidos. En la lixiviación, el mineral triturado se somete a la acción de agentes lixiviantes como el cianuro de sodio, Gold Max, o tiourea, que disuelven el oro permitiendo su posterior recuperación. Este método es aplicable en la minería a gran escala, mediana y pequeña, y es especialmente eficiente en la extracción de oro de minerales de baja ley. El proceso puede ser llevado a cabo en pilas, tanques o autoclaves, dependiendo de la mineralogía y el tamaño de la operación.
4. **Flotación:** La flotación es un proceso fisicoquímico que permite la recuperación de oro en forma de concentrado a partir de una pulpa. Este método es particularmente efectivo cuando el oro se encuentra finamente diseminado en sulfuros o cuando está presente en forma de partículas de un tamaño adecuado, generalmente entre 100 y 200 μm . La flotación facilita la separación del oro y los sulfuros de los minerales estériles, permitiendo un tratamiento posterior más concentrado y eficiente.

5. **Métodos de pretratamiento para mena refractaria:** Algunas menas auríferas contienen minerales refractarios, donde el oro está encapsulado dentro de sulfuros como la pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), o incluso minerales como la estibina (Sb_2S_3). Estos minerales hacen que el oro sea inaccesible para la lixiviación directa con cianuro. En estos casos, es esencial considerar métodos de pretratamiento como:
- **Oxidación a presión (Autoclave):** Este proceso involucra la oxidación de los sulfuros a alta presión y temperatura en un ambiente acuoso, liberando el oro para su posterior cianuración.
 - **Tostación:** El proceso de tostación oxida los sulfuros a temperaturas elevadas, convirtiéndolos en óxidos más fácilmente lixiviables.
 - **Biolixiviación:** Utiliza microorganismos para oxidar los sulfuros y liberar el oro. Es una opción ecológica en comparación con la tostación.
6. **Recuperación de oro a partir de lixiviados complejos:** Con el desarrollo de la minería de oro en zonas con minerales complejos, se han utilizado agentes lixiviantes alternativos como el tiosulfato y la tiourea, especialmente en casos donde el cianuro no es viable o está prohibido. Sin embargo, estos procesos requieren un conocimiento detallado del comportamiento del oro en soluciones complejas y la necesidad de diseñar circuitos de recuperación específicos, como el uso de resinas de intercambio iónico o carbón activado modificado.
7. **Impactos ambientales y responsabilidad social:** En la actualidad, los aspectos ambientales y sociales son cruciales en cualquier operación minera. La gestión adecuada de residuos, como los relaves que contienen cianuro o mercurio, y la implementación de técnicas de minería sostenible son fundamentales. Además, se debe considerar la

remediación post-explotación, asegurando que las áreas afectadas sean restauradas y se minimice el impacto en las comunidades locales.

8. **Tecnologías Emergentes en Extracción de Oro:** La industria está continuamente evolucionando con nuevas tecnologías que prometen mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. Algunas de las tecnologías emergentes incluyen:

- **Lixiviación en medio clorurado:** Este método es más selectivo y menos contaminante que el cianuro, y puede ser útil para minerales difíciles de tratar.
- **Nano-tecnología:** Se están investigando partículas de oro a escala nano que podrían revolucionar la manera en que se recupera y procesa el oro, ofreciendo una mayor selectividad y eficiencia.
- **Flotación asistida por microburbujas:** Mejora la recuperación de oro fino en comparación con los métodos tradicionales de flotación.

9. **Optimización de procesos:** Es esencial considerar la integración de análisis mineralógicos y estudios de balance de masa en el proceso de extracción de oro. El monitoreo constante y la optimización de los circuitos de molienda, lixiviación y recuperación pueden mejorar significativamente las tasas de recuperación y la eficiencia global del proceso.

2.2.5. Selección del método de extracción de oro

La selección del proceso de extracción de oro es una etapa crítica y multifacética que comienza tan pronto como la exploración geológica confirma la presencia de mineralización aurífera con una ley y un tonelaje que sugieren viabilidad económica. Este procedimiento iterativo no solo busca evaluar la rentabilidad de un yacimiento, sino también considerar múltiples factores que pueden influir en la viabilidad del proyecto.

En la metalurgia del oro, la selección del proceso adecuado se centra en dos objetivos fundamentales:

- 1. Maximizar la rentabilidad del proyecto:** Esto implica “optimizar la recuperación del oro mediante el diseño de un proceso que permita alcanzar altas tasas de recuperación, junto con una producción eficiente que minimice los costos operativos y de capital” (Marsden J.O, 2009, pág. 69). Es crucial que el proceso seleccionado no solo maximice la extracción del metal precioso, sino que también mantenga bajos los costos a lo largo de la vida del proyecto, considerando aspectos como el consumo de reactivos, la energía, y el mantenimiento de los equipos.
- 2. Cumplir con los requerimientos del proyecto:** Más allá de la rentabilidad, “el proceso seleccionado debe alinearse con las normativas ambientales, sociales y políticas vigentes en la región donde se desarrollará el proyecto” (Marsden J.O, 2009, pág. 69). Esto incluye la implementación de tecnologías limpias y sostenibles, que minimicen el impacto ambiental y aseguren la aceptación social, además de cumplir con las leyes y regulaciones aplicables.

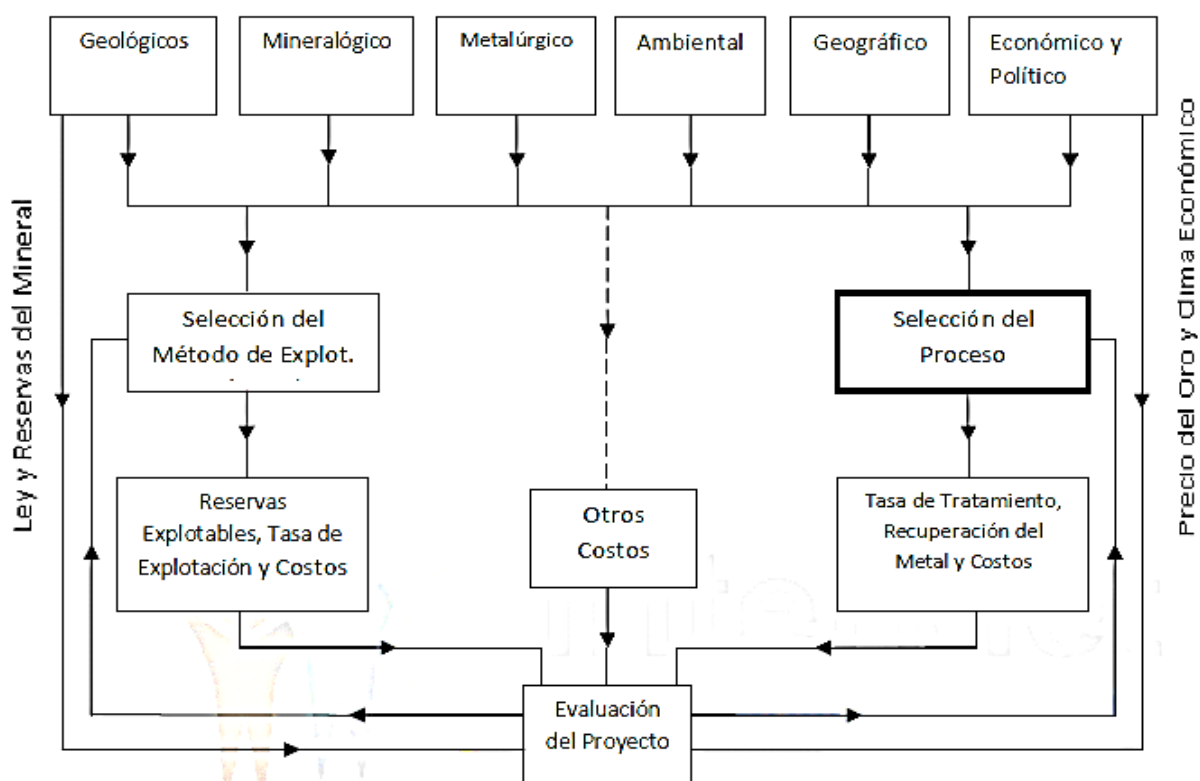
La respuesta química de un mineral aurífero particular frente a diversas alternativas de procesamiento es determinante en la consecución de estos objetivos. Factores como la mineralogía del depósito, la liberación del oro, y la presencia de elementos refractarios pueden dictar la viabilidad de un proceso sobre otro. “Actualmente, más del 85% de la producción mundial de oro se logra a través de procesos químicos, como la cianuración, la cual ha demostrado ser eficiente y ampliamente adoptada, aunque siempre con la necesidad de optimización y adaptación a las características específicas de cada yacimiento” (Marsden J.O, 2009, pág. 69).

2.2.6. Principales factores que influyen en la determinación del método de extracción del oro

“Los factores que afectan la selección del proceso, pueden agruparse en seis áreas principales: Geológicos, mineralógicos, metalúrgicos, ambientales, geográficos, económica y política, figura 2” (Marsden J.O, 2009, pág. 70).

Figura 2

Factores que inciden en el proceso de selección



Nota. En la figura se muestra un esquema de los factores que inciden en la selección del proceso de extracción de oro. Tomado de (Marsden J.O, 2009, pág. 70).

Factores Geológicos: Comprenden la estructura del yacimiento, la distribución del oro, la ley del mineral, y las características geomecánicas del depósito. Estos aspectos determinan no solo la viabilidad del proyecto sino también las técnicas de explotación y procesamiento que serán más adecuadas.

Factores Mineralógicos: La mineralogía del depósito es crucial, ya que influye directamente en la liberación del oro y en la eficiencia del proceso de recuperación. La presencia de minerales asociados como sulfuros de hierro (pirita, pirrotita), minerales de arsénico (arsenopirita), o telururos puede requerir tratamientos específicos como tostación, flotación, o pretratamientos oxidativos antes de la cianuración o cualquier otro proceso de lixiviación.

Metalúrgicos: Involucran la naturaleza del oro, ya sea en forma libre o encapsulado, así como la respuesta del mineral a los diferentes métodos de procesamiento. La recuperación eficiente del oro depende de la elección del proceso metalúrgico que mejor se adapte a la mineralogía y características del yacimiento, buscando maximizar la recuperación con el menor costo operativo y de capital.

Factores Ambientales: Los requisitos ambientales, que incluyen regulaciones sobre el uso de químicos como el cianuro, la gestión de residuos, y la protección de los recursos hídricos y del ecosistema local, juegan un papel cada vez más preponderante en la selección del proceso. Además, las normativas de emisiones de gases y la gestión de residuos tóxicos deben ser consideradas para asegurar la sostenibilidad del proyecto.

Factores Geográficos: La ubicación del yacimiento puede influir significativamente en la selección del proceso. Aspectos como el acceso a infraestructura, la disponibilidad de agua, energía, y otros recursos, así como la proximidad a mercados o puertos, son determinantes en la viabilidad económica del proyecto. La logística y el transporte también pueden impactar los costos y la elección del método de procesamiento.

Factores Económicos y Políticos: La evaluación económica incluye tanto los costos de inversión y operación como los potenciales ingresos generados por la extracción del oro. Además, las políticas gubernamentales, incentivos fiscales, y la estabilidad política del país o

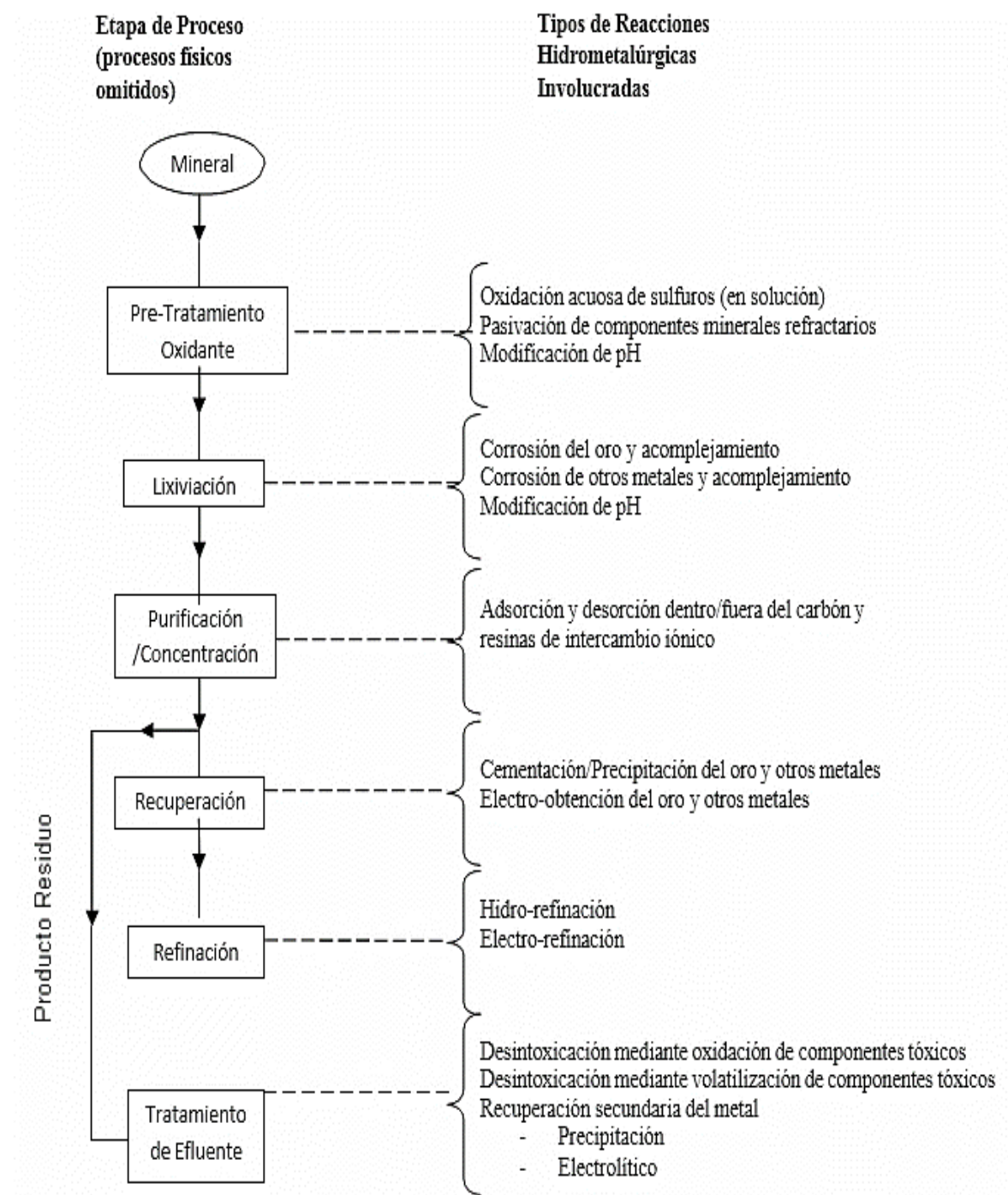
región donde se desarrolla el proyecto pueden influir significativamente en la toma de decisiones, afectando la selección del proceso más adecuado.

2.2.7. Principios en la hidrometalurgia

“Dentro de las técnicas hidrometalúrgicas en la extracción de oro; las más importantes de estas son la lixiviación, purificación y concentración de la solución, y su posterior recuperación del oro” (Marsden J.O, 2009, pág. 140). “Según el tipo de mineral, se puede realizar pre-tratamiento como la cloración, la oxidación a presión y la oxidación biológica para una buena extracción de oro en posteriores etapas de hidrometalúrgicas” (Marsden J.O, 2009, pág. 140).

En la extracción de oro, se debe tener especial cuidado en la cinética de la reacción y en qué grado la reacción procederá. Dichos factores dependen de las propiedades termodinámicas del sistema químico y la cinética de la reacción. Las reacciones químicas más considerables en la extracción del oro son las que involucran el oro y las reacciones secundarias involucran minerales de ganga. Las reacciones secundarias pueden generar un incremento en el consumo de reactivos, presencia de especies parasitas en la solución que pueden influir de manera negativa en los diversos tipos de reacciones en la extracción de oro, se muestra de manera resumida en la figura3.

El fundamento de la lixiviación del oro: el metal nativo, se debe de oxidarlo y acomplejarlo para disolverlo. Adicionando un agente oxidante para hacerlo auroso y luego acomplejarlo con CN^- mantener estable en el medio acuoso. Luego se procede con la adsorción y precipitación.

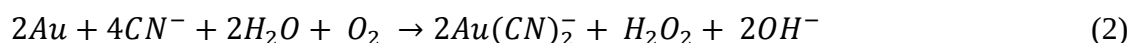
Figura 3*Química de la reacción de oro*

Nota. La figura muestra las etapas y reacciones en la extracción de oro a partir del mineral.

Tomado de (Marsden J.O, 2009, pág. 141)

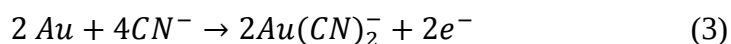
2.2.8. Cianuración del oro

El oro, bajo condiciones de temperatura normales, no se oxida y tampoco es soluble en ácidos como el sulfúrico, nítrico o clorhídrico. El proceso de cianuración se fundamenta en la afinidad que las soluciones de cianuro de sodio poseen hacia las partículas de oro y plata, siendo más selectivas que hacia otros metales. El cianuro, comúnmente referido como cianuro de sodio (NaCN), es el agente principal en este proceso. La reacción del oro en presencia de cianuro se describe a través de la ecuación de Elsner, que representa el mecanismo químico de la disolución del oro en estas soluciones.

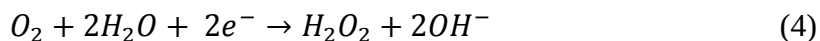


Cuando el oro se expone al cianuro en una solución acuosa, se forma un complejo de cianuro de oro y un hidróxido. Esta formación se debe a dos reacciones electroquímicas simultáneas que ocurren en el proceso:

1. Reacción de oxidación, en la zona anódica, del oro en medio del cianuro con polaridad negativa:



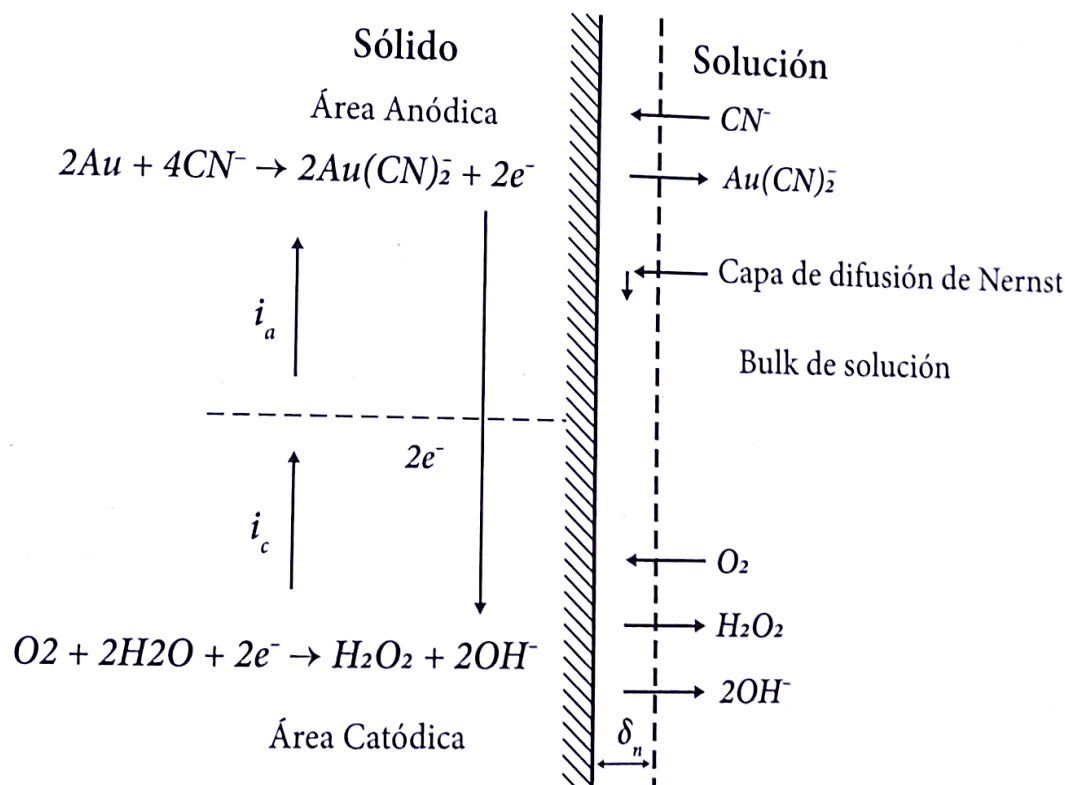
2. Reacción de reducción, en la zona catódica, del oxígeno disuelto en la solución con polaridad positiva:



El mecanismo del proceso de cianuración obedece al de una corrosión en la superficie de oro en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno disuelto, como se muestra en la figura 5.

Figura 4

Representación esquemática del proceso del mecanismo de cianuración de oro



Nota. La figura muestra el proceso del mecanismo de la cianuración de oro. Tomado de (Uceda H., 2020, pág. 249).

2.2.9. Termodinámica de cianuración del oro

El oro es notable por su extraordinaria estabilidad química, lo que se refleja en su resistencia a la oxidación en el aire y su inercia frente a la mayoría de las soluciones acuosas, incluyendo ácidos fuertes. Esta estabilidad se debe a su alta electronegatividad, que confiere al oro una fuerte tendencia a atraer electrones, haciéndolo menos reactivo frente a la mayoría de los agentes químicos. Sin embargo, el oro puede disolverse en soluciones que actúan como agentes oxidantes en presencia de ligandos específicos, como cianuros, haluros, tiosulfatos, tiourea y tiocianatos. Este comportamiento selectivo es fundamental en la industria de la

extracción de oro, permitiendo una recuperación eficiente y específica del metal precioso a partir de minerales complejos.

