

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DE CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**EXTRACCION DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACION POR
AGITACION A PARTIR DE LOS MINERALES AURIFEROS DEL YACIMIENTO
AYAHUAY, PROVINCIA ANTABAMBA– REGION APURIMAC**

PRESENTADO POR:

Br. NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN

Br. EDITH ESLACHIN QUISPE

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

ASESOR:

Ing. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada:
EXTRACCION DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACION POR AGITACION
A PARTIR DE LOS MINERALES AURIFEROS DEL YALINCENIO AYAHUAY,
PROVINCIA ANTABAMBA - REGION APURIMAC.....

Presentado por: EDITH ESLACHIN QUISPE..... con DNI Nro: 76447315
 Presentado por: NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN con DNI Nro: 75901774.....
 para optar el título profesional/grado académico de
INGENIERO METALURGICO.....

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.	X
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 la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 15 de NOVIEMBRE de 2021

Firma 

Post firma Eduardo Marcelo Quispe Nina

Nro. de DNI. 23957149

ORCID del Asesor. 0000-0002-4473-1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.

2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:405741369

NOMBRE DEL TRABAJO

EXTRACCION DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACION POR AGITACION A PARTIR DE LOS MINERALES AURIFEROS DEL YACIMIENTO DE AYAHUAY, PROVINCIA ANTABAMBA - REGION APURIMAC

AUTOR

EDITH ESLACHIN QUISPE / NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN

RECUENTO DE PALABRAS

25127 Words

RECUENTO DE CARACTERES

132767 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

173 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

29.0MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 15, 2024 9:56 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 15, 2024 9:58 AM GMT-5

● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- Base de datos de Crossref
- 8% Base de datos de trabajos entregados

● Excluir del Reporte de Similitud

- Base de datos de Internet
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

PRESENTACIÓN

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

Señores miembros de jurado: Cumpliendo con el reglamento de grados y títulos de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, y de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, con el fin de optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra disposición el trabajo de investigación intitulado: “EXTRACCION DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACION POR AGITACION A PARTIR DE LOS MINERALES AURIFEROS DEL YACIMIENTO AYAHUAY, PROVINCIA ANTABAMBA– REGION APURIMAC”

Este trabajo de investigación reviste una gran importancia para el avance de la minería, ya que busca optimizar la extracción de Oro a partir de los minerales auríferos del yacimiento de Ayahuay mediante el proceso de cianuración por agitación.

Además, esperamos que este trabajo sirva como una base de información valiosa para los mineros artesanales que actualmente venden el mineral sin procesar, con el objetivo de que puedan obtener mayores beneficios económicos, al procesar el mineral de manera más eficiente.

Este proyecto es el resultado del esfuerzo y dedicación tanto en el campo como en el laboratorio, y esperamos que cumpla con los objetivos establecidos, contribuyendo significativamente a nuestra formación académica.

NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN

EDITH ESLACHIN QUISPE

DEDICATORIA I

A mis padres, Víctor y Marcusa, por ser los pilares fundamentales de mi vida. Su ejemplo de esfuerzo, perseverancia y dedicación ha forjado mi carácter y me ha enseñado que no hay meta inalcanzable cuando se lucha con convicción. Su amor incondicional ha sido mi refugio en los momentos difíciles y mi mayor fortaleza para seguir adelante.

A mis hermanos, Víctor y Shamira, quienes han estado a mi lado en cada paso de este camino. Sus palabras de aliento y su apoyo inquebrantable han sido mi guía en los momentos de duda y mi impulso para no rendirme ante los desafíos. A mi querido hermano Grober Moisés, que desde el cielo me sigue acompañando. Su recuerdo y el amor que compartimos en vida son una fuente fuerza eterna.

A mi hijo, Deereck Alezandro, mi mayor inspiración y razón de ser. Cada logro es para ti, porque tu sonrisa ilumina mis días y me recuerda que cada esfuerzo vale la pena. Eres el motivo por el cual siempre busco superarme y dar lo mejor de mí.

A mi pareja, abuelos y tíos, quienes han estado a mi lado en cada paso de este camino. Su apoyo incondicional, su fe en mis capacidades y sus palabras de aliento han sido el impulso necesario para que pudiera alcanzar mis metas.

A mis amigos, quienes han compartido risas, desafíos y momentos inolvidables a lo largo de este viaje. Gracias por estar a mi lado, por su aliento y por hacer que este camino sea más ligero.

A los docentes que me brindaron su apoyo incondicional ya quienes me acompañaron desde el inicio de mi carrera, por su valiosa orientación.

NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN

DEDICATORIA II

A Dios por ser la luz que guía mis pasos, el apoyo constante en cada desafío por darme salud, bienestar y sabiduría para lograr mis objetivos.

A mis padres Adrian y Ricardina, por su amor incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Su fe en mí ha sido mi mayor motivación. A mi Padre porque me ha enseñado el valor de ser una persona disciplinada y responsable y en especial a mi Madre, mi ejemplo de superación y fortaleza, de quien aprendí que todo esfuerzo al final es bien recompensado.

A mis hermanos Karen, Aldo, Areliz, por su apoyo inquebrantable y por hacer de este camino uno lleno de risas y recuerdos inolvidables. Juntos hemos superado obstáculos y celebrado triunfos.

A mi hermosa hija Meredith Arenas, mi gordis bonita por ser la razón de mi vida y la inspiración para alcanzar mis objetivos, quien con su ternura y amor llena de alegría mi vida.

A mi abuela Aurelia, tíos y primos por su aliento y apoyo en cada momento. Su compañía ha sido esencial en mi camino.

A mis amigos, por su lealtad y compañía en cada etapa de este viaje. Gracias por su apoyo, risas y por recordarme siempre la importancia de disfrutar el camino.

A mis docentes por su valiosa orientación durante este proceso. Su apoyo y dedicación fueron fundamentales para mi aprendizaje y la realización de esta tesis.

EDITH ESLACHIN QUISPE

AGRADECIMIENTOS

Deseamos comenzar expresando nuestro más profundo agradecimiento a Dios, por darnos la vida y por su inmenso amor al habernos permitido gozar de buena salud.

Nuestro más sincero reconocimiento va dirigido a los estimados docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Su dedicación, sabiduría y compromiso con la enseñanza han dejado una huella imborrable en nuestro camino académico.

Asimismo, extendemos nuestro más profundo agradecimiento a nuestro asesor de tesis, el ingeniero Eduardo Marcelo Quispe Nina. Agradeciendo su orientación, su apoyo incondicional, el tiempo brindado y por compartir generosamente su vasta experiencia con nosotras.

Queremos también expresar nuestra gratitud al señor Moisés Cavero Mendoza, minero artesanal del yacimiento de Ayahuay quien, junto a sus compañeros, nos confiaron su preocupación para mejorar la extracción de Oro del yacimiento minero de Ayahuay, lo que nos permitió abordar esta problemática. Esto llevó a plantear nuestro tema de tesis como una solución para mejorar la extracción de oro y en el futuro incrementar las ganancias tanto para él como para los pobladores de Ayahuay, quienes aprenderán a aprovechar mejor estos recursos.

A nuestros padres, les agradecemos infinitamente por su constante apoyo y amor sin condiciones. Su sacrificio y ejemplo de dedicación han sido nuestra inspiración constante. Este proyecto no habría sido posible sin su aliento y respaldo incondicional.

GRACIAS

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	ii
DEDICATORIA I.....	iii
DEDICATORIA II	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	viii
SIMBOLOGÍA.....	x
INTRODUCCIÓN	xxi
CAPITULO I.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. Justificación	3
1.3.1. Justificación Tecnológica	3

1.3.2.	Justificación Económica.....	3
1.3.3.	Justificación Social.....	4
1.3.4.	Justificación Ambiental.....	4
1.4.	Objetivos.....	5
1.4.1.	Objetivo General.....	5
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO II.....		6
2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.	Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1.	Antecedentes Locales.....	6
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.....	6
2.1.3.	Antecedentes Internacionales.....	7
2.2.	Bases Teóricas.....	8
2.2.1.	Minerales Auríferos.....	8
2.2.2.	Oro.....	9
2.2.3.	Propiedades Físicas del Oro.....	9
2.2.4.	Propiedades Químicas del Oro.....	11
2.2.5.	Importancia del Oro.....	12
2.2.6.	Métodos y Técnicas de Recuperación del Oro.....	13
2.2.7.	Cianuración.....	16

2.2.8.	Métodos de Cianuración	18
2.2.9.	Cianuración por agitación	19
2.2.10.	Tipos de Agitadores para la cianuración por Agitación	20
2.2.11.	Características de los Minerales Apropriados para la Cianuración	22
2.2.12.	Tipos de Cianuros.....	23
2.2.13.	Variables de la Cianuración.....	24
2.2.14.	Termodinámica de la Cianuración	30
2.2.15.	Mecanismo electroquímico de la Cianuración	33
2.2.16.	Cinética de la reacción de la Cianuración	35
2.2.17.	Efectos Aceleradores y Retardadores en la Cianuración.....	36
2.2.18.	Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución	37
2.2.19.	Efecto del Oxígeno sobre la Disolución del Oro	39
2.2.20.	Efecto del Tamaño de la Partícula sobre la Velocidad de Disolución	40
2.2.21.	Efecto de la Temperatura en la Cianuración	41
2.2.22.	Química de la Cianuración del Oro.....	42
2.2.23.	Diseño experimental.....	44
2.2.24.	Tipos de Diseño Experimental:	45
2.2.25.	Diseño Factorial	45
2.2.26.	Diseño Factorial 2^k	46
CAPITULO III.....		49

3.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	49
3.1.	Hipótesis	49
3.1.1.	Hipótesis General	49
3.1.2.	Hipótesis Específicos	49
3.2.	Variables.....	49
3.2.1.	Variable Dependiente	49
3.2.2.	Variables Independientes.....	49
3.3.	Operacionalización de variables	51
CAPITULO IV		52
4.	METODOLOGÍA	52
4.1.	Ámbito del estudio localización política, geográfica.....	52
4.1.1.	Ubicación	52
4.2.	Geología y Mineralogía del Yacimiento de Ayahuay.....	53
4.2.1.	Geología del yacimiento	53
4.2.2.	Mineralogía del Yacimiento de Ayahuay.....	54
4.2.3.	Caracterización del mineral de Ayahuay a nivel de microscopio.....	55
4.3.	Tipos de nivel de Investigación	59
4.3.1.	Tipo de investigación	59
4.3.2.	Nivel de investigación.....	60
4.4.	Población de estudio	60

4.5.	Tamaño de la muestra	61
4.6.	Selección de Muestra	61
4.7.	Técnica de Recolección de Datos	61
4.8.	Equipos, Materiales y Reactivos.....	62
4.8.1.	Equipos.....	62
4.8.2.	Materiales.....	63
4.8.3.	Reactivos	64
4.9.	Procedimiento Experimental.....	65
4.9.1.	Diagrama de flujo del proceso de cianuración realizada:	66
4.9.2.	Preparación Mecánica del Mineral.....	67
5.	CAPITULO V.....	69
RESULTADOS EXPERIMENTALES		69
5.1.1.	Tiempo de Molienda	69
5.1.2.	Determinación de la gravedad específica.....	72
5.1.3.	Condiciones Operativas para la cianuración.	74
5.1.4.	Cálculo de Peso de Mineral y volumen de Agua en pulpa.....	75
5.1.5.	Cianuración del mineral.	80
5.1.6.	Determinación de cantidad de Cal Inicial	81
5.1.7.	Cálculo de cianuro de sodio (NaCN)	83
5.1.8.	Titulación de muestras durante la cianuración.....	86

5.1.9. Reposición de cianuro de sodio (NaCN).....	87
5.2. Resultados de extracción de Oro.....	89
5.3. Balance metalúrgico de los resultados de extracción de Au.....	90
5.3.1. Resultados de la muestra 1.....	90
5.3.2. Resultados de la muestra 2.....	91
5.3.3. Resultados de la muestra 3.....	92
5.3.4. Resultados de la muestra 4.....	93
5.3.5. Resultados de la muestra 5.....	94
5.3.6. Resultados de la muestra 6.....	95
5.3.7. Resultados de la muestra 7.....	96
5.3.8. Resultados de la muestra 8.....	97
5.3.9. Resultados de la muestra 9.....	98
5.3.10. Resultados de la muestra 10.....	99
5.3.11. Resultados de la muestra 11.....	100
5.4. Cinética de Cianuración.....	102
5.5. Diseño Experimental.....	104
5.5.1. Diseño factorial 2^k	104
5.5.2. Construcción de matriz de diseño.....	105
CAPITULO VI.....	117
6. DISCUSIÓN DE RESULTADO.....	117

6.1. Análisis de resultados mediante análisis químico.....	117
6.2. Análisis de los resultados mediante diseño factorial	117
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	125
APÉNDICE 1	126
7. CUADROS DE PARÁMETROS OPERATIVOS	126
APÉNDICE 2	131
8. FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO EXPERIMENTAL	131
ANEXO 1.....	139
9. REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO	139
ANEXO 2.....	142
10. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	142
ANEXO 3.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades Físicas del Oro	10
Tabla 2 Propiedades Químicas del Oro	11
Tabla 3 Solubilidad de minerales de distintos metales en soluciones cianuradas	38
Tabla 4 Efecto del Oxígeno sobre la velocidad de disolución de Oro	39
Tabla 5 Operacionalización de variables.....	51
Tabla 6 Determinación del tiempo de molienda.....	69
Tabla 7 Datos para la determinación de la gravedad específica.....	73
Tabla 8 Tabla de condiciones iniciales	75
Tabla 9 Base de cálculo de 100 g.	76
Tabla 10 Balance para determinar la cantidad de mineral y agua N° 1.....	76
Tabla 11 Base de cálculo en 100 g.	77
Tabla 12 Balance para determinar la cantidad de mineral y agua N° 2.....	77
Tabla 13 Base de cálculo de 100 g.	78
Tabla 14 Balance para determinar la cantidad de agua y mineral N° 3.....	79
Tabla 15 Datos experimentales.....	80
Tabla 16 Diseño de plan Experimental.....	81
Tabla 17 Componente ingresado inicialmente en los reactores	86
Tabla 18 Reporte de contenido de Oro en la Solución	89
Tabla 19 Balance metalúrgico de la prueba 1	90
Tabla 20 Balance metalúrgico de la prueba 2.....	91
Tabla 21 Balance metalúrgico de la prueba 3.....	92
Tabla 22 Balance metalúrgico de la prueba 4.....	93

Tabla 23 Balance metalúrgico de la prueba 5.....	94
Tabla 24 Balance metalúrgico de la prueba 6.....	95
Tabla 25 Balance metalúrgico de la prueba 7.....	96
Tabla 26 Balance metalúrgico de la prueba 8.....	97
Tabla 27 Balance metalúrgico de la prueba 9.....	98
Tabla 28 Balance metalúrgico de la prueba 10.....	99
Tabla 29 Balance metalúrgico de la prueba 11.....	100
Tabla 30 Porcentaje de Oro extraído después del balance metalúrgico.....	101
Tabla 31 Extracción de Oro de la prueba 8 de 0 a 24 horas.....	103
Tabla 32 Diseño factorial del experimento 2^3 con replica en el punto central.....	105
Tabla 33 Factores y Niveles Codificados.....	106
Tabla 34 Matriz de diseño factorial 2^3	106
Tabla 35 Matriz experimental del diseño factorial, plan de ejecución y resultados.....	107
Tabla 36 Cálculo de efectos.....	108
Tabla 37 Análisis de la varianza.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Oro Nativo	12
Figura 2 Concentradores centrífugos	14
Figura 3 Celdas Convencionales.....	15
Figura 4 Efecto de la concentración de Cianuro	25
Figura 5 Efecto de la concentración de Cianuro en la Lixiviación.....	26
Figura 6 Diagrama de estabilidad de potencial pH para el sistema Au- H_2O - CN^-	31
Figura 7 Diagrama de estabilidad - pH para el sistema Au- H_2O - CL^-	32
Figura 8 Representación esquemática del mecanismo electroquímico.....	34
Figura 9 Hidrolisis del cianuro de sodio	43
Figura 10 Diseños Factoriales 2^k	48
Figura 11 Ubicación Geográfica del distrito de El Oro	52
Figura 12 Ubicación demográfica de Ayahuay	53
Figura 13 Geología de Ayahuay	54
Figura 14 Mineral de caracterización del yacimiento de Ayahuay	55
Figura 15 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 1	56
Figura 16 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 2	56
Figura 17 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 4	57
Figura 18 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 5	57
Figura 19 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 5	58
Figura 20 Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 6	58
Figura 21 Caracterización microscópica con aumento (1920 x x 1080) N° 7	59
Figura 22 Grafica Tiempo de molienda vs % - 200 mallas.....	70

Figura 23 Ajuste lineal de la gráfica de molienda.....	71
Figura 24 Grafico de barras de la extracción de Au (%).....	102
Figura 25 Grafica de dispersión % de extracción de Au VS Tiempo de cianuración	103
Figura 26 Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	110
Figura 27 Efectos normales estandarizados para la respuesta	111
Figura 28 Efectos Principales para Extracción	112
Figura 29 Grafica de interacción para la Extracción (%).....	114
Figura 30 Grafica de cubos (medidas ajustadas) de extracción (%)	115

RESUMEN

El Perú es uno de los principales productores de oro a nivel mundial, en la región de Apurímac, provincia de Antabamba, la minería aurífera es una actividad vital, pero la falta de acceso a tecnologías de procesos de extracción metalúrgicos limita su desarrollo, limitándose al pallaqueo. En el centro poblado de Ayahuay, los yacimientos auríferos han sido explotados durante más de diez años mediante el método de pallaqueo, lo cual resulta en ingresos bajos y no rentables y condiciones laborales precarias.

Actualmente el proceso de cianuración por agitación, en un método de extracción de oro que permite obtener un mayor porcentaje de oro presente, para ello se usan granos muy finos para permitir una mayor interacción entre la solución y los granos de mineral.

Dentro de nuestro trabajo de investigación el objetivo es extraer oro a partir de los minerales auríferos provenientes del yacimiento Ayahuay, por el método de cianuración usando el reactivo cianuro de sodio NaCN, el cual cumplirá la función de disolver el metal valioso contenido por el mineral formando un complejo soluble dicianoaurato de sodio, cuya reacción química se describe en la ecuación de Elsner: $4 \text{ Au} + 8 \text{ NaCN} + \text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ Na}[\text{Au}(\text{CN})_2] + 4 \text{ NaOH}$. Para ello se utilizó una muestra de 25 kg, de la cual se tomó 11 muestras de mineral de 1 kg, con un contenido metálico de 0,591 oz/tc Au, como muestra representativa, el cual fue sometido a una preparación mecánica y reducción de tamaño, sometiendo a una molienda de 19.90 minutos para tener una liberación de 65%-200M.

Para evaluar las condiciones del mineral la investigación se llevó a cabo de manera experimental a nivel de laboratorio, siendo esta descriptiva y explicativa con el diseño factorial de $n^k = 2^3$ con los siguientes factores dentro de los siguientes parámetros operacionales, como

variables independientes a estudiar son: tiempo de cianuración (20 a 24) horas, la concentración de cianuro de sodio (NaCN) de 300 ppm a 600 ppm y el porcentaje de sólidos en la pulpa de 30% a 35% y con una temperatura y presión a condiciones ambientales normales, donde el pH 11 es un parámetro fijo, teniendo como resultado diferentes valores del porcentaje de extracción, siendo el más favorable de 90.19%, bajo las condiciones, tiempo de cianuración 24 horas, concentración de cianuro de sodio (NaCN) de 600 ppm y un 35% de sólidos en la pulpa, siendo este valor favorable se puede concluir que el proceso de cianuración por agitación es una solución efectiva para mejorar la extracción de Oro en el yacimiento Ayahuay.

Palabras clave: Cianuración, extracción de oro, Cianuro de Sodio (NaCN) y proceso de agitación.

ABSTRACT

Peru is one of the main gold producers worldwide, in the Apurímac region, Antabamba province, gold mining is a vital activity, but the lack of access to metallurgical extraction process technologies limits its development, limiting itself to pallaqueo. In the town center of Ayahuay, the gold deposits have been exploited for more than ten years using the pallaqueo method, which results in low and unprofitable income and precarious working conditions.