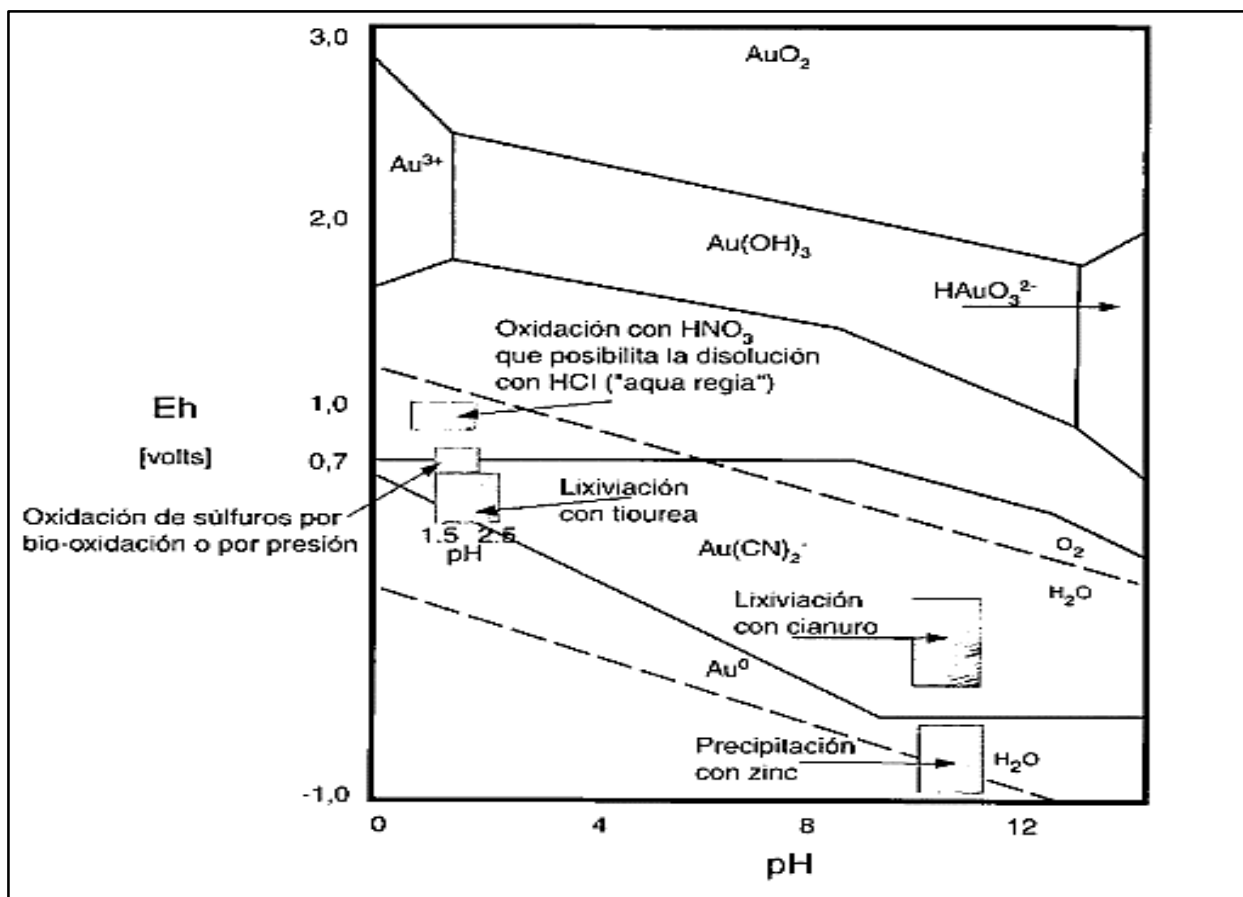
En soluciones acuosas, los compuestos de oro y las especies en solución existen predominantemente en los estados de oxidación +1 (Au^+) y +3 (Au^{3+}). Esta característica es crucial para comprender la química del oro en procesos hidrometalúrgicos, donde la formación de complejos con cianuro ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$) es clave para la disolución del oro en la etapa de lixiviación. El equilibrio entre las condiciones de potencial redox (Eh) y pH es determinante en la estabilidad de las especies de oro en solución, como se ilustra en el diagrama Eh-pH.

El área de estabilidad del oro metálico se sitúa por encima de la línea de reducción del oxígeno en el diagrama de estabilidad electroquímica (figura 6), lo que indica que el oro es termodinámicamente estable en agua pura en ausencia de agentes complejantes. Sin embargo, al introducir un ligando como el cianuro en presencia de un oxidante, el oro es capaz de formar complejos solubles, facilitando su extracción a través del proceso de cianuración.

Este control preciso de las condiciones de Eh y pH es esencial en los procesos hidrometalúrgicos e industriales para optimizar la recuperación del oro, minimizando la formación de especies no deseadas que puedan competir con el oro en solución y aumentar los costos de reactivos.

Figura 5

Diagrama Eh-pH para el oro y el aurocianuro, mostrando además las de operación para los distintos otros procesos industriales de extracción del oro.



Nota. La figura presenta las áreas de estabilidad de cada especie en un medio de cianuro.

Tomado de (Domic, 2001, pág. 197).

Del análisis del diagrama que se muestra en la figura 5, se muestra claramente que:

Estabilidad del oro metálico (Au): El área donde el oro metálico (Au) es termodinámicamente estable se encuentra en la parte inferior del diagrama, en un amplio rango de pH bajo y potencial de reducción (Eh). Esto refleja la conocida estabilidad del oro en ausencia de complejantes fuertes, lo cual es una razón clave por la cual el oro es encontrado en la naturaleza en su forma nativa. Para que el oro sea lixiviado, es necesario salir de esta zona de

estabilidad, lo que ocurre cuando el cianuro (CN^-) está presente como ligando, aumentando el Eh a niveles donde el oro se puede disolver en forma de complejo aurocianuro ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$).

Formación de complejos de oro: La línea que define la región de estabilidad de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ indica que la lixiviación efectiva del oro en un sistema de cianuración requiere un ambiente alcalino (pH generalmente entre 10 y 11) y un potencial de oxidación positivo. En estas condiciones, el cianuro se combina con el oro para formar un complejo soluble que puede ser separado y posteriormente recuperado. Las zonas donde predominan los complejos Au^+ y Au^{3+} son relevantes en otras soluciones, pero no son favorables en el proceso de cianuración con cianuro debido a la fuerte tendencia a formar $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en condiciones apropiadas de pH y Eh.

Precipitación del oro: La zona de precipitación con zinc se encuentra en un rango de pH más elevado y menor Eh. Esto corresponde al proceso conocido como cementación con zinc, donde el oro se reduce y precipita desde su complejo en solución, recuperándose así del licor de lixiviación.

Oxidación de sulfuros: El diagrama también muestra que la oxidación de sulfuros, ya sea por biolixiviación o por oxidación a presión, ocurre a valores más altos de Eh. Esto es significativo en el tratamiento de minerales refractarios que contienen sulfuros, ya que la oxidación previa de estos minerales es necesaria para liberar el oro encapsulado y permitir su posterior lixiviación.

Impacto del pH y Eh en la lixiviación: Las condiciones óptimas de lixiviación con cianuro se representan en la parte central del diagrama, donde el potencial de reducción y el pH están controlados cuidadosamente para maximizar la disolución del oro mientras se

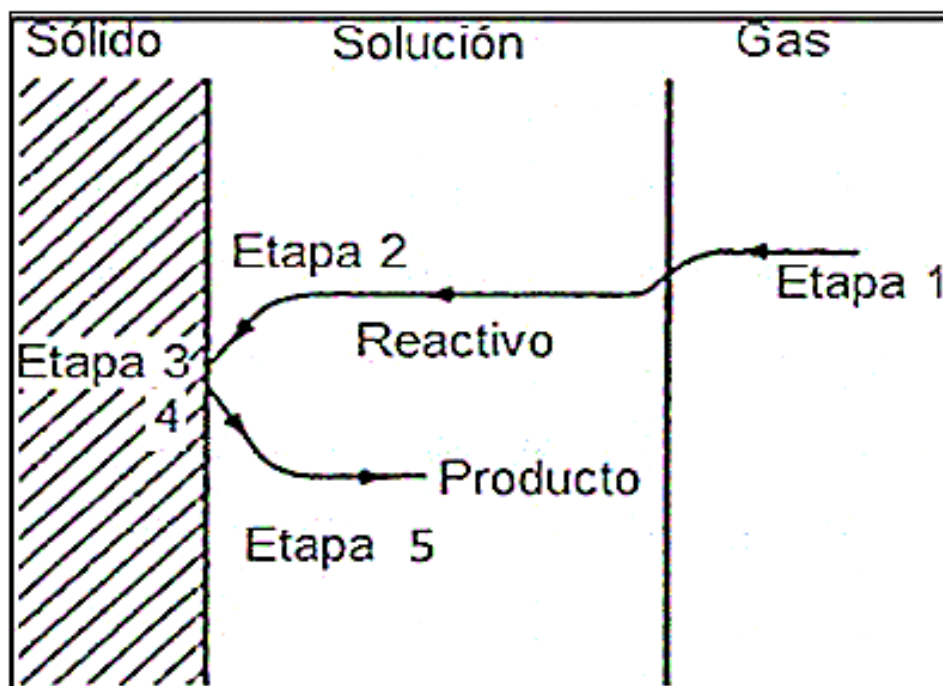
minimiza la formación de especies parasitarias que podrían consumir cianuro o interferir con la extracción del oro.

2.2.10. Cinética de cianuración del oro

La velocidad de una reacción de cianuración depende significativamente de la etapa más lenta, conocida como la etapa controlante, lo que hace crucial su identificación para poder acelerar la reacción. En una reacción fisicoquímica donde interactúan una fase sólida y una líquida, el proceso se desarrolla a través de cinco etapas siguientes, como se muestra en la figura 6:

Figura 6

Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea



Nota. En la figura se representa las etapas de una reacción química heterogénea que se produce durante la cianuración. Tomado de (Bustinza Rivera, 2019, pág. 19)

Una descripción de todas las etapas sería:

- Difusión de reactantes: Los reactantes se desplazan desde la solución hasta la interfase entre el sólido y el líquido.
- Adsorción: Los reactantes se fijan en la superficie del sólido.
- Reacción superficial: La reacción química ocurre en la superficie del sólido.
- Desorción: Los productos resultantes de la reacción son liberados de la superficie del sólido.
- Difusión de productos: Los productos se difunden desde la interfase sólido-líquido hacia la solución.

“El tiempo asociado a las etapas 1 y 5 está controlado principalmente por la velocidad de difusión, mientras que las etapas 2, 3 y 4 dependen de la velocidad de los procesos químicos” (Misare Ch., 1993, pág. 23). Si la difusión es demasiado lenta, es necesario incrementar la agitación para acelerar el proceso; en cambio, si los procesos químicos son los que retrasan la reacción, se debe aumentar la temperatura para compensar.

El proceso de cianuración está regido por las leyes de difusión de Fick, que se pueden expresar matemáticamente como sigue:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{A_1}{\delta} D_{O_2} \{[O_2] - [O_2]_s\} \quad (5)$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{A_2}{\delta} D_{CN^-} \{[CN^-] - [CN^-]_s\} \quad (6)$$

Donde: $\frac{d(O_2)}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$ son las velocidades de difusión de O_2 y CN^- respectivamente, expresadas en moles/s.

En estas ecuaciones, $\frac{d(O_2)}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$ representan las velocidades de difusión del oxígeno y del cianuro, medidas en moles por segundo. Los coeficientes de difusión para O_2 y CN^- son D_{O_2} y D_{CN^-} , respectivamente, ambos en cm^2/s . Las superficies anódica y catódica, sobre las que

ocurre la reacción, se denotan como A_1 y A_2 , y están en cm^2 . δ es el grosor de la capa límite de Nernst en cm .

Las concentraciones de oxígeno y cianuro en la solución son $[O_2]$ y $[CN^-]$ en moles/ cm^3 , mientras que $[O_2]_s$ y $[CN^-]_s$ son las concentraciones en la superficie de reacción.

Si en las ecuaciones 5 y 6 se asume que la reacción química es extremadamente rápida, las concentraciones superficiales se consideran nulas ($[O_2]_s = [CN^-]_s = 0$). Además, si se supone que la velocidad de disolución del metal es el doble que la del oxígeno y la mitad que la del cianuro, se puede derivar la siguiente relación:

$$2D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} [O_2] = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} [CN^-] \quad (6)$$

Considerando que el área total es $A = A_1 + A_2$, y resolviendo este sistema de ecuaciones, se llega a la expresión para la velocidad de cianuración:

$$v = \frac{2AD_{CN^-}D_{O_2}[CN^-][O_2]}{\delta(D_{CN^-}[CN^-] + 4D_{O_2}[O_2])} \quad (7)$$

Después de derivar la ecuación de velocidad (ecuación 7), es necesario considerar dos escenarios:

Bajas concentraciones de cianuro: En este caso, el primer término en el denominador de la ecuación 7 es muy pequeño en comparación con el segundo, lo que permite simplificar la expresión de la velocidad de lixiviación a:

$$v = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A}{\delta} [CN^-] \quad (8)$$

O simplemente:

$$v = K_1 [CN^-] \quad (9)$$

Esto indica que, bajo estas condiciones, la velocidad de lixiviación depende de la concentración de cianuro, lo cual ha sido demostrado experimentalmente.

Altas concentraciones de cianuro: Aquí, el segundo término del denominador se vuelve insignificante en comparación con el primero, lo que transforma la ecuación en:

$$v = 2D_{O_2} \frac{[O_2]}{\delta} \quad (10)$$

O:

$$v = K_2[O_2] \quad (11)$$

Esto implica que, a altas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución del metal depende únicamente de la concentración de oxígeno, una predicción que ha sido confirmada por experimentos.

2.2.11. Método de cianuración por agitación

“La lixiviación por agitación, ampliamente utilizada en diversos tipos de minerales, ha sido una técnica empleada durante más de 200 años. Este proceso generalmente se lleva a cabo en tanques de acero, donde los sólidos se mantienen en suspensión mediante aire o agitación mecánica (fugura7) ” (Uceda H., 2020, pág. 269). “Aunque en los primeros tiempos de la cianuración se utilizaban tanques de lixiviación de fondo cónico (como los tanques Browns o Pachuca) con agitación por aire, estos han sido en gran medida reemplazados por sistemas de agitación mecánica más eficientes, que requieren menos energía y mejoran la eficiencia de mezcla” (Uceda H., 2020, pág. 269). Los sistemas bien diseñados permiten manejar condiciones de flujo bien mezcladas en un solo reactor, optimizando la cinética de la reacción y maximizando el rendimiento del equipo de lixiviación disponible.

La agitación se aplica principalmente a minerales de alta ley, especialmente cuando contienen un alto contenido de finos tras el chancado, o cuando el mineral aurífero requiere molienda para liberar las especies valiosas. Este proceso se utiliza para tratar menas de oro y plata de ley económica, las cuales deben contener oro fino, liberado durante la molienda. “En

general, se trabaja con tamaños de partículas por debajo de -m150, con un 60 a 90 % de material bajo -m200, bajo contenido de cianicidas, y la densidad de la pulpa se ajusta entre 40 y 50 % de sólidos, con velocidades de asentamiento aceptables en los espesadores” (Uceda H., 2020, pág. 269).

La agitación de la pulpa que rebosa del clasificador o se descarga del primer espesador tiene como objetivo completar la disolución del oro mediante lixiviación con cianuro, para lograr la extracción deseada. “El tiempo de agitación en los tanques puede variar entre 6 y 48 horas, siendo mayor en el caso de las menas de plata. Para evitar cortocircuitos en la pulpa, se recomienda trabajar con al menos tres agitadores en serie, en lugar de uno grande, y tener uno de reserva para emergencias o reparaciones” (Uceda H., 2020, pág. 269). La lixiviación en tanques agitados, donde el mineral está en suspensión, es utilizada en minerales de alta ley para compensar los costos de molienda y agitación, y también se emplea para lixiviar subproductos de alta ley.

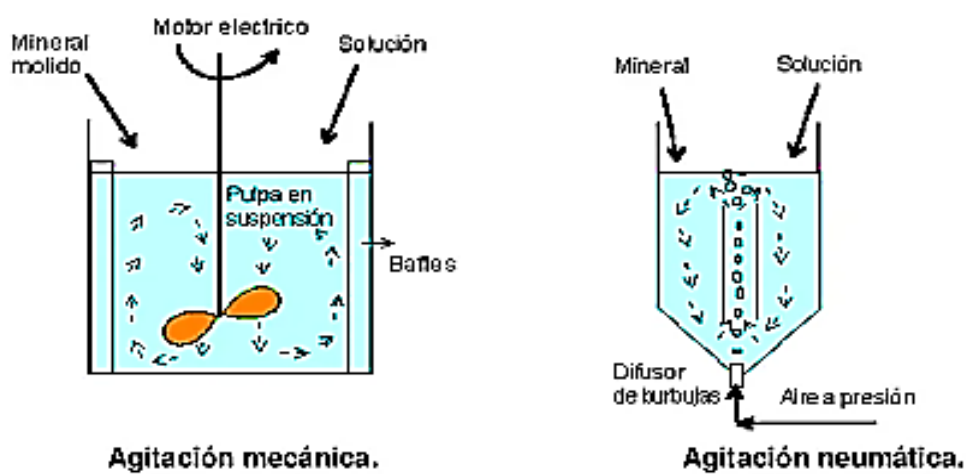
Tanques: La agitación se genera mediante la inyección de aire a presión en el fondo de los tanques. Estos tanques suelen tener un fondo cónico para dirigir la solución de sólidos hacia la entrada de aire. Frecuentemente, se utilizan en serie para cumplir con el tiempo de residencia necesario. No son muy populares debido a que los sólidos sedimentan si se interrumpe la energía. Los tanques generalmente tienen paletas en las paredes para aumentar la turbulencia y mejorar la mezcla.

Agitadores de Baja Velocidad: Son apropiados cuando la tasa de reacción no mejora con un mezclado más intenso. Las paletas o rastrillos de gran diámetro mantienen la suspensión fuera del fondo del tanque.

Agitadores de Alta Velocidad: Se emplean cuando la tasa de lixiviación está limitada por la difusión de los reactivos hacia la superficie del mineral. Están diseñados para bombear rápidamente la pulpa.

Figura 7

Agitación mecánica y neumática



Nota. En la figura se muestra los dos tipos de agitadores para un proceso de lixiviación por agitación. Tomado de (Cáceres A., 2007, pág. 64).

2.2.12. Factores que afectan la extracción y la velocidad de disolución del oro en un sistema agitado

1. **Tamaño de Partícula:** El mineral destinado a la lixiviación se muele a tamaños que mejoran tanto la recuperación de oro como los costos de conminución, “usualmente entre $80\% < 150\ \mu\text{m}$ y $80\% < 45\ \mu\text{m}$. En casos especiales, el mineral puede ser molido a $80\% < 20$ a $25\ \mu\text{m}$ para un procesamiento más eficiente, ya sea por un pre-tratamiento oxidante o mediante lixiviación” (Uceda H., 2020, pág. 270). Es raro aplicar lixiviación por agitación a partículas más grandes que $150\ \mu\text{m}$ debido a la dificultad de mantenerlas en suspensión y al aumento de la abrasión. La lixiviación por agitación está siendo cada vez más utilizada

para materiales finamente molidos, “especialmente con el avance en equipos de molienda ultrafina como el IsaMill de Xstrata y el Detritor SMD de Metso, permitiendo moler concentrados a 80% <7 a 10 μm , lo que facilita la liberación de oro en minerales refractarios y no refractarios antes del proceso de lixiviación por agitación o pre-tratamiento oxidante” (Uceda H., 2020, pág. 270).

2. **Densidad de la Pulpa:** “La lixiviación generalmente se lleva a cabo con densidades de pulpa que varían entre 35% y 50% de sólidos, lo que depende de la gravedad específica de los sólidos, el tamaño de las partículas y la presencia de minerales que afectan la viscosidad de la pulpa, como las arcillas” (Marsden J.O, 2009, pág. 263). A densidades bajas de pulpa, se maximiza la transferencia de masa, aunque el tiempo de retención de los sólidos en el equipo de lixiviación aumenta con la densidad. Además, una mayor densidad de la pulpa ayuda a reducir el consumo de reactivos al alcanzar concentraciones óptimas con menores dosis debido al menor volumen de solución por unidad de masa del material.
3. **Modificación del pH:** para controlar el pH de la pulpa en los procesos de lixiviación, es fundamental añadir un álcali antes del cianuro para mantener una alcalinidad protectora y evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis. “Generalmente, el proceso se lleva a cabo en un rango de pH de 10 a 11, y puede ser necesario agregar álcali en diferentes etapas del circuito para mantener el pH deseado, especialmente cuando se procesan minerales que consumen álcali” (Marsden J.O, 2009, pág. 264). El pH se controla mediante medición manual o automática en varias fases. El hidróxido de calcio (cal apagada) es comúnmente utilizado por su costo más bajo, aunque es menos soluble y puede causar problemas de precipitación e incrustaciones. La cal viva, aunque más económica, es menos efectiva en la modificación del pH. “En minerales que no consumen ácidos o álcalis, se suelen requerir concentraciones

de hidróxido de calcio entre 0.15 y 0.25 g/L para mantener el pH en el rango adecuado para la lixiviación” (Marsden J.O, 2009, pág. 264). Aunque el hidróxido de sodio es más efectivo para disolver ciertos minerales, su uso puede generar problemas de precipitación que afectan etapas posteriores del proceso, como la filtración y adsorción de oro, por lo que el hidróxido de calcio es generalmente preferido para el control del pH en sistemas de lixiviación agitada.

4. **Cianuro:** el cianuro se puede añadir en los sistemas de lixiviación agitada antes del inicio del proceso de lixiviación, como durante la molienda, o en la primera etapa del proceso. También se pueden hacer adiciones posteriores de cianuro en las siguientes etapas para mantener o aumentar su concentración y así maximizar la disolución del oro. Si no hay minerales que consuman cianuro en la mena, “las concentraciones utilizadas suelen oscilar entre 0.05 y 0.5 g/L de NaCN, con consumos típicos de cianuro de 0.25 a 0.75 kg/t” (Marsden J.O, 2009, pág. 265). Si el material de alimentación contiene minerales que consumen cianuro o tiene un alto contenido de plata, “se pueden emplear concentraciones más altas de cianuro, de 2 a 10 g/L, lo que puede llevar a consumos de cianuro de 1 a 2 kg/t o más, dependiendo de las características del mineral” (Marsden J.O, 2009, pág. 265). Las concentraciones de cianuro son controladas generalmente mediante técnicas manuales de titulación o, menos frecuentemente, mediante analizadores en línea basados en métodos titulométricos, colorimétricos, potenciométricos o de electrodos de ion específico.
5. **Oxígeno:** el oxígeno se introduce en los sistemas de lixiviación principalmente mediante la inyección de aire en los tanques, ya sea como el método principal de agitación o a través de la aireación directa con oxígeno puro. En muchos casos, la simple aspersión de aire es suficiente para dispersar adecuadamente las burbujas y mantener las concentraciones

adecuadas de oxígeno disuelto. Generalmente, con la aspersión de aire se pueden mantener, e incluso superar ligeramente, los niveles de saturación de oxígeno disuelto (por ejemplo, 8.2 mg/L al nivel del mar y a 25°C). Existen diferentes opiniones sobre el mejor método para introducir aire en los tanques de lixiviación, incluyendo:

- Aspersión de aire en el fondo del tanque (en puntos de adición simples o múltiples).
- Aspersión en la parte superior del tanque usando sistemas de corriente para dispersar el aire.

6. Introducción de aire debajo del eje del agitador.

La elección del sistema de aspersión óptimo depende de la geometría de los tanques de lixiviación.

En ciertas situaciones, especialmente cuando se procesan minerales que consumen oxígeno, se puede añadir oxígeno puro o peróxido de hidrógeno para aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto más allá de lo que es posible con la simple aspersión de aire.

7. Tiempo de residencia. Los requerimientos del tiempo de residencia varían dependiendo de las características de lixiviación del material tratado y deben determinarse mediante una prueba de trabajo metalúrgica. Los tiempos de lixiviación aplicados en la práctica varían entre 6 y 48 horas, siendo mayor en el caso de las menas de plata de unas horas a varios días. La lixiviación frecuentemente se realiza de 4 a 10 etapas, con el volumen de la etapa individual y el número de etapas dependiendo de la velocidad de flujo de la pulpa, tiempo de residencia requerido y eficiencia del equipo de mezcla utilizado.

2.2.13. Diseño experimental

El diseño experimental es la planificación estructurada y sistemática de un experimento, que permite identificar y evaluar el impacto de las variables independientes sobre una o más variables dependientes. En una tesis experimental, el diseño experimental busca optimizar el proceso bajo estudio mediante la selección adecuada de los factores, la asignación controlada de tratamientos y la disposición de las unidades experimentales, garantizando la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. Este enfoque es esencial para establecer relaciones causales claras, minimizar errores experimentales, y permitir la replicabilidad del estudio.

2.2.13.1. Diseño experimental en la investigación metalúrgica

“La técnica del Diseño Experimental representa una herramienta básica en los procesos metalúrgicos e industriales. Lo cual permite que mediante la aplicación de métodos y técnicas estadísticas para la recolección, tabulación, análisis e interpretación de datos se reduzca a un mínimo la inseguridad de conclusiones mal elaboradas, lográndose diseños de procesos altamente eficientes” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1).

Las ventajas más importantes de la elaboración de experimentos industriales son las siguientes:

- “Proporciona la mayor información aprovechable sobre el experimento con la posibilidad de particularizar las variables o factores de mayor influencia en el proceso en tiempo mínimo y con alta eficiencia” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1).
- “Permite la organización en la selección adecuada de datos hacia un fácil análisis de la información obtenida” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1).

- “Evalúa íntegra y claramente la información obtenida en forma experimental y autocritica los resultados dando más credibilidad a las conclusiones” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1).
- “Es capaz de determinar las interacciones entre las variables involucradas posibilitando realizar predicciones sobre los resultados a obtenerse en áreas no cubiertas por el experimento” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1).

2.2.13.2. Etapas en una investigación

Las etapas de una investigación a considerar, según (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 1) son:

a. El Experimento, está compuesto por los siguientes factores:

- Definición del problema.
- Selección de la respuesta o variable dependiente.
- Selección de los factores a ser variados (variables independientes).
- Elección de los niveles de estos factores:
 - Cuantitativos o Cualitativos.
 - Fijos o al azar.
 - Cuantos niveles de factores van a ser considerados.

b. El Diseño, se considera los siguientes aspectos:

- Número de experiencias a realizar.
- Orden de Experimentación.
- Modelo matemático para describir el experimento.

c. El Análisis, se consideran los siguientes aspectos:

- Recolección de datos.

- Computación de test estadístico.
- Interpretación de datos por el experimentador.

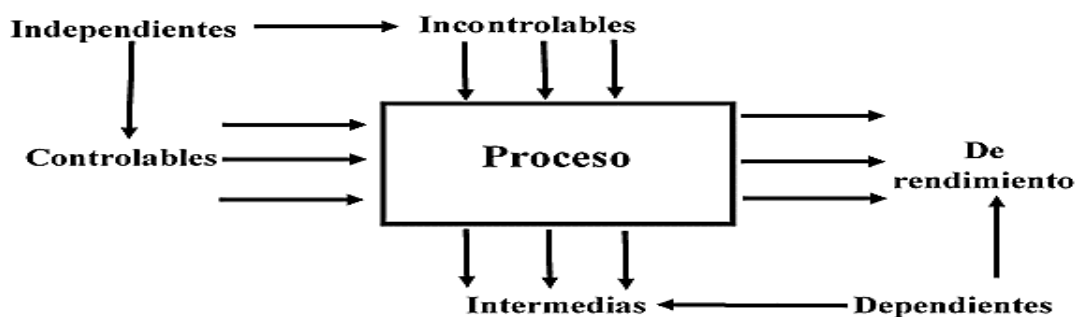
2.2.13.3. Variables en un proceso y su clasificación

En general, en un sistema multivariable se dispone de dos tipos de variables, cuyo conocimiento depende del control que sobre el proceso podemos ejercer:

1. **Variables de entrada:** “Son variables independientes del proceso, definen las características de éste y según sus valores relativos determinan los valores de las otras variables del sistema” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 2).
2. **Variables de salida:** “Son las variables dependientes del proceso y pueden considerarse como efectos o respuestas a las variables de entrada. En la figura 8, se esquematiza una clasificación de los distintos tipos de variables que se encuentran en un proceso determinado” (Arce Lopez & Cano Alpaca, 2015, pág. 2).

Figura 8

Tipos de variables en un proceso



Nota. La figura representa los distintos tipos de variables que intervienen en un proceso.

Tomado de (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 3)

De la figura 8 se tiene la siguiente clasificación de variables en un proceso:

1. Variables independientes

- a. Controlables: básica o primaria y transformada.
- b. Incontrolables: materias primas, condiciones ambientales, condiciones de operación y factores económicos.

2. Variables dependientes

- a. De rendimiento.
- b. Cualitativas o cuantitativas (física, operación)
- c. Intermedias.

2.2.13.4. Principios básicos en la experimentación

Para llevar a cabo un experimento de manera más eficiente, es fundamental aplicar métodos científicos rigurosos en su planificación. El diseño estadístico de experimentos implica estructurar un experimento de tal manera que se obtengan datos relevantes, los cuales pueden ser analizados utilizando técnicas estadísticas con el fin de generar conclusiones válidas y objetivas. La metodología estadística es la única vía que permite un análisis objetivo de problemas que implican datos susceptibles a errores experimentales. En este contexto, se destacan dos componentes esenciales en cualquier problema experimental:

- El diseño del experimento
- El análisis estadístico de los datos

Los tres principios fundamentales en el diseño de experimentos son los siguientes:

Réplicas: Se refiere a la repetición del experimento base. Este principio tiene dos aspectos clave: primero, permite al investigador estimar el error experimental, lo cual se convierte en una medida central para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas. En segundo lugar, las réplicas ofrecen una estimación más precisa del efecto de un factor específico dentro del experimento.

Aleatorización: Constituye el fundamento del uso de métodos estadísticos en el diseño experimental. La aleatorización implica que tanto la asignación del material experimental como el orden de las pruebas individuales se determinen de manera aleatoria. Esto asegura que las observaciones, o posibles errores, sean variables aleatorias independientes. La correcta aleatorización de un experimento ayuda a neutralizar el impacto de factores externos que podrían influir en los resultados.

Análisis por bloques: Esta técnica se utiliza para mejorar la precisión del experimento. Un bloque es una sección del material experimental que presenta mayor homogeneidad en comparación con el conjunto total del material. Al aplicar el análisis por bloques, se comparan las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque, lo que contribuye a una evaluación más precisa y fiable de los efectos experimentales.

2.2.13.5. Diseños experimentales de primer orden

Los diseños experimentales de primer orden se refieren a aquellos que permiten estimar con precisión los coeficientes β_j en el modelo matemático general (modelo lineal de regresión múltiples), que se expresa de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + Z_r \quad (12)$$

Entre los diseños experimentales que permiten ajustar modelos de primer orden se encuentran:

- Diseños Factoriales
- Diseños Factoriales Fraccionados
- Diseños de Plackett y Burman

Para estimar los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ de manera adecuada, es esencial trabajar con dos niveles, o valores, para cada variable controlable. Estos niveles suelen codificarse como "bajo"

y "alto", o también como “-” y “+”. Considerando el caso más sencillo, con solo una variable controlable ($k=1$), y utilizando los diseños experimentales mencionados (cuyos detalles se describirán más adelante), se puede obtener el siguiente modelo:

$$Y = b_0 + b_1X_1 \quad (13)$$

En este modelo, b_0 representa el intercepto y b_1 la pendiente. Este enfoque es útil para predecir los valores de Y dentro de un rango limitado de valores de X . Si el valor de b_1 es cercano a cero, significa que la variable X_1 tiene un efecto insignificante en Y . Dicho de otra manera, si la pendiente b_1 es cero, cualquier variación en X_1 no afectará los valores de la respuesta Y , resultando en valores constantes.

Cuando se trabaja con dos o más variables, la situación se complica debido a la posible existencia de interacciones entre ellas, lo que indica que las variables pueden no actuar de manera independiente sobre la respuesta Y (criterio de optimización). El modelo empírico para el caso de dos variables se expresa como:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 \quad (14)$$

Donde: Los parámetros b_1 y b_2 representan las pendientes correspondientes a las variables X_1 y X_2 , respectivamente. El parámetro b_{12} se conoce como el coeficiente de interacción. Si este coeficiente es igual a cero ($b_{12} = 0$), obtenemos un modelo aditivo estrictamente de primer orden. Sin embargo, si $b_{12} \neq 0$, el modelo se vuelve interactivo. Aunque el modelo interactivo se considera de segundo orden en las variables X_1 y X_2 , la representación gráfica de Y versus cualquiera de las variables consideradas será siempre una línea recta. Por lo tanto, los modelos interactivos, como el descrito, se clasifican dentro de los diseños experimentales de primer orden.

“El uso de diseños experimentales de primer orden es fundamental en las primeras etapas de la optimización. Al inicio de una investigación, se suele trabajar con un gran número de variables. El objetivo principal es evaluar el impacto de cada una de estas variables en la respuesta del proceso, eliminando aquellas que resulten poco significativas o cuyas pendientes sean cercanas a cero, lo cual se analizará más detalladamente en secciones posteriores” (Ayres Hidalgo & Torres Ponce, 1999, pág. 6).

2.2.13.6. Diseño factorial 2^k

En estudios que involucran múltiples variables independientes o factores, es útil realizar una investigación preliminar utilizando diseños factoriales. Estos permiten determinar cuáles son las variables más relevantes y significativas para el proceso. Si se sospecha que ciertas variables tienen un efecto considerable, es necesario confirmarlo con datos experimentales. Sin una planificación adecuada, podrían llevarse a cabo pruebas innecesarias, lo que incrementaría los costos totales.

Cuando se trabaja con muchos factores, es crucial establecer un procedimiento sistemático para seleccionar las condiciones bajo las cuales se realizará el diseño experimental. Aquí es donde el diseño factorial resulta útil, ya que ayuda a reducir significativamente la cantidad de pruebas experimentales necesarias para obtener la información mínima necesaria para establecer el modelo matemático.

El diseño factorial permite modificar varios factores al mismo tiempo siguiendo un modelo patrón, lo que minimiza el número de pruebas experimentales requeridas. Además, proporciona una estimación de la variabilidad del error experimental en nuestros datos. Este diseño también nos permite evaluar las interacciones entre los factores, si es que existen, lo cual no se logra con la experimentación tradicional de "un factor a la vez".

A través del uso de ANOVA, podemos identificar y reducir las variables más importantes, lo que nos permite avanzar a la etapa de optimización preliminar y cuantificar el proceso que estamos estudiando.

En trabajos exploratorios, comunes en ingeniería e investigación, se emplean diseños factoriales seleccionando dos niveles o tratamientos para cada uno de los factores, lo que resulta en una familia factorial $N=2^k$, donde N es el número de experimentos y k es el número de factores. Existen otras familias factoriales más complejas, como $3^k, 4^k, \dots, f^k$ donde f es el número de niveles de cada factor.

Además de los conceptos ya mencionados, es necesario definir lo siguiente:

- **Niveles de un factor:** Representan los diferentes valores asignados a un factor en el experimento, es decir, la intensidad o magnitud con la que se aplica un factor.
- **Combinación de tratamiento:** Se refiere al conjunto de todos los factores utilizados en un experimento específico, es decir, cualquier combinación particular de niveles de factor.
- **Respuesta:** Es el resultado numérico obtenido de una experiencia experimental, que corresponde a la variable dependiente (criterio de optimización).
- **Efecto de un factor:** Es el cambio en la respuesta causado por una modificación en el nivel de un factor determinado.
- **Unidad experimental:** Es la unidad básica sobre la cual se aplica un tratamiento o una combinación de tratamientos.
- **Error experimental:** Se presenta cuando dos unidades experimentales idénticas reciben el mismo tratamiento, pero producen respuestas o mediciones diferentes; esta diferencia entre las respuestas se denomina error experimental.

2.2.14. Definición de términos básicos

1. **Cianuración:** La cianuración es un proceso hidrometalúrgico utilizado para la extracción de metales preciosos, como el oro y la plata, a partir de sus minerales. Este método se basa en la capacidad del cianuro de sodio (NaCN) para disolver metales preciosos en presencia de oxígeno y agua, formando complejos solubles que luego pueden ser recuperados mediante procesos como la precipitación o adsorción. Es crucial controlar parámetros como la concentración de cianuro, el pH, la granulometría del mineral y el tiempo de lixiviación para maximizar la eficiencia del proceso.
2. **Granulometría:** La granulometría se refiere a la distribución del tamaño de las partículas de un mineral después de ser triturado o molido. Es un factor crítico en la cianuración, ya que influye en la superficie de contacto del mineral con la solución lixivante. Una granulometría adecuada asegura una mayor exposición del oro a la solución de cianuro, lo que facilita su disolución y extracción. En el contexto de esta tesis, se evaluará la granulometría óptima que maximice la extracción de oro.
3. **Agitación:** La agitación es una operación de mezclar la pulpa mineral con la solución de cianuro en los tanques de lixiviación para asegurar una distribución uniforme del reactivo y mantener las partículas en suspensión. Una agitación eficiente mejora la transferencia de masa entre el mineral y la solución, facilitando la disolución del oro. La configuración y velocidad de agitación son factores que se deben optimizar para mejorar la eficiencia del proceso de cianuración.
4. **Variable:** Una variable es cualquier factor, característica o condición que puede cambiar o ser controlada en un experimento o proceso. En la investigación experimental, como en el proceso de cianuración para la extracción de oro, las variables pueden ser independientes o

dependientes. Las variables independientes son aquellas que el investigador manipula deliberadamente, como la concentración de cianuro, el tiempo de lixiviación, la granulometría, o el pH. Las variables dependientes, por otro lado, son las que se miden en respuesta a los cambios en las variables independientes, como el porcentaje de extracción de oro. La correcta identificación y control de las variables es crucial para obtener resultados confiables y reproducibles en la evaluación y optimización del proceso.

5. **Evaluación de variables:** La evaluación de variables implica el análisis sistemático de los factores que pueden influir en un proceso, en este caso, la extracción de oro mediante cianuración. Se enfoca en identificar cómo cada variable (granulometría, concentración de cianuro, tiempo de lixiviación) impacta el rendimiento del proceso, permitiendo establecer las condiciones óptimas de operación.
6. **Optimización:** La optimización es el proceso de ajustar las condiciones operacionales para maximizar un objetivo específico, como la extracción de oro, mientras se minimizan los costos y se mejora la eficiencia. En el contexto de la cianuración, implica determinar las mejores combinaciones de variables que permitan obtener la máxima recuperación de oro con el menor costo y tiempo.
7. **Extracción:** es la relación entre la cantidad de oro recuperado durante el proceso de cianuración y la cantidad total de oro presente en el mineral. Este indicador es crucial para evaluar la eficiencia del proceso de extracción y se utiliza como criterio principal para medir el éxito de las condiciones experimentales aplicadas.
8. **pH:** El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución, que se expresa en una escala de 0 a 14. En el contexto de la cianuración del oro, el pH es una variable crítica que afecta la estabilidad del cianuro en solución y la eficiencia de la extracción de oro. Mantener

el pH en un rango óptimo (generalmente entre 10 y 11) es esencial para prevenir la descomposición del cianuro y minimizar la formación de cianuro de hidrógeno, lo que puede influir directamente en el rendimiento del proceso y en la seguridad operativa.

9. **Parámetros operativos:** Son todas aquellas condiciones físicas, químicas y mecánicas que influyen directamente en el comportamiento del proceso.

CAPÍTULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La optimización de variables operacionales, como la granulometría del mineral, la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C., permite maximizar la extracción de oro alcanzando valores superiores al 90%.

3.1.2. Hipótesis específicas

HE 1: Una granulometría del mineral de 80%-200M permite lograr una extracción de oro superior al 90% en el proceso de cianuración por agitación, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

HE 2: Una concentración de 0.15 g/l de NaCN permite una extracción de oro superior al 90% de oro por el proceso de cianuración por agitación, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

HE 3: Un tiempo de 72 horas de cianuración asegura una extracción de oro superior al 90%, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

3.2. Variables

3.2.1. Variable dependiente

Porcentaje de extracción de oro (Y): Es la proporción del oro contenido en el mineral que es extraído mediante el proceso de cianuración por agitación, expresado en porcentaje.

3.2.1.2. Variables independientes (X_i)

Granulometría (X_1): Se refiere al tamaño promedio de las partículas del mineral después de ser triturado y molido, expresado en micrones.

Concentración de cianuro (X_2): cantidad de reactivo de cianuro de sodio presente por unidad de volumen de la solución de cianuro.

Tiempo de cianuración (X_3): es el período durante el cual el mineral aurífero está interactuando con la solución de cianuro bajo agitación, permitiendo que ocurra la disolución del oro.

En el proceso de cianuración para la extracción de oro de los minerales del yacimiento ISHIHUINCA, los niveles de las variables independientes que afectan en menor o mayor medida el proceso se presentan en la siguiente tabla

Tabla 1

Variables independientes y sus niveles

Variables independientes	Nivel de los variables		Unidades
	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)	
Granulometría -m200 (X_1):	65	86	%
Concentración de cianuro (X_2):	800	1500	ppm
Tiempo de cianuración (X_3):	24	72	h

Nota. La tabla muestra las variables independientes y sus niveles. Elaborado por los tesisistas.

3.2.2. Operacionalización de variables

Tabla 2

Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	DIMENSIÓN	UNIDAD	INSTRUMENTO
Extracción de oro (Y)	Dependiente	Es la proporción del oro contenido en el mineral que es extraído mediante el proceso de cianuración por agitación, expresado en porcentaje.	Cantidad de oro disuelto en la solución de lixiviación (cianurada), expresada como un porcentaje del total de oro contenido en el mineral original.	Oro presente en la solución de cianuro (PLS).	0 a 100	%	Balance de materia, análisis químico y cálculos matemáticos.
Granulometría del mineral (X1)	Independiente	Se refiere al tamaño promedio de las partículas del mineral después de ser triturado y molido, expresado en micrones.	Se determina mediante un análisis granulométrico, utilizando malla 200ASTM para separar las fracciones de tamaño, expresado en micrones.	Porcentaje de mineral que pasa la malla 200.	65 a 86	µm	Tamices y hoja de cálculo.
Concentración de NaCN (X2)	Independiente	Cantidad de reactivo de cianuro de sodio presente por unidad de volumen de la solución de cianuro.	Se mide en términos de la cantidad de cianuro de sodio en la solución, generalmente expresada en gramos por litro.	Presencia de cianuro en la solución.	0.08 a 0.15	g/l	Titulación con nitrato de plata y yoduro de potasio.
Tiempo de cianuración (X3)	Independiente	Es el periodo durante el cual el mineral aurífero está en interactuando con la solución de cianuro bajo agitación permitiendo que ocurra la disolución del oro.	Intervalo desde el inicio del contacto entre el mineral y la solución de cianuro hasta el final del proceso de cianuración	Cantidad de oro extraído en función del tiempo.	24 a 72	h	Cronometro

Nota. En la tabla se muestra la operacionalización de las variables independientes y la dependiente.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Ámbito de estudio: Localización Política y Geográfica

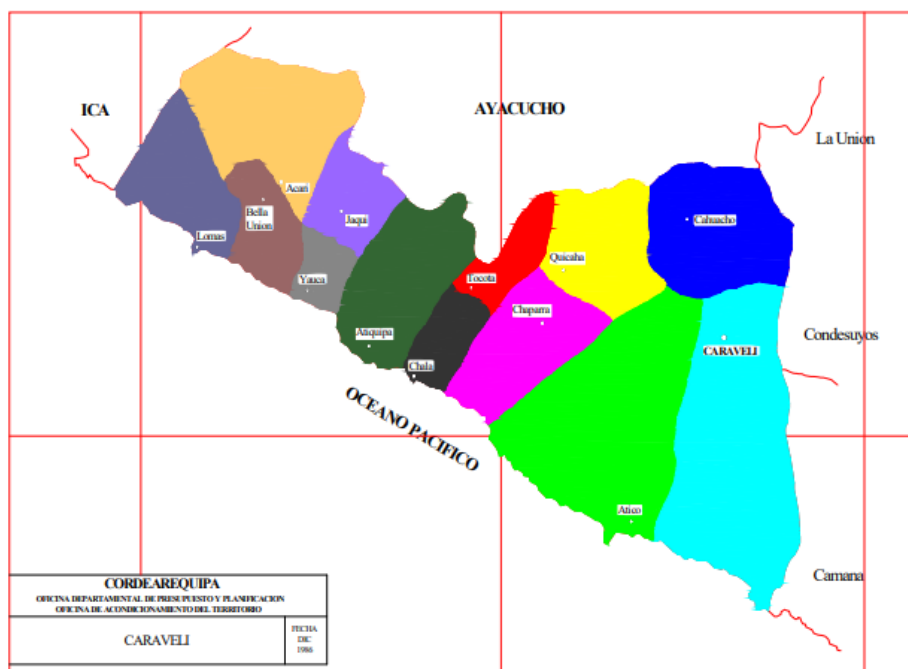
El estudio se realizó con las muestras del yacimiento yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C., ubicado en el distrito de Caraveli (figura 9), que es uno de los 13 distritos de la provincia del mismo nombre. La capital del distrito es la ciudad de Caraveli, ubicada en la margen derecha del río Caraveli, a $15^{\circ}45'47''$ de latitud sur y $73^{\circ}21'20''$ de longitud Oeste, a una altitud promedio de 1,779 m.s.n.m. La capital de distrito dista 77 Km. (Atico a Caraveli), de la Panamericana Sur en el kilómetro 702.

Limites:

- ✓ Por el Nor - Este con el distrito de Tauria de la provincia de la Unión
- ✓ Por el Norte con el distrito de Cahuacho
- ✓ Por el Sur Oeste con el Océano Pacífico
- ✓ Por el Este con el distrito de Yanaquihua y Andaray de la provincia de Condesuyos y el distrito de Tauria de la provincia de la Unión y los distritos de Mariano Nicolás Valcarcel y Ocoña de la provincia de Camana.
- ✓ Por el Oeste con el distrito de Atico.

Figura 9

Ubicación geográfica de la municipalidad distrital de Caraveli.



Nota. En la figura se representa la ubicación del distrito donde se encuentra ubicado el yacimiento. Tomado de CORAREQUIPA.

El yacimiento de Ishihuinca se encuentra en la zona suroeste del Perú, cercano a los límites con las regiones de Ica y Arequipa. Según la figura 10, está localizado en el área sureste de la provincia de Caravelí, cerca de otras áreas mineras, como Mina Chipmo y Cotahuasi.