Currently, the agitation cyanidation process is a gold extraction method that allows obtaining a higher percentage of gold present. Very fine grains are used to allow greater interaction between the solution and the mineral grains.

Within our research work, the objective is to extract gold from the gold minerals coming from the Ayahuay deposit, by the cyanidation method using the sodium cyanide reagent NaCN, which will fulfill the function of dissolving the valuable metal contained by the mineral, forming a soluble sodium dicyanoaurate complex, the chemical reaction of which is described by the Elsner equation: $4 \text{ Au} + 8 \text{ NaCN} + \text{ O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ Na}[\text{Au}(\text{CN})_2] + 4 \text{ NaOH}$. For this, a 25 kg sample was used, from which 11 mineral samples of 1 kg were taken, with a metal content of 0.591 oz/tc Au, as a representative sample, which was subjected to mechanical preparation and size reduction, subjecting it to a grinding period of 19.90 minutes to have a release of 65%-200M.

To evaluate the conditions of the mineral, the research was carried out experimentally at the laboratory level, being descriptive and explanatory with the factorial design of $n_k = 23$ with the following factors within the following operational parameters, as independent variables to be studied are : cyanidation time (20 to 24) hours, the concentration of sodium cyanide (NaCN) from 300 ppm to 600 ppm and the percentage of solids in the pulp from 30% to 35% and with a

temperature and pressure at normal ambient conditions , where pH 11 is a fixed parameter, resulting in different values of the extraction percentage, the most favorable being 90.19%, under the conditions, cyanidation time 24 hours, sodium cyanide (NaCN) concentration of 600 ppm and 35% solids in the pulp, this value being favorable, it can be concluded that the agitation cyanidation process is an effective solution to improve the extraction of Gold in the Ayahuay deposit.

Keywords: Cyanidation, gold extraction, sodium cyanide (NaCN) and stirring process.

SIMBOLOGÍA

g	: Gramos
g/cm³	: Gramos por centímetro cúbico
g/TM	: Gramos por tonelada métrica
g/L	: Gramos por litro
mL	: Mililitros
mg	: Miligramos
mg/L	: miligramos por litro
ppm	: Partes por millón
h	: horas
Kg	: kilogramos
RPM ó rpm	: Revoluciones por minuto
W	: Peso
µm	: Micrones
pH	: Potencial de hidrogeniones
°C	: Grados centígrados
NaCN	: Cianuro de sodio o cianuro sódico
KI	: Yoduro de potasio
AgNO₃	: Nitrato de Plata

INTRODUCCIÓN

La minería aurífera en el Perú es una de las actividades económicas más importantes, especialmente en las regiones rurales, donde miles de familias dependen de ella para su sustento. En la provincia de Apurímac, en el yacimiento de Ayahuay, la minería de oro es una actividad fundamental. Sin embargo, en esta área, la extracción se realiza principalmente mediante el pallaqueo, un proceso manual que no solo es ineficiente, sino también riesgoso y poco rentable. La falta de acceso a tecnologías modernas de extracción ha sido un obstáculo para la comunidad, que necesita métodos más eficientes y sostenibles.

En este contexto, el proceso de cianuración por agitación surge como una posible solución. Este proceso es utilizado a nivel mundial en la minería para extraer oro de manera más eficiente. Funciona mediante el uso de una solución de cianuro de sodio (NaCN), que disuelve el oro presente en el mineral, permitiendo una extracción más completa y rentable. Este proceso, si se aplica correctamente, podría mejorar significativamente la extracción de oro en Ayahuay, ayudando a los mineros a aumentar sus ingresos y mejorar sus condiciones laborales.

El propósito de esta investigación es evaluar la viabilidad de implementar el proceso de cianuración por agitación en el yacimiento de Ayahuay para mejorar la extracción de oro. El estudio se centrará en determinar las condiciones óptimas de operación, como el tiempo de cianuración, la concentración de cianuro y el porcentaje de sólidos en la pulpa, con el objetivo de maximizar el rendimiento de la extracción.

Para ello, se realizó un estudio experimental a nivel de laboratorio utilizando una muestra representativa de los minerales auríferos de Ayahuay. A través de un diseño experimental factorial de 2^3 , se evaluaron tres variables clave: el tiempo de cianuración (entre 20 y 24 horas), la

concentración de cianuro de sodio (entre 300 y 600 ppm), y el porcentaje de sólidos en la pulpa (entre 30% y 35%). Estas condiciones fueron seleccionadas para identificar las mejores combinaciones que maximicen el porcentaje de oro recuperado.

Con los resultados de esta investigación, se espera poder ofrecer una solución más eficiente y sostenible para la pequeña minería en Ayahuay. De esta manera, no solo se busca mejorar la rentabilidad de la actividad minera, sino también promover prácticas más seguras y responsables que beneficien a las familias de la región.

CAPITULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.Planteamiento del problema

En la región de Apurímac, provincia de Antabamba, distrito de El Oro, se localiza el centro poblado de Ayahuay, que presenta una notable presencia de yacimientos auríferos. Estos recursos han sido explotados de manera artesanal por los comuneros durante más de diez años, utilizando el método de pallaqueo. Este enfoque se debe, en gran medida, a la falta de conocimiento sobre tecnologías más avanzadas, como el proceso de cianuración, que podría mejorar significativamente la extracción de oro.

El mineral del yacimiento de Ayahuay presenta un contenido metálico de 0.591 oz/tc de oro, según el análisis realizado por el laboratorio: "ROLAB LABORATORIO", Vista Alegre-Nazca-Ica, el cual se adjunta en los anexos de esta investigación. A pesar de tener un alto contenido metálico de Au se vende el mineral pallaqueado a compradores que pagan un precio bajo, lo cual no resulta rentable, con esta propuesta y estudio se busca la rentabilidad del potencial del yacimiento, razón por lo que plantea un desafío significativo para la sostenibilidad y el desarrollo económico de la comunidad de Ayahuay.

La cianuración por agitación se considera un método más adecuado, debido a las características mineralógicas del yacimiento de Ayahuay. Este proceso permite una extracción más eficiente de Oro, lo que podría transformar la actividad minera de la región. La implementación de esta tecnología requiere de profesionales con el conocimiento y dominio de este proceso, que podría ser proporcionada por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a través de su Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica. De esta manera, se capacitará a los

trabajadores para emplear un proceso eficiente y manejo de la misma, siendo amigable con el medio ambiente.

Por lo tanto, se ha elegido el yacimiento minero de Ayahuay para llevar a cabo un estudio metalúrgico con el objetivo de identificar y aplicar la tecnología de cianuración por agitación, optimizando así la extracción de Oro.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Se podrá extraer oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac?

1.2.2. Problemas específicos

¿Qué tiempo de cianuración se requiere para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac?

¿Qué concentración de cianuro de sodio (NaCN) se requiere para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac?

¿Cuánto será el porcentaje de sólidos en la pulpa para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Tecnológica

La implementación del proceso de cianuración por agitación en el yacimiento de Ayahuay permitirá optimizar la extracción de oro, maximizando el rendimiento y la eficiencia del proceso.

A través de la investigación y experimentación, se determinarán las variables óptimas del proceso, como el tiempo de cianuración, la concentración adecuada de cianuro de sodio (NaCN) y el porcentaje óptimo de sólidos en la pulpa. Estas mejoras tecnológicas permitirán un control preciso de las condiciones operativas, reduciendo el consumo de reactivos y optimizando los recursos energéticos. Además, la cianuración por agitación es una tecnología flexible que permite una mejor disolución del oro en un menor tiempo, lo que incrementa la capacidad productiva de las plantas de procesamiento.

1.3.2. Justificación Económica

Actualmente, los mineros de Ayahuay venden el mineral en forma de mineral pallaqueado, obteniendo una mínima ganancia debido a la falta de procesos de extracción adecuados. La implementación del proceso de cianuración no solo facilitará una extracción más eficiente y rentable del oro, sino que también se traducirá en un incremento significativo en los ingresos de la comunidad. Esta tecnología reducirá las pérdidas asociadas al transporte de mineral sin procesar y, al mismo tiempo, fortalecerá la competitividad del yacimiento en el mercado global, lo que podría atraer inversiones adicionales.

1.3.3. Justificación Social

Este proyecto tiene el potencial de mejorar significativamente el bienestar y el desarrollo integral de la comunidad local. Al introducir el proceso de cianuración por agitación, se crearán empleos directos e indirectos, impulsando la actividad económica local. La posibilidad de extraer y procesar el oro en la misma localidad proporcionará oportunidades de empleo para la población local, incluyendo trabajos para mano de obra no calificada y mejorará las condiciones de vida de los habitantes. Además, el acceso a técnicas de extracción más eficientes permitirá a la comunidad obtener mayores beneficios económicos, reduciendo la dependencia de intermediarios y mejorando su calidad de vida.

1.3.4. Justificación Ambiental

La justificación ambiental de este proyecto se basa en la necesidad de realizar una extracción de oro más sostenible, minimizando los impactos ambientales y preservando el entorno natural del yacimiento de Ayahuay. La implementación de procesos productivos más eficientes y tecnológicamente controlados reducirá los riesgos de contaminación neutralizando el cianuro, también se evitará la contaminación de suelos con el uso de geomembranas con aislante. En particular, se controlarán las concentraciones de cianuro libre y total para no exceder los límites permitidos por el Ministerio del Medio Ambiente (MINAM), garantizando el bienestar de los trabajadores, los pobladores y el medio ambiente. Donde la entidad fiscalizadora que se encargará de este control será la municipalidad distrital de El Oro

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Extraer oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el tiempo óptimo de cianuración necesario para la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac.
- Identificar la concentración óptima de cianuro de sodio (NaCN) para el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac.
- Determinar el porcentaje de sólidos en la pulpa que permita una extracción óptima de oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba– Región Apurímac.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Antecedentes Locales*

(Holguin, 2023), en la tesis intitulado “Optimización del proceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento VALETITA IV de la compañía minera TUNKYRO SAC”, tuvo como objetivo general optimizar la extracción del oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento VALETITA IV. Este estudio, de diseño experimental y carácter explicativo-descriptivo, utilizó una muestra de minerales auríferos del yacimiento. Los resultados mostraron que se obtuvo un porcentaje de extracción de oro máximo de 95.12%, con valores de tamaño de partícula de 90% malla (-200), concentración de cianuro de sodio de 0.14% y un tiempo total de lixiviación de 72 horas. La conclusión fue que las variables operativas significativas en el proceso de cianuración fueron el tamaño de partícula, la concentración de cianuro y el tiempo total de lixiviación, utilizando un diseño factorial para la optimización. Estos parámetros optimizados lograron incrementar significativamente la eficiencia de extracción de oro del yacimiento VALETITA IV.

2.1.2. *Antecedentes Nacionales*

(Morales, 2018), en la tesis titulada “Evaluación del proceso de cianuración por agitación de minerales de oro y plata de la zona minera de Malco en el distrito de Puyo – Ayacucho. La investigación realizada tuvo como objetivo optimizar la extracción de oro y plata mediante el proceso de cianuración para minerales de la zona minera de Malco en el distrito de Puyo, Ayacucho. Este estudio, de diseño experimental y carácter explicativo-descriptivo, se llevó a cabo

a escala de laboratorio utilizando dos muestras representativas molidas a 25 y 35 minutos. Las muestras se sometieron a un proceso de cianuración por agitación con dosis variables de pH (10,3 a 10,5), CaO (1,0 a 1,5 g/kg), NaCN (1,9 a 9,0 g) y tiempo de cianuración (0 a 24 horas). Los resultados mostraron una recuperación máxima de oro de 89,5% y una extracción de plata de 61,4% a las 24 horas, con una dosificación de NaCN hasta 9,0 gramos a un pH de 10,3 a 10,5. La conclusión fue que la eficacia del proceso de cianuración depende de la consideración de parámetros como el tiempo de molienda, pH, tiempo de cianuración, y la adición de NaCN y CaO, optimizando así la extracción de oro y plata en las condiciones experimentales mencionadas.

2.1.3. Antecedentes Internacionales

(VILCA, 2018), en la tesis intitulada “Optimización del proceso de cianuración de oro en la planta de la Joya Mining” desarrolló un estudio enfocado en la optimización del proceso de cianuración de minerales auríferos en la planta de La Joya. El análisis se centra en los desafíos que presenta el tratamiento de minerales con oro finamente encapsulado y distribuidos en matrices sulfuradas complejas, en combinación con otros minerales como los sulfuros de hierro y compuestos de arsénico, antimonio y bismuto, los cuales complican la extracción eficiente del metal. La investigación destacó la importancia de evaluar y ajustar diversas variables operativas en el proceso, tales como el tiempo de agitación, el consumo de cianuro de sodio (NaCN) y el pH, para optimizar el proceso de cianuración.

Mediante el uso de diseños experimentales, se asume que estas variables son fundamentales para optimizar el proceso de cianuración. El análisis de Pareto evidencia que tanto el pH, como la concentración de NaCN y el tiempo de agitación tienen una influencia significativa en la tasa de recuperación de oro. En el estudio, una mejora en el tamaño de partícula, ajustando el corte de malla, permitió incrementar la recuperación de oro de un 88.5% a un 94% en condiciones óptimas:

un tiempo de agitación de 120 horas, un consumo de NaCN de 6 kg/tonelada y un pH de 12. Esto teniendo en cuenta el grado de liberación de partículas y la mineralogía específica del mineral ya que impactan significativamente en la eficiencia de la extracción del oro.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Minerales Auríferos*

El oro es un metal que rara vez se encuentra formando compuestos en la naturaleza, a diferencia de otros metales como el cobre o el zinc. Los únicos elementos con los que puede combinarse naturalmente son el telurio y en ocasiones con el selenio. Generalmente, se presenta en su estado nativo o formando aleaciones, especialmente con plata. Se encuentra diseminado en pequeñas cantidades en la naturaleza y comúnmente en filones relacionados genéticamente con rocas ígneas de tipo silíceo. La principal fuente de oro son los filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde el metal se deposita junto con pirita y otros sulfuros a partir de soluciones minerales ascendentes (Ros Moreno, 2017, p. 45).

Aunque el oro también se encuentra en el agua de mar, la concentración es tan baja que su extracción no es económicamente viable.

Si bien existen distintas clasificaciones geológicas, se pueden proponer siete grupos: Vetas de oro-cuarzo, depósitos epitermales, placeres jóvenes, placeres fósiles, depósitos con oro diseminado, Oro en menas de metales no ferrosos y Oro en agua de mar.

(Prasad y otros, 1991) Su clasificación según la extracción del metal:

1. **Menas de oro nativo:** Recuperables por gravedad, amalgamación o cianuración.
2. **Oro asociado con sulfuros:** Oro libre o diseminado en sulfuros.

3. **Teluros de oro:** Asociados con oro nativo y sulfuros.
4. **Oro en otros minerales:** Asociado con arsénico, antimonio, plomo, zinc y materiales carbonáceos.

2.2.2. Oro

El oro, con símbolo Au, es un elemento químico que ha sido altamente valorado a lo largo de la historia debido a sus propiedades físicas y químicas únicas.

El oro es un metal precioso conocido y utilizado por la humanidad desde tiempos prehistóricos. Su símbolo químico es Au, derivado del latín "aurum," que significa "brillante amanecer". El oro es notable por su color amarillo brillante, alta densidad, maleabilidad, ductilidad, y resistencia a la corrosión y oxidación. Estas características lo hacen ideal para su uso en joyería, electrónica, medicina, y como activo financiero.

2.2.3. Propiedades Físicas del Oro

El oro es altamente valorado por sus notables propiedades físicas, entre las cuales destacan las siguientes:

Tabla 1*Propiedades Físicas del Oro*

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Número Atómico	79	
Peso Atómico	197.2	
Densidad a 20°C	19.32	g/cm ³
Punto de Fusión	1064.4	°C
Punto de Ebullición	2808	°C
Electronegatividad	2.54	eV
Volumen Atómico a 20°C	10.21	cm ³ /mol
Calor Específico	0.138	J/g·K
Conductividad Térmica a 20°C	3.14	W/cm·K
Resistividad Eléctrica a 20°C	2.06×10 ⁻⁶	Ω·cm
Entalpía de Fusión	12.77	KJ/mol
Entalpía de Evaporación	324.4	KJ/mol
Dureza (Escala de Mohs)	2.5 - 3	
Límite de Elasticidad	55	MPa
Raya	Amarilla brillante	
Gravedad específica	16 - 19	g/cm ³
Color	Amarillo de oro	
Brillo	Metálico	
Estructura Cristalina	Fcc (Cúbica centrada en las caras)	
Morfología	Octaedros redondeados, cubos, dodecaedros, filiforme, reticulado, dendrítico, arborescente, láminas delgadas, masivo en granos redondeados.	

Nota: (Ros Moreno, 2017, p. 3,4)

2.2.4. *Propiedades Químicas del Oro*

El oro es un metal noble, lo que significa que es altamente resistente a las reacciones químicas. A continuación, se describen sus principales propiedades químicas:

Tabla 2

Propiedades Químicas del Oro

Propiedad	Descripción
Reactividad	El oro es químicamente inerte y no se oxida en el aire ni en el oxígeno a ninguna temperatura. (Ros Moreno, 2017)
Resistencia a ácidos	El oro resiste completamente a los ácidos clorhídrico, nítrico y sulfúrico a temperaturas ordinarias y hasta 100 °C. También resiste el ataque de los ácidos bromhídrico, yodhídrico y fluorhídrico.
Agua regia	Una mezcla de ácido clorhídrico y nítrico (agua regia) disuelve fácilmente el oro.
Teluro y selénico	El ácido telúrico y el ácido selénico atacan al oro a altas temperaturas.
Reactividad con halógenos	Todos los halógenos atacan al oro, siendo el bromo el más activo.
Amalgamación	El mercurio reacciona rápidamente con el oro para formar amalgama, utilizada para recoger el metal finamente dividido de arena, gravas y minerales pulverizados.
Aleaciones	El oro forma aleaciones con metales como plata, cobre, paladio, platino, zinc y níquel para modificar sus propiedades físicas.
Solubilidad en cianuro	El oro es soluble en soluciones cianuradas con presencia de oxígeno, un proceso fundamental en la extracción de oro.
Compuestos	El oro forma compuestos con teluros como la calaverita y la silvanita, y aleaciones isomorfas con la plata y el paladio.

Nota: (Ros Moreno, 2017) (Johnson & Smith, 2019)

2.2.5. *Importancia del Oro*

El oro es un metal valioso debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. Es el metal más dúctil y maleable, con una alta densidad y una gravedad específica de 19.3. Químicamente inerte, el oro no se oxida y refleja todos los colores excepto el amarillo, manteniendo su brillo característico. Tiene una dureza de 2,5 a 3 en la escala de Mohs, un punto de fusión de 1063 °C y un punto de ebullición de 2970 °C. Representado por el símbolo Au en la tabla periódica y con una masa atómica de 196.966 gramos, es soluble en agua regia y en soluciones cianuradas con oxígeno, lo que es crucial para su extracción y procesamiento (Quispe Pampa, 2024).

Figura 1

Oro Nativo



Nota: Oro Nativo con Cuarzo – Fabre Minerals

El oro ha sido utilizado históricamente como moneda y reserva de valor, y sigue siendo un activo financiero fundamental. En la industria, su excelente conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión lo hacen indispensable en componentes electrónicos y dispositivos médicos. En joyería, su maleabilidad y brillo lo convierten en un símbolo de riqueza y estatus. Además, las nanopartículas de oro se utilizan en diagnósticos y tratamientos médicos avanzados. Los países

acumulan reservas de oro para garantizar la estabilidad económica, protegiéndose contra la inflación y la volatilidad de los mercados financieros, lo que refuerza su importancia global.

2.2.6. Métodos y Técnicas de Recuperación del Oro

La recuperación del oro se fundamenta en sus propiedades físicas y químicas, como su alta densidad, flotabilidad natural y solubilidad en soluciones de cianuro. Estas características permiten la aplicación de varios métodos y técnicas para extraer y tratar el oro, dependiendo de su forma de presentación y la asociación con otros minerales. Los métodos más comunes incluyen:

Concentración Gravimétrica:

La concentración por gravedad se basa en la diferencia de densidad entre el oro y las rocas que lo contienen. El oro tiene una densidad de 19.3, mientras que la mayoría de los minerales tienen una densidad de aproximadamente 2.6. Los métodos de concentración por gravedad aprovechan esta diferencia para separar el oro de las rocas. Uno de los dispositivos más conocidos para este proceso es el pan de prospector, que se usa para separar el oro del sedimento (Yannopoulos, 1991).