La ubicación exacta del yacimiento está marcada dentro de un área delimitada en la imagen con el nombre "MINA ISHIHUINCA", al este de la carretera principal que conecta las localidades cercanas.

Este mapa indica claramente las conexiones viales y la proximidad del yacimiento a otras áreas importantes en la región, lo que facilita su acceso desde distintas provincias.

Figura 10*Ubicación del yacimiento minero ISHIHUINCA*

Nota. En la figura se tiene la ubicación del yacimiento minero ISHIHUINCA. Tomado de CORAREQUIPA.

4.2. Metodología de la investigación

Esta investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, donde se recolectaron y analizaron datos numéricos mediante técnicas estadísticas, con el propósito de establecer las interacciones entre las variables independientes (granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) y la variable dependiente (porcentaje de extracción de oro). El objetivo

principal es determinar qué combinación de estas variables optimiza el proceso de extracción de oro y plata.

El estudio fue de carácter experimental, ya que se realizaron ensayos controlados en un laboratorio metalúrgico, replicando las condiciones reales de operación del proceso de cianuración por agitación. De este modo, se identificó cómo los cambios en las variables operacionales afectan la extracción de los metales preciosos. Se ha seleccionado un diseño experimental factorial de tres factores (2^3), lo que permitió evaluar de manera detallada tanto los efectos individuales de cada variable como sus interacciones, que proporcionó información para la optimización del proceso.

El tipo de investigación es explicativa y aplicada. Es explicativa porque se buscó identificar las relaciones causales entre las variables y cómo estas influyen en la eficiencia del proceso. Es aplicada, ya que los resultados tendrán implicaciones prácticas para mejorar el desempeño del proceso de cianuración en la planta de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.

El nivel de investigación es correlacional, ya que se pretende analizar cómo las diferentes combinaciones de las variables afectan el porcentaje de extracción de oro y determinar qué condiciones permiten alcanzar la máxima eficiencia en el proceso.

4.3. Población, selección de muestra y tamaño de muestra

4.3.1 Población

La población de estudio fue constituida por los minerales auríferos provenientes del yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C. Estos minerales presentan una ley promedio de 10.76 g Au/TM, con características mineralógicas que justifican la aplicación del proceso de cianuración.

4.3.1 Muestra

Para los ensayos experimentales, la muestra se recogió de la población de 5000kg, compuesta por aproximadamente de 50 kg de mineral aurífero, seleccionados de la cancha de minerales del yacimiento ISHIHUINCA. Para garantizar la representatividad de la muestra y la equiprobabilidad, el tamaño de la muestra fue en función del tamaño de la población y el número de pruebas experimentales según el diseño factorial.

4.3.1 Selección de la muestra

La selección de la muestra se realizó de manera aleatoria dentro de las áreas de explotación del yacimiento ISHIHUINCA, asegurando una representación adecuada de las distintas vetas mineralizadas. Se consideró una granulometría previa de 5" para la homogenización y representatividad de la muestra.

Para determinar cuántas etapas de muestreo se debe realizar para obtener 50 kg de muestra a partir de un lote de 5000kg, fue necesario considerar el factor de reducción en cada etapa de muestreo. Por lo general, el factor de reducción depende del método de muestreo, pero un valor común es reducir el tamaño del lote en un factor de $\frac{1}{2}$ (dividir por 2) en cada etapa.

Si en cada etapa el tamaño del lote se reduce a la mitad, el número de etapas para obtener una muestra de 50kg, puede calcularse mediante la fórmula:

$$T = \log_2 \frac{L}{M} \quad (15)$$

Donde:

T: Número de etapas de reducción.

L: Tamaño inicial del lote (5000kg).

M: Tamaño de la muestra final (50kg).

Sustituyendo los valores en la ecuación... se tiene:

$$T = \log_2 \frac{500}{50} = \log_2(100)$$

Usando el cambio de base, donde:

$$\log_2(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(2)}$$

Por consiguiente:

$$T = \log_2 \frac{500}{50} = \log_2(100) = \frac{\log_{10}(100)}{\log_{10}(2)} = 6.64 \cong 7$$

Por lo tanto, se realizó 7 etapas de muestreo para reducir un lote 5000 kg a una muestra de 50kg.

4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

En esta investigación, se utilizaron técnicas e instrumentos específicos para garantizar la precisión en la recolección de datos relacionados con el proceso de cianuración, evaluando el impacto de las variables operacionales en la extracción de oro.

4.4.1. Técnicas

- **Muestreo y preparación de muestras:** Se realizaron trabajos de muestreo en el yacimiento de un tamaño de 50 kilogramos, las mismas que se sometieron a una preparación mecánica en el laboratorio.
- **Pruebas experimentales:** La principal técnica fue la ejecución de ensayos metalúrgicos bajo diferentes combinaciones de granulometría, concentración de cianuro y tiempos de cianuración. Estos ensayos permitieron medir directamente la eficiencia de extracción de oro en condiciones controladas de laboratorio.
- **Observación directa:** Durante el desarrollo de los experimentos, se realizó una observación directa y controlada de cambios en las muestras de mineral durante el proceso de cianuración, con el fin de identificar posibles desviaciones o comportamientos anómalos.

- **Análisis químico:** Se emplearon métodos de volumetría para determinar el cianuro libre y su reposición, y el análisis químico para determinar la concentración de oro disuelto en la solución y el residuo, lo que permitió calcular el porcentaje de extracción de oro.
- **Balances metalúrgicos:** se realizaron balances metalúrgicos en cabeza, solución PLS y rípios para determinar el nivel de extracción de oro.

4.4.2. Instrumentos

Los instrumentos para la recolección de datos en esta investigación fueron: Libros, revistas, tesis, tesinas, artículos, informes, formatos de balance metalúrgico, otros.

4.5. Equipos, materiales y reactivos requeridos

4.5.1 Equipos requeridos

- **Equipo de cianuración por rodillos:** Un sistema de cianuración en botellas roladas de laboratorio se utilizarn para llevar a cabo los ensayos experimentales bajo condiciones específicas del diseño factorial.
- **Balanza analítica:** Instrumento utilizado para pesar las muestras de mineral antes y después del proceso de cianuración, garantizando la exactitud en los cálculos de recuperación de oro.
- **Chancadora de quijada y cónica:** Se utilizó para reducir de tamaño de la muestra de mineral hasta una granulometría de 100%-10M.
- **Molino de bolas de laboratorio:** Se utilizó para preparar las muestras de mineral, reduciendo su granulometría a los niveles requeridos por los ensayos experimentales.
- **pH-metro:** Este instrumento se utilizó para controlar y ajustar el pH de las soluciones durante los ensayos de cianuración, asegurando que las condiciones químicas sean las adecuadas para la disolución del oro.

- ***Cronómetros:*** Se utilizó para medir con precisión los tiempos de cianuración, una variable clave en los ensayos experimentales.
- ***Laboratorios de servicio en análisis químico:*** Se recorrió a los laboratorios externos para determinar la concentración de oro en las soluciones obtenidas después del proceso de lixiviación. Es crucial para medir la cantidad de oro extraído y calcular el porcentaje de recuperación.

4.5.2 Materiales requeridos

- Muestra de mineral aurífero del yacimiento ISHIHUINCA.
- Bolsas de polietileno para el transporte de muestras.
- Bandejas de aceros inoxidable.
- Tamices.
- Vaso de precipitado, matraces y pipetas para el manejo de soluciones.
- Bandejas metálicas.
- Mantas de marroquín.
- Brochas.
- Espátula.
- Pizetas.
- EPPs
- Reactores de botellas Dama Juanas.
- Goteros.
- Soporte universal.
- Otros.

4.5.3 Reactivos

- Cianuro de sodio (NaCN).
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ioduro de potasio (KI) al 5%.
- Nitrato de plata (AgNO₃) 4.333 g/l.
- Agua destilada.
- Otros.

4.6. Técnicas de procesamiento de datos y plan de análisis de datos

En la investigación se utilizó un análisis estadístico factorial para procesar los datos obtenidos en los ensayos experimentales. Los resultados fueron analizados utilizando **ANOVA (Análisis de Varianza)** para identificar las diferencias significativas entre los niveles de las variables operacionales (granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) en términos de la extracción de oro.

Se empleó software como **Minitab 18.1** para realizar el análisis de los datos experimentales. Los resultados fueron presentados mediante tablas y gráficos que ilustrarán el efecto de las distintas variables sobre la recuperación de oro, y se identificará el conjunto óptimo de condiciones experimentales.

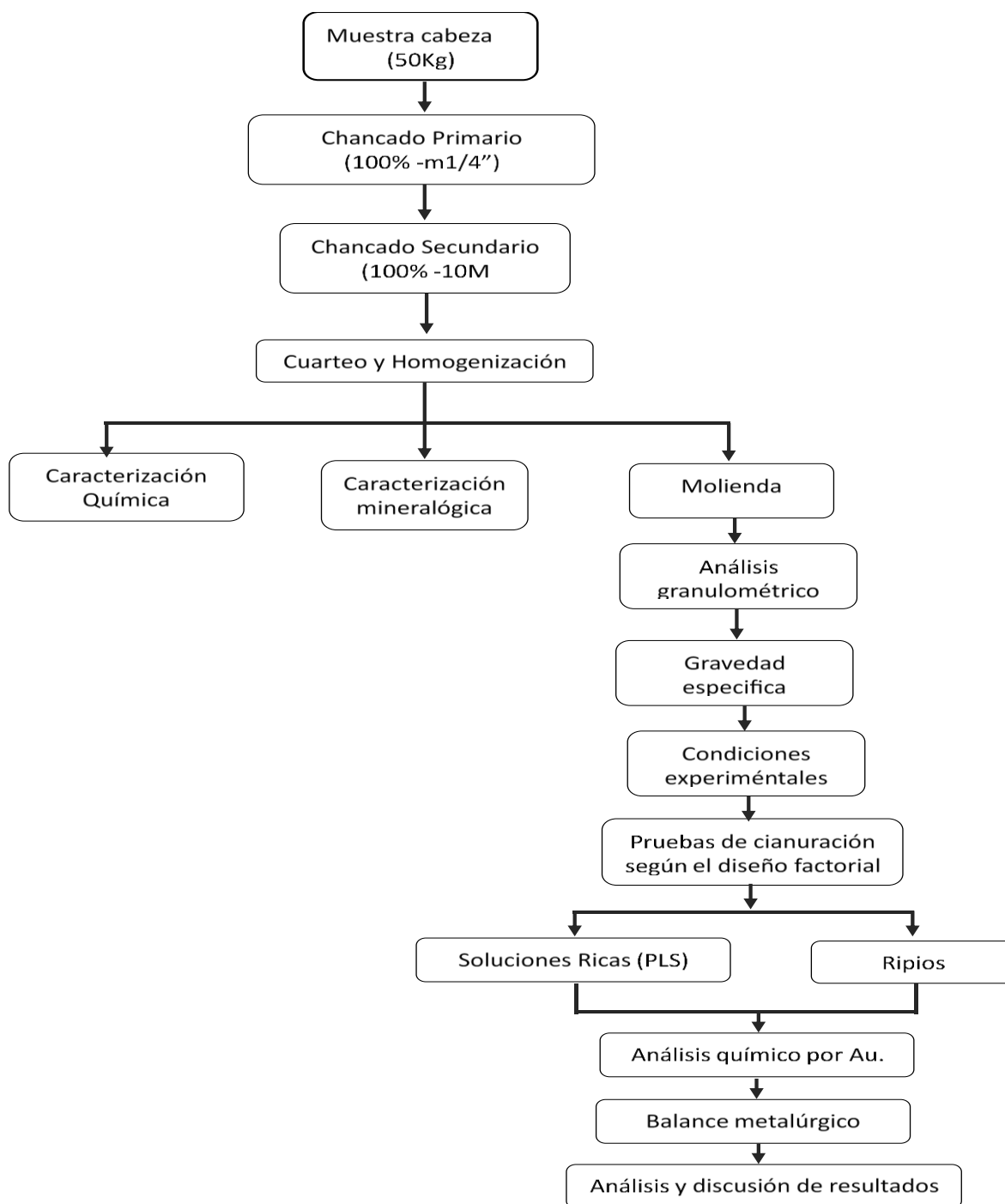
El plan de análisis de datos incluirá: evaluación de la significancia estadística de cada variable independiente en la extracción de oro, identificación de las interacciones entre las variables y optimización de las condiciones operativas a través de modelos predictivos basados en los datos obtenidos.

4.7. Metodología aplicada a la investigación de tesis

La metodología empleada incluye la planificación de experimentos utilizando el diseño factorial 2^3 , donde se evaluarán tres variables independientes (granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) en dos niveles (alto y bajo). Para cada combinación, se realizarán pruebas de cianuración por agitación, y los resultados obtenidos en términos de porcentaje de extracción de oro y plata se compararán y analizarán para determinar la configuración más eficiente del proceso.

El proceso experimental llevado a cabo en esta investigación se estructuró en diversas etapas, las cuales se presentan de manera detallada en la figura 11, mediante un diagrama de flujo. Este diagrama ilustra de forma clara y secuencial cada fase del desarrollo experimental, facilitando la comprensión integral del procedimiento seguido.

Esta metodología organizada permite visualizar el flujo del proceso desde la preparación de las muestras hasta la evaluación final de los resultados experimentales, asegurando una estructura sistemática y coherente en todas las etapas del estudio.

Figura 11*Diagrama de flujo del desarrollo experimental*

Nota. La figura muestra las diferentes etapas del proceso experimental. Elaborado por las tesisistas.

CAPITULO V

DESARROLLO Y RESULTADOS EXPERIEMNTALES

5.1.Desarrollo del trabajo de investigación

5.1.1. Muestra y muestreo

En un proyecto minero, las decisiones clave, desde la etapa de exploración hasta el cierre de la operación, dependen en gran medida de los valores obtenidos a partir del material muestreado, es decir, de la calidad y representatividad de las muestras. Estas decisiones pueden tener un impacto económico significativo, alcanzando millones de dólares.

En esta investigación, se recolectaron muestras representativas que reflejan las condiciones promedio y la calidad del yacimiento ESHIHUINCA. La técnica empleada consistió en la selección de una pequeña parte del conjunto de minerales en la cancha (500kg), con el fin de inferir el valor de una o varias características del yacimiento en su totalidad. Para ello, se realizaron muestreos por reducción hasta obtener un composito deseado. A continuación, se realizaron la reducción del tamaño de acuerdo a la fórmula 15 hasta obtener una sub muestra de 50kg. Esta muestra fue trasladada al laboratorio para su correspondiente tratamiento y análisis.

5.1.2. Preparación mecánica de la muestra

La muestra total recibida en el laboratorio, de un peso aproximado de 50 kg, consistía predominantemente en fragmentos con tamaños de hasta 5 pulgadas. Dada la necesidad de obtener un material de granulometría adecuada para los ensayos experimentales, se procedió con una preparación mecánica del mineral. Este proceso fue fundamental para reducir y homogeneizar el tamaño de las partículas, asegurando una distribución óptima para el procesamiento subsiguiente.

5.1.2.1. Chancado primario y secundario

El proceso de reducción de tamaño inició con el chancado primario, empleando una chancadora de quijadas de 5"x 4" (anexo 2). Este equipo permitió reducir el material de la muestra hasta obtener partículas de un tamaño inferior a $\frac{1}{4}$ de pulgada. A continuación, se llevó a cabo el chancado secundario utilizando una chancadora cónica (anexo 2), la cual disminuyó aún más el tamaño de las partículas, logrando una distribución granulométrica de 100% pasante por malla -10 Tyler (figura 12). Este proceso de reducción secuencial aseguró que el mineral presente la granulometría adecuada para los ensayos metalúrgicos y facilitó la posterior etapa de molienda, garantizando un tamaño de partícula adecuado para maximizar la eficiencia en la liberación de valores metálicos.

5.1.3. Cuarteo y homogenización

Una vez que la muestra fue reducida a una granulometría de 100% pasante por malla -10 Tyler, se procedió con el proceso de cuarteo (anexo 3) para garantizar la representatividad del material en las pruebas experimentales. Para ello, se empleó el método de cuarteo manual mediante la técnica de cuartos opuestos: la muestra se dividió en cuatro partes iguales, y se seleccionaron dos cuartos opuestos para continuar con el proceso, mientras que los dos restantes se reservaron.

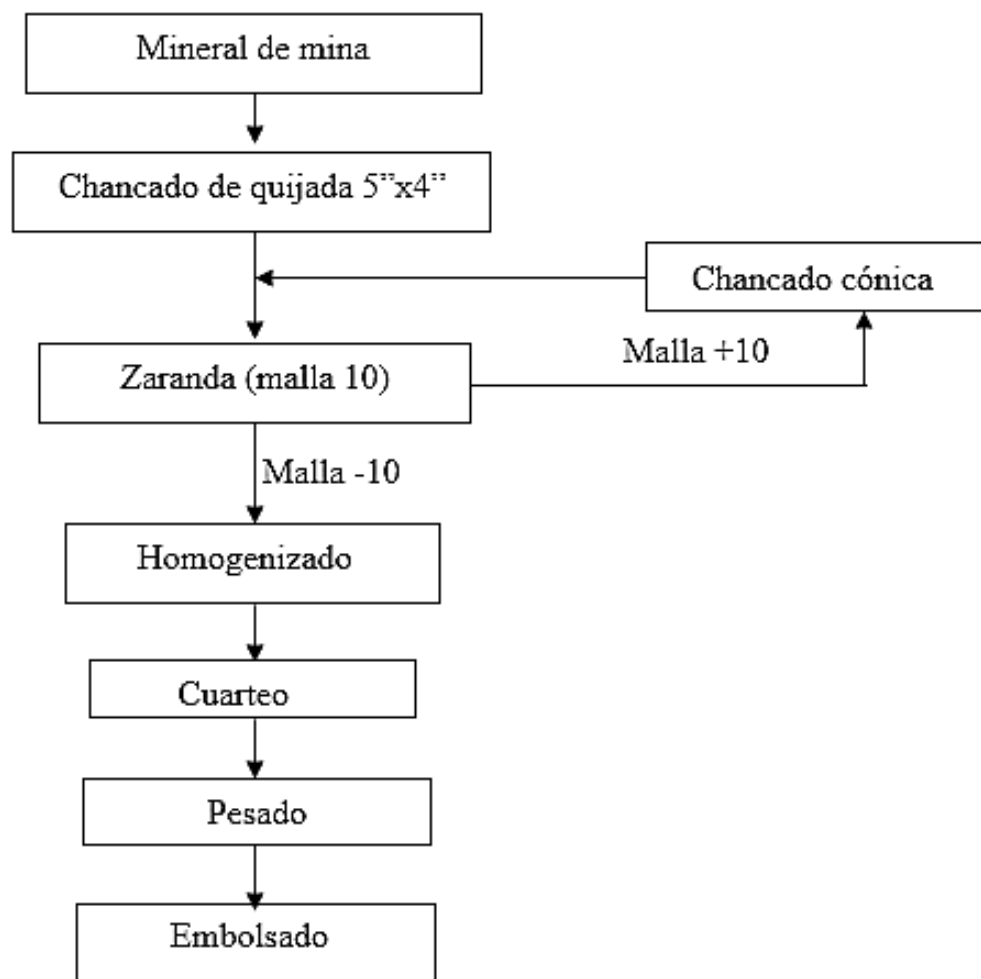
Posteriormente, se utilizó un cortador de rifles, realizando cuarteos sucesivos hasta obtener las porciones requeridas para las diferentes pruebas experimentales. Este método asegura una distribución homogénea de las partículas en cada submuestra, minimizando posibles sesgos en los resultados de las pruebas.

Finalmente, las muestras obtenidas fueron pesadas y embolsadas adecuadamente para evitar cualquier tipo de contaminación o pérdida de material, preservando así la integridad de

las muestras para su posterior análisis (anexo 4). Este procedimiento se detalla en la figura 12, que ilustra las etapas del cuarteo y homogenización.

Figura 12

Etapas de la preparación mecánica de la muestra



Nota. En la figura se muestra un diagrama de flujo de las etapas de preparación mecánica de la muestra en el laboratorio. Elaborado por tesistas.

5.1.4. Caracterización de la muestra de mineral

5.1.4.1. Caracterización química

Para llevar a cabo la parte experimental de esta investigación, resultó esencial determinar la ley del mineral. Se realizó un análisis químico utilizando el método de ensayo al

fuego para la cuantificación de oro, mientras que la presencia de plata y cobre se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica. Estos métodos garantizan una alta precisión en la medición de los contenidos de los elementos presentes en la muestra.

Los análisis fueron realizados por el laboratorio certificado de Laboratorios Analíticos del Sur (LAS), el cual emitió un informe técnico con los resultados (anexo 5), que se detallan en la tabla 3. Este análisis químico permitió establecer la calidad del mineral, lo que sirvió como base para diseñar y ejecutar las pruebas experimentales correspondientes.

Tabla 3

Reporte de análisis químico de cabeza

Código de muestra	Au	Ag	Cu
	(g/TM)	(g/TM)	(%)
ISHI – 001 (CABEZA)	10.76	93	1.051

Nota. La tabla muestra la ley de cabeza de la muestra en estudio. Tomado del reporte del laboratorio analítica del sur L.A.S (anexo 5).

5.1.4.2. Caracterización mineralógica

La composición mineralógica es clave para seleccionar y diseñar el proceso metalúrgico adecuado para el beneficio del mineral. Cada proceso está condicionado por la naturaleza de los minerales presentes en la muestra. En la presente investigación, la caracterización mineralógica fue realizada por un geólogo especializado, cuyos resultados se detallan en la tabla 4, como resumen del anexo 6. Esta caracterización permitió identificar tanto los minerales de valor económico como los minerales de ganga, proporcionando la "llave metalúrgica" para las pruebas experimentales.

Tabla 4*Composición mineralógica de la muestra*

Material de mena		
Mineral de valor económico	Fórmula Química	Porcentaje (%)
Trazas de oro	Au	-
Pirita octagonal	FeS ₂	2%
Calcopirita	CuFeS ₂	0.5%
Magnetita	Fe ₃ O ₄	0.5%
Galena	PbS	0.5%
Material de ganga		
Cuarzo hialino	SiO ₂	2%
Cuarzo lechoso	SiO ₂	2%
Jarosita	KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	1.0%
Limonita propiamente dicha	FeO(OH)	0.5%
Hematita	Fe ₂ O ₃	0.5%
Plagioclasa	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	0.5%

Nota. En la tabla se puede apreciar la mena y la ganga presente en la muestra y su proporción.

Tomado del reporte del especialista (anexo 6).

Según los resultados, se observa la presencia de trazas de oro, pirita octagonal, calcopirita, magnetita y galena como minerales de interés económico. Además, se identificaron materiales de ganga como el cuarzo hialino, cuarzo lechoso, jarosita, limonita, hematita y plagioclasa, lo que permite inferir la complejidad del procesamiento y las posibles interacciones mineralógicas que afectarán la eficiencia de la extracción de oro. Estos datos proporcionan un panorama detallado del comportamiento del mineral durante las pruebas metalúrgicas.