La concentración por gravedad se usa principalmente en la minería de placeres, donde el oro ya ha sido parcialmente concentrado por la acción del agua. En estos depósitos aluviales, la forma del oro puede indicar cuánto ha sido transportado desde su origen; las partículas redondeadas indican un transporte corto, mientras que las partículas achatadas sugieren un transporte más largo. (Yannopoulos, 1991)

La concentración por gravedad es efectiva cuando el oro está en partículas grandes y libres. Hay muchos tipos de equipos para este método, como: Cajas Sluice, Cajas Basculantes, Jigs, Espirales, Mesas Separadoras, Concentradores Centrífugos y Lavadoras en seco.

Figura 2

Concentradores centrífugos



Nota: Hidrometalurgia – Química e Ingeniería (Uceda, 2016)

Cianuración:

Es un proceso donde el oro y la plata se disuelven en una solución alcalina de cianuro de sodio. Es ampliamente utilizado, especialmente en plantas de lixiviación en pilas, para explotar minerales auríferos de baja ley. Sin embargo, su eficacia se ve limitada cuando se trata de minerales refractarios.

Flotación:

La flotación es un proceso utilizado para concentrar minerales mediante la adición de productos químicos específicos y la introducción de aire en una suspensión de mineral. Este proceso genera una espuma en la superficie que contiene una alta concentración del mineral deseado. Los productos químicos se añaden para hacer que ciertos minerales se adhieran a las

burbujas de aire (flotación) o para evitar que otros minerales lo hagan. El material obtenido en la flotación inicial puede requerir etapas adicionales para aumentar la pureza del concentrado (Uceda, 2016).

Figura 3

Celdas Convencionales



Nota: Hidrometalurgia – Química e Ingeniería (Uceda, 2016)

La flotación es particularmente efectiva para minerales donde el oro está asociado con sulfuros, como la pirita. En estos casos, el oro está atrapado dentro de la estructura del sulfuro de hierro. Sin embargo, el proceso no suele ser eficaz para partículas libres de oro o minerales altamente oxidados. Una de las principales ventajas de la flotación es que libera el oro en partículas relativamente grandes, lo que reduce los costos de molienda.

Los reactivos usados en la flotación son generalmente de baja toxicidad, y la concentración máxima permitida de Xantato en aguas residuales es de 0.01 ppm. Esto ayuda a mantener bajos los costos de manejo de los residuos. La flotación también se utiliza para recuperar oro junto con

otros metales, como cobre, plomo o zinc. Los concentrados obtenidos suelen enviarse a fundiciones para recuperar el oro y los metales base.

Frecuentemente, la flotación se combina con la lixiviación con cianuro. En este caso, la cianuración se aplica a los concentrados de flotación o a los relaves, dependiendo de la mineralogía del mineral y de la eficiencia económica del proceso. (Uceda, 2016)

Amalgamación:

Utilizada cuando el oro está liberado o cuando se obtiene un concentrado de alta ley. Consiste en mezclar el mineral aurífero con mercurio líquido para formar una amalgama, de la cual se recupera el oro. (TECSUP, 2023)

Fusión Directa:

Aunque poco común, este método implica mezclar menas que contienen oro con plomo y cobre, y luego fundirlas. El oro se recupera posteriormente durante el refinado del metal base.

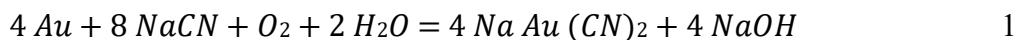
Estos métodos, dependiendo del tipo de mineral y sus características, se combinan o se utilizan de manera independiente para maximizar la recuperación del oro. Cada técnica tiene sus ventajas y limitaciones, siendo crucial seleccionar el método adecuado según las condiciones específicas del yacimiento.

2.2.7. Cianuración

La cianuración es un proceso electroquímico ampliamente utilizado en la industria minera para la extracción de oro y plata de minerales. Este método se basa en la capacidad del cianuro de sodio o potasio para formar complejos estables con estos metales preciosos, disolviéndolos en una solución alcalina y permitiendo su separación de otros minerales presentes. La cianuración es

eficaz para minerales que contienen oro libre o asociado a minerales como sulfuros, siempre que estos no interfieran con el proceso. Los minerales aptos para la cianuración deben ser porosos, de grano fino, y libres de sustancias que reaccionen negativamente con el cianuro, como ciertos sulfuros, óxidos de antimonio, zinc, hierro, cobre, arsénico y materia carbonácea. (Yannopoulos, 1991).

El proceso de cianuración se basa en la reacción química entre el cianuro de sodio y el oro, bajo la presencia de oxígeno y agua. La ecuación química básica es: Elsner reconoció en 1846 que el oxígeno era vital para la disolución del oro en una solución de cianuro. Lo siguiente también se conoce como la ecuación de Elsner.



En esta reacción, el oro se disuelve en la solución de cianuro formando un complejo soluble de dicianurato de oro ($NaAu(CN)_2$).

Existen varios métodos de cianuración, entre ellos la in situ, heap leaching, dump leaching, vat leaching y la lixiviación por agitación. Cada uno de estos métodos se aplica según las características del mineral y la ubicación del depósito. La lixiviación por agitación, por ejemplo, es especialmente adecuada para minerales finamente molidos y de alta ley, proporcionando una rápida disolución del oro debido a la alta superficie específica de las partículas y la agitación intensiva que minimiza la capa límite. La agitación puede ser neumática o mecánica, cada una con sus propias ventajas y aplicaciones específicas.

2.2.8. Métodos de Cianuración

Cianuración In Situ

La cianuración in situ es un método que consiste en la cianuración del mineral directamente en el terreno donde se encuentra, sin necesidad de extraerlo, utilizando soluciones de cianuro para disolver los metales preciosos. Este método es aplicable a depósitos de minerales que son difíciles de manejar o transportar. El proceso suele implicar perforar el mineral, inyectar una solución de cianuro, y luego recolectar la solución que contiene los metales disueltos. (Wills & Finch, 2016)

Dump Leaching (Cianuración por Acarreo)

La cianuración por acarreo, o dump leaching, es una técnica de lixiviación en la que grandes cantidades de mineral triturado se apilan en montones y se rocían con una solución de cianuro. El cianuro disuelve el oro y otros metales preciosos del mineral, y la solución cargada es recogida en el fondo del montón para ser procesada y recuperar los metales. (Hedley & Tabachnick, 1968)

Heap Leaching (Lixiviación en Pilas)

La lixiviación en pilas (heap leaching) es un proceso de extracción de metales preciosos, como el oro y la plata, de minerales triturados. En este método, el mineral triturado se apila en grandes montones sobre una superficie impermeable. Se rocía una solución de lixiviación, generalmente una mezcla de cianuro y agua, sobre el montón. La solución se infiltra a través del mineral, disolviendo los metales preciosos. La solución cargada con los metales se recoge en un sistema de drenaje en la base del montón para su posterior procesamiento, que puede incluir la recuperación del metal disuelto mediante técnicas como la adsorción en carbón activado o la precipitación química. (La Brooy y otros, 1994)

Vat Leaching (Lixiviación en Bateas)

La lixiviación en bateas es un proceso de extracción de metales preciosos de minerales triturados utilizando una solución de lixiviación en un recipiente o batea. En este método, el mineral triturado se coloca en un tanque o batea, y se añade una solución de lixiviación, generalmente una mezcla de cianuro y agua. La solución se mantiene en contacto con el mineral durante un período prolongado, permitiendo que el cianuro disuelva los metales preciosos. Después de la lixiviación, la solución cargada con los metales disueltos se drena del tanque para su procesamiento posterior, que puede incluir la recuperación del metal mediante técnicas como la adsorción en carbón activado o la precipitación. (Marsden & House, 2006)

Lixiviación por Agitación

La lixiviación por agitación es un proceso de extracción de metales preciosos, como oro y plata, en el cual el mineral triturado se mezcla con una solución de lixiviación en un tanque de agitación. En este método, el mineral y la solución de lixiviación se mantienen en movimiento constante mediante agitación mecánica, lo que mejora el contacto entre el mineral y la solución. La agitación facilita la disolución de los metales preciosos del mineral en la solución. Después de un período de agitación, la solución cargada con los metales disueltos se separa del sólido para su procesamiento adicional, que puede incluir la recuperación del metal mediante técnicas como la adsorción en carbón activado o la precipitación. (Heinen & Verloo., 1999)

2.2.9. Cianuración por agitación

La cianuración por agitación es un método de extracción de metales preciosos, como el oro y la plata, del mineral triturado utilizando una solución de cianuro en un tanque de agitación. En

este proceso, el mineral se mezcla con una solución de cianuro en un tanque donde se agita mecánicamente para asegurar un contacto uniforme entre el mineral y la solución de lixiviación.

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Alta eficiencia en la disolución de metales preciosos.
- Adecuado para minerales con concentraciones bajas de metales preciosos.
- Capacidad para tratar minerales complejos.

Desventajas:

- Requiere un manejo cuidadoso de cianuro y control de las emisiones.
- Mayor costo operativo en comparación con métodos menos intensivos como la lixiviación en pilas.
- Necesidad de control riguroso de las condiciones del proceso para evitar la formación de compuestos tóxicos.

2.2.10. Tipos de Agitadores para la cianuración por Agitación

Agitador Mecánico

El agitador mecánico es el tipo más común en los procesos de lixiviación. Consiste en un conjunto de palas, hélices o discos montados en un eje que gira para crear un flujo de mezcla en el tanque. Los agitadores mecánicos están diseñados para mantener el mineral en suspensión y asegurar un contacto homogéneo con la solución de lixiviación (Marsden & House, 2006).

La ventaja de utilizar este agitador es: eficiente para mantener el mineral en suspensión y control preciso del proceso. Por otro lado, existe mayor costo de operación, mantenimiento y consumo de energía para el funcionamiento.

Agitador Neumático

El agitador neumático utiliza aire o gases para crear burbujas en el líquido, las cuales ayudan a mezclar el mineral y la solución de lixiviación. El aire se introduce a través de difusores o tubos perforados en la base del tanque, generando una mezcla fluida. Este método es útil para procesos que requieren una buena transferencia de oxígeno (Heinen & Verloo., 1999).

La ventaja de usar este agitador es: mejora la transferencia de oxígeno, beneficioso en ciertos procesos y puede ser más suave en comparación con la agitación mecánica. Por otro lado, se requiere un sistema adicional para la generación, control de aire y puede no ser tan eficiente en la suspensión del mineral como los agitadores mecánicos.

Aunque la agitación neumática no es tan común como la mecánica en la lixiviación por agitación, puede ser una opción válida en situaciones específicas, como:

- Cuando se busca mejorar la transferencia de oxígeno en el proceso.
- En sistemas donde se desea minimizar el desgaste mecánico o el consumo de energía.

Agitador de Ciclón

El agitador de ciclón utiliza un flujo de líquido que se mueve en espiral dentro del tanque, creando un efecto de ciclón. Este tipo de agitación es eficiente para mantener el mineral en suspensión y para asegurar un buen contacto con la solución de lixiviación.

Agitador de Corriente

El agitador de corriente utiliza una bomba para recircular la solución de lixiviación y el mineral dentro del tanque, creando un flujo continuo a través del lecho de mineral. Este método asegura una mezcla constante y una transferencia efectiva de la solución (Davidson, 2001)

La ventaja de utilizar este agitador es: Mejora la eficiencia de la lixiviación al asegurar un buen contacto entre el mineral y la solución., puede reducir la necesidad de agitación mecánica intensiva. Por otro lado, se requiere bombas, sistemas de tuberías adicionales y mayor complejidad en el diseño del sistema.

2.2.11. Características de los Minerales Apropriados para la Cianuración

La cianuración es una técnica eficiente para la extracción de metales preciosos como el oro y la plata. Sin embargo, no todos los minerales son adecuados para este proceso. Las características específicas del mineral influyen en la eficacia de la cianuración. A continuación, se describen las principales características de los minerales que son apropiados para la cianuración.

Contenido de Metal Precioso

El contenido de metal precioso en el mineral es un factor crucial para determinar la viabilidad de la cianuración. Los minerales con concentraciones suficientes de oro o plata son los más adecuados para el proceso, ya que la cianuración es más efectiva y económica en estos casos (Marsden & House, 2006).

Tamaño de Partícula

El tamaño de partícula del mineral afecta la velocidad de disolución del metal. Los minerales deben ser triturados y molidos a un tamaño que permita un contacto efectivo entre el

mineral y la solución de cianuro. Típicamente, los minerales se muelen a un tamaño de malla de 75 a 150 micrómetros para optimizar la cianuración (Wills & Finch, 2016).

Mineralogía del Mineral

La mineralogía del mineral afecta la eficacia de la cianuración. Minerales como la pirita, arsénico, y otros minerales de sulfuro pueden interferir con el proceso al consumir cianuro o formar compuestos tóxicos. Minerales que contienen metales preciosos en formas accesibles y libres son los más adecuados para la cianuración.

Reactividad del Mineral

La reactividad del mineral con la solución de cianuro también es un factor importante. Minerales que reaccionan de manera eficiente con cianuro, liberando metales preciosos en solución, son ideales para la cianuración. La reactividad puede estar influenciada por la estructura mineral y la presencia de otros elementos en el mineral (Davidson, 2001).

Propiedades de Liberación de Metales

Los minerales que liberan metales preciosos de manera eficiente durante el proceso de lixiviación son más adecuados para la cianuración. La estructura del mineral y la presencia de revestimientos o inclusiones pueden afectar la liberación de los metales.

2.2.12. Tipos de Cianuros

Los cianuros son compuestos químicos que contienen el grupo cianuro (CN), el cual está formado por un átomo de carbono unido a un átomo de nitrógeno. En la industria minera, los cianuros se utilizan principalmente en la extracción de metales preciosos, como el oro y la plata, a través de un proceso conocido como cianuración (Marsden & House, 2006).

Cianuro de Sodio (NaCN)

El cianuro de sodio es el tipo de cianuro más comúnmente utilizado en la cianuración. Es altamente soluble en agua y se disuelve fácilmente para formar una solución de cianuro que se utiliza en el proceso de lixiviación. Se usa para disolver metales preciosos del mineral triturado en procesos de cianuración por agitación, lixiviación en pilas, y lixiviación en bateas (Davidson, 2001).

El cianuro de sodio contiene cerca de 50% de NaCN equivalente. El sodio se expende en varias concentraciones desde el 85% hasta el 98% de NaCN.

Cianuro de Potasio (KCN)

Similar al cianuro de sodio, el cianuro de potasio es también soluble en agua y se utiliza en algunas aplicaciones de cianuración. Su uso es menos común debido a su costo relativamente más alto. Utilizado en procesos de cianuración en menor medida comparado con el cianuro de sodio, y a menudo en laboratorios o procesos de menor escala (Heinen & Verloo., 1999).

El cianuro de potasio (KCN) en la actualidad no es utilizado debido a su costo alto, pero fue muy importante antes de la utilización del cianuro de sodio (NaCN), que es más económico.

2.2.13. Variables de la Cianuración

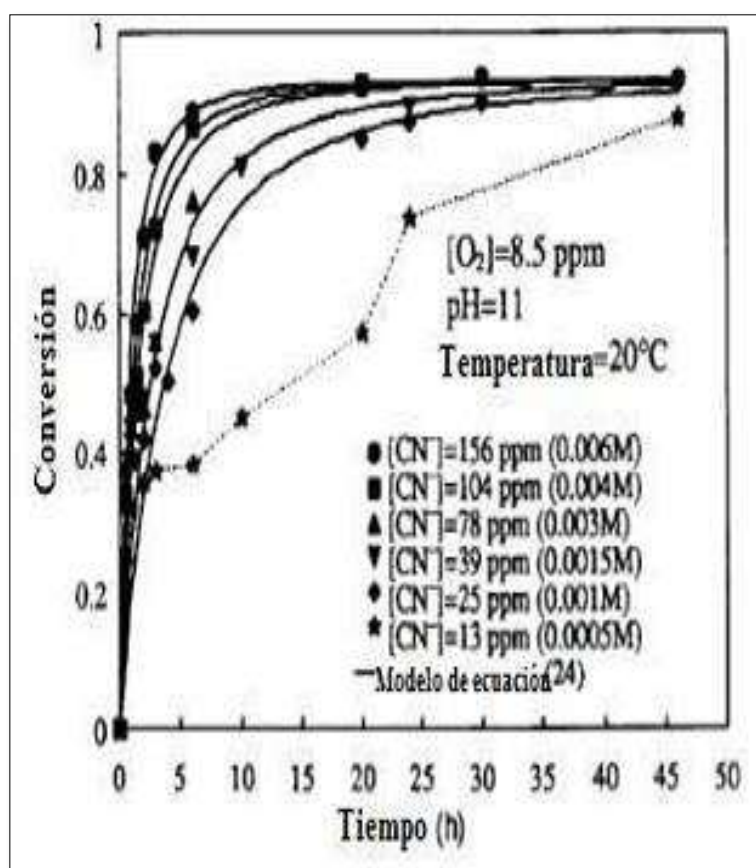
La cianuración es un proceso complejo que está influenciado por múltiples variables. Cada una de estas variables puede afectar la eficiencia de la extracción de metales preciosos y debe ser cuidadosamente controlada. A continuación, se describen las principales variables de la cianuración con citas de diferentes fuentes:

Concentración de Cianuro

La concentración de cianuro en la solución de lixiviación es una variable crítica en el proceso de cianuración. Una concentración adecuada asegura que se forme suficiente complejo de cianuro con los metales preciosos para su disolución. Sin embargo, concentraciones demasiado altas pueden ser costosas y no necesariamente aumentar la eficiencia (Marsden & House, 2006).

Figura 4

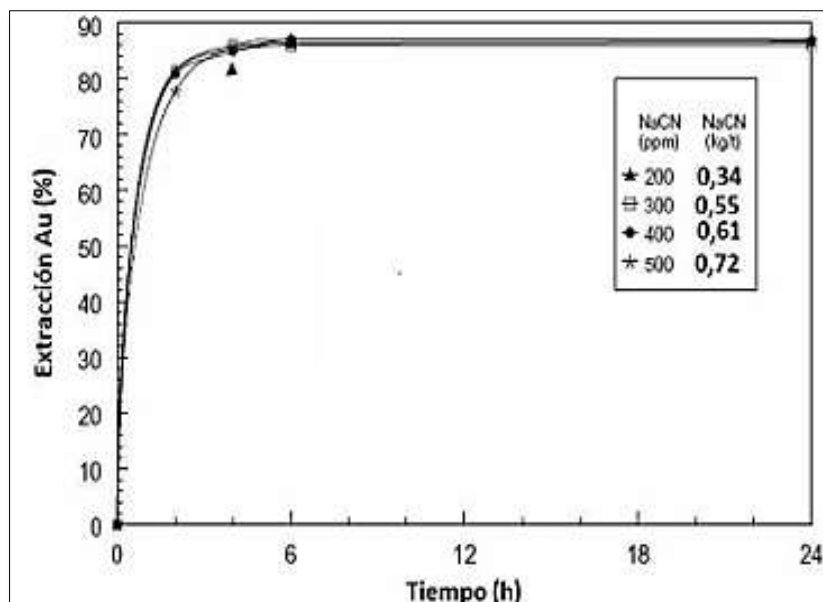
Efecto de la concentración de Cianuro



Nota: (Misari, 2010)

Figura 5

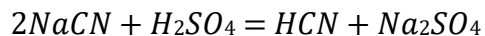
Efecto de la concentración de Cianuro en la Lixiviación

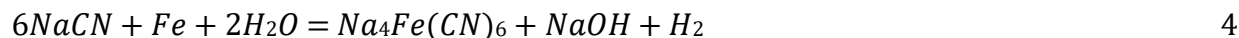


Nota: (Misari, 2010)

La concentración óptima de cianuro suele estar en el rango de 0.20% a 0.40% de NaCN en la solución. Esta concentración permite un equilibrio adecuado entre la eficiencia de disolución del oro y el costo del proceso. Un nivel de cianuro demasiado alto no proporciona beneficios adicionales y puede llevar a un aumento en el costo del tratamiento de efluentes debido al mayor consumo de cianuro (Marsden & House, 2006)

Además, las pérdidas de cianuro durante el proceso también afectan la concentración necesaria. Las pérdidas mecánicas y químicas deben ser consideradas, ya que afectan la cantidad de cianuro requerido. Las pérdidas químicas ocurren debido a reacciones con otros compuestos presentes en la mena, como se ilustra en las siguientes ecuaciones:





Tiempo de Lixiviación

El tiempo de lixiviación es el período durante el cual el mineral está en contacto con la solución de cianuro. Un tiempo de lixiviación adecuado es esencial para asegurar que la cantidad suficiente de metal sea disuelta. Los tiempos muy cortos pueden resultar en una recuperación incompleta, mientras que tiempos excesivamente largos pueden no ser económicos (Davidson, 2001).