5.1.4.3. Determinación del tiempo óptimo de molienda y análisis granulométrico

Para determinar el tiempo óptimo de molienda que garantice una distribución granulométrica entre 65% y 86% pasante por la malla -200M, se llevaron a cabo cinco pruebas

de molienda (anexo7) con distintos tiempos de residencia: 5, 10, 15, 20 y 25 minutos. El objetivo de estas pruebas fue desarrollar un modelo matemático que permitiera calcular el tiempo de molienda necesario para alcanzar el tamaño de partícula requerido en cada prueba experimental.

Las pruebas se realizaron utilizando un molino de bolas estándar en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Las condiciones operativas del molino, incluyendo el tipo de medio de molienda, la velocidad crítica y la carga circulante, se detallan en la siguiente tabla.

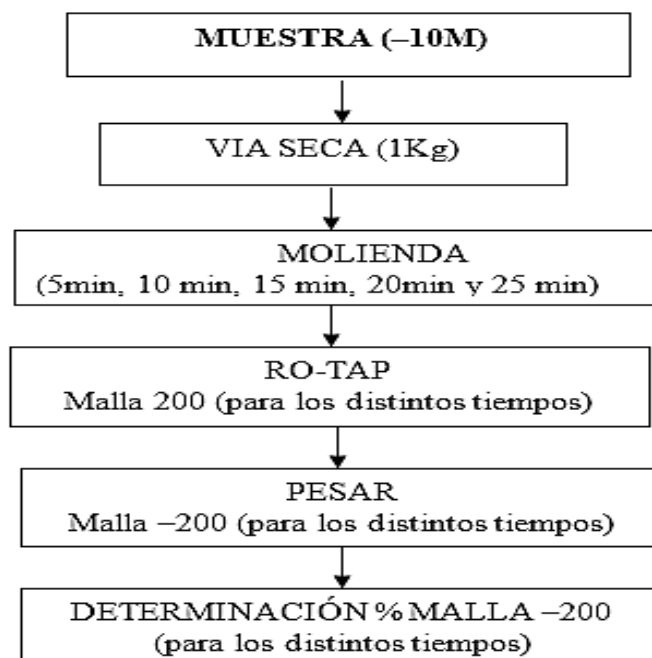
Tabla 5

Condiciones operativas del molino de bolas

Diseño del equipo	Longitud (")	13
	Diámetro interno (")	8
	Volumen interno (l)	10.71
Parte operativa	Velocidad crítica (rpm)	27.05
	Velocidad operativa (rpm)	20,26
	Carga de mineral (Kg)	1
	Peso total (Kg)	10.46
Distribución de bolas		
Cantidad de bolas	Peso de bolas unitarias (g)	Diámetro (")
31	67	1
37	227	1.5

Nota. En la tabla se muestra las características del molino utilizado. Elaboración propia de tesistas.

El procedimiento se muestra en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 13.

Figura 13*Procedimiento de la moliendabilidad*

Nota. La figura muestra un diagrama de flujo de las etapas de la molienda. Elaboración de tesisistas.

Los resultados obtenidos en el procedimiento de la molienda, según la figura 13, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6*Resultados de las pruebas de molienda*

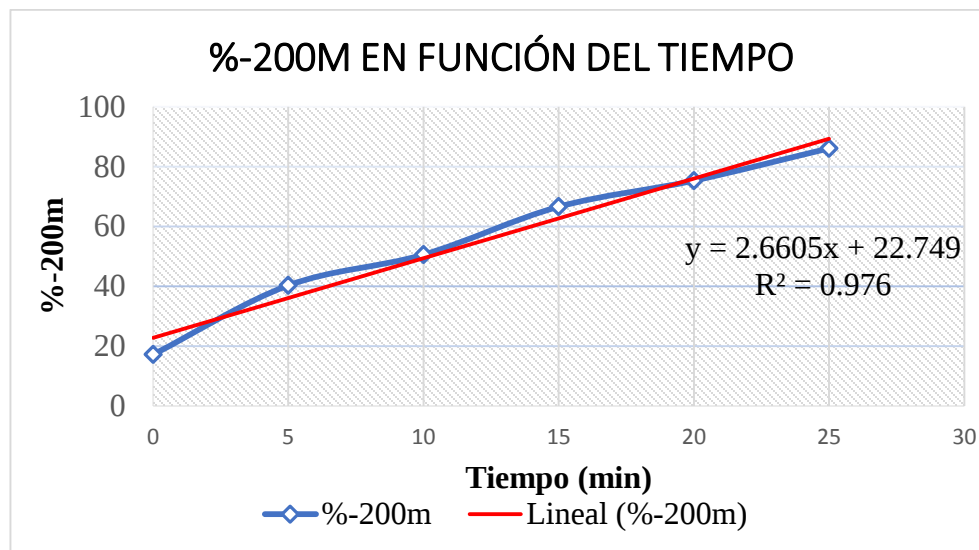
Tiempo	
(min)	%-200m
0	17.19
5	40.29
10	50.57
15	66.58
20	75.3
25	86.1

Nota. La tabla muestra los %-200m a diferentes tiempos de molienda. Elaborado por tesisistas.

Con los resultados de la tabla 6 se graficó el porcentaje de la malla -200 en función al tiempo (figura 14), luego se linealizó para obtener un modelo matemático que permita determinar el tiempo óptimo de molienda.

Figura 14

Grafica %-200m vs tiempo



Nota. En la figura se ilustra la gráfica de los resultados de la molienda y su linealización con su modelo matemático. Elaboración de tesis.

A partir de la figura 14, el modelo matemático que representa la moliendabilidad es:

$$Y = 2.6605X + 22.749 \quad (15)$$

Donde:

Y = %-200m.

X = tiempo requerido para alcanzar el porcentaje -200m.

Teniendo en cuenta que la granulometría es una de las variables de estudio con un nivel inferior de Y = 65%-200m y Y = 86%-200m (tabla 1), se requiere determinar los tiempos de molienda para cada caso.

Para calcular el tiempo de molienda requerido para obtener los valores deseados de 65%-200m y 86%-200m, se usó la ecuación 15 donde:

$$Y=2.6605X+22.749$$

Donde:

Y es el porcentaje de material que pasa por la malla -200 (en este caso, 65% y 86%), X es el tiempo de molienda en minutos que necesitamos calcular.

Cálculo para obtener 65%-200m

Usamos la ecuación $Y=2.6605X+22.749$ y sustituimos $Y= 65$ para encontrar X:

$$65=2.6605X+22.74965$$

Restamos 22.749 de ambos lados:

$$65-22.749 = 2.6605X$$

$$42.251=2.6605X$$

Dividimos ambos lados entre 2.6605:

$$X = \frac{42.251}{2.6605}$$

$$X \approx 15.88 \text{ minutos.}$$

Cálculo para obtener 86%-200m

Usamos la ecuación $Y=2.6605X+22.$ y sustituimos $Y=86$ para encontrar X:

$$86=2.6605X+22.749$$

Restamos 22.749 de ambos lados:

$$86-22.749=2.6605X$$

$$63.251=2.6605X$$

Dividimos ambos lados entre 2.6605:

$$X = \frac{63.251}{2.6605}$$

$$X \approx 23.77 \text{ minutos.}$$

De los cálculos realizados se concluye lo siguiente:

- ✓ Para obtener 65%-200m, se requieren aproximadamente **15.88 minutos** de molienda.
- ✓ Para obtener 86%-200m, se requieren aproximadamente **23.77 minutos** de molienda.

5.1.5. Determinación de la gravedad específica

La gravedad específica es una propiedad física fundamental del mineral que permite caracterizar su densidad relativa en comparación con el agua. Este valor es crucial para evaluar su comportamiento en los procesos metalúrgicos.

Para la determinación de la gravedad específica de la muestra de mineral del yacimiento ISHIHUINCA, se utilizó el método de la fiola (anexo 7). Se preparó una muestra representativa de 100 gramos para cada prueba, con una granulometría de 100% pasante por la malla -100. Se realizaron cinco réplicas con el fin de garantizar la precisión de los resultados, los cuales se presentan en la tabla correspondiente (tabla 7).

Tabla 7

Datos y resultados de la gravedad específica

Nº Prueba	Wm	W1	W2	W3	W4	G.E (g/cc)
1	100	78.7	277.48	350.31	178.7	3.68
2	100	78.7	277.43	350.34	178.7	3.69
3	100	78.7	277.4	350.3	178.7	3.69
4	100	78.7	277.1	350.02	178.7	3.69
5	100	78.7	277.2	350.2	178.7	3.70
PROMEDIO						3.69

Nota. La tabla muestra los datos y los resultados de las gravedades específicas de cada prueba. Elaboración de tesisistas.

A partir de los datos obtenidos en las pruebas, se procedió al cálculo de la gravedad específica (G.E) del mineral, empleando la siguiente fórmula:

$$GE: \frac{W_m}{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_4)} \quad (16)$$

Donde:

W_m = Peso del mineral

W_1 = Peso de la fiola

W_2 = Peso de fiola + peso de agua

W_3 = Peso de fiola + peso de mineral + peso de agua

W_4 = Peso fiola + peso mineral

Con el valor obtenido, es posible realizar balance de pulpa y tener los pesos adecuados del mineral y agua para su respectiva aplicación en la parte experimental de lixiviación.

5.1.6. Condiciones operacionales para el proceso de cianuración

Para la ejecución de las pruebas experimentales, se manipularon intencionalmente las variables independientes (tabla 1), variando de sus niveles bajos a altos según el diseño experimental establecido. Además de las variables independientes, se controlaron otras variables que funcionaron como parámetros constantes para cada ensayo, con el objetivo de mantener condiciones uniformes en el proceso de cianuración. Los parámetros definidos para cada prueba experimental fueron los siguientes:

- ✓ **Porcentaje de sólidos:** 30.01%
- ✓ **Gravedad específica:** 3.69 g/cc (promedio de la tabla 7).
- ✓ **pH:** 11
- ✓ **Volumen de pulpa:** 0.850 L (en función de la capacidad del reactor).

Estas condiciones se mantuvieron constantes para garantizar la reproducibilidad de los experimentos y permitir la correcta evaluación del impacto de las variables independientes en el proceso de cianuración

5.1.6.1. Cantidad de mineral y volumen de solución requerida para cada prueba

Teniendo los parámetros operacionales se procede a calcular la cantidad de mineral y el volumen de la solución. Para lo cual se utilizó la siguiente relación:

$$\rho_p = \frac{100GE}{\%S + GE(100 - \%S)} \quad (17)$$

Donde:

ρ_p = Densidad de la pulpa.

GE = Gravedad específica de mineral.

%S = Porcentaje de sólidos de la pulpa.

Utilizando la ecuación 17, se procede a calcular la densidad de la pulpa de volumen de 0.843 l.

$$\rho_p = \frac{100 * 3.69}{30.01 + 3.69(100 - 30.01)} = 1280 g/l$$

De donde:

$$\text{Peso de mineral: } W_s = \left(\frac{30.01}{100}\right) * \left(1280 \frac{g}{l}\right) * (0.850l) = 326.48g$$

$$\text{Volumen de la solución: } V_s = \left(\frac{100 - 30.01}{100}\right) * \left(1280 \frac{g}{l}\right) * (0.843l) = \frac{761.52g}{\frac{1g}{cc}} = 0.76152l$$

5.1.6.2. Cantidad de cianuro de sodio requerido en su nivel bajo y alto

La concentración de cianuro de sodio (NaCN) fue una de las variables independientes clave cuya influencia se evaluó en sus niveles bajo y alto durante el proceso de extracción de oro en las pruebas experimentales. Estas concentraciones se ajustaron para analizar su efecto en la recuperación del metal precioso. Las cantidades de cianuro de sodio necesarias para cada nivel de prueba fueron cuidadosamente calculadas y dosificadas, garantizando una adecuada

disolución del oro. A continuación, se realizan los cálculos para determinar las cantidades de NaCN requeridas para los niveles evaluados:

Cantidad de cianuro de sodio requerido en su nivel bajo de 0.8g/l, según la tabla 1.

$W(\text{NaCN}) = (\text{volumen de solución}) * (\text{concentración de cianuro en su nivel bajo}).$

$$W(\text{NaCN}) = (0.76152l * 0.8 \frac{g}{l} = 0.61g$$

Cantidad de cianuro de sodio requerido en su nivel alto de 1.5 g/l, según la tabla 1.

$W(\text{NaCN}) = (\text{volumen de solución}) * (\text{concentración de cianuro en su nivel alto}).$

$$W(\text{NaCN}) = (0.76152l * 1.5 \frac{g}{l} = 1.14g$$

Cantidad de cianuro de sodio requerido en el punto central de su nivel baja y alto.

$W(\text{NaCN}) = (\text{volumen de solución}) * (\text{concentración de cianuro en su nivel alto}).$

$$W(\text{NaCN}) = (0.76152l * 1.1 \frac{g}{l} = 0.84g$$

5.1.6.3. Condiciones operativas según la matriz codificada del diseño factorial

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se deben considerar tanto los parámetros calculados como las variables a evaluar, de acuerdo con el diseño factorial 2^3 con dos replicas en el punto central, que incluye el tamaño de partícula, la concentración de cianuro y el tiempo de cianuración (según la tabla 1). Estas variables se dispusieron estratégicamente para cada prueba experimental, organizadas conforme a la matriz codificada completa y los valores reales correspondientes al diseño factorial de dos niveles y tres factores. La disposición de estas variables, que asegura una evaluación precisa de sus efectos, se presenta en la tabla 8.

Tabla 8

Matriz codificada y completa para el diseño factorial 2³

PRUEBA	VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES REALES		
	X1	X2	X3	TAMAÑO DE PARTICULA (%-200M)	CONCENTRACIÓN DE NaCN (ppm)	TIEMPO DE CIANURACIÓN (h)
1	-	-	-	65	800	24
2	+	-	-	86	800	24
3	-	+	-	65	1500	24
4	+	+	-	86	1500	24
5	-	-	+	65	800	72
6	+	-	+	86	800	72
7	-	+	+	65	1500	72
8	+	+	+	86	1500	72
9	0	0	0	75	1100	48
10	0	0	0	75	1100	48

Nota. La tabla muestra organización de las variables en estudio para cada prueba experimental, según el diseño factorial. Elaboración de tesis.

Para las condiciones de las variables del proceso, incluyendo sus valores máximos y mínimos, se tomaron en cuenta las condiciones operativas de la planta de la compañía minera CORIRE S.A.C., así como las recomendaciones y parámetros sugeridos en la literatura revisada en el marco teórico.

5.1.6.4. Planificación de las condiciones operacionales para las pruebas experimentales

Con los parámetros operacionales previamente definidos, que incluyen el porcentaje de sólidos, la gravedad específica del mineral, el pH y el volumen de la pulpa (según el ítem 5.1.6), junto con la cantidad de mineral y el volumen de pulpa necesario para cada prueba experimental, calculados en el ítem 5.1.6.1, y las cantidades de cianuro de sodio requeridas para los niveles bajo y alto, según lo calculado en el ítem 5.1.6.2 y las condiciones operativas conforme al diseño factorial 2³ descritas en el ítem 5.1.6.3 y la tabla 8, y los variables de estudio que se detalla en la tabla 1.

Con base a estas especificaciones, se procedió a planificar las ocho pruebas experimentales, incluyendo dos réplicas en el punto central del diseño factorial 2^3 . La planificación detallada de estas pruebas se presenta en la tabla 9, con lo que se aseguró una adecuada ejecución de los experimentos conforme al diseño propuesto.

Tabla 9

Planificación detalla de las 8 pruebas y 2 réplicas en el punto central

	N° DE PRUEBA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen de pulpa (L)	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
% de Sólidos (%)	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01	30.01
Gravedad específica (g/cc)	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69
Densidad de Pulpa (g/l)	1280	1280	1280	1280	1280	1280	1280	1280	1280	1280
Peso de mineral (g)	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48	326.48
Volumen de solución (L)	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152	0.76152
pH (NaOH)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Tamaño de partícula (%-200M)	65	86	65	86	65	86	65	86	75	75
NaCN (g)	0.61	0.61	1.14	1.14	0.61	0.61	1.14	1.14	0.84	0.84
Tiempo (h)	24	24	24	24	72	72	72	72	48	48

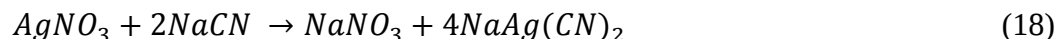
Nota. La tabla muestra las condiciones para cada una de las pruebas experimentales de la prueba experimenta. Elaborado por tesistas.

5.1.6.5. Preparación de solución AgNO_3 para la titulación por CN^-

Para esta etapa, se utilizó una solución de nitrato de plata con una concentración de 4.3333 g de AgNO_3/L , la cual se obtiene a partir de la reacción estequiométrica indicada en la ecuación 38.

La muestra de la solución cianurada se expresó en mililitros, lo que significa que en 1000 ml de solución hay 4.3333 g de AgNO_3 . Por lo tanto, en 1 ml de solución hay 0.0043333 g de AgNO_3 .

La ecuación que representa la reacción es la siguiente:



Donde la relación molar entre $AgNO_3$ y $NaCN$ es de 1:2. Por lo tanto, para determinar la cantidad de $NaCN$ que reacciona con la cantidad de $AgNO_3$ presente en 1 ml de solución, se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{169.87NaNO_3}{2(46)gNaCN} = \frac{0.0043335g AgNO_3}{XgNaCN}$$

Al despejar para X, se obtiene:

$$XgNaCN = \frac{(0.0043335g AgNO_3)(2(46)gNaCN)}{169.87NaNO_3} = 0.002499gNaCN$$

Este cálculo determina que, para cada 1 ml de la solución de $AgNO_3$, se requieren 0.002499 g de $NaCN$ para la reacción completa.

El resultado anterior es para un volumen de 1 ml. Sin embargo, si trabajamos con otro volumen de muestra, el factor cambiará. En nuestro caso, se tomará un alícuota de 10 ml, por lo que el factor en este caso será 0.025.

En la preparación de la solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) para la titulación de cianuro, se produce una disolución del nitrato de plata en agua. Durante este proceso, el nitrato de plata se disocia completamente en iones plata (Ag^+) y nitrato (NO_3^-), ya que es una sal soluble en agua. La reacción es la siguiente:



En esta reacción: **$AgNO_3$** es el nitrato de plata en forma sólida, **Ag^+** es el ion plata, que es el reactivo activo durante la titulación y **NO_3^-** es el ion nitrato, que no participa directamente en la titulación de cianuro, actuando como ion espectador.

5.1.6.6. Preparación de yoduro de potasio al 5% como indicador en la titulación

La solución de yoduro de potasio (KI) se utiliza como parte de un procedimiento analítico para el control del cianuro libre en soluciones cianuradas, comúnmente durante la titulación argentométrica. En este método, el yoduro de potasio actúa como indicador para detectar el punto final de la titulación.

Para la preparación del indicador de yoduro de potasio al 5%, se procedió de la siguiente manera:

- Se pesan 5 gramos de yoduro de potasio, los cuales se agregan a una fiola previamente llenada hasta la mitad con agua destilada.
- Posteriormente, se enraza la fiola con agua destilada hasta la línea de aforo de 100 ml.
- La solución se agita durante unos minutos hasta que el sólido se disuelva completamente.
- Una vez disuelto, la solución se almacena en una botella de vidrio ámbar para evitar su descomposición debido a la exposición a la luz.
- Para su uso en las pruebas, la solución se dosificará lentamente de acuerdo con los requerimientos, utilizando un gotero para asegurar precisión en el volumen administrado.

Este procedimiento garantiza la estabilidad y precisión del indicador durante las pruebas experimentales.

En la preparación de yoduro de potasio (KI) para una titulación, cuando se disuelve en agua, KI se disocia completamente en sus iones constituyentes: el ion potasio (K^+) y el ion yoduro (I^-). Este es un proceso de disociación típico de yoduro de potasio en agua.



Donde: KI(s) es el yoduro de potasio en estado sólido, $K^+(aq)$ es el ion potasio en disolución acuosa y $I^-(aq)$ es el ion yoduro en disolución acuosa.

5.1.6.7. Pruebas de cianuración en botellas roladas

Con los parámetros experimentales establecidos en el ítem 5.1.6, la matriz codificada para el diseño factorial 2^3 con dos réplicas en el punto central (tabla 8), y la planificación detallada para cada prueba (tabla 9), así como la preparación de los reactivos para el análisis de cianuro libre mediante titulación, se procedió a ejecutar las pruebas de cianuración (anexo 8).

Para este proceso, se utilizaron botellas de dama Juana como reactores, las cuales fueron colocadas en un rodillo giratorio para asegurar la agitación constante de la pulpa durante la cianuración. Este sistema permitió una mezcla homogénea y optimizó el contacto entre el cianuro y el mineral aurífero, facilitando así la disolución del oro. Los detalles específicos del montaje experimental y el equipo utilizado se encuentran en el anexo 6.

5.1.6.8. Control de consumo de cianuro y reposición

En cada prueba experimental, es esencial mantener una concentración constante de cianuro libre en la solución. Para lograrlo, se implementó un control estricto mediante análisis volumétrico y titulación, utilizando como solución titulante una preparación de AgNO_3 (4.3333 g/L) y un indicador de yoduro de potasio al 5%. Se extrajeron muestras de 10 ml de cada reactor en intervalos de tiempo específicos para realizar la titulación del cianuro libre. En el nivel inferior de concentración de cianuro, las muestras fueron tomadas a los 0, 0.5, 2, 4, 17, y 20 horas del proceso, mientras que en el nivel superior se muestreó a los 0, 0.5, 2, 4, 6, 24, 36, 48, y 72 horas. Con los resultados obtenidos, se determinó el consumo de cianuro y la cantidad de reposición necesaria para mantener la concentración estable en la solución, los resultados para cada prueba experimental se muestran en el anexo 10.

Durante la titulación, el proceso se desarrolla en dos etapas:

1. En esta fase, los iones de plata (Ag^+) reaccionan con los iones de cianuro (CN^-) presentes en la solución, formando un complejo dicianoargentato soluble:



Este complejo es incoloro y permanece en solución, sin provocar un cambio visual notable, lo que indica que el cianuro libre sigue estando presente en la solución.

2. Una vez que todo el cianuro ha reaccionado, el exceso de Ag^+ comienza a reaccionar con el yoduro de potasio (KI), que actúa como indicador. Los iones de plata reaccionan con los iones yoduro (I^-) para formar un precipitado de yoduro de plata (AgI):



La aparición de este precipitado amarillo marca el punto final de la titulación, indicando que todo el cianuro ha sido titulado y el exceso de Ag^+ se está combinando con el yoduro de potasio, produciendo un cambio visual claro.

Una vez alcanzado el punto final de la titulación, se calcula la concentración de cianuro libre en la solución mediante la fórmula:

$$\% \text{ de cianuro libre} = \text{Gasto (AgNO}_3\text{)} \times \text{Factor} \quad (23)$$

Donde el factor, determinado en el ítem 5.1.6.1, es de 0.025.

Con esta información, se calculó la cantidad de cianuro necesaria para reponer en cada control utilizando la siguiente relación:

$$\text{NaCN (a reponer en g.)} = \frac{(C_i(\% \text{NaCN}) - C_f(\% \text{NaCN}))}{100} \times (V_{\text{solución (ml)}}) \quad (24)$$

Este procedimiento de titulación se muestra en el anexo 9, se aplicó en cada control de cianuro a lo largo de las pruebas experimentales, permitiendo un ajuste preciso de la concentración de cianuro y asegurando la eficiencia y consistencia del proceso de cianuración, los resultados se muestran en el anexo 10.

5.1.6.9. Registro de datos para el balance y resultados experimentales

Finalizada las 8 pruebas experimentales más dos replicas en el punto central se procedió con el muestreo de soluciones ricas y ripios de cada prueba para sus análisis por oro. El ensaye químico de la solución rica se realizó en el laboratorio de LAS, cuyos reportes se muestra en el anexo 11.

Teniendo los reportes de los ensayos, se procedió con el balance metalúrgico para determinar el porcentaje de extracción de oro en cada prueba experimental (anexo 12). El porcentaje de extracción se determinó utilizando la siguiente relación (anexo 12):

$$\% \text{ extracción de oro} = \frac{\text{Ley de cabeza} \left(\frac{g}{TM}\right) - \text{ley de ripio} \left(\frac{g}{TM}\right)}{\text{Ley de cabeza} \left(\frac{g}{TM}\right)} \times 100 \quad (24)$$

También se procedió a determinar la cantidad de consumo de cianuro de sodio e hidróxido de sodio en cada prueba experimental, según se muestra en el anexo 11.

El resumen de los resultados de las pruebas experimentales, según el anexo 11 y 12 se presenta en la siguiente tabla 10:

Tabla 10

Resumen de los resultados experimentales

Prueba	Ley de cabeza (g/TM)	Ley de ripio (g/TM)	Extracción (%)	Consumo NaCN (Kg/TM)	Consumo NaOH (Kg/TM)
1	10.76	1.406	86.93	4.52	3.03
2	10.76	0.617	94.27	5.02	3.06
3	10.76	0.549	94.90	7.19	3.06
4	10.76	0.617	94.27	7.57	3.57
5	10.76	0.343	96.81	4.17	3.06
6	10.76	0.583	94.58	4.18	3.06
7	10.76	0.514	95.22	10.35	3.03
8	10.76	0.446	95.86	11.36	3.06
9	10.76	0.72	93.31	7.56	3.03
10	10.76	0.789	92.67	6.86	3.03
Promedio			93.88	6.88	3.10

Nota. En la table se muestra un extracto del porcentaje de extracción en cada prueba y sus respectivos consumos de cianuro e hidróxido de sodio. Elaborado por tesistas.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Matriz de diseño factorial para el análisis y discusión de resultados por medio de Minitab 18.1

Con el objetivo de analizar y discutir los resultados de las pruebas experimentales, se elaboró la matriz de diseño factorial 2^3 con dos réplicas en el punto central (tabla 8). Los porcentajes de extracción obtenidos en cada experimento (tabla 10) sirvieron como base para la construcción de la matriz de diseño (tabla 11), Esta tabla resume las condiciones experimentales y las respuestas obtenidas en las pruebas de cianuración para evaluar el porcentaje de extracción de oro. Las variables codificadas (X1, X2, X3) corresponden a los niveles de cada variable real, que incluyen el tamaño de partícula, la concentración de NaCN, y el tiempo de cianuración. Las pruebas fueron realizadas con diferentes combinaciones de estos factores para determinar su influencia en la eficiencia del proceso.

Esta matriz se generó con el apoyo del software Minitab 18.1, herramienta esencial para llevar a cabo un análisis estadístico preciso de los resultados obtenidos. La matriz de diseño factorial permite evaluar el impacto y la interacción de las variables experimentales, facilitando así una interpretación detallada y fundamentada de los efectos que influyen en la extracción de oro durante los experimentos.

Tabla 11

Condiciones experimentales y las respuestas según el diseño factorial 2³

Prueba	Variables codificadas			Variables reales			% Extracción Y
	X1	X2	X3	“A”	“B”	“C”	
				Tamaño de partícula (%-200M)	Concentración de NaCN (ppm)	Tiempo de cianuración (h)	
1	-1	-1	-1	65	800	24	91.87
2	+1	-1	-1	86	800	24	94.27
3	-1	+1	-1	65	1500	24	94.90
4	+1	+1	-1	86	1500	24	94.27
5	-1	-1	+1	65	800	72	96.81
6	+1	-1	+1	86	800	72	94.58
7	-1	+1	+1	65	1500	72	95.22
8	+1	+1	+1	86	1500	72	95.86
9	0	0	0	75.5	1150	48	93.31
10	0	0	0	75.5	1150	48	93.67

Nota. La tabla muestra las combinaciones de las variables para prueba experimental y los resultados. Data del Software MINITAB 18.1.

Según los datos de la tabla 11, la mayor extracción de oro del yacimiento Ishihuinca se alcanzó en la prueba experimental número 5, con un rendimiento de 96.81%. Este valor óptimo de extracción se obtuvo bajo las siguientes condiciones de proceso: tamaño de partícula de 65% a -200 mallas, concentración de cianuro de 800 ppm y un tiempo de cianuración de 72 horas. Estos parámetros sugieren una combinación favorable para maximizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración bajo las condiciones evaluadas.

6.2. Análisis de resultados

Con la matriz de diseño factorial presentada en la tabla 11, se procedió a realizar un análisis de los resultados utilizando el software Minitab 18.1. Este análisis permitió identificar las variables con mayor impacto en el proceso de cianuración, así como evaluar los efectos de las interacciones entre dichas variables.

El análisis incluyó la realización de un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los factores individuales y sus interacciones. Además, se calcularon los coeficientes codificados que conforman el modelo matemático que describe el comportamiento del proceso, y se elaboró un modelo de correlación que optimiza las condiciones experimentales.

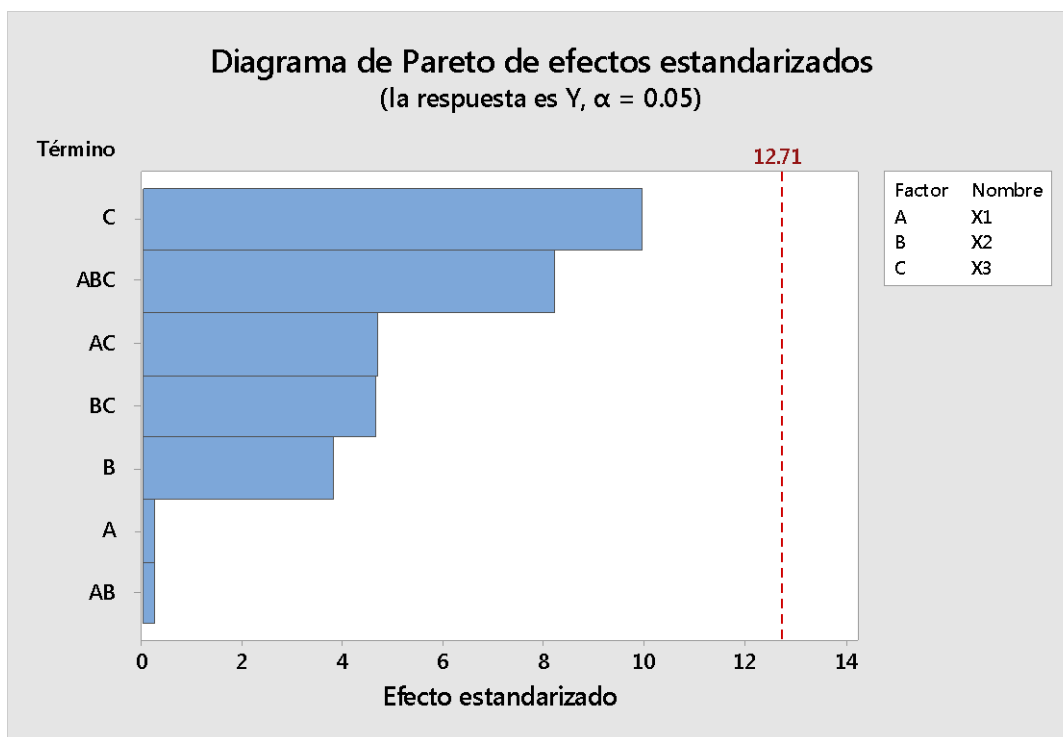
Asimismo, se generaron gráficos de superficies de respuesta que facilitaron la visualización de cómo las variables independientes influyen en el porcentaje de extracción de oro. Estos resultados, junto con sus respectivas interpretaciones, se desarrollan en las secciones que siguen, proporcionando una base sólida para la discusión de la optimización del proceso.

6.2.1. Análisis de los resultados predeterminados según el diseño factorial 2³

Las variables (factores) presentados en la tabla 1 han sido seleccionados por su posible impacto en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ishihuinca, perteneciente a la Compañía Minera Corire S.A.C. Para evaluar el grado de influencia de cada variable en la eficiencia de extracción de oro, se realizó un análisis de efectos utilizando el diagrama de Pareto, el cual se muestra en la figura 15.

Figura 15

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



Nota. A= X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C =X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

Al analizar la Figura 15, se observa que los efectos estandarizados de las variables y sus interacciones en la extracción de oro durante el proceso de cianuración no superan el nivel de significancia establecido en 12.71. Esto sugiere que su influencia en el proceso es limitada. Por ello, es importante realizar ajustes al modelo matemático y a las conclusiones para fortalecer su precisión y evitar posibles interpretaciones equivocadas sobre efectos que tienen poca o ninguna relevancia.

Para corroborar, lo que se manifiesta con el diagrama de Pareto, el nivel de los efectos de las variables y las interacciones en el proceso se procede al análisis de la varianza (tabla de ANOVA), los resultados se muestran en la tabla número 12.

Tabla 12*Análisis de la varianza (ANOVA)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	16.9276	2.11595	32.65	0.135
Lineal	3	7.3370	2.44568	37.74	0.119
X1	1	0.0040	0.00405	0.06	0.844
X2	1	0.9248	0.92480	14.27	0.165
X3	1	6.4082	6.40820	98.89	0.064
Interacciones de 2 términos	3	2.8088	0.93628	14.45	0.190
X1*X2	1	0.0032	0.00320	0.05	0.861
X1*X3	1	1.4112	1.41120	21.78	0.134
X2*X3	1	1.3945	1.39445	21.52	0.135
Interacciones de 3 términos	1	4.3513	4.35125	67.15	0.077
X1*X2*X3	1	4.3513	4.35125	67.15	0.077
Curvatura	1	2.4305	2.43049	37.51	0.103
Error	1	0.0648	0.06480		
Total	9	16.9924			

Nota. La tabla es el resultado del análisis de la varianza donde X1= Tamaño de partícula (%-200M), X2 = Concentración de NaCN (ppm) y X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

De la tabla 12, para que las variables y sus interacciones sean significativos deben tener un a valor menor de $p = 0.05$, el análisis de los valores p muestra que ninguna variable o interacción es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95%. Sin embargo, el tiempo de cianuración (X3) y la interacción X1*X3 presentan los valores p más cercanos al umbral de significancia, lo que sugiere que podrían tener un efecto relevante en el proceso. Por lo que se recomienda realizar ajustes al modelo y explorar diseños experimentales adicionales para confirmar estas tendencias y mejorar la calidad del análisis.

Para predecir la calidad de los ajustes del modelo estadístico a los datos experimentales, a continuación, se obtuvo un resumen del modelo, los resultados se muestran en la tabla 13.

Tabla 13

Resumen del modelo en función a R

S	R-cuad.	R-cuad.	R-cuad.
		(ajustado)	(pred)
0.254558	99.62%	96.57%	*

Nota. En la tabla se tiene un resumen del modelo ajustado. Tomado de la data de Minitab.

El modelo tiene un ajuste estadísticamente alto (R-cuadrado y R-cuadrado ajustado), lo que indica que explica la mayor parte de la variabilidad en los datos experimentales. Sin embargo, la falta de un valor de R-cuadrado predicho sugiere que es necesario verificar la capacidad del modelo para generalizar fuera del conjunto de datos analizados. Además, el análisis de significancia estadística de las variables (valor p) ya discutido muestra que el modelo podría estar incluyendo factores no significativos. Por lo que es necesario revisar el modelo, eliminar términos irrelevantes, y realizar validaciones adicionales para garantizar la robustez y predictibilidad del modelo.

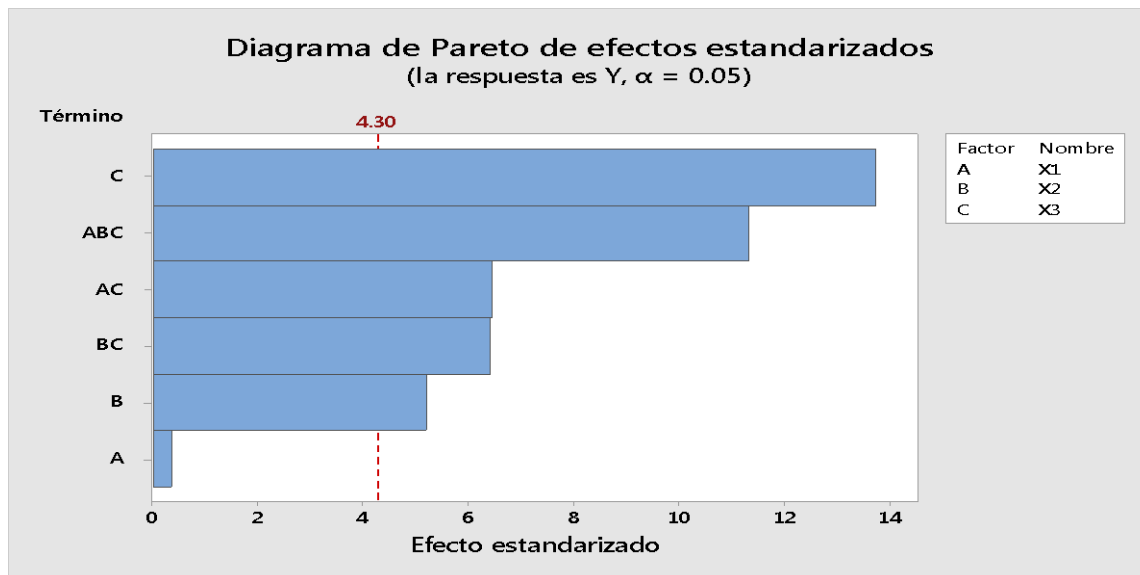
6.2.2. Análisis de los resultados ajustados según el diseño factorial 2³

Considerando el análisis de la figura 15, la tabla 12 y la tabla 13, se concluye que es necesario realizar ajustes para fortalecer el modelo estadístico. En particular, se identifica que la interacción entre las variables tamaño de partícula (%-200M) y concentración de NaCN (ppm) tiene un efecto mínimo en el proceso de cianuración. Por este motivo, se recomienda excluir esta interacción del análisis para obtener un modelo más ajustado y confiable. Los resultados de este ajuste se presentan a continuación.

6.2.2.1. Diagrama de Pareto ajustado de los efectos de las variables en la extracción de oro

Figura 16

Diagrama de Pareto ajustado de los efectos estandarizados



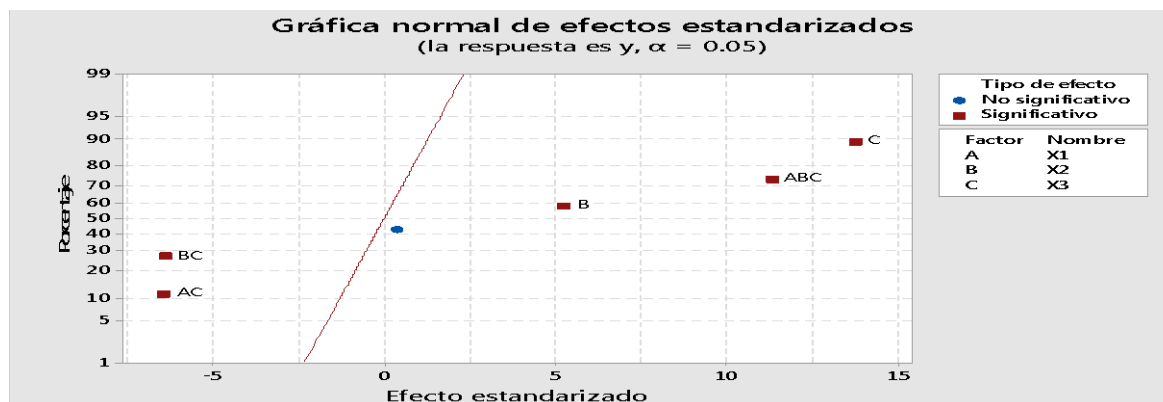
Nota. La figura representa los efectos de las variables y de sus interacciones en el proceso de cianuración. Tomado de la data de Minitab.

De la figura 16, se establece que el tiempo de cianuración es el factor más influyente en la extracción de oro, superando el umbral de significancia estadística de 4.30 y destacando su papel crucial en la lixiviación. Las interacciones significativas entre el tamaño de partícula, concentración de NaCN y tiempo indican que las condiciones óptimas dependen de combinaciones específicas de estos factores. Aunque el tamaño de partícula y la concentración de NaCN tienen un impacto menor por sí solos, influyen cuando se combinan con otras variables. En consecuencia, el tiempo de cianuración es clave para la optimización del proceso, y las interacciones entre variables deben ser consideradas para maximizar la recuperación de oro del yacimiento Ishihuinca, perteneciente a la Compañía Minera Corire S.A.C.

6.2.2.2. Gráfica normal de los efectos en la extracción de oro

Figura 17

Gráfica normal de los efectos estandarizados



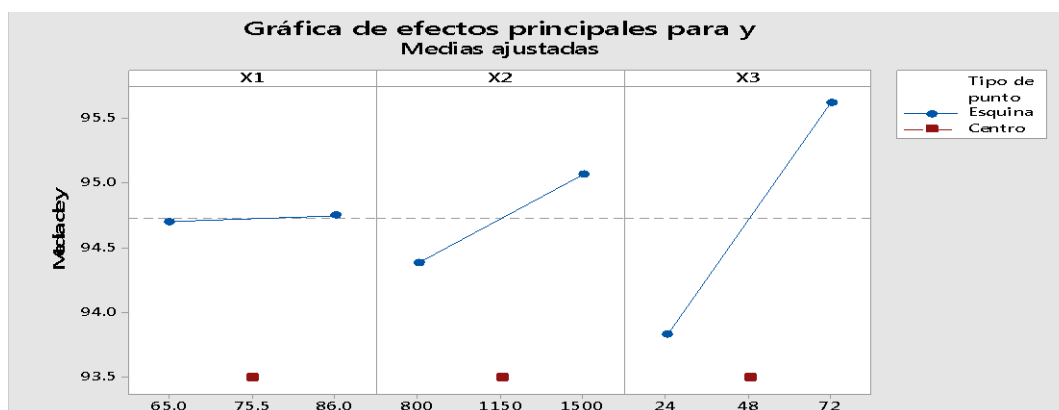
Nota. A=X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C = X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

La gráfica normal de los efectos, mostrada en la figura 17, respalda lo señalado en el diagrama de Pareto de la figura 16, evidenciando que el tiempo de cianuración tiene una alta influencia en la extracción de oro, mientras que la granulometría presenta una relevancia menor.

6.2.2.3. Análisis de los efectos principales de cada variable en la extracción de oro

Figura 18

Gráfica de los efectos principales en la extracción de oro



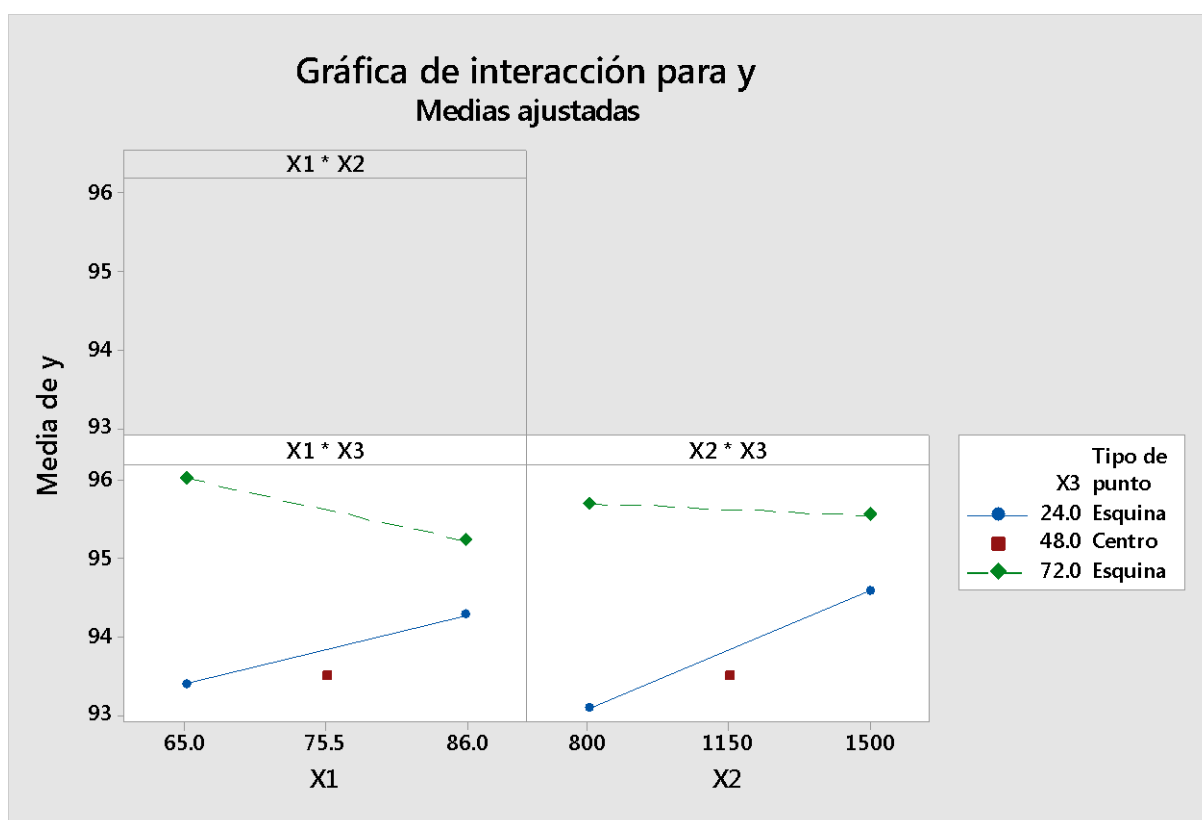
Nota. A=X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C = X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

De acuerdo a la figura 18, las tres variables al cambiar de su nivel inferior a su nivel superior contribuyen de manera positiva en la extracción de oro a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, perteneciente a la Compañía Minera Corire S.A.C.