Porcentaje de Sólidos en la Pulpa

El porcentaje de sólidos en la pulpa se refiere a la relación entre el peso de los minerales triturados y la cantidad de solución acuosa con cianuro que los contiene. Este factor es crucial en el proceso de cianuración, ya que influye en la eficiencia de la cianuración y en el comportamiento físico de la pulpa durante el proceso. Según Misari (2010), mantener un porcentaje adecuado de sólidos es fundamental para asegurar una interacción efectiva entre la solución de cianuro y el oro presente en el mineral.

Impacto en el Proceso de Cianuración

- **Eficiencia de la Lixiviación:** Un porcentaje de sólidos elevado incrementa la viscosidad de la pulpa, lo que puede dificultar el flujo y la mezcla uniforme del mineral, reduciendo el contacto con la solución de cianuro y, por lo tanto, disminuyendo la recuperación del

oro. Por otro lado, un porcentaje bajo de sólidos mejora la circulación y facilita la disolución del metal, pero puede requerir mayores volúmenes de solución de cianuro, lo que incrementa los costos operativos y puede afectar la eficiencia económica del proceso (Ros Moreno, 2008).

- **Manejo de la Pulpa:** Una pulpa con un porcentaje de sólidos excesivo puede causar problemas en el transporte y la separación, mientras que una concentración muy baja de sólidos reduce la eficiencia del proceso y aumenta el volumen de líquido a manejar, lo cual no es ideal desde el punto de vista económico (Misari, 2010).
- **Control de Procesos:** El control del porcentaje de sólidos se realiza ajustando la cantidad de agua o eliminando parte de la pulpa, según las condiciones operativas óptimas para la lixiviación. Mantener un balance adecuado entre los sólidos y el líquido es esencial para maximizar la recuperación del oro, minimizando simultáneamente los costos operativos y los problemas de manejo del material.

Alcalinidad Protectora en la Cianuración del Oro

La alcalinidad protectora en la cianuración del oro se refiere a la adición de agentes alcalinizantes, como la cal (CaO), para mantener el pH adecuado en el circuito de lixiviación. (Srithammavut, 2008), señala que el uso de cal es común para ajustar y controlar el pH de la solución, lo cual es crucial para el éxito del proceso de lixiviación. La mantención de un pH adecuado es importante, ya que influye directamente en la eficiencia de la disolución del oro.

El pH de la solución afecta la velocidad de disolución del oro debido a su influencia en la interacción entre el oro y el cianuro. A medida que el pH aumenta, la concentración de iones hidroxilo (OH^-) en la solución también aumenta, lo que puede adsorberse en la superficie del oro

y reducir la cantidad de superficie disponible para la interacción con el cianuro. Según Kondos, esta adsorción disminuye la eficacia del cianuro para disolver el oro. Además, un pH elevado puede acelerar las reacciones competidoras, como la disolución de sulfuros y otras especies reactivas, lo que puede disminuir la disponibilidad de cianuro para el oro (Marsden & House, 2006).

Tamaño de Partícula del Mineral

El tamaño de partícula del mineral afecta la superficie de contacto entre el mineral y la solución de cianuro. Minerales más finamente triturados ofrecen una mayor superficie para la reacción, lo que puede mejorar la eficiencia de la lixiviación. Sin embargo, un tamaño de partícula demasiado pequeño puede resultar en problemas de manejo y filtración (Wills & Finch, 2016).

pH de la Solución

El pH de la solución de lixiviación juega un papel crucial en la estabilidad del complejo de cianuro y en la eficiencia del proceso de cianuración. Se ha determinado que un pH óptimo para la cianuración se encuentra generalmente entre 10 y 11. En estas condiciones, el cianuro permanece estable y eficaz en la disolución de metales preciosos. Sin embargo, un pH más bajo puede resultar en el deterioro del cianuro, reduciendo su efectividad, mientras que un pH más alto puede disminuir la solubilidad de algunos metales, afectando negativamente la recuperación del oro. (Johnson & Smith, 2019)

Temperatura de la Solución

La temperatura de la solución de lixiviación puede afectar la velocidad de reacción entre el cianuro y el metal. A temperaturas más altas, la disolución del metal puede ser más rápida, pero temperaturas demasiado altas pueden también acelerar la descomposición del cianuro y aumentar el consumo de energía (Schlesinger y otros, 2011).

Agitación y Mezcla

La agitación y la mezcla son necesarias para mantener el mineral en suspensión y asegurar un contacto uniforme entre el mineral y la solución de cianuro. Una agitación adecuada mejora la eficiencia del proceso y ayuda a evitar la formación de zonas muertas en el reactor.

Presencia de Impurezas

La presencia de impurezas en el mineral, como minerales de sulfuro, puede afectar la eficiencia de la cianuración. Algunos minerales pueden consumir cianuro o formar compuestos que interfieren con la disolución de los metales preciosos.

2.2.14. Termodinámica de la Cianuración

La termodinámica de la cianuración se centra en cómo el oro reacciona con el cianuro y qué condiciones son necesarias para que el oro se disuelva en la solución de cianuro. Los diagramas de Pourbaix son herramientas clave para entender esto. (Misari, 2010, p. 15)

Diagramas de Pourbaix

Los diagramas de Pourbaix muestran cómo el oro y sus compuestos se comportan bajo diferentes condiciones de pH (acidez o alcalinidad) y potencial redox (una medida de la capacidad de una solución para oxidar o reducir sustancias).

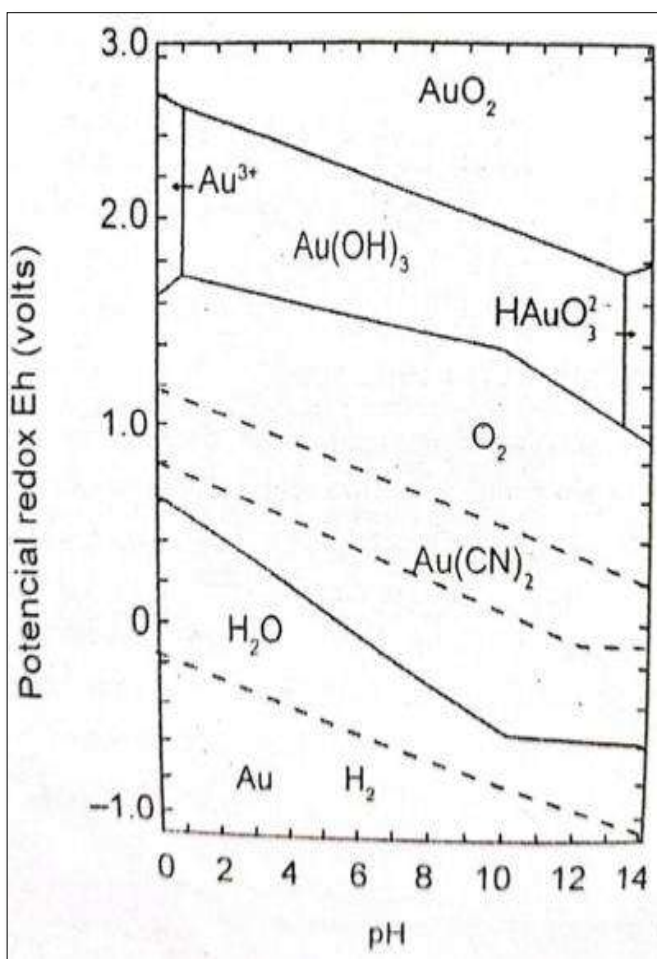
Diagrama Au-H₂O-CN⁻

En este diagrama, se ve que el oro puede formar un complejo con el cianuro (llamado aurocianuro) bajo ciertas condiciones. Para que el oro se disuelva, el pH debe ser lo suficientemente alto (alcalino) y el potencial redox debe estar en un rango adecuado. A pH bajo, el

cianuro puede descomponerse, mientras que, a pH alto, el oro se puede disolver eficazmente gracias a la acción del oxígeno en la solución básica. (Misari, 2010)

Figura 6

Diagrama de estabilidad de potencial pH para el sistema Au-H₂O-CN



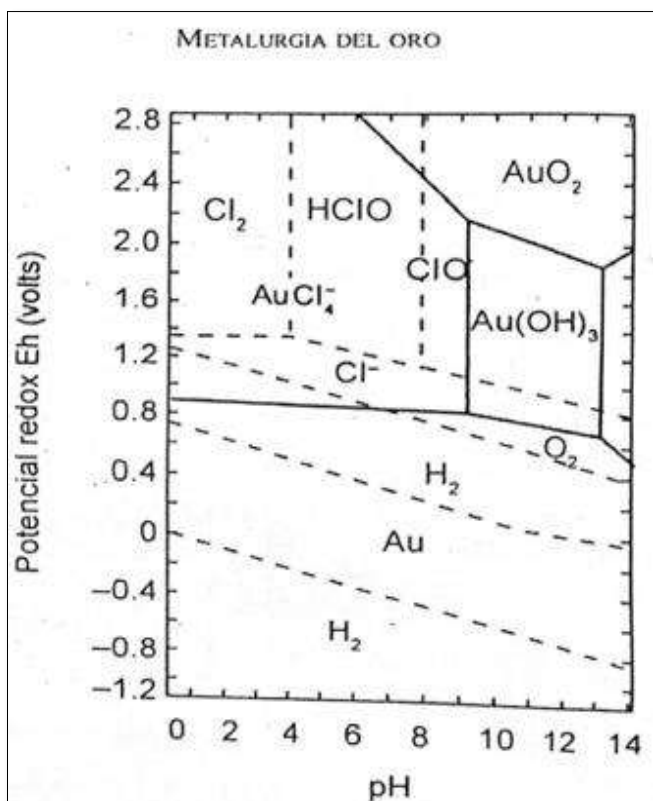
Nota: Este diagrama muestra el equilibrio entre el oro, el cianuro y el agua (Misari, 2010, p. 16).

Diagrama Au-H₂O-Cl:

Este diagrama ilustra las condiciones necesarias para disolver el oro utilizando cloro en lugar de cianuro. El oro se disuelve en un ambiente muy ácido y oxidante cuando se utiliza cloro, formando un compuesto llamado cloroaurato.

Figura 7

Diagrama de estabilidad - pH para el sistema Au- H₂O - Cl⁻



Nota: Este diagrama muestra el equilibrio entre el oro, el cloruro y el agua (Misari, 2010, p. 17)

Para comprobar los mecanismos fisicoquímicos de la lixiviación del oro, se debe recurrir a una revisión de sus principales propiedades termodinámicas y en particular de sus estados estables y metaestables, representados en los diagramas de Pourbaix. Donde se relaciona el potencial del óxido-reducción (Eh) del metal con el pH del medio. Este diagrama muestra una representación gráfica que muestra las regiones de estabilidad termodinámica de las especies en los sistemas metal-electrolito acuoso.

Estados Estables y Metaestables

Estados Estables: El oro metálico es muy estable y difícil de disolver directamente. En cianuración, se forma un complejo estable llamado aurocianuro que facilita la disolución.

Estados Metaestables: Estos son compuestos que pueden formarse temporalmente durante el proceso de lixiviación, pero no son necesariamente los más estables o deseables.

2.2.15. Mecanismo electroquímico de la Cianuración

El mecanismo electroquímico de la cianuración del oro involucra reacciones redox (oxidación-reducción) que permiten la disolución del oro metálico en una solución de cianuro. Este proceso se basa en la formación de complejos de cianuro de oro, y las reacciones electroquímicas son fundamentales para entender cómo el oro se disuelve eficientemente.

Reacción de Reducción del Oxígeno

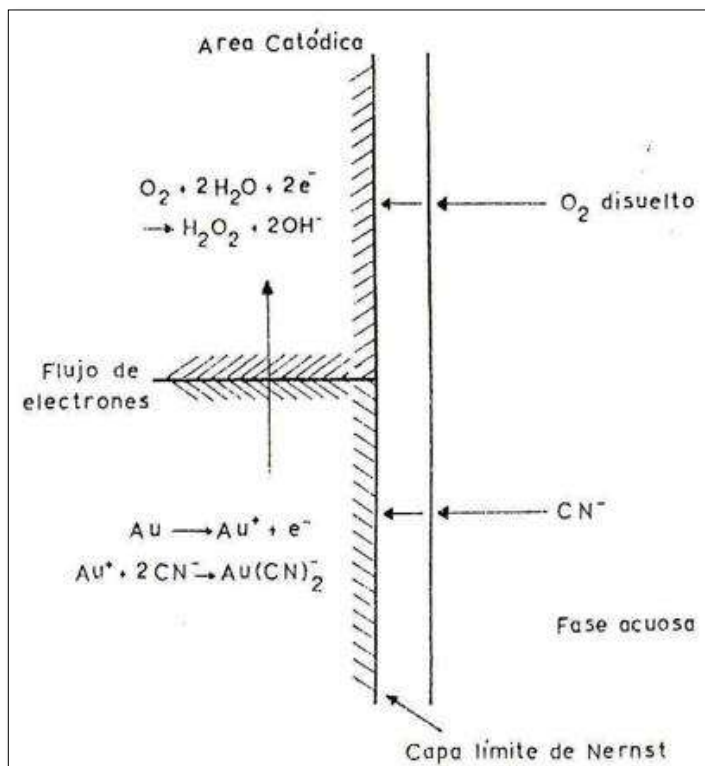
Según Johnson & Smith (2019), el oxígeno disuelto en la solución también juega un papel crucial. El oxígeno actúa como un agente oxidante que facilita la disolución del oro al mantener el potencial redox adecuado. La reacción de reducción del oxígeno en el contexto de la cianuración es:



El oxígeno se reduce para formar hidróxido OH^- lo que ayuda a mantener el pH adecuado y favorece la disolución del oro.

Figura 8

Representación esquemática del mecanismo electroquímico

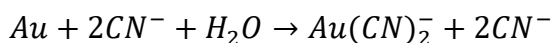


Nota: Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones cianuradas por corrosión electroquímica (Misari, 2010, p. 25)

Reacción de Oxidación del Oro

Según Misari (20210), la reacción principal que ocurre durante la cianuración del oro es la formación de un complejo de cianuro de oro. En términos electroquímicos, esto implica la oxidación del oro metálico y la reducción de cationes de cianuro para formar el complejo soluble.

La ecuación general para esta reacción es:



El oro metálico (Au) pierde electrones (se oxida) para formar un complejo de aurocianuro $Au(CN)_2^-$ y el cianuro CN^- se combina con el oro para formar el complejo y se produce hidróxido OH^- .

2.2.16. Cinética de la reacción de la Cianuración

La cinética de la cianuración del oro se basa en el control del proceso a lo largo del tiempo, el cual tiene un impacto significativo en la velocidad de reacción. Es esencial identificar la etapa controlante, es decir, la etapa que limita la rapidez de la reacción, para optimizar el proceso. Las reacciones fisicoquímicas que involucran una fase sólida y una líquida se desarrollan a través de las siguientes cinco etapas:

- 1) Los reactantes se desplazan desde la solución hasta la interfaz sólido-líquido. Este proceso es crucial para que los reactantes entren en contacto con la superficie del sólido.
- 2) Los reactantes se adhieren a la superficie del sólido. La rapidez de esta etapa depende de la capacidad del sólido para atraer y retener los reactantes.
- 3) Los reactantes en la superficie del sólido reaccionan entre sí para formar productos. Esta etapa está influenciada por la cinética química de la reacción.
- 4) Los productos de la reacción se separan de la superficie del sólido. La velocidad de esta etapa afecta la disponibilidad de la superficie para nuevas reacciones.
- 5) Los productos se desplazan desde la interfaz sólido-líquido de vuelta a la solución. La eficiencia de esta etapa depende de la rapidez con que los productos se muevan fuera de la interfaz.

El tiempo requerido para las etapas 1 y 5 está controlado por las velocidades de difusión, mientras que las etapas 2, 3 y 4 dependen de la rapidez de los procesos químicos. Si la difusión es

lenta, es necesario aumentar la agitación para acelerar la transferencia de reactantes y productos. En caso de que las etapas químicas sean lentas, se debe incrementar la temperatura para aumentar la velocidad de las reacciones. En la cianuración, el proceso de difusión se describe mediante las leyes de Fick.

"En la cianuración, la cinética de la reacción se controla a través de etapas que incluyen la difusión, adsorción, reacción, desorción y difusión de productos, con la difusión y la cinética química influyendo en la velocidad global del proceso" (Misari, 2010).

2.2.17. Efectos Aceleradores y Retardadores en la Cianuración

La cianuración del oro puede verse afectada por diversos factores que pueden acelerar o retardar la disolución del oro. Estos efectos son importantes para optimizar el proceso y asegurar una recuperación eficiente del oro.

Efectos Aceleradores

Según Misari (2010), la investigación de Haden en 1983 que mostró que pequeñas cantidades de sales de plomo y mercurio pueden acelerar la disolución del oro en cianuro. Estos elementos alteran la capa límite de Nernst que rodea el mineral, disminuyendo su espesor. Como la etapa que controla la cianuración es la difusión, una capa límite más delgada facilita el proceso de transferencia de reactantes y productos, acelerando así la disolución.

Efectos Retardadores

La presencia y consumo de oxígeno en la solución puede retardar la disolución del oro. Esto es especialmente relevante cuando la mena contiene minerales como la pirrotina. La pirrotina

se descompone en presencia de oxígeno, formando hidróxidos ferrosos que luego se oxidan. El consumo de oxígeno por estos procesos reduce la cantidad disponible para la disolución del oro.

2.2.18. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución

De acuerdo con J. S. Maclaurin, la velocidad de disolución del oro en soluciones de cianuro alcanza su máxima eficacia a concentraciones específicas. En su estudio, Maclaurin indicó que la velocidad de disolución del oro es óptima a una concentración de 0.25% KCN, equivalente a 0.19% NaCN. Concentraciones menores a este nivel no logran disolver el oro de manera efectiva (Misari, 2010, p. 25)

Por otro lado, Christy descubrió que soluciones de cianuro con concentraciones extremadamente bajas, como 0.001% KCN, no son capaces de disolver el oro. White, en sus investigaciones, encontró que la velocidad de disolución se maximiza con una solución de 0.027% KCN o 0.020% NaCN, especialmente cuando la solución está saturada de oxígeno (Misari, 2010, p. 25).

El consumo de cianuro libre puede reducir la eficiencia del proceso de cianuración, afectando la velocidad de disolución del oro. Este consumo ocurre a través de varios mecanismos:

- **Adsorción Sobre la Ganga:** Minerales de ganga como cuarzo y aluminosilicatos pueden adsorber cianuro, reduciendo su concentración en la solución y afectando la eficiencia de la disolución del oro (Misari, 2010).
- **Formación de Capas Delgadas sobre el Metal:** La formación de capas delgadas sobre el oro o la deposición de peróxidos como el peróxido de calcio también puede impedir la disolución del oro, interfiriendo con la interacción del cianuro.