6.2.2.4. Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción de oro

Figura 19

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



Nota. A=X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C = X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

Según la figura19 las interacciones de las variables tienen una incidencia positiva en la extracción de oro a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, perteneciente a la Compañía Minera Corire S.A.C.

6.2.2.5. Análisis de varianza

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	16.9244	2.41778	71.11	0.014
Lineal	3	7.3370	2.44568	71.93	0.014
X1	1	0.0040	0.00405	0.12	0.763
X2	1	0.9248	0.92480	27.20	0.035
X3	1	6.4082	6.40820	188.48	0.005
Interacciones de 2 términos	2	2.8056	1.40282	41.26	0.024
X1*X3	1	1.4112	1.41120	41.51	0.023
X2*X3	1	1.3945	1.39445	41.01	0.024
Interacciones de 3 términos	1	4.3513	4.35125	127.98	0.008
X1*X2*X3	1	4.3513	4.35125	127.98	0.008
Curvatura	1	2.4305	2.43049	71.49	0.014
Error	2	0.0680	0.03400		
Falta de ajuste	1	0.0032	0.00320	0.05	0.861
Error puro	1	0.0648	0.06480		
Total	9	16.9924			

Nota. A=X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C = X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

La tabla de 14 presentada se puede evaluar la influencia de los factores experimentales (X1 = Tamaño de partícula, X2 = Concentración de NaCN y X3 = Tiempo de cianuración) y sus interacciones en la extracción de oro. El modelo general muestra un valor F de 71.11 y un valor p de 0.014, indicando que el modelo es estadísticamente significativo al nivel del 5%, lo que confirma que al menos uno de los factores o interacciones tiene un efecto relevante sobre la variable dependiente.

En el análisis de los factores lineales, se observa que X1 (Tamaño de partícula) no es significativo, con un valor p de 0.763, lo que sugiere que este factor, por sí solo, no tiene un impacto considerable. Por otro lado, X2 (Concentración de NaCN) es significativo con un valor p de 0.035, y X3 (Tiempo de cianuración) es altamente significativo, con un valor p de 0.008. Esto indica que tanto la concentración de cianuro como el tiempo de cianuración tienen una influencia importante en la extracción de oro.

Las interacciones de dos términos también son significativas. La interacción entre X1 y X3 (Tamaño de partícula y Tiempo de cianuración) tiene un valor p de 0.023, mientras que la interacción entre X2 y X3 (Concentración de NaCN y Tiempo de cianuración) muestra un valor p de 0.011. Esto evidencia que las combinaciones entre estos factores afectan significativamente la respuesta. Asimismo, la interacción de tres términos (X1X2X3) es altamente significativa, con un valor p de 0.008, indicando que la interacción simultánea de los tres factores tiene un efecto relevante y no debe ignorarse.

El análisis de la curvatura refleja un valor p de 0.014, lo que sugiere la presencia de una relación no lineal en los datos, señalando que el modelo ajustado podría requerir términos adicionales para capturar completamente las variaciones observadas. Sin embargo, la falta de ajuste no es significativa (valor p de 0.861), lo que indica que el modelo explica adecuadamente la variación en los datos experimentales y no presenta errores sistemáticos importantes.

En consecuencia, los factores más influyentes son la Concentración de NaCN (X2), el Tiempo de cianuración (X3) y las interacciones entre estos factores, especialmente la interacción de tres términos (X1X2X3). Aunque el modelo es estadísticamente válido, podría ser útil explorar términos no lineales adicionales para mejorar la precisión del ajuste y optimizar el proceso.

Tabla 15*Resumen del modelo ajustado en función a R*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.184391	99.60%	98.20%	97.27%

Nota. En la tabla se tiene un resumen del modelo ajustado. Tomado de la data de Minitab.

El análisis de la tabla 15 resume el modelo ajustado en función de R (factor de correlación de los datos) nos permite evaluar la calidad del ajuste estadístico del modelo desarrollado para explicar la extracción de oro a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, propiedad de la Compañía Minera Corire S.A.C. A continuación, se analizan los indicadores proporcionados:

- ***S (Error estándar de la estimación):*** El valor de $S=0.184391$ indica que la dispersión de los datos experimentales alrededor de los valores ajustados es relativamente baja, lo cual sugiere que el modelo tiene una buena capacidad para predecir los datos observados.
- ***R² (Coeficiente de determinación):*** Con un R^2 del **99.60%**, el modelo explica prácticamente la totalidad de la variabilidad observada en los datos. Este porcentaje es indicativo de un modelo altamente explicativo y bien ajustado.
- ***R² ajustado:*** El valor de R^2 ajustado es **98.20%**, ligeramente menor que el R^2 estándar, lo cual es esperado porque este indicador penaliza la inclusión de términos innecesarios en el modelo. Sin embargo, el alto valor de R^2 ajustado confirma que los términos incluidos son relevantes y que el modelo no está sobreajustado.
- ***R² predicho:*** El valor de R^2 predicho es **97.27%**, lo que indica que el modelo tiene una capacidad predictiva muy alta para nuevos datos dentro del rango experimental evaluado. Esto es crucial para garantizar la robustez del modelo y su aplicabilidad en situaciones reales.

6.2.2.6. Coeficientes codificados para el modelo matemático de extracción de oro

Tabla 16

Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		94.7225	0.0652	1452.98	0.000	
X1	0.0450	0.0225	0.0652	0.35	0.763	1.00
X2	0.6800	0.3400	0.0652	5.22	0.035	1.00
X3	1.7900	0.8950	0.0652	13.73	0.005	1.00
X1*X3	-0.8400	-0.4200	0.0652	-6.44	0.023	1.00
X2*X3	-0.8350	-0.4175	0.0652	-6.40	0.024	1.00
X1*X2*X3	1.4750	0.7375	0.0652	11.31	0.008	1.00
Pt Ctral		-1.232	0.146	-8.45	0.014	1.00

Nota. A=X1= Tamaño de partícula (%-200M), B = X2 = Concentración de NaCN (ppm) y C = X3 = Tiempo de cianuración (h). Extraído de la data de Minitab.

La tabla 16 de coeficientes codificados muestra los efectos y la significancia estadística de las variables independientes y sus interacciones en el proceso experimental. La constante del modelo, con un valor de 94.7225 ($p=0.000$), representa el nivel base del proceso cuando las variables están en su punto medio. Entre las variables lineales, X3 (tiempo de cianuración) es la más influyente, con un coeficiente de 1.7900 y alta significancia ($p=0.005$), seguido de X2 (concentración de NaCN), que tiene un efecto moderado (0.6800) y también significativo ($p=0.035$). Por otro lado, X1 (tamaño de partícula) presenta un efecto bajo y no significativo ($p=0.735$).

En cuanto a las interacciones, X1*X3 y X2*X3 tienen efectos negativos (-0.8400 y -0.8350, respectivamente) y son significativas ($p < 0.05$), indicando que estas combinaciones

disminuyen el rendimiento. Sin embargo, la interacción de tres términos ($X_1 * X_2 * X_3$) presenta un efecto positivo importante (1.4750) y es altamente significativa ($p=0.008$), lo que resalta su relevancia en la optimización del proceso. El efecto negativo del punto central (-1.232, $p=0.014$) sugiere una posible falta de linealidad en el modelo.

Finalmente, los valores del FIV iguales a 1 confirman que no hay colinealidad entre las variables, validando la robustez del modelo. En resumen, el tiempo de cianuración (X_3) y la interacción de los tres factores ($X_1 * X_2 * X_3$) son los factores clave para optimizar el rendimiento del proceso, mientras que las interacciones $X_1 * X_3$ y $X_2 * X_3$ tienen efectos desfavorables.

6.2.2.7. Modelo de correlación para la optimización del proceso

El proceso de extracción de oro a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, propiedad de la Compañía Minera Corire S.A.C., puede optimizarse mediante la ecuación de regresión en unidades codificadas obtenida con el software Minitab. La ecuación es la siguiente:

$$Y = 94.7225 + 0.0225X_1 + 0.3400X_2 + 0.8950X_3 - 0.4200X_1X_3 - 0.4175X_2X_3 + 0.7375X_1X_2X_3 - 1.232\text{Pt Ctral.}$$

Donde: X_1 : Tamaño de partícula (% -200M), X_2 : Concentración de NaCN (ppm), X_3 : Tiempo de cianuración (h), Y : Porcentaje de extracción de oro.

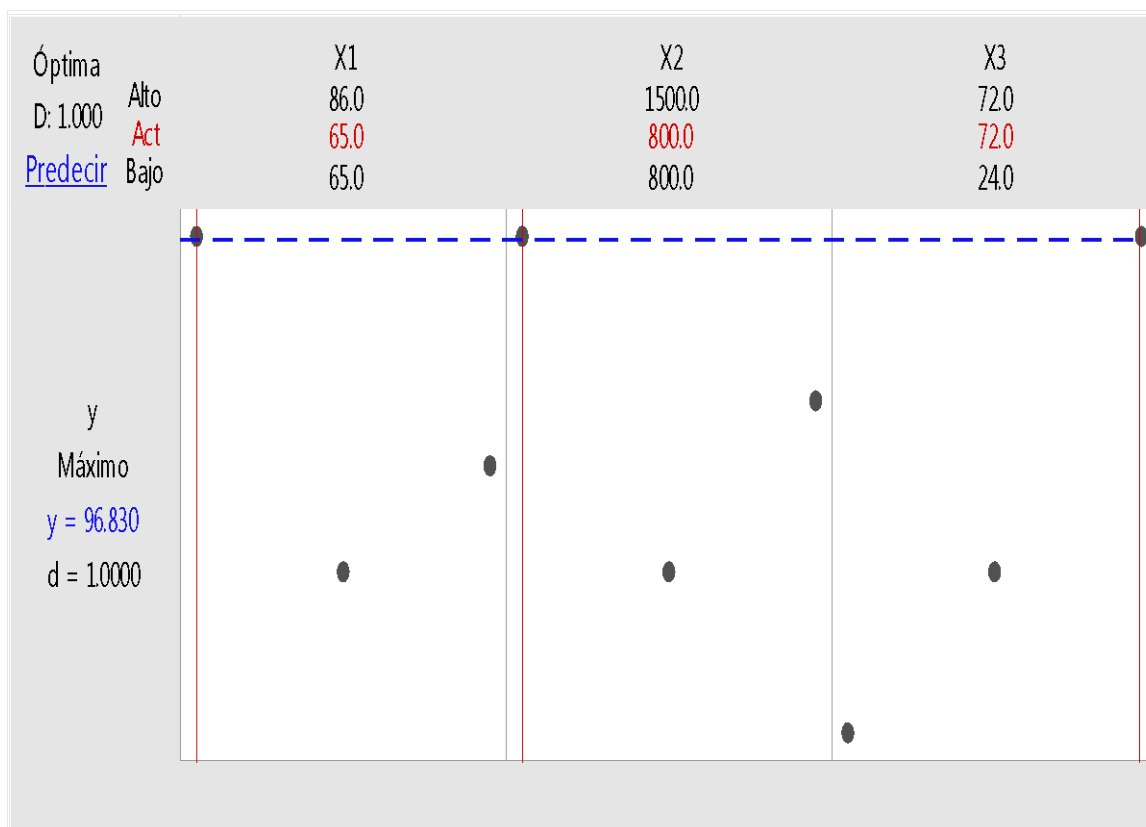
Esta ecuación refleja cómo las variables experimentales y sus interacciones afectan el rendimiento del proceso, permitiendo determinar las condiciones óptimas para maximizar la extracción de oro.

6.2.2.8. Optimización de la extracción de oro

Utilizando la ecuación de modelo correlacional obtenida en el apartado 6.2.2.7, se realizó una simulación para determinar las condiciones que permiten alcanzar una extracción óptima de oro. Los resultados de esta simulación se presentan en la figura 20.

Figura 20

Gráfica de la optimización de la extracción de oro



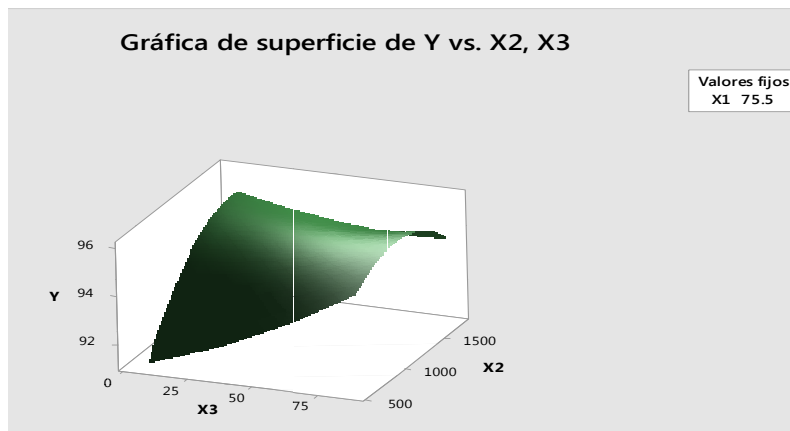
Nota: **X₁**: Tamaño de partícula (% -200M), **X₂**: Concentración de NaCN (ppm), **X₃**: Tiempo de cianuración (h), **Y**: Porcentaje de extracción de oro. Tomado de la data de Minitab.

Según la figura 20, para lograr una extracción óptima de oro del 96.830% a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, propiedad de la Compañía Minera Corire S.A.C., las variables experimentales deben ajustarse a los siguientes niveles: **X₁** (tamaño de partícula) en su nivel bajo (65%-200M), **X₂** (concentración de NaCN) en su nivel bajo (800 ppm), y **X₃** (tiempo de cianuración) en su nivel alto (72 h).

6.2.2.9. Grafica de superficie y contornos de respuesta

Figura 21

Gráfica de superficie de respuesta

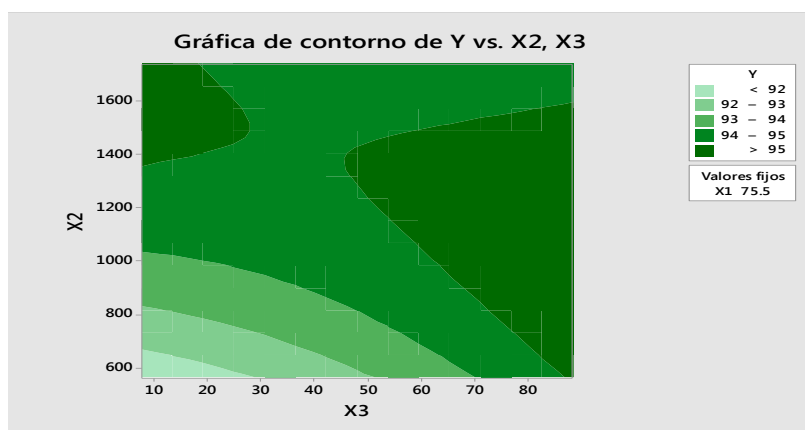


Nota: X_1 : Tamaño de partícula (% -200M), X_2 : Concentración de NaCN (ppm), X_3 : Tiempo de cianuración (h), Y : Porcentaje de extracción de oro. Tomado de la data de Minitab.

La figura 21 corrobora todo el análisis realizado en los ítems anteriores, mediante una gráfica en 3D, manteniendo la variable de menor incidencia X_1 (Tamaño de partícula) en el punto central

Figura 22

Gráfica de contorno



Nota: X_1 : Tamaño de partícula (% -200M), X_2 : Concentración de NaCN (ppm), X_3 : Tiempo de cianuración (h), Y : Porcentaje de extracción de oro. Tomado de la data de Minitab.

La figura 21 corrobora todo el análisis realizado en los ítems anteriores, mediante una gráfica en 2D, manteniendo la variable de menor incidencia X1(Tamaño de partícula) en el punto central. Las regiones más oscuras representan que a dicha condiciones se obtiene altas extracciones de oro, por encima de los 95%.

6.3. Discusión de los resultados

Al concluir el trabajo experimental, se determinó que, en la extracción de oro a partir de los minerales del yacimiento Ishihuinca, propiedad de la Compañía Minera Corire S.A.C., la variable granulometría del mineral no presentó una incidencia considerable en el proceso de cianuración. Sin embargo, las pruebas realizadas con granulometría de 65% malla -200 mostraron un incremento significativo en el porcentaje de extracción, alcanzando un valor del 96.81%, según la prueba número 5 de la tabla 11, y del 96.83%, según la figura 20. En contraste, granulometrías más finas, como 86% malla -200, presentaron porcentajes de extracción inferiores. Este comportamiento puede atribuirse a la buena porosidad del mineral, que facilita la difusión de la solución de cianuro hacia el núcleo del mineral, reduciendo la necesidad de un grado de molienda más fino.

En relación con la concentración de cianuro de sodio (NaCN), los resultados experimentales mostraron que, al incrementar esta variable de niveles bajos a niveles altos, inicialmente se observó un aumento en la disolución del oro, tal como se muestra en la figura 18. La concentración óptima fue identificada en 800 ppm, logrando un porcentaje de extracción de 96.81%, según la prueba número 5 de la tabla 11 y la figura 20. Sin embargo, concentraciones superiores a este valor no mejoraron significativamente la extracción, lo que sugiere un punto de saturación en la cinética de lixiviación. Este fenómeno puede explicarse por: la saturación de las reacciones de disolución del oro, el consumo innecesario de cianuro, que incrementa los

costos del proceso sin aportar beneficios adicionales. Por lo tanto, para optimizar el proceso, se estableció como concentración ideal de cianuro 800 ppm, tal como se observa en la figura 20.

Respecto al tiempo de cianuración, los análisis realizados mostraron una clara tendencia: el porcentaje de extracción de oro incrementó con el tiempo hasta alcanzar un punto de equilibrio a las 72 horas, donde se logró un porcentaje máximo de extracción del 96.81%, según la prueba número 5 de la tabla 11. Este comportamiento indica que el tiempo de cianuración tiene un impacto significativo en la eficiencia del proceso, pero solo hasta cierto límite, más allá del cual no se observan mejoras considerables.

Finalmente, el análisis de las interacciones entre las variables indicó efectos significativos entre la granulometría, la concentración de cianuro y el tiempo de cianuración. Las condiciones óptimas, consistentes con una granulometría de 65% malla -200, una concentración de cianuro de 800 ppm, y un tiempo de cianuración de 72 horas, proporcionaron los mejores resultados, logrando una extracción del 96.81%, como se detalla en la prueba número 5 de la tabla 11. Estos hallazgos subrayan que las condiciones óptimas no dependen únicamente de las variables de forma independiente, sino también de la interacción entre ellas, destacando la importancia de considerar un enfoque integral en el diseño experimental.

CONCLUSIONES

- ✓ Se logra evaluar las variables operacionales para la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C., mediante la evaluación de las variables operacionales de granulometría, concentración de cianuro de sodio y tiempo de cianuración por agitación. Siendo la extracción máxima de 96.81 % de oro. Con una extracción optimizada de 96.83% según el modelo matemático que representa al proceso.
- ✓ La granulometría del mineral tiene un impacto limitado en el proceso de cianuración. Sin embargo, la granulometría óptima de 65% malla -200 facilitó una mayor extracción de oro, alcanzando el 96.81%, sin requerir molienda más fina.
- ✓ La concentración óptima de NaCN fue de 800 ppm, alcanzando el mayor porcentaje de extracción de oro (96.81%). Concentraciones superiores no generaron mejoras significativas en la extracción, indicando un punto de saturación en la cinética de lixiviación y un consumo innecesario de reactivos que eleva los costos operativos.
- ✓ El tiempo de cianuración influye significativamente en la extracción de oro. Un tiempo óptimo de 72 horas permitió maximizar la extracción, alcanzando el equilibrio sin requerir tiempos mayores, lo que optimiza la eficiencia del proceso con un porcentaje de extracción de 96.81%.
- ✓ Las interacciones entre granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración son determinantes en la extracción de oro. Las condiciones óptimas combinadas de 65% malla -200, 800 ppm de NaCN y 72 horas de cianuración resultaron en la mayor eficiencia, demostrando que las variables no actúan de manera independiente, sino interrelacionadas.

RECOMENDACIONES

- Mantener un tamaño de partícula de 65% malla -200 variable parametrizado en futuros procesos de cianuración, ya que este nivel balancea adecuadamente la eficiencia del proceso y los costos operativos de molienda.
- Implementar sistemas de monitoreo continuo que permitan ajustar en tiempo real las condiciones operativas (granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) para asegurar la optimización de los procesos y minimizar las desviaciones.
- Realizar estudios complementarios que cuantifiquen los costos asociados al uso de reactivos y tiempos de procesamiento, así como el impacto ambiental, para garantizar la sostenibilidad del proceso de cianuración.
- Aplicar las condiciones óptimas identificadas en esta investigación a una escala piloto o industrial para validar los resultados y garantizar su viabilidad en condiciones reales de operación.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, K. d. (Mayo de 2014). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7394>

Arce Lopez, L., & Cano Alpaca, F. (2015). *Perú | info:eu-repo/semantics/bachelorThesis*.

Obtenido de Importancia del pH en la recuperación de oro y plata en los Procesos de Cianuración:

<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3263275#:~:text=Se%20realiz%C3%B3%20diferentes%20pruebas%20de,%C3%B3ptimo%20de%2010.5%20a%2011.>

Ayres Hidalgo, F. A., & Torres Ponce, M. T. (1999). *Diseño experimental, su aplicación en Ingeniería de procesos*. Arequipa: FERAYHI.

Bustanza Rivera, V. V. (2019). *Estudio de nitrato de plomo para optimizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.

Cáceres A., G. (2007). *Introducción a la Hidrometalurgia*. Atacama, Chile: Universidad de Atacama.

Cahuana, A. E. (2021). Obtenido de

<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/14392/IMsocaae.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

David, M. (01 de Enero de 2017). *911Metallurgist*. Obtenido de Introducción a la Lixiviación de Oro y Plata: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/cianuracion-oro-plata/>

Domic, M. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos aplicaciones*. Chile, Santiago: Andros Impresores Ltda.

Escalante, D. S. (2016). Obtenido de

<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10531/Mendo%20Escalante%2c%20Diego%20Samir.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Mexico D. F. : McGraw Hill Education.

Linares G., N. (2010). *Aspectos generales del procesamiento de oro*. Tacna, Perú: UNJBG.

Mamani, H. N. (2021). Obtenido de

http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/4175/1883_2021_nina_mamani_h_fain_ingenieria_metalurgica_y_materiales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Marsden J.O, I. C. (2009). *The Chemistry of Gold Ectraton*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Misare Ch., F. S. (1993). *Metalurgia del oro*. Lima, Perú: CEPECT.

Naval, U. (s.f.). *Metodologia de investigacion*. Obtenido de

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133491/METODOLOGIA_DE_INVESTIGACION.pdf

Ortíz, I. Á. (Enero de 2001). Obtenido de RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA DE MINERALES POR HEAP LEACHING:

https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/recup_oro_plata.htm#:~:text=La%20concentraci%C3%B3n%20usual%20de%20CN,tambi%C3%A9n%20se%20emplea%20el%20KCN.

Palma, R. A. (Mayo de 2019). Obtenido de

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47948/3560902038864UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Uceda H., D. A. (2020). *Hidrometalurgí química e ingeniería de la extracción del oro*. Lima:

Fondo Editorial de la UNAM.

Vargas Gallardo, J. (1980). *Metalurgia del oro y la plata*. Lima, Perú: San Marcos.

Yañez, J. J., Garcia, I. H., Pedraza, J., & Laverde, D. (10 de Diciembre de 2004).

Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frio.

Bolivar. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n145/a03v72n145.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

EVALUACIÓN DE VARIABLES EN LA EXTRACCIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DEL YACIMIENTO				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	METODOLOGIA
¿Cómo afectará las variables operacionales de granulometría del mineral, concentración de cianuro de sodio y tiempo del proceso de cianuración por agitación, en la maximización de la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.?	Optimizar las variables operacionales de granulometría del mineral, concentración de cianuro de sodio y tiempo del proceso de cianuración por agitación, en la maximización de la extracción de oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA, perteneciente a la Compañía Minera CORIRE S.A.C.	La optimización de variables operacionales, como la granulometría del mineral, la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C., permite maximizar la extracción de oro alcanzando valores superiores al 90%.	Porcentaje de extracción de oro(Y).	ENFOQUE Cuantitativo CLASE Aplicada TIPO Experimental NIVEL Explicativo DISEÑO Experimental: Diseño Factorial 2 ³
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTE	POBLACIÓN
¿Cuál será la granulometría óptima del mineral que maximiza la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.?	Determinar la granulometría óptima del mineral que maximice la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.	Una granulometría del mineral de 80%-200M permite lograr una extracción de oro superior al 90% en el proceso de cianuración por agitación, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.	- Granulometría de mineral. - Concentración de cianuro. - Tiempo de cianuración	Minerales del yacimiento ISHIHUINCA MUESTRA: 50 Kg TÉCNICAS E INSTRUMENTOS:
¿Cuál será la concentración óptima de cianuro de sodio que permite una máxima extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.?	Determinar la concentración óptima de cianuro de sodio que permite una máxima extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.	Una concentración de 0.15 g/l de NaCN permite una extracción de oro superior al 90% de oro por el proceso de cianuración por agitación, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.		Observación Ensayos de laboratorio Análisis de datos Diseño factorial, Excel y Minitab 18.1
¿Cuál será el tiempo óptimo de cianuración que asegura una máxima extracción de oro, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.?	Establecer el tiempo óptimo de cianuración que asegura una máxima extracción de oro, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la compañía minera CORIRE S.A.C.	Un tiempo de 72 horas de cianuración asegura una extracción de oro superior al 90%, sin comprometer la viabilidad económica del proceso, a partir de los minerales auríferos del yacimiento ISHIHUINCA de la Compañía Minera CORIRE S.A.C.		

Anexo 2: fotografías de la preparación mecánica de la muestra en el laboratorio



Muestra de tamaño máx. 5"

Chancado primario

Chancado secundario

Anexo 3: fotografías de homogenización y cuarteo



Homogenización

Cuarteo

recojo de partes opuestas

Anexo 4: preparación de muestras para la caracterización química y mineralógica



Anexo 5: Reporte de análisis químico de cabeza



Laboratorios Analíticos del Sur

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



Registro N° LC - 050

Clave generada : 2BCCD2C9

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-23-01136

Fecha de emisión: 17/5/2023

Página 1 de 1

Señores: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI
Dirección: AV RENE DE LA COLINA S/N CUSCO
Atención: JOSE RAUL PINTO RIVAS
Recepción: 13/5/2023
Realización: 13/5/2023
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*552 Método de ensayo a fuego para oro por reconocimiento gravimetría
501 Método de Ensayo para Plata por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)
502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*552		501		502
				Au		Ag		Cu
				g/TM	oz/TC	g/TM	oz/TC	%
MN23007759	MUESTRA DE INVESTIGACION 100% PASANTE -M10	No proporcionado por el cliente.	Cabeza	10,76	0,3139	93	2,70	1,051

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

Anexo 6: caracterización mineralógica

Descripción mineralógica de la muestra



Fotografía N° 01: Descripción macroscópica, donde se puede observar en función a la lupa de aumento X10 traza de calcopirita



Fotografías N° 02: Descripción macroscópica, donde se puede observar en función a la lupa de aumento X10 traza de pirita octaédrica, como se muestra en las fotografías.



Fotografía N° 01: Aumento (1920x1080) Tz de Au de color amarillo brillante en una muestra fina, acompañado de rocas, fragmentos de cuarzo lecho y hialino, presencia de limonitas y magnetita muy esporádica



Fotografía N° 02: Aumento (1920x1080) Granulometría gruesa se tiene fenos de cuarzo hialino, acompañado de fragmentos menores de roca caja



Fotografía N° 03: Aumento (1920x1080) Granulometría gruesa, donde se observa Tzs de galena y pirita micro granular en un fragmento de roca caja y débil presencia de limonita y magnetita

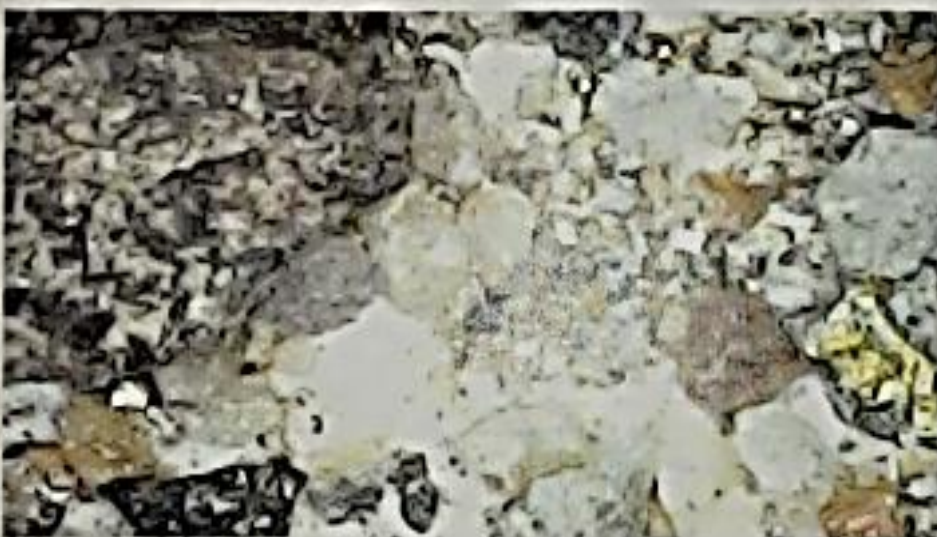


Fotografía N° 04: Aumento (1920x1080) Granulometría gruesa, donde se observa Tz de Oro de color amarillo brillante, presencia de pirita micro granular y tzs de magnetita, débil presencia de limonitas

[Handwritten signature]
 Tesis: Mineralogía y Petrología
 Autor: [Illegible]
 Fecha: [Illegible]



Fotografía N° 05: Aumento (1920x1080) Presencia de limonitas, hematita, feldespatos y abundante pirita micro granular, cuarzo lechoso y hialino, con tz de galena



Fotografía N° 06: Aumento (1920x1080) Presencia de la limonita, jarosita, hematita, con tzs de magnetita, pirita micro granular y cuarzo lechoso y hialino

Signature
Florencia Egidio Cardozo
Geóloga
Bach. en Geología



Fotografía N° 07: Aumento (1920x1080) Granulometría gruesa y fina, mayor presencia de magnetita, pirita micro granular de tipo cúbico, limonitas, jarosita y fenos de cuarzo lechoso



Fotografía N° 08: Aumento (1920x1080) Muestra fina, con presencia de Pirita micro granular, calcopirita, magnetita, limonitas, jarositas y cuarzo hialino y lechoso.

[Handwritten signature]
Eduardo J. Navarro Cárdenas
Geólogo Profesional
C.O.G. 12345



Estudio
 Juan Martínez Rodríguez Cardenas
 Ingeniero de Minas
 CIP 14 8000

Fotografía N° 09: Aumento (1920x1080) Granulometría entre material grueso y fina, resalta la presencia de plagioclasea con fenos de cuarzo hialino en una matriz fina.

En % de minerales existentes en la muestra.

Mineral valor económico	Porcentaje
Trazas de oro	
Pirita octagonal	2%
Calcopirita	0.5%
Magnetita	0.5%
Galena	0.5
Material de ganga	Porcentaje
Cuarzo hialino	2%
Cuarzo lechoso	2%
Jarosita	1.0%
Limonita propiamente dicha	0.5%
Hematita	0.5
Plagioclasea	0,5

Estudio
 Juan Martínez Rodríguez Cardenas
 Ingeniero de Minas
 CIP 14 8000

Anexo 7: Fotos de molienda y gravead específica**Anexo 8: Fotos de montaje y pruebas de cianuración en botellas roladas****Anexo 9: fotografía del proceso de titulación por cianuro libre**

Anexo 10: Resultados de titulación y reposición de cianuro de sodio para cada prueba experimental.

Control Prueba N° 01: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro													
Día	Hora control	-	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
					Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
						Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
26/12/2023	01:35:00 p.m.	-	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.08		0	0
26/12/2023	14:05		0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.01	0.53	1.62	1.62
26/12/2023	15:35		1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.05	0.23	0.7	2.32
26/12/2023	17:35	-	2	4		0	3.062974761	-	11	0.06	0.15	0.46	2.78
27/12/2023	01:35		13	17		0	3.062974761	-	11	0.03	0.38	1.16	3.94
27/12/2023	13:35		3	20		0	3.062974761	-	11	0.055	0.19	0.58	4.52

Control Prueba N° 02: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro												
Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	CAL					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
15/01/2024	01:35:00 p.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.08		0	0
15/01/2024	14:05	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.02	0.46	1.41	1.41
15/01/2024	15:35	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.035	0.34	1.04	2.45
15/01/2024	17:35	2	4		0	3.062974761	-	11	0.05	0.23	0.7	3.15
16/01/2024	01:35	13	17		0	3.062974761	-	11	0.045	0.27	0.83	3.98
16/01/2024	13:35	3	20		0	3.062974761	-	11	0.035	0.34	1.04	5.02

Control Prueba N° 03: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro												
Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
15/01/2024	01:35:00 p.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761	6	11	0.15		0	0
15/01/2024	14:05	0.5	0.5	0	0	3.062974761		11	0.055	0.72	2.21	2.21
15/01/2024	15:35	1.5	2	0	0	3.062974761	-	11	0.08	0.53	1.62	3.83
15/01/2024	17:35	2	4	0	0	3.062974761	-	11	0.1	0.38	1.16	4.99
16/01/2024	01:35	13	17	0	0	3.062974761	-	11	0.105	0.34	1.04	6.03
16/01/2024	13:35	3	20	0	0	3.062974761	-	11	0.1	0.38	1.16	7.19

Control Prueba N° 04: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro												
Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
15/01/2024	01:35:00 p.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.15		0	0
15/01/2024	14:05	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.05	0.76	2.33	2.33
15/01/2024	15:35	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.07	0.61	1.87	4.2
15/01/2024	17:35	2	4		0	3.062974761	-	11	0.11	0.3	0.92	5.12
16/01/2024	01:35	13	17		0	3.062974761	-	11	0.1	0.38	1.16	6.28
16/01/2024	13:35	3	20		0	3.062974761	-	11	0.095	0.42	1.29	7.57

Control Prueba N° 05: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro												
Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
29/01/2024	09:25:00 a.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.08		0	0
29/01/2024	09:55	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.055	0.19	0.58	0.58
29/01/2024	11:25	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.045	0.27	0.83	1.41
29/01/2024	13:25	2	4		0	3.062974761	-	11	0.05	0.23	0.7	2.11

29/01/2024	15:25	13	6		0	3.062974761	-	11	0.065	0.11	0.34	2.45
30/01/2024	09:25	3	24		0	3.062974761	-	11	0.06	0.15	0.46	2.91
30/01/2024	21:25		36		0	3.062974761	-	11	0.065	0.11	0.34	3.25
31/01/2024	09:25		48		0	3.062974761	-	11	0.065	0.11	0.34	3.59
01/02/2024	09:25		72		0	3.062974761	-	11	0.055	0.19	0.58	4.17

Control Prueba N° 06: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro

Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	CAL					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
29/01/2024	09:25:00 a.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.08		0	0
29/01/2024	09:55	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.04	0.3	0.92	0.92
29/01/2024	11:25	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.045	0.27	0.83	1.75
29/01/2024	13:25	2	4		0	3.062974761	-	11	0.055	0.19	0.58	2.33
29/01/2024	15:25	13	6		0	3.062974761	-	11	0.07	0.08	0.25	2.58
30/01/2024	09:25	3	24		0	3.062974761	-	11	0.065	0.11	0.34	2.92
30/01/2024	21:25		36		0	3.062974761	-	11	0.065	0.11	0.34	3.26
31/02/2024	09:25		48		0	3.062974761	-	11	0.06	0.15	0.46	3.72
01/02/2024	09:25		72		0	3.062974761	-	11	0.06	0.15	0.46	4.18

Control Prueba N° 07: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro

Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
29/01/2024	09:25:00 a.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.15		0	0
29/01/2024	09:55	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.09	0.46	1.41	1.41
29/01/2024	11:25	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	2.91
29/01/2024	13:25	2	4		0	3.062974761	-	11	0.08	0.53	1.62	4.53
29/01/2024	15:25	13	17		0	3.062974761	-	11	0.09	0.46	1.41	5.94

30/01/2024	09:25	3	20		0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	7.44
30/01/2024	21:25				0	3.062974761	-	11	0.105	0.34	1.04	8.48
31/01/2024	09:25				0	3.062974761	-	11	0.105	0.34	1.04	9.52
01/02/2024	09:25				0	3.062974761	-	11	0.115	0.27	0.83	10.35

Control Prueba N° 08: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro

Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
29/01/2024	09:25:00 a.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.15		0	0
29/01/2024	09:55	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	1.5
29/01/2024	11:25	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.09	0.46	1.41	2.91
29/01/2024	13:25	2	4		0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	4.41
29/01/2024	15:25	13	17		0	3.062974761	-	11	0.1	0.38	1.16	5.57
30/01/2024	09:25	3	20		0	3.062974761	-	11	0.075	0.57	1.75	7.32
30/01/2024	21:25				0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	8.82
31/01/2024	09:25				0	3.062974761	-	11	0.105	0.34	1.04	9.86
01/02/2024	09:25				0	3.062974761	-	11	0.085	0.49	1.5	11.36

Control Prueba central N° 01: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro

Día	Hora control	Hora control	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
				Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
					Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
15/01/2024	01:35:00 p.m.	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.11		0	0
15/01/2024	14:05	0.5	0.5		0	3.062974761	-	11	0.035	0.57	1.75	1.75
15/01/2024	15:35	1.5	2		0	3.062974761	-	11	0.05	0.46	1.41	3.16
15/01/2024	17:35	2	4		0	3.062974761	-	11	0.065	0.34	1.04	4.2
16/01/2024	01:35	13	17		0	3.062974761	-	11	0.08	0.23	0.7	4.9
16/01/2024	13:35	3	20		0	3.062974761	-	11	0.065	0.34	1.04	5.94
15/01/2024	01:35				0	3.062974761	-	11	0.08	0.23	0.7	6.64
15/01/2024	13:35				0	3.062974761	-	11	0.07	0.3	0.92	7.56

Control Prueba central N° 02: fuerza de cianuro, adición de cianuro y consumo de cianuro													
Día	Hora control	Hora control	Minutos	Horas acumuladas	HIDROXIDO DE SODIO					CIANURO DE SODIO			
					Adición (g)	Consumo kg/TMS		pH		Fuerza final (%)	Adición (g)	Consumo (kg/TMS)	
						Parcial	Acumulado	Inicio	Final			Parcial	Acumulado
15/01/2024	01:35:00 p.m.	0	0	0	1	3.062974761	3.062974761		11	0.11		0	0
15/01/2024	14:05	0.5	30	0.5		0	3.062974761	-	11	0.05	0.46	1.41	1.41
15/01/2024	15:35	1.5	120	2		0	3.062974761	-	11	0.06	0.38	1.16	2.57
15/01/2024	17:35	2	240	4		0	3.062974761	-	11	0.065	0.34	1.04	3.61
16/01/2024	01:35	13	1020	17		0	3.062974761	-	11	0.075	0.27	0.83	4.44
16/01/2024	13:35	3	1200	20		0	3.062974761	-	11	0.07	0.3	0.92	5.36
15/01/2024	01:35					0	3.062974761	-	11	0.09	0.15	0.46	5.82
15/01/2024	13:35					0	3.062974761	-	11	0.065	0.34	1.04	6.86

Anexo 11: informe de ensayo de las soluciones ricas y los rípios de cada prueba



INFORME DE ENSAYO
CM2024-2895

A SOLICITUD: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI
POR CUENTA DE: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI
PRODUCTO DESCRITO COMO: Pulpa y solución aurífera.
TIPO DE ANALISIS: Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS: Reconocimiento Au-Ag, Solución Au-Ag – AAS.
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION: En bolsa y frasco de plástico cerrado.
FECHA DE RECEPCION: 19-01-2024
FECHA DE REPORTE: 20-01-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:

CMP-09-DETERMINACION DE Au-Ag POR FUNDICION -
COPELACION DE MUESTRAS DE EXPLORACION
CMP-14 DETERMINACION DE Au-Ag DE SOLUCIONES
CIANURADAS-AAS
CMP-04-DETERMINACION DE ANALISIS DE MINERALES POR
DIGESTION DE TRES ACIDOS-AAS

DETALLE DE RESULTADOS:

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au	Au	Ag	Ag
	METODO	CMP-09	CMP-09	CMP-04	CMP-04
	UNIDAD	Oz/Tc	g/TM	Oz/Tc	g/TM
	RECONOCIMIENTO	Ley de Au	Ley de Au	Ley de Ag	Ley de Ag
SOLIDO PM – 001	Mineral Au-Ag	0.026	0.875	2.247	77.035
SOLIDO PM – 002	Mineral Au	0.018	0.617	---	---
SOLIDO PM – 003	Mineral Au	0.016	0.549	---	---
SOLIDO PM – 004	Mineral Au	0.018	0.617	---	---
SOLIDO PM – 005	Mineral Au	0.021	0.720	---	---
SOLIDO PM – 006	Mineral Au-Ag	0.020	0.692	2.120	72.700

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au	Ag
	METODO	CMP-14	CMP-14
	UNIDAD	g/m ²	g/m ²
	LOTE	Ley de Au	Ley de Ag
SOLUCION P – 001	Solución Au-Ag	4.356	15.140
SOLUCION P – 002	Solución Au	4.350	---
SOLUCION P – 003	Solución Au	4.655	---
SOLUCION P – 004	Solución Au	4.610	---
SOLUCION P – 005	Solución Au	5.260	---
SOLUCION P – 006	Solución Au-Ag	4.495	7.625

Nota de almacenaje:
Las muestras podrán ser
retiradas por los interesados
por un periodo de 30 días,
caso contrario se procederá a
desacharlas.

CONTROL MINERALS S.A.C.

Ing. Molinda Mejía Yeo
Jefe de Laboratorio Químico
CAP: 117812



**CONTROL
MINERALS**

INFORME DE ENSAYO
CM2024-3049

A SOLICITUD: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI
 POR CUENTA DE: FIDEL SULIN QUISPE MAMANI
 PRODUCTO DESCRITO COMO: Pulpa y solución aurífera.
 TIPO DE ANALISIS: Análisis Químico de Minerales.
 DETALLE DE ANALISIS: Reconocimiento Au-Ag, Solución Au-Ag – AAS.
 CANTIDAD DE MUESTRAS: 8 Muestras.
 DESCRIPCION DE RECEPCION: En bolsa y frasco de plástico cerrado.
 FECHA DE RECEPCION: 03-02-2024
 FECHA DE REPORTE: 05-02-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:

CMP-09-DETERMINACION DE Au-Ag POR FUNDICION -
 COPELACION DE MUESTRAS DE EXPLORACION
 CMP-14 DETERMINACION DE Au-Ag DE SOLUCIONES
 CIANURADAS-AAS

DETALLE DE RESULTADOS:

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au	Au
	METODO	CMP-09	CMP-09
	UNIDAD	Oz/Tc	g/TM
	RECONOCIMIENTO	Ley de Au	Ley de Au
SOLIDO PM – 007	Mineral Au	0.010	0.343
SOLIDO PM – 008	Mineral Au	0.017	0.583
SOLIDO PM – 009	Mineral Au	0.015	0.514
SOLIDO PM – 010	Mineral Au	0.013	0.446

Nota de almacenaje:
 Las muestras podrán ser retiradas
 por los interesados por un
 periodo de 30 días, caso contrario
 se procederá a desecharlas.

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au
	METODO	CMP-14
	UNIDAD	g/m ³
	LOTE	Ley de Au
SOLUCION P – 007	Solución Au	4.360
SOLUCION P – 008	Solución Au	4.545
SOLUCION P – 009	Solución Au	4.620
SOLUCION P – 010	Solución Au	4.510

CONTROL MINERALS S.A.S.

Ing. Moisés Nolasco Tito
 Jefe de Laboratorio Químico
 CIP: 187612

Anexo 12: cálculo de los resultados de las pruebas experimentales utilizando Excel

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 01					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.875	gr Au/TM	%Extracción:	91.868	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 01					
Extracción (48 h)	91.868	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	4.52	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 02					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.617	gr Au/TM	%Extracción:	94.266	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 02					
Extracción (48 h)	94.27	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	5.02	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 03					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.549	gr Au/TM	%Extracción:	94.898	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 03					
Extracción (48 h)	94.90	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	7.19	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 04					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.617	gr Au/TM	%Extracción:	94.266	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 04					
Extracción (48 h)	94.27	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	7.57	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 05					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.343	gr Au/TM	%Extracción:	96.812	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 05					
Extracción (48 h)	96.81	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	4.17	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 06					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.583	gr Au/TM	%Extracción:	94.582	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 06					
Extracción (48 h)	94.58	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	4.18	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 07					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.514	gr Au/TM	%Extracción:	95.223	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 07					
Extracción (48 h)	95.22	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	10.35	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba N° 08					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.446	gr Au/TM	%Extracción:	95.855	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba N° 08					
Extracción (48 h)	95.86	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	11.36	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba central 01					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au

Análisis de residuo 24 h	0.720	gr Au/TM	%Extracción:	93.308	Au
Análisis de residuo 48 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Resumen de los resultados de la prueba central 01					
Extracción (48 h)	93.31	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	7.56	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			

Cálculo de porcentaje de extracción de oro en la prueba central 02					
Cabeza	10.76	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 24 h	0.000	gr Au/TM	%Extracción:	-	Au
Análisis de residuo 48 h	0.720	gr Au/TM	%Extracción:	93. 31	Au
Resumen de los resultados de la prueba central 02					
Extracción (48 h)	93. 31	%			
Consumo de Cianuro de Sodio	6.86	kg/TM de mineral			
Consumo de Oxido de Sodio	3.06	kg/TM de mineral			