Tabla 3*Solubilidad de minerales de distintos metales en soluciones cianuradas*

Mineral	Solubilidad	Referencia	Mineral	Solubilidad	Referencia
Oro	Calaverita	Rápidamente soluble	Johnston (1933)	Smithsonita	40.2
Plata	Argentita	Rápidamente soluble	Zincita	35.2	Leaver y Woolf (1931)
	Cerargirita	Rápidamente soluble	Hidrozinca	35.1	
	Proustita	Moderadamente soluble	Franklinita	20.2	
	Pirargirita	Moderadamente soluble	Esfalerita	18.4	
Cobre	Azurita	94.5	Hemimorfita	13.4	Hedley y Tabachinick (1958)
	Malaquita	90.2	Willemita	13.1	
	Calcocita	90.2	Willomita		
	Cuprita	85.5	Pirrotita	Rápidamente soluble	
	Bornita	70	Pirita	Moderadamente soluble	
	Enargita	65.8	Hierro Hematita	Prácticamente insoluble	
	Tetraedrita	21.9	Magnetita	Prácticamente insoluble	
	Crisocola	11.8	Siderita	Prácticamente insoluble	
	Calcopirita	5.6	Oropimente	73	
Antimonio	Estibina	21.1	Arsenico Rejalgar	9.4	
Plomo	Galena	Soluble a alta alcalinidad	Lemmon (1940)	Arsenopirita	0.9

Nota: Extraído de F. Habashi (Misari, 2010, p. 22)

2.2.19. Efecto del Oxígeno sobre la Disolución del Oro

El oxígeno es crucial para la disolución efectiva del oro en el proceso de cianuración. Su presencia facilita la oxidación del oro metálico, esencial para formar complejos de cianuro de oro.

El oxígeno es necesario para mantener el potencial redox adecuado en la solución de cianuro, facilitando la formación de complejos de cianuro de oro. Sin embargo, el consumo de oxígeno por reacciones secundarias puede reducir su disponibilidad y retardar el proceso de disolución del oro. (Misari, 2010, p. 27)

- La disolución del oro se acelera significativamente cuando el oxígeno está presente en la solución de cianuro. La saturación con oxígeno mejora la velocidad de disolución al facilitar la oxidación del oro y la formación del complejo de cianuro. (Misari, 2010, p. 27)

Tabla 4

Efecto del Oxígeno sobre la velocidad de disolución de Oro

OXIGENO %	DISOLUCIÓN DEL ORO mm / cm² / hora
0	0.04
9.6	1.03
20.9	2.36
60.1	7.62
99.5	12.62

Nota: (Misari, 2010, p. 27)

Además del oxígeno, se han utilizado otros agentes oxidantes, como el permanganato de potasio, peróxido de sodio, bromo y cloro, para mejorar la disolución del oro. Sin embargo, debido

a su alto costo y las complicaciones asociadas con su uso, estos agentes oxidantes se han dejado de utilizar en favor del oxígeno (Misari, 2010, p. 27).

Reacciones que Consumen Oxígeno

Descomposición de Pirrotina: La pirrotina es un mineral que a menudo se encuentra junto con el oro en depósitos. Al estar presente en la mena, se descompone y consume oxígeno.

La pirrotina se descompone formando hidróxidos ferrosos, que luego se oxidan, consumiendo oxígeno en el proceso.



Formación de Tiosulfatos y Polisulfuros: El azufre liberado de la pirrotina y otros minerales puede oxidarse para formar tiosulfatos y polisulfuros, que también consumen oxígeno.



2.2.20. Efecto del Tamaño de la Partícula sobre la Velocidad de Disolución

La velocidad de disolución del oro en el proceso de cianuración está influenciada significativamente por el tamaño de las partículas y la concentración de cianuro. Partículas más pequeñas presentan una mayor área superficial, lo que facilita una mayor interacción entre el oro y la solución de cianuro, resultando en una velocidad de disolución más alta (Misari, 2010, p. 27). Además, las partículas finas permiten una mejor difusión del cianuro hacia el interior del mineral, acelerando el proceso de disolución. En contraste, las partículas grandes pueden limitar la

penetración del reactivo y presentar barreras físicas que reducen la velocidad de disolución (Misari, 2010).

El tamaño de las partículas también afecta la eficiencia del proceso. El oro grueso libre en la mena generalmente se recupera mediante métodos como Jigs y trampas antes de la cianuración, ya que las partículas grandes pueden no disolverse completamente en el tiempo disponible. Bajo condiciones óptimas de aireación y agitación, Barsky reportó que la velocidad máxima de disolución del oro puede alcanzar 3.25 mg/cm²/hora, destacando la importancia de estos factores operativos en la eficiencia del proceso (Misari, 2010, p. 27).

2.2.21. Efecto de la Temperatura en la Cianuración

La temperatura tiene un impacto significativo en el proceso de cianuración del oro, afectando tanto la velocidad de disolución como la eficiencia general del proceso. En términos generales, el aumento de la temperatura acelera la velocidad de disolución del oro debido a que incrementa la actividad de la solución y facilita la reacción entre el oro y el cianuro. A temperaturas más altas, la reacción química se lleva a cabo más rápidamente, y la solubilidad del cianuro en agua aumenta, lo que puede mejorar la disponibilidad de cianuro libre para disolver el oro (Misari, 2010, p. 29).

Sin embargo, existen factores adversos asociados con el aumento de temperatura. Una de las principales desventajas es que la solubilidad del oxígeno en la solución disminuye a medida que la temperatura aumenta. Dado que el oxígeno es esencial para la oxidación del oro y la formación del complejo cianuro de oro $[Au(CN)_2]^-$, una menor disponibilidad de oxígeno puede limitar la eficiencia de la disolución del oro.

Además, el uso de soluciones calientes para la extracción del oro presenta varios inconvenientes prácticos. El calentamiento de la pulpa conlleva un costo significativo y puede aumentar la descomposición del cianuro debido al calor. Esto, a su vez, puede resultar en un consumo excesivo de cianuro, ya que se intensifica la reacción entre el cianuro y los cianocidos presentes en la mena, como los sulfuros de cobre y hierro (Misari, 2010, p. 29). Estos factores adversos deben ser considerados para optimizar el proceso de cianuración y minimizar los costos operativos.

2.2.22. Química de la Cianuración del Oro

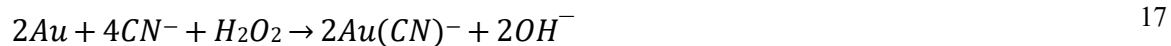
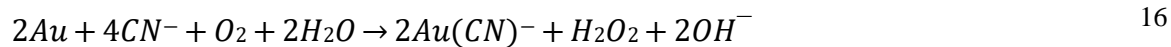
La cianuración es el proceso más utilizado para la extracción de oro de minerales auríferos, basado en la disolución del oro en una solución de cianuro. Este método ha sido empleado desde finales del siglo XIX debido a su eficiencia y costo relativamente bajo (Misari, 2010). El cianuro, principalmente en forma de cianuro de sodio (NaCN), se disuelve en agua, liberando iones cianuro (CN^-), que son los responsables de la disolución del oro:



En solución, los iones cianuro (CN^-) pueden hidrolizarse para formar ácido cianhídrico (HCN) y iones hidroxilo (OH^-), siendo el equilibrio entre CN^- y HCN dependiente del pH de la solución. En un pH de aproximadamente 9.3, la concentración de HCN y CN^- es igual; sin embargo, para optimizar la lixiviación del oro, el pH debe mantenerse por encima de este nivel, preferiblemente entre 10 y 11, ya que a estos valores el cianuro está mayoritariamente en forma de CN^- , lo que facilita la disolución del oro (Ros Moreno, 2015).

El oro en sí es químicamente inerte, pero en presencia de cianuro y oxígeno, forma un complejo soluble de cianuro de oro, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$. Este complejo se forma a través de una serie de

reacciones, siendo la oxidación del oro uno de los pasos clave. La oxidación del oro se logra con la ayuda del oxígeno disuelto en la solución, y se puede expresar mediante las siguientes reacciones químicas:



Al sumar estas dos reacciones, se obtiene la ecuación global propuesta por Elsner:

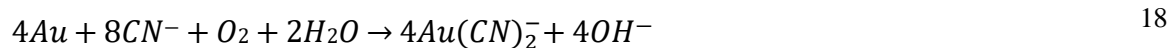
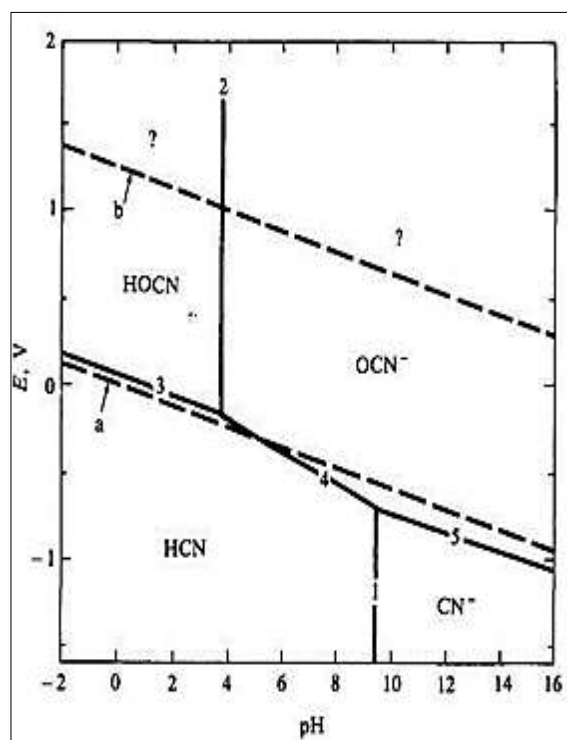


Figura 9

Hidrolisis del cianuro de sodio



Nota: Adaptado de (Marsden & House, 2006)

2.2.23. Diseño experimental

El diseño experimental es un tipo de diseño de investigación que se utiliza para examinar las relaciones causales entre las variables. Es decir, busca determinar si una o más variables independientes (factores) tienen un efecto directo sobre una o más variables dependientes. (Sampieri, 2014)

Según Fisher (1935), uno de los pioneros de esta metodología, el diseño experimental no sólo establece la relación causa-consecuencia, sino que también permite reducir el error experimental y mejorar la precisión de los resultados. En el contexto de la ingeniería y la minería, su aplicación es fundamental para evaluar la efectividad de diversas técnicas, optimizar procesos y tomar decisiones basadas en datos confiables (Montgomery, 2017, p. 45).

Objetivo del Diseño Experimental

El objetivo principal del diseño experimental es planificar y realizar experimentos de manera que los datos obtenidos sean válidos, fiables y útiles para el análisis.

“El diseño experimental busca identificar y cuantificar la relación entre variables independientes y dependientes, de forma que se pueda controlar y manipular las condiciones del experimento para obtener resultados precisos” (Hadi Mohamed y otros, 2023).

El diseño experimental también tiene como objetivo minimizar el error y el sesgo, permitiendo una evaluación clara de los efectos de los factores en estudio, destacan que un buen diseño experimental ayuda a establecer relaciones causales entre variables y a optimizar los procesos al proporcionar información crítica para la toma de decisiones.

2.2.24. Tipos de Diseño Experimental:

Hernández Sampieri describe diferentes tipos de diseños experimentales, según la cantidad de variables manipuladas y las condiciones del estudio. Algunos de los más comunes son:

- **Diseños experimentales simples:** En los que se manipula una sola variable independiente para observar su efecto sobre una variable dependiente.
- **Diseños factoriales:** Donde se manipulan dos o más variables independientes (factores) simultáneamente, y se analizan tanto los efectos principales de cada factor como las interacciones entre ellos. El Diseño Factorial 2^k , por ejemplo, es un tipo de diseño factorial en el que se manipulan k factores, cada uno con dos niveles.
- **Diseños cuasi - experimentales:** Aunque el objetivo sigue siendo el estudio de causalidad, estos diseños no emplean una asignación aleatoria estricta, lo que puede hacer que los resultados sean menos confiables que en un diseño experimental tradicional.
- **Diseños longitudinales y transversales:** Un diseño longitudinal implica la recopilación de datos a lo largo del tiempo para observar los cambios causales, mientras que un diseño transversal mide variables en un solo momento del tiempo, permitiendo solo inferir relaciones, no causalidad.

2.2.25. Diseño Factorial

Es una herramienta que sirve para evaluar el efecto de múltiples variables independientes, sus interacciones y los efectos combinados sobre una variable dependiente. Este tipo de diseño ofrece una visión más rica y detallada que los diseños experimentales univariados (que solo

manipulan una variable independiente a la vez), y es particularmente útil en situaciones complejas donde se desea entender cómo varias variables interactúan en un sistema.

Según Hernández Sampieri, la idea es que el diseño factorial maximiza la información que se obtiene al permitir el estudio no solo de los efectos de cada variable de forma independiente, sino también de cómo las variables interactúan entre sí. "Cuando se incluyen más de una variable independiente, el diseño factorial permite evaluar las interacciones entre estas variables y sus efectos combinados sobre la variable dependiente" (Sampieri, 2014).

Además, un diseño experimental bien estructurado facilita la interpretación de los resultados, ya que establece relaciones causales claras entre las variables, lo que permite generalizar los hallazgos a situaciones similares. (Avila Acosta, 1997)

2.2.26. Diseño Factorial 2^k

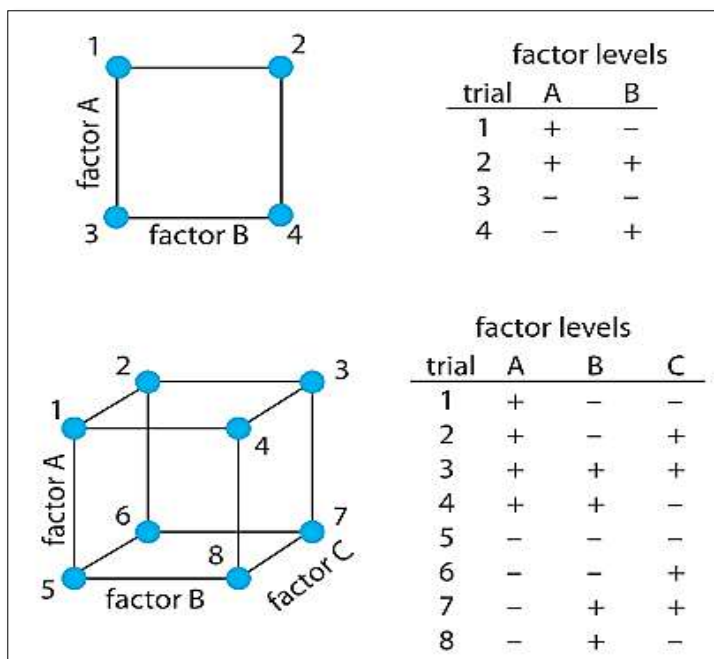
El Diseño Factorial 2^k es un tipo específico de diseño experimental factorial, en el que se manipulan k variables independientes (factores), y cada una de ellas tiene dos niveles. Este diseño es muy útil para estudiar los efectos principales de las variables, así como las interacciones entre ellas de manera eficiente, minimizando el número de experimentos necesarios.

Donde:

- k es el número de factores (o variables independientes) que se están manipulando.
- 2 indica que cada factor tiene dos niveles. Estos niveles son típicamente un nivel bajo y un nivel alto.

Características del Diseño Factorial 2^k

- ***Dos niveles por factor:*** Cada factor tiene dos niveles, y esos niveles representan las diferentes condiciones experimentales.
- ***Combinaciones de niveles:*** En un diseño factorial 2^k , se combinan todas las posibles combinaciones de niveles de los factores. Si hay k factores, el número total de combinaciones será 2^k . Esto significa que, si tienes, 3 factores ($k=3$), se realizarán $2^k = 8$ experimentos, cada uno correspondiente a una combinación distinta de los niveles de los factores.
- ***Estudio de efectos principales e interacciones:*** Este diseño permite no solo evaluar los efectos principales de cada factor, sino también las interacciones entre los factores. Es decir, puedes investigar cómo la combinación de dos o más factores afecta el resultado en formas que no se podrían entender observando los efectos principales de manera aislada.

Figura 10*Diseños Factoriales 2^k* 

Nota: 2^k diseños factoriales para $k = 2$, y para $k = 3$. Un diseño factorial 2^2 requiere cuatro experimentos y un diseño factorial 2^3 requiere ocho experimentos (Miranda Zanardi & Medina de Miranda, 2015)

CAPITULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1.Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

El proceso de cianuración por agitación permite alcanzar una extracción de oro superior al 90% de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.

3.1.2. *Hipótesis Específicos*

- La extracción de oro incrementa conforme aumenta el tiempo de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.
- La concentración óptima de cianuro de sodio (NaCN), para maximizar la extracción de oro es de 600 ppm de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.
- La cantidad optima de porcentaje de sólidos en la pulpa para una extracción eficiente de Oro es 35% de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.

3.2.Variables

3.2.1. *Variable Dependiente*

- Extracción de Oro (%)

3.2.2. *Variables Independientes*

- Tiempo de cianuración

- Concentración de Cianuro de Sodio (NaCN) en la solución.
- Porcentaje de sólidos en la pulpa

3.3.Operacionalización de variables

Tabla 5

Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	UNIDAD	INDICADOR	TÉCNICAS E INSTRUMENTO
Extracción de Oro	Dependiente	Fracción de oro presente en la solución rica en relación con el oro presente en el mineral. (Marsden & House, 2006)	Se realiza comparando la cantidad de oro disuelto en la solución rica (PLS) con la cantidad total de oro presente en el mineral.	0 a 100	(%)	Absorbancia de la solución que contiene el metal disuelto.	Análisis químico por absorción atómica en solución alcalina
Tiempo de Cianuración	Independiente	Tiempo de contacto de un líquido disolvente aplicado a minerales para extraer partes solubles. (Habashi, 1999)	Se mide desde el momento en que el mineral entra en contacto con la solución de cianuro hasta que el proceso alcanza el final predefinido.	20-24	Horas	Contenido de oro extraído durante el tiempo establecido.	Cronometro o temporizadores
Concentración de Cianuro de Sodio (NaCN) en la solución.	Independiente	Cantidad de NaCN presente en la solución en relación con el solvente (agua) utilizado. (Marsden & House, 2006)	Determinar la cantidad de NaCN disuelto en la solución acuosa durante la cianuración.	300 a 600	ppm	Nitrato de plata, formando un complejo coloreado de cianuro.	Método de Colorimetría o método de titulación
Porcentaje de Sólidos en la Pulpa	Independiente	Cantidad de masa sólida en una muestra líquida expresada como un porcentaje de la pulpa total. (Wills & Finch, 2016, p. 150-153)	Determinar el porcentaje de sólidos presentes en la pulpa durante el proceso de cianuración.	30-35	(%)	Balanza de precisión densímetro	Cálculos matemáticos, Balanza Marcy

Nota: Elaboración Propia

CAPITULO IV

4. METODOLOGÍA

4.1.Ámbito del estudio localización política, geográfica

4.1.1. Ubicación

El yacimiento minero está ubicado en el paraje denominado en el centro poblado de Ayahuay del distrito de El Oro; provincia de Antabamba, de la región de Apurímac, aproximadamente a $13^{\circ} 99'$ de latitud sur y $-73^{\circ} 40'$ de longitud oeste; entre 3300 m.s.n.m

- Por el norte con la provincia de Grau
- Por el este con la provincia de Cotabambas y el departamento del Cusco
- Por el sur con el departamento de Arequipa
- Por el oeste con la provincia de Aymaraes. (Habashi, 1999)

Figura 11

Ubicación Geográfica del distrito de El Oro



Nota: Mapa Geográfico Google Maps

Figura 12

Ubicación demográfica de Ayahuay



Nota: Mapa Geográfico Google Maps

4.2. Geología y Mineralogía del Yacimiento de Ayahuay

4.2.1. Geología del yacimiento

El yacimiento de Ayahuay, ubicado en el norte de los cuadrángulos de Chalhuanca y Antabamba, presenta una geología diversa con vetas hidrotermales que se dividen en dos zonas principales: la zona oxidada y la zona primaria. La mineralización en este yacimiento tiene un origen hidrotermal, es decir, proviene de fluidos magmáticos que transportan minerales.

La zona oxidada es el resultado de procesos superficiales, y contiene minerales como hematita, goethita, jarosita, cuarzo y oro libre, que no están asociados a otros minerales. En cambio, la zona primaria está compuesta por sulfuros como pirita, arsenopirita y calcopirita, que se encuentran en una matriz de cuarzo. (Pecho Gutierrez, 1981)

Figura 13*Geología de Ayahuay*

Nota: Fotografía Propia

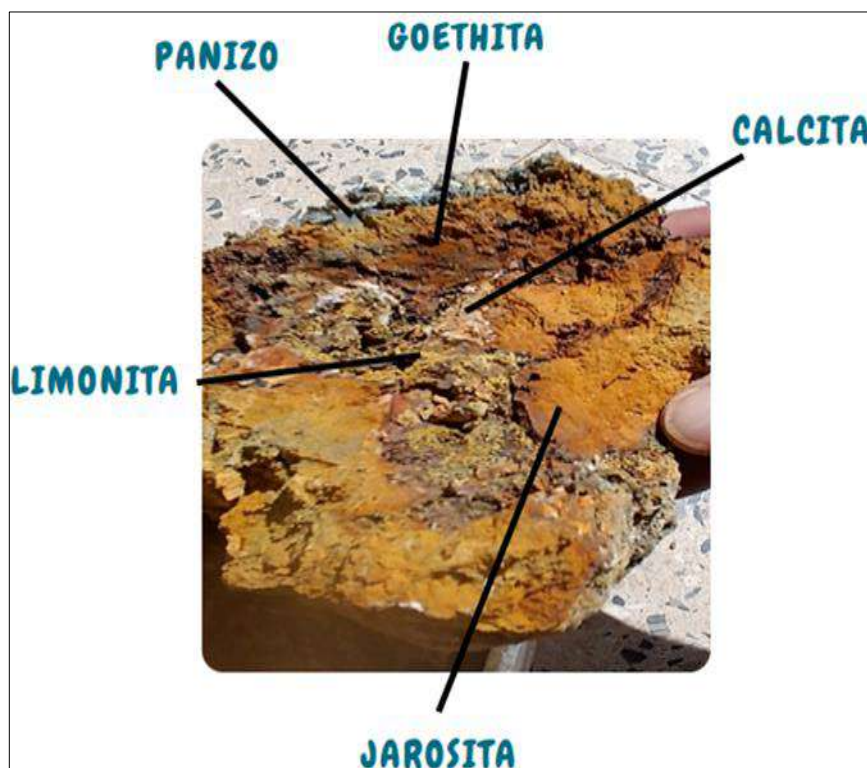
4.2.2. Mineralogía del Yacimiento de Ayahuay

El yacimiento de Ayahuay presenta características similares a otros depósitos minerales, con vetas que se dividen en dos zonas principales: oxidada y primaria

La mineralización del yacimiento de Ayahuay es de origen hidrotermal, proveniente de fuentes magmáticas alcalinas. Los minerales principales presentes en esta zona son limonita, hematita, jarosita, goethita, panizo y oro. El depósito es un yacimiento hidrotermal constituido principalmente por relleno de fracturas tipo vetas, donde la mineralización incluye oro libre en óxidos, cuarzo, calcita y solución sólida en la pirita (Quispe Pampa, 2024).

Figura 14

Mineral de caracterización del yacimiento de Ayahuay



Nota: Fotografía Propia

4.2.3. Caracterización del mineral de Ayahuay a nivel de microscopio

El mineral del yacimiento de Ayahuay a nivel de microscopio permite una caracterización más detallada de su composición y estructura mineralógica. A través del uso de microscopio, se puede observar la distribución, textura y asociación de los minerales presentes, así como las formas en las que el oro y otros minerales están alojados en la roca.

Figura 15

Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 1



Nota: Alteración de las plagioclasas de color blanquecino que son los más saltantes, en medio de los ferromagnesianos que muestra un color gris plomo mate. Con presencia de limonitas, de tipo jarosita y goethita. (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas)

Figura 16

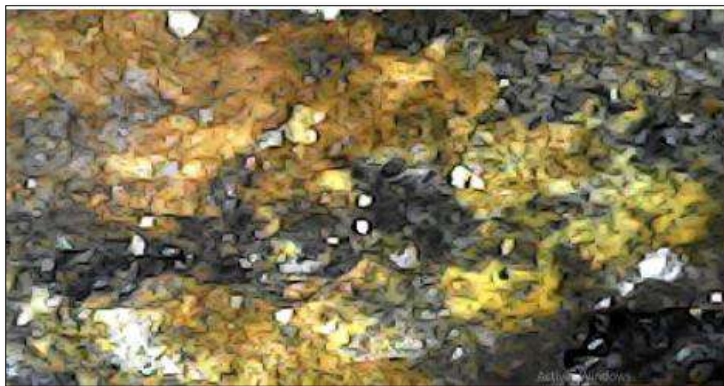
Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 2



Nota: Alteración de plagioclasas en proceso de formación a una argelización, la pirita como producto de un hidrolisis se encuentra oxidando a un sulfato de color gris plomo mate, como se observa. Calcita de forma esporádica. (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

Figura 17

Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 4



Nota: La alteración de la pirita a goethita y un pequeño % de hematita y fuerte presencia de sulfato de magnesio y cloruros de hierro de color gris oscuro a mate. La presencia de plagioclasa se observa en menor %. Presencia de cuarzo en un tipo de descomposición (alteración). (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

Figura 18

Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 5



Nota: Una mezcla de alteraciones de ferromagnesianos y plagioclasas. La presencia de pirita en su estado de oxidación de color amarillo mate a café (jarosita, goethita y la limonita propiamente dicha). (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

Figura 19

Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 5



Nota: Clara oxidación de plagioclasa, para convertirse en óxido de hierro como se observa la coloración café, en medio de la alteración argílica y presencia esporádica de ferromagnesianos de color gris mate y calcita de color blanquecino. (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

Figura 20

Caracterización microscópica con aumento (1920 x 1080) N° 6



Nota: Clara observación de la pirita en un estado de oxidación como se observa, en medio de la alteración argílica, presencia de cuarzo de tipo blanquecino y trazas de malaquita. (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

Figura 21

Caracterización microscópica con aumento (1920 x x 1080) N° 7



Nota: Alteración visible de una plagioclasa en medio de ferromagnesianos alterados y pobre presencia de la hematita y jarosita. Con esporádica traza de melanterita. (Analizado por el Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas).

4.3. Tipos de nivel de Investigación

4.3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación para este trabajo de tesis es experimental, orientada a evaluar el porcentaje de extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación. En esta investigación, se realiza la manipulación de variables bajo condiciones controladas utilizando instrumentos y herramientas especializadas para medir y controlar las variables relevantes del proceso. El objetivo es establecer relaciones causales entre las variables independientes (como la concentración de cianuro, el tiempo de agitación y porcentaje (%) de sólidos) y la variable dependiente (el porcentaje de extracción de oro) del proceso de cianuración por agitación.

4.3.2. Nivel de investigación

La investigación se lleva a cabo a nivel experimental y de laboratorio, y se clasifica en los niveles descriptivo y explicativo:

Descriptivo:

En este nivel, se busca detallar las propiedades y características más relevantes del proceso de cianuración, incluyendo la descripción de las condiciones experimentales y el comportamiento del mineral durante el proceso. Se especifican las dimensiones y características del proceso hasta obtener el PLS (solución rica en oro disuelto).

Explicativo:

Este nivel tiene como objetivo establecer las causas de los fenómenos observados en el proceso de cianuración por agitación. Se analizan las relaciones entre las variables, proporcionando un entendimiento detallado de cómo cada variable afecta el porcentaje de extracción de oro. Se realiza un análisis predictivo mediante métodos estadísticos y matemáticos para prever el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones.

4.4. Población de estudio

La población de estudio está compuesta por las reservas de minerales auríferos del yacimiento de Ayahuay, ubicado en el distrito de El Oro, provincia de Antabamba, Región Apurímac. Estos minerales se encuentran acompañados de otros minerales como pirita, calcopirita, limonita, goethita, calcita, panizo y jarosita.

4.5. Tamaño de la muestra

Para la investigación, se ha seleccionado una muestra de 25 kg de mineral para realizar los análisis y evaluaciones experimentales en el laboratorio. Esta muestra se compone de 11 muestras de mineral aurífero provenientes de los yacimientos de Ayahuay, ubicado en el distrito de El Oro, provincia de Antabamba, Región Apurímac. El tamaño de la muestra se ha determinado para asegurar una representación adecuada del mineral y obtener resultados significativos para el análisis.

4.6. Selección de Muestra

La muestra de estudio se ha tomado utilizando el método de cono y cuarteo manual, que es una técnica estándar para asegurar una representación equitativa del mineral extraído. Este método permite obtener una muestra representativa del yacimiento, reduciendo el sesgo y asegurando la validez de los resultados experimentales.

4.7. Técnica de Recolección de Datos

La recolección de datos en esta investigación se realiza mediante las siguientes técnicas:

- **Guía de Observación:** Se emplea una guía de observación estructurada para registrar las condiciones y comportamientos durante el proceso de cianuración por agitación. Esto incluye la observación de la evolución de las variables experimentales y los cambios en las muestras de mineral.
- **Recopilación Documental:** Se realiza una revisión exhaustiva de trabajos de investigación previos, artículos científicos, y otras fuentes documentales relevantes para proporcionar un contexto teórico y empírico para el estudio. Esta recopilación

incluye la búsqueda de literatura relacionada con la cianuración, técnicas experimentales y estudios de casos similares.

- **Recolección de Datos Experimentales:** Se lleva a cabo la recolección de datos durante las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio. Esto incluye la medición de parámetros el pH de las soluciones, temperatura, oxígeno y otros parámetros críticos durante las pruebas de cianuración.

Técnicas Utilizadas:

- **Pruebas a Nivel de Laboratorio:** Se realizan experimentos controlados en el laboratorio para evaluar la eficiencia del proceso de cianuración por agitación. Estas pruebas incluyen la manipulación de variables y el análisis de los resultados obtenidos.
- **Información Bibliográfica:** Se consulta y analiza información bibliográfica relevante para respaldar los métodos y enfoques utilizados en la investigación. Esto incluye libros, revistas y artículos científicos relacionados con el tema de estudio.

4.8. Equipos, Materiales y Reactivos

4.8.1. Equipos

- **Chancador de Quijada (5"x6"):** Utilizado para la trituración inicial del mineral en el laboratorio.
- **Chancador de Quijada (3"x4"):** Empleado para una trituración más fina del mineral.
- **Chancador de Rodillos (10x8):** Utilizado para la reducción adicional del tamaño de las partículas.

- **Molino de Bolas (1000 g Max):** Equipado para la molienda del mineral hasta obtener un tamaño de partícula adecuado.
- **ROTAP (CE Tyler):** Aparato para el análisis de tamices y la clasificación de partículas.
- **Balanza Analítica:** Para la medición precisa de las muestras y reactivos.
- **Balanza Digital:** Para la medición general de peso.
- **Reactores de Agitación:** Equipos para realizar la cianuración por agitación en condiciones controladas.
- **Equipos de Protección Personal (EPP):** Incluyen guantes, gafas de seguridad, mascarillas, lentes, zapatos de seguridad, tapones de oído y batas de laboratorio.
- **Microscopio:** Para la observación detallada de las partículas y los minerales.
- **Calculadora:** Para realizar cálculos necesarios durante el análisis de datos.
- **Cámara Fotográfica:** Para documentar visualmente los procesos y resultados experimentales.

4.8.2. *Materiales*

- **pHmetro de Cinta:** Para medir el pH de las soluciones durante las pruebas.
- **Juego de Tamices:** Para la clasificación y análisis del tamaño de las partículas.
- **Brochas:** Para la limpieza de equipos y superficies.
- **Espátulas:** Para la manipulación de muestras y reactivos.
- **Bolsas SIPLOP:** Para el almacenamiento de muestras.
- **Bandejas:** Para la organización y manejo de muestras.
- **Mortero de Trituración:** Para la molienda manual de las muestras de mineral.
- **Saquillos:** Para el transporte y almacenamiento de muestras.

- **Plumones Indelebles:** Para marcar y etiquetar las muestras.
- **Manta para Premezclado:** Para la preparación y homogenización del mineral.
- **Cinta Masking:** Para la protección y delimitación durante el trabajo en el laboratorio.
- **Papel Filtro:** Para la filtración de soluciones.
- **Materiales de Vidrio de Laboratorio:** Incluyen frascos, matraces y embudos.
- **Recipientes para Muestras de Solución Lixiviada:** Para el almacenamiento y análisis de las soluciones obtenidas.
- **Embudos:** Para la transferencia de líquidos y soluciones.
- **Vasos de Vidrio:** Para la preparación y manejo de reactivos y muestras.
- **Matras de Base Redonda:** Para la mezcla de líquidos.
- **Soporte Universal:** Para el montaje y sujeción de equipos y aparatos.
- **Pipeta y Bureta:** Para la medición precisa de líquidos y reactivos.

4.8.3. *Reactivos*

- **Nitrato de Plata (AgNO_3):** Utilizado en pruebas específicas para detectar y analizar cianuro residual.
- **Cal:** Para ajustar el pH de las soluciones según sea necesario.
- **Agua Destilada:** Para la preparación de soluciones y el lavado de equipos.
- **Cianuro de Sodio:** Reactivo principal en el proceso de cianuración para disolver el oro.
- **Yoduro de Potasio:** Utilizado en la determinación de la concentración de cianuro.

4.9.Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental de la investigación se organiza según el siguiente diagrama de flujo, el cual detalla la estructura del proceso desde el inicio hasta la finalización del experimento. Este diagrama ilustra cada etapa clave del procedimiento, incluyendo:

➤ ***Preparación de Muestras:***

Incluye la trituración, molienda y clasificación de los minerales auríferos.

➤ ***Preparación de Soluciones:***

Preparación de las soluciones de cianuro y ajustes de pH según los requerimientos del experimento hasta llegar a un pH 11.

➤ ***Cianuración por Agitación:***

Realización de las pruebas de cianuración en los reactores de agitación bajo condiciones controladas en 11 pruebas experimentales y 3 réplicas.

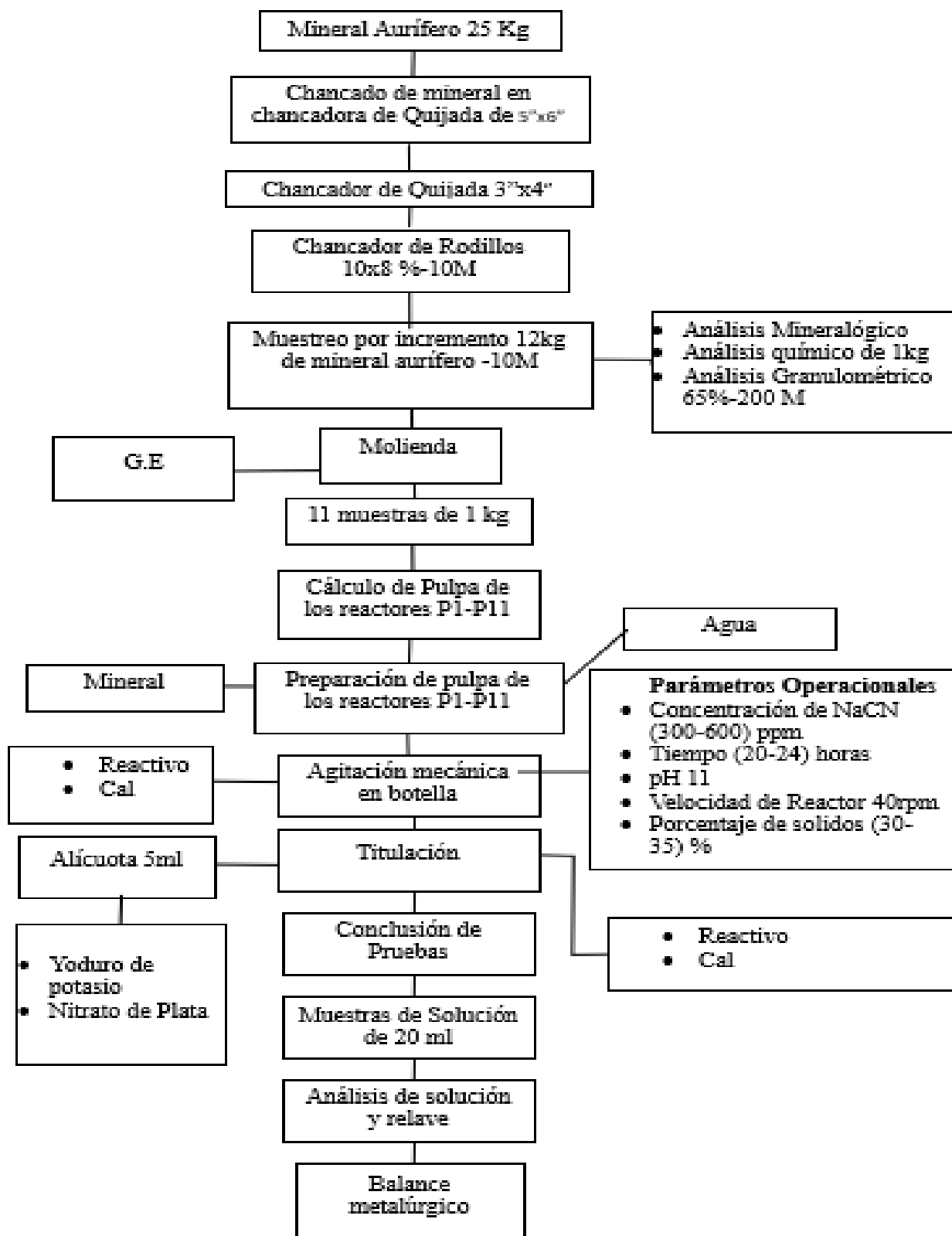
➤ ***Análisis de Resultados:***

Recolección de las soluciones lixiviadas y análisis del porcentaje de extracción de oro.

➤ ***Procesamiento de Datos:***

Aplicación de técnicas estadísticas para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos.

4.9.1. Diagrama de flujo del proceso de cianuración realizada:



4.9.2. Preparación Mecánica del Mineral

Del mineral obtenido de las vetas dentro de los socavones del yacimiento minero Ayahuay, se tomó muestras de distintos puntos de la beta haciendo un total aproximado de 25 kg de mineral, el cual para la reducción de tamaño y la liberación de la mena se realizó lo siguiente.

- Se realizó la preparación mecánica del mineral con el objetivo de reducir el tamaño de mineral en la chancadora de quijadas de 5"x 6". (A nivel de laboratorio)
- Reducción del tamaño del mineral en la chancadora de quijadas de 3"x 4" procedente de la chancadora de quijadas de 5"x 6". (A nivel de laboratorio)
- Conminución del mineral pasante de la chancadora de quijadas de 3"x 4" en el chancador de rodillos hasta alcanzar una granulometría 100%-10 mallas.
- Homogeneización del mineral y muestreo mediante el método de muestreo por incrementos, obteniendo una muestra representativa de 11 kg para una etapa posterior, una muestra de 1 kg para análisis newmont y determinación de la ley de cabeza del mineral y 1 kg para la determinación del tiempo de molienda para alcanzar una granulometría deseada.
- Se realiza una molienda preliminar para obtener el tiempo necesario para alcanzar la granulometría deseada, que es aproximadamente de 65%-200 mallas que brinda una mejor liberación del oro, para la cianuración por agitación en botellas, logrando determinar el tiempo de molienda.
- Se realiza la Molienda de las 11 muestras de mineral en un molino de bolas a nivel de laboratorio, consiguiendo llegar a una granulometría de 65%-200 mallas. Los cuales se usaron para realizar 11 pruebas de cianuración.

- Se realiza la homogeneización del mineral molido a 65%-200M de cada muestra, se toma una muestra que ingresará dentro de los reactores para realizar el proceso hidrometalúrgico, peso que será determinado por cálculos más adelante.

5. CAPITULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1.1. *Tiempo de Molienda*

El tiempo de molienda es el período durante el cual el mineral permanece en el molino de bolas. Su objetivo es lograr el tamaño de partículas óptimo para maximizar la liberación del oro durante el proceso de cianuración por agitación.

Un mayor tiempo de molienda generalmente conduce a un mayor grado de liberación del oro, ya que permite reducir el tamaño de las partículas hasta alcanzar la granulometría deseada. En este estudio, se ha determinado que un tiempo de molienda de 19.90 minutos es necesario para obtener un mineral con una granulometría adecuada, medida en mallas -200, que facilita una liberación eficiente del oro.

La siguiente tabla muestra la relación entre el tiempo de molienda y la granulometría obtenida:

Tabla 6

Determinación del tiempo de molienda

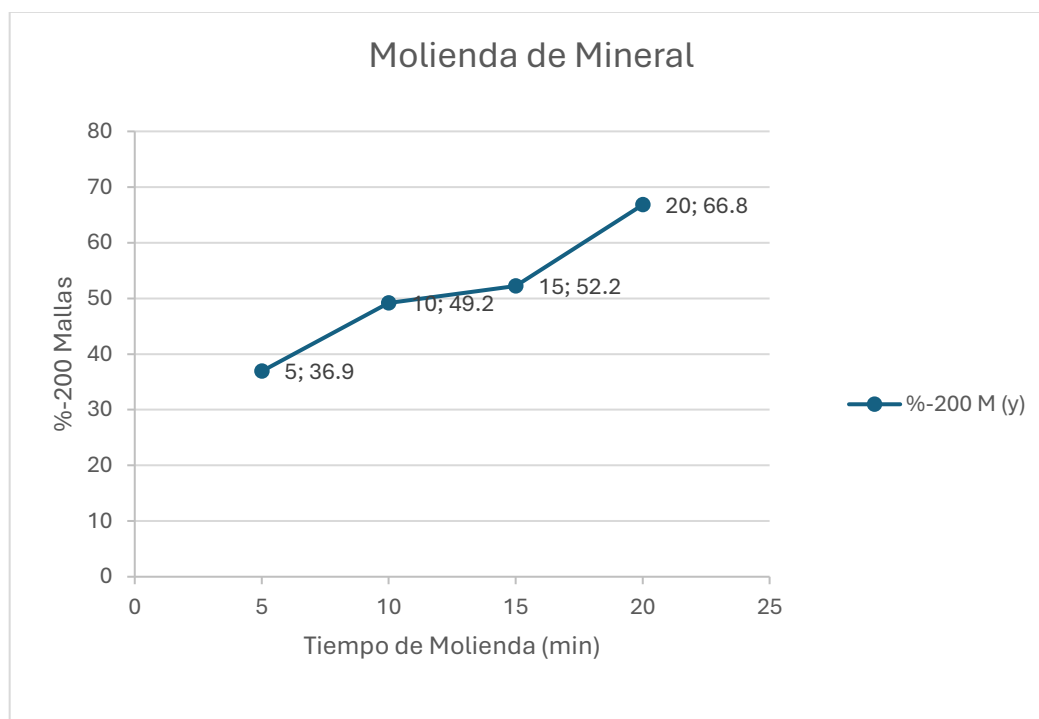
Tiempo de Mol. (x) min	%-200 M (y)
5	36,9
10	49,2
15	52,2
20	66,8

Nota: Elaboración propia

En lo siguiente se observa la representación gráfica del tiempo de molienda y el porcentaje de mineral pasante a la malla de 200.

Figura 22

Grafica Tiempo de molienda vs % - 200 mallas

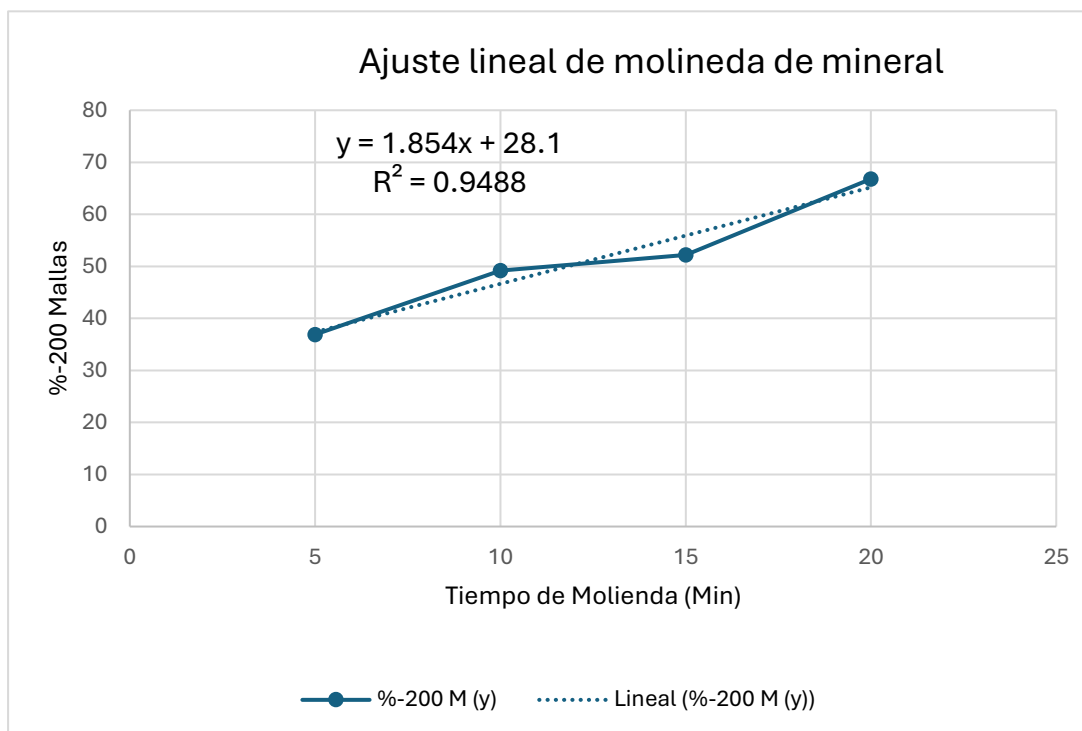


Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

En la siguiente tabla se realiza el ajuste lineal de la figura anterior en el programa de Microsoft Excel para obtener la ecuación matemática lineal que se debe representar de la siguiente manera: $Y = mx + b$

Figura 23

Ajuste lineal de la gráfica de molienda



Nota: Elaboración en programa Microsoft Excel con datos de laboratorio

De la gráfica de ajuste lineal del tiempo de molienda se tiene los siguientes valores de la ecuación lineal.

Pendiente $m = 1.854$

valor de b $b = 28.1$

Erre cuadrada $R^2 = 0.9488$

Se compara la ecuación lineal a la ecuación obtenida con el ajuste lineal se determina lo siguiente:

$$Y = mx + b$$

$$Y = 1.854x + 28.1$$

Donde “Y” es el valor que queremos determinar siendo este el porcentaje pasante a una malla de tamizaje (-200 M)

Por tanto:

El objetivo de la cantidad de porcentaje pasante a -200 M, de la investigación a determinar es de 65%, en tanto se calcula lo siguiente:

$$65 = 1.854x + 28.1$$

$$1.854x = 65 + 28.1$$

$$x = 19.9029$$

El valor hallado para una molienda con un 65% pasante a -200M, se requiere una residencia del mineral de 1 kg en el molino de bolas (a nivel de Laboratorio) a un tiempo de 19.9029 minutos.

5.1.2. Determinación de la gravedad específica

Se realiza el cálculo de la gravedad específica del mineral de la siguiente manera:

- Se toma 3 muestras de mineral y pesa las muestras representativas de 5 gramos.
- Se pesa tres fiolas limpias, secas y vacías, se toma apuntes de peso respectivo.
- Se pesa las 3 fiolas aforadas con agua, se toma apunte del peso de cada uno para los cálculos
- Se agrega los 5 gramos de mineral en las fiolas vacías y se afora con agua, luego se toma el peso del mineral en la fiola con el mineral sumergido en el agua. Tomando apuntes para los cálculos.

Se tiene el siguiente cuadro de datos:

Tabla 7

Datos para la determinación de la gravedad específica

	P_m	W_1	W_2	W_3
	Peso de la muestra (g.)	Peso de la fiola vacía (g.)	Peso de fiola aforada de agua (g.)	Peso del mineral en la fiola sumergido en agua (g.)
MUESTRA 1	5	79,7	278,3	281,4
MUESTRA 2	5	79,5	278,2	281,5
MUESTRA 3	5	79,2	277,6	280,7

Nota: Elaboración Propia

➤ Ahora hallamos la gravedad específica con la siguiente ecuación matemática.

$$G.E = \frac{P_m}{P_m + W_2 - W_3}$$

G.E: gravedad específica.

P_m : Peso del mineral en aire o seco.

W_1 : Peso de la fiola vacía (Este es el peso de la fiola sin agua).

W_2 : Peso de fiola aforada de agua (Este es el peso total de la fiola con agua).

W_3 : Peso del mineral en la fiola, (Es el peso de la fiola aforada con el mineral sumergido en el agua).

- $G.E1 = \frac{5gr}{5gr+278.3-281.4}$
- $G.E1 = 2.6315 \frac{g}{cm^3}$
- $G.E2 = 2.94 \frac{g}{cm^3}$
- $G.E3 = 2.63 \frac{g}{cm^3}$

$$G.E = \frac{\sum(2.6315 + 2.94 + 2.63)}{3} = 2.73 \frac{g}{cm^3}$$

$$G.E = 2.73 \frac{g}{cm^3}$$

Este resultado nos sirve para todas las muestras a trabajar ya que todas son iguales y por eso se hace solo una vez.

5.1.3. Condiciones Operativas para la cianuración.

Para realizar el proceso de lixiviación por agitación con el reactivo de prueba cianuro de Sodio, debemos tomar en cuenta los parámetros y condiciones de operación, tomando las condiciones iniciales en la siguiente tabla:

Tabla 8*Tabla de condiciones iniciales*

Condiciones Iniciales de Operación
Granulometría: 65% -200 Mallas
pH: 11
Velocidad de Agitación: 40 rpm
% sólidos: 30-35
Tiempo de Agitación (horas): 20-24
Concentración de Reactivo (ppm): 300 - 600
Temperatura: Temperatura Ambiental

Nota: Elaboración Propia

5.1.4. Cálculo de Peso de Mineral y volumen de Agua en pulpa.

Para la determinación de la cantidad de mineral y agua para la pulpa en cada reactor de Cianuración (1-11 reactores), se realizó mediante el Balance de Pulpa la cual se tiene en el siguiente cuadro.

Tabla de Balance de Pulpa de la prueba con 30% de Sólidos.

- Volumen de Reactor : 1100 ml
- Volumen de reactor a 80% : 880 ml
- G.E. : 2.73 g/cc
- % Sólidos : 30%

Tabla 9

Base de cálculo de 100 g.

Mineral base: 100 g.			
% PESO (g.)	PESO (g.)	G.E.	VOLUMEN (cc)
30,00	30,00	2.73 gr/cc	10,97
70,00	70,00		70,00
100,00	100,00		80,97

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

Tabla 10

Balance para determinar la cantidad de mineral y agua N° 1

Mineral base: 100 gr		Volumen: 880 cc	
PESO	VOLUMEN	PESO	VOLUMEN
(g.)	(cc)	(g.)	(cc)
30,00	10,97	326,05	119,22
70,00	70,00	760,78	760,78
100,00	80,97	1086,82	880,00

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

En la Tabla anterior se muestran los cálculos de pulpa para los reactores con las condiciones en donde para un volumen de pulpa al 80% de 880 ml se necesita 326,05 de mineral y 760,78 ml de agua.

Tabla de Balance de Pulpa de la prueba con 35% de Sólidos.

De la siguiente manera determinamos la pulpa para un porcentaje de Sólidos de 35%

Volumen de Reactor	: 1100 ml
Volumen de reactor a 80%	: 880 ml
G.E.	: 2.73 g/cc
% Sólidos	: 35

Tabla 11

Base de cálculo en 100 g.

Mineral base: 100 g.			
PESO (g.)	PESO (g.)	G.E.	VOLUMEN (cc)
35,00	35,00	2.73 gr/cc	12.81
65,00	65,00		65,00
100,00	100,00		77.81

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

Tabla 12

Balance para determinar la cantidad de mineral y agua N° 2

100 pulpa		880 pulpa	
PESO	VOLUMEN	PESO	VOLUMEN
(g.)	(cc)	(g.)	(cc)
35,00	12.81	371,99	136,02
65,00	65,00	743,98	743,98
100,00	77.81	1111,97	880,00

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

En la Tabla anterior se muestran los cálculos de pulpa para los reactores con las condiciones en donde para un volumen de pulpa al 80% de 880 ml se necesita 371,98 de mineral y 743,98 ml de agua.

Tabla de cálculo de Pulpa de la prueba con 32.5% de Sólidos.

De la siguiente manera determinamos la pulpa para un porcentaje de Sólidos de 32.5%

Volumen de Reactor	: 1100 ml
Volumen de reactor a 80%	: 880 ml
G.E.	: 2.73g/cc
% Sólidos	: 32.5%

Tabla 13

Base de cálculo de 100 g.

Mineral base: 100 g.			
% PESO (g.)	PESO (g.)	G.E.	VOLUMEN (cc)
32.50	32.50	2.73 gr/cc	11.88
67.50	67.50		67.50
100.00	100.00		79.38

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

Tabla 14

Balance para determinar la cantidad de agua y mineral N° 3

Base mineral: 100 g.		Volumen: 880 cc	
PESO	VOLUMEN	PESO	VOLUMEN
(g.)	(cc)	(g.)	(cc)
32.50	11.88	349.27	127.72
67.50	67.50	752.28	752.28
100.00	79.38	1101.56	880.00

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

En la Tabla anterior se muestran los cálculos de pulpa para los reactores con las condiciones en donde para un volumen de pulpa al 80% de 880 ml se necesita 349,27 de mineral y 752,28 ml de agua, y para las demás pruebas será de la misma manera en función a las condiciones Iniciales.

En el siguiente cuadro se muestran los cálculos de pulpa de los 11 reactores, donde se muestra la cantidad de mineral y agua contenida por reactor.

Tabla 15*Datos experimentales*

Pruebas	% Solidos	Peso de mineral (g)	Volumen de Agua (ml)
P-1	30	326.05	760.78
P-2	30	326.05	760.78
P-3	30	326.05	760.78
P-4	30	326.05	760.78
P-5	35	371.99	743.98
P-6	35	371.99	743.98
P-7	35	371.99	743.98
P-8	35	371.99	743.98
P-9	32,5	349.27	752.28
P-10	32,5	349.27	752.28
P-11	32,5	349.27	752.28

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

5.1.5. Cianuración del mineral.

Para la alimentación de reactores se asignan los valores de las variables con las que cada uno va a trabajar, los cuales serán determinados por el siguiente plan de experimentación

Tabla 16*Diseño de plan Experimental*

Matriz de experimentos		Plan de experimentación		
N° de pruebas	Tiempo (H)	Concentrado de Cianuro	% de Solidos	
P-1	20	0,03	30,0	
P-2	24	0,03	30,0	
P-3	20	0,06	30,0	
P-4	24	0,06	30,0	
P-5	20	0,03	35,0	
P-6	24	0,03	35,0	
P-7	20	0,06	35,0	
P-8	24	0,06	35,0	
P-9	22	0,045	32,5	
P-10	22	0,045	32,5	
P-11	22	0.045	32,5	

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel

5.1.6. Determinación de cantidad de Cal Inicial

Para determinar la cantidad de cal inicial se toma una muestra de mineral de oro en estudio de 50 gramos con un G.E.= 2.73 g/L y agua de 100 ml los cuales son agregados en un recipiente, los cuales se mezclan y se determina el pH, con el pHmetro de cinta siendo el resultado de pH=6.

Entonces para la regulación del pH se agrega Cal, de manera progresiva hasta llegar a un valor estándar de pH =11, dando un total de 0.8 gramos de Cal.

Se realiza el cálculo de pH estándar (11) de la pulpa para un 30% y 35% de porcentaje de Sólidos

Datos:

Hallamos la cantidad de cal para 326.05 g. de mineral

Hallamos la cantidad de Cal Para el volumen de pulpa de 880 ml.

Si 0,8 g Cal 50 g. de mineral

X_1 cal..... W (326,05 g.)

$$X_1 \text{ cal} = \frac{(0,8g * 326.05g)}{50 g}$$

$$X_1 \text{ cal} = 5.22 g.$$

Hallamos la cantidad de cal para 349.27 g. de mineral

Hallamos la cantidad de Cal Para el volumen de pulpa de 880 ml.

Si 0,8 g.....50 g. de mineral

X_2 W (371,99 g.)

$$X_2 \text{ cal} = \frac{(0,8g * 371,99 g.)}{50 g.}$$

$$X_2 \text{ cal} = 5.95 g.$$

Hallamos la cantidad de cal para 371.99 g. de mineral

Hallamos la cantidad de Cal Para el volumen de pulpa de 880 ml.

Si 0,8 g.....50 g. de mineral

X_3 W (371,99 g.)

$$X_3 \text{ cal} = \frac{(0,8g * 371,99 g.)}{50 g.}$$

$$X_3 \text{ cal} = 5.95 g.$$

5.1.7. Cálculo de cianuro de sodio (NaCN)

Realizamos el cálculo para la adición de cianuro de sodio (NaCN):

Según los parámetros de las variables en evaluación se tiene el concentrado de Cianuro de Sodio (NaCN) se tiene lo siguientes valores: 300 ppm, 600 ppm y 450 ppm.

Entonces se realiza el cálculo matemático de la concentración de Cianuro de Sodio Inicial:

Cálculo de Cianuro de Sodio para 300 ppm

Si se tiene que:

- 1 ppm equivale a 1 mg/L,
- Por tanto, 300 ppm equivale a 300 mg/L = 0.3 g/L

Se sabe que se trabajara con un volumen de pulpa de 880 ml, por tanto, se debe calcular la cantidad de concentración de cianuro de sodio para este volumen.

Donde se cumple la relación que 0.3 g es para 1000 ml entonces hallamos la cantidad de cianuro de sodio para 880 ml.

$$W_{300ppm} = \text{Peso NaCN} = \frac{0.3gNaCN * 880ml}{1000ml}$$

$$W_{300ppm} = \text{Peso NaCN} = 0.264g = 0.26g$$

Entonces se determinó que, para una concentración de Cianuro de Sodio de 300 ppm, se requiere agregar 0.26 g de Cianuro de Sodio para iniciar la cianuración, en todos los reactores que cumplan estas condiciones.

Cálculo de Cianuro de Sodio para 600 ppm

Si se tiene que:

- 1 ppm equivale a 1 mg/L,
- Por tanto, 600 ppm equivale a 600 mg/L= 0.6 g/L

Se sabe que se trabajara con un volumen de pulpa de 880 ml, por tanto, se debe calcular la cantidad de concentración de cianuro de sodio para este volumen.

Donde se cumple la relación que 0.6 g es para 1000 ml entonces hallamos la cantidad de cianuro de sodio para 880 ml.

$$W_{600ppm} = \text{Peso NaCN} = \frac{0.6gNaCN * 880ml}{1000ml}$$

$$W_{600ppm} = \text{Peso NaCN} = 0.528g = 0.53g$$

Entonces se determinó que, para una concentración de Cianuro de Sodio de 600 ppm, se requiere agregar 0.53 g de Cianuro de Sodio para iniciar la cianuración, en todos los reactores que cumplan estas condiciones.

Cálculo de Cianuro de Sodio para 450 ppm

Si se tiene que:

- 1 ppm equivale a 1 mg/L,
- Por tanto 450 ppm equivale a 450 mg/L = 0.45 g/L

Se sabe que se trabajara con un volumen de pulpa de 880 ml, por tanto, se debe calcular la cantidad de concentración de cianuro de sodio para este volumen.

Donde se cumple la relación que 0.45 g es para 1000 ml entonces hallamos la cantidad de cianuro de sodio para 880 ml.

$$W_{400ppm} = \text{Peso NaCN} = \frac{0.45gNaCN * 880ml}{1000ml}$$

$$W_{400ppm} = \text{Peso NaCN} = 0.396g = 0.39g$$

Entonces se determinó que, para una concentración de Cianuro de Sodio de 450 ppm, se requiere agregar 0.39 g de Cianuro de Sodio para iniciar la cianuración, en todos los reactores que cumplan estas condiciones.

Tabla 17*Componente ingresado inicialmente en los reactores*

Muestra	Peso de mineral (g)	Volumen de Agua (ml)	Cianuro de sodio (g.)
P-1	326,05	760,78	0,26
P-2	326,05	760,78	0,26
P-3	326,05	760,78	0,53
P-4	326,05	760,78	0,53
P-5	371,99	743,98	0,26
P-6	371,99	743,98	0,26
P-7	371,99	743,98	0,53
P-8	371,99	743,98	0,53
P-9	349,27	752,28	0,39
P-10	349,27	752,28	0,39
P-11	349,27	752,28	0,39

Nota: Elaboración propia Microsoft Excel**5.1.8. Titulación de muestras durante la cianuración**

Para determinar el consumo y gasto de cianuro se realiza la titulación volumétrica.

- Se toman muestras de cada uno de los reactores en un tiempo estimado cronológicamente, hasta cumplir el tiempo máximo de cianuración establecido.
- Se toma una alícuota de 10 ml de solución cianurada
- Se controla el pH de la solución y mantener alcalino la solución de lo contrario se añade Cal.

- Se filtra la solución cianurada para poder tener una solución clara.
- Se toma una alícuota de 5 ml de solución filtrada en un matraz de fondo redondo al cual se añade dos gotas de Yoduro de Potasio (KI) y agitar lentamente.
- Con la solución de nitrato de plata ($AgNO_3$), se titula la alícuota hasta que la solución cambie a un color blanco opalescente y con el volumen de nitrato de plata consumido se realizará los cálculos matemáticos para saber la cantidad de cianuro de sodio gastado y adicionar o no la cantidad de cianuro de sodio en cada uno de los reactores.

5.1.9. Reposición de cianuro de sodio (NaCN)

Para la reposición del cianuro de sodio se realiza mediante cálculos matemáticos, donde se realiza una titulación de muestra con la ayuda de Yoduro de Potasio (KI), y nitrato de plata $AgNO_3$ para determinar el consumo de Cianuro.

Se toman muestras por reactor para determinar datos individuales por cada uno de ellos.

Para el cálculo del reactivo se realiza la siguiente relación matemática.

Donde:

V_o = volumen inicial

V_f = volumen final

C_o = concentración inicial de cianuro de sodio (NaCN)

C_1 = Cantidad del cianuro de sodio libre

C_2 = Cantidad del cianuro de sodio a reponer

G = gasto de nitrato de plata (AgNO_3) en la titulación

Si para: 5 ml0.1ml

25 ml C

$$C1 = \frac{0,1ml * 25ml}{5ml}$$

$$C1 = 0.5\%$$

$$C1 = [\text{NaCN}]_o = 0.03$$

$$C1 = [\text{NaCN}]_1 = 0.005$$

$$C1 = [\text{NaCN}]_1 = 0.025$$

Determinamos la reposición para el reactor N° 1:

$$V1 * C1 = V2 * C2$$

$$C2 = \frac{V1 * C1}{V2}$$

$$C2 = [\text{NaCN}]_f = \frac{880ml * 0,025}{100}$$

$$C2 = [\text{NaCN}]_f = 0.22$$

Se determinó un cronograma de tiempos, 1,2,4,8,16,20 y 24 horas, para tomar muestras de la solución cianurada de cada reactor, se tituló cada una de las muestras, determinando de manera individual el gasto de Cianuro y añadiendo el cianuro gastado en los reactores.

Se mide el pH de cada uno de los reactores para mantener la alcalinidad en pH=11.

Al término de la Cianuración por agitación se permite la precipitación de la pulpa para la separación de la parte sólida y líquida, se extrae la solución enriquecida, en un contenedor hermético para un análisis químico.

5.2. Resultados de extracción de Oro

En la siguiente tabla se muestran los resultados de extracción de oro de las pruebas P-1 a P-11, según el análisis químico, que servirán para el balance metalúrgico y el cálculo del porcentaje de extracción.

Tabla 18

Reporte de contenido de Oro en la Solución

Muestra	Peso de mineral (g)	Volumen de Agua (ml)	Au Extraído mg/L
P-1	326,05	760,78	7,57
P-2	326,05	760,78	6,71
P-3	326,05	760,78	7,37
P-4	326,05	760,78	7,60
P-5	371,99	743,98	7,33
P-6	371,99	743,98	7,90
P-7	371,99	743,98	7,92
P-8	371,99	743,98	9,15
P-9	349,27	752,28	7,82
P-10	349,27	752,28	7,58
P-11	349,27	752,28	7,94

Nota: Laboratorios Analíticos del Sur.

5.3. Balance metalúrgico de los resultados de extracción de Au

El balance metalúrgico se realiza con los resultados del análisis químico de la solución acuosa, los ripios y la ley de cabeza del mineral para determinar la extracción de oro.

5.3.1. Resultados de la muestra 1.

Contenido metálico:

$$P1Cabeza = 326.05g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 6.62mg$$

$$P1Solucion = 760.78ml * 7.57 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.76mg$$

$$P1Ripios = 0.86mg$$

$$Cabeza calculada = 6.62mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P1\text{ porcentaje} = \frac{5.76mg}{6.62mg} * 100 = 87.05\%$$

Tabla 19

Balance metalúrgico de la prueba 1

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	326,05	20,29	6,62
Solución	760,78	7,57	5,76
Ripios	326,05		0,86
Cabeza Calculada	326,05		6,62
Extracción (%)	87,05		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 19, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 1, obteniendo un porcentaje de extracción del 87.05% de Oro.

5.3.2. Resultados de la muestra 2.

Contenido metálico:

$$P2Cabeza = 326.05g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 6.62mg$$

$$P2Solucion = 760.78ml * 6.71 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.10mg$$

$$P2Ripios = 1.52mg$$

$$Cabeza calculada = 6.62mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P2\ porcentaje = \frac{5.10mg}{6.62mg} * 100 = 77.16\%$$

Tabla 20

Balance metalúrgico de la prueba 2

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	326,05	20,29	2,62
Solución	760,78	6,71 mg/L	5,10
Ripios	326,05		1,52
Cabeza Calculada	326,05		6,62
Extracción (%)	77,16		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 20, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 2, obteniendo un porcentaje de extracción del 77.16% de Oro.

5.3.3. Resultados de la muestra 3.

Contenido metálico:

$$P3Cabeza = 326.05g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 6.62mg$$

$$P3Solucion = 760.78ml * 7.37 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.61mg$$

$$P3Ripios = 1.01mg$$

$$Cabeza calculada = 6.62mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P3\text{ porcentaje} = \frac{5.61mg}{6.62mg} * 100 = 84.75\%$$

Tabla 21

Balance metalúrgico de la prueba 3

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	326,05	20,29	2,62
Solución	760,78	7,37 mg/L	5,61
Ripios	326,05		1,01
Cabeza Calculada	326,05		6,62
Extracción (%)	84.75		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 21, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 3, obteniendo un porcentaje de extracción del 84.75% de Oro.

5.3.4. Resultados de la muestra 4.

Contenido metálico:

$$P4Cabeza = 326.05g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 6.62mg$$

$$P4Solucion = 760.78ml * 7.60 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.78mg$$

$$P4Ripios = 0.84mg$$

$$Cabeza calculada = 6.62mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P4\text{ porcentaje} = \frac{5.78mg}{6.62mg} * 100 = 87.40\%$$

Tabla 22

Balance metalúrgico de la prueba 4

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	326,05	20,29	2,62
Solución	760,78	7,60 mg/L	5,78
Ripios	326,05		0,84
Cabeza Calculada	326,05		6,62
Extracción (%)	87,40		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 22, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 4, obteniendo un porcentaje de extracción del 87.40% de Oro.

5.3.5. Resultados de la muestra 5.

Contenido metálico:

$$P5Cabeza = 371.99g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.55mg$$

$$P5Solucion = 743.98ml * 7.33 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.45mg$$

$$P5Ripios = 2.09mg$$

$$Cabeza calculada = 7,55mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P5 porcentaje = \frac{5.45mg}{7.55mg} * 100 = 72.25\%$$

Tabla 23

Balance metalúrgico de la prueba 5

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	371,99	20,29	7,55
Solución	743,98	7,33 mg/L	5,45
Ripios	371,99		2,10
Cabeza Calculada	371,99		7,55
Extracción (%)	72,25		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 23, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 5, obteniendo un porcentaje de extracción del 72.25% de Oro.

5.3.6. Resultados de la muestra 6.

Contenido metálico:

$$P6Cabeza = 371.99g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.55mg$$

$$P6Solucion = 743.98ml * 7.90 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.88mg$$

$$P6Ripios = 1.67mg$$

$$Cabeza calculada = 7.55mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P6\ porcentaje = \frac{5.88mg}{7.55mg} * 100 = 77.87\%$$

Tabla 24

Balance metalúrgico de la prueba 6

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	371,99	20,29	7,55
Solución	743,98	7,9 mg/L	5,88
Ripios	371,99		1,67
Cabeza Calculada	371,99		7,55
Extracción (%)	77,87		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 24, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 6, obteniendo un porcentaje de extracción del 77.87% de Oro.

5.3.7. Resultados de la muestra 7.

Contenido metálico:

$$P7Cabeza = 371.99g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.55mg$$

$$P7Solucion = 743.98ml * 7.92 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.89mg$$

$$P7Ripios = 1.66mg$$

$$Cabeza calculada = 7.55mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P7 \text{ porcentaje} = \frac{5.89mg}{7.55mg} * 100 = 78.07\%$$

Tabla 25

Balance metalúrgico de la prueba 7

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	371,99	20,29	7,55
Solución	743,98	7.9 mg/L	5,89
Ripios	371,99		1,66
Cabeza Calculada	371,99		7,55
Extracción (%)	78.07		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 25, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 7, obteniendo un porcentaje de extracción del 78.07% de Oro.

5.3.8. Resultados de la muestra 8.

Contenido metálico:

$$P8Cabeza = 371.99g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.55mg$$

$$P8Solucion = 743.98ml * 9.15 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 6.81mg$$

$$P8Ripios = 0.74mg$$

$$Cabeza calculada = 7.55mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P8\ porcentaje = \frac{6.81mg}{7.55mg} * 100 = 90.19\%$$

Tabla 26

Balance metalúrgico de la prueba 8

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	371,99	20,29	7,55
Solución	743.98	9.15 mg/L	6,81
Ripios	371.99		0,74
Cabeza Calculada	371.99		7,55
Extracción (%)	90.19		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 26, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 8, obteniendo un porcentaje de extracción del 90.19% de Oro.

5.3.9. Resultados de la muestra 9.

Contenido metálico:

$$P9Cabeza = 349.27g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.09mg$$

$$P9Solucion = 752.28ml * 7.82 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.88mg$$

$$P9Ripios = 1.20mg$$

$$Cabeza calculada = 7.09mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P9\text{ porcentaje} = \frac{5.88mg}{7.09mg} * 100 = 83.01\%$$

Tabla 27

Balance metalúrgico de la prueba 9

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	349,27	20,29	7,09
Solución	752,28	7,82 mg/L	5,88
Ripios	349,27		1,21
Cabeza Calculada	349,27		7,09
Extracción (%)	83,01		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 27, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 9, obteniendo un porcentaje de extracción del 83.01% de Oro.

5.3.10. Resultados de la muestra 10.

Contenido metálico:

$$P10Cabeza = 349.27g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.09mg$$

$$P10Solucion = 752.28ml * 7.58 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.70mg$$

$$P10Ripios = 1.39mg$$

$$Cabeza calculada = 7.09mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P10 \text{ porcentaje} = \frac{5.70mg}{7.09mg} * 100 = 80.46\%$$

Tabla 28

Balance metalúrgico de la prueba 10

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	349,27	20,29	7.09
Solución	752,28	7.58 mg/L	5,70
Ripios	349,27		1,39
Cabeza Calculada	349,27		7.09
Extracción (%)	80,46		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 28, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 10, obteniendo un porcentaje de extracción del 80.46% de Oro.

5.3.11. Resultados de la muestra 11.

Contenido metálico:

$$P11Cabeza = 349.27g * 20.29 \frac{g}{TM} * \frac{1TM}{10^6g} * \frac{10^3mg}{1g} = 7.09mg$$

$$P11Solucion = 752.28ml * 7.94 \frac{mg}{L} * \frac{1L}{10^3ml} = 5.97mg$$

$$P11Ripios = 1.11mg$$

$$Cabeza calculada = 7.09mg$$

Extracción de Oro (%):

$$P11 \text{ porcentaje} = \frac{5.97mg}{7.09mg} * 100 = 84.29\%$$

Tabla 29

Balance metalúrgico de la prueba 11

	Peso (g)	Au (g/TM)	Con. Metálico (mg)
Cabeza	349,27	20.29	7,09
Solución	752,28	7.94 mg/L	5,97
Ripios	349,27		1,12
Cabeza Calculada	349,27		7,09
Extracción (%)	84.29		

Nota: Elaboración propia

En la tabla 29, se tiene el balance metalúrgico de la prueba 11, obteniendo un porcentaje de extracción del 84.29% de Oro.

En la siguiente tabla se tiene el porcentaje de oro extraído de cada muestra, después de realizar el balance metalúrgico.

Tabla 30

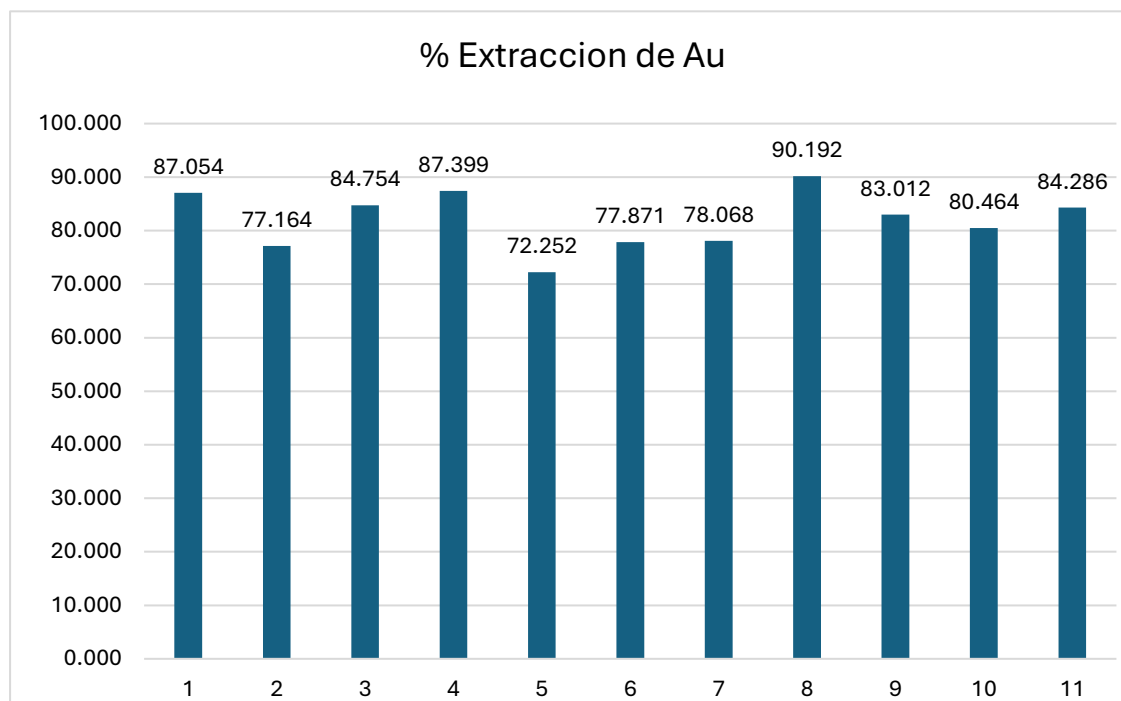
Porcentaje de Oro extraído después del balance metalúrgico

Muestra	Peso de mineral (g)	Volumen de Agua (ml)	Au Extraído mg/L	Extracción (%)
P-1	326,05	760,78	7,57	87,05
P-2	326,05	760,78	6,71	77,16
P-3	326,05	760,78	7,37	84,75
P-4	326,05	760,78	7,60	87,40
P-5	371,99	743,98	7,33	72,25
P-6	371,99	743,98	7,90	77,87
P-7	371,99	743,98	7,92	78,07
P-8	371,99	743,98	9,15	90,19
P-9	349,27	752,28	7,82	83,01
P-10	349,27	752,28	7,58	80,46
P-11	349,27	752,28	7,94	84,29

Nota: Elaboración propia

Figura 24

Grafico de barras de la extracción de Au (%)



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

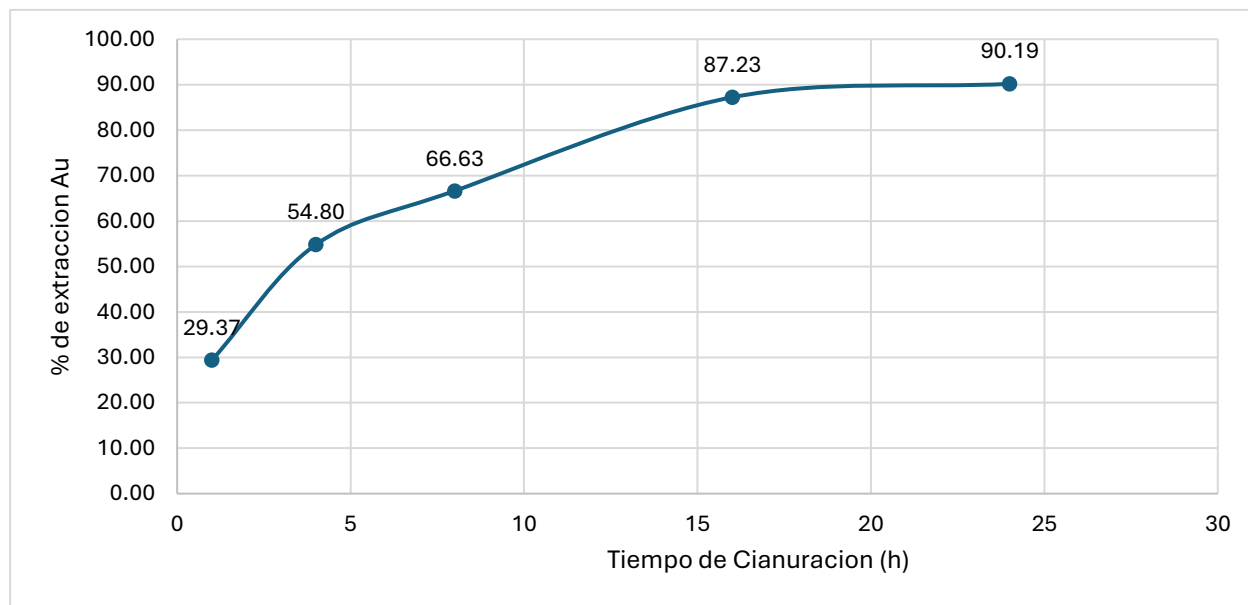
5.4.Cinética de Cianuración

Comprender la cinética de la cianuración es crucial para optimizar las condiciones del proceso y mejorar la eficiencia en la extracción de oro. La cinética proporciona información sobre cómo ajustar variables operativas para maximizar la extracción y minimizar los costos y tiempos de operación.

Se muestra en los datos experimentales obtenidos a tiempos de 1,4,8,16 y 24 horas correspondientes a la prueba 8, se observan las siguientes concentraciones y porcentajes de extracción de oro en función del tiempo:

Tabla 31*Extracción de Oro de la prueba 8 de 0 a 24 horas*

Tiempo (H)	Au mg/L	% Extracción Au
0	0.00	0.00
1	2.98	29.37
4	5.56	54.80
8	6.76	66.63
16	8.85	87.23
24	9.15	90.19

Nota: Elaboración propia**Figura 25***Grafica de dispersión % de extracción de Au VS Tiempo de cianuración**Nota:* Elaboración propia en Microsoft Excel

Estos datos reflejan un aumento en la extracción de oro a medida que transcurre el tiempo. En particular, se observa que la velocidad de disolución disminuye a medida que la reacción progresa, lo cual es típico de los procesos de cianuración. Inicialmente, la tasa de extracción es más alta, pero conforme se avanza hacia el equilibrio, la tasa se reduce.

Este comportamiento sugiere que la reacción de disolución del oro se acerca a un estado de equilibrio a medida que el tiempo avanza, y que la eficiencia de extracción de oro mejora con el tiempo, aunque de manera decreciente.

5.5. Diseño Experimental

5.5.1. *Diseño factorial 2^k*

El diseño factorial con el que se trabajó es el modelo factorial de 2^3 con doble replica en el punto central donde:

- $k=3$ es la cantidad de variables contempladas durante el experimento los cuales son: Tiempo de cianuración, Concentración de cianuro de sodio (NaCN) y porcentaje (%) de sólidos en la pulpa.
- 2 nos indica los niveles a trabajar que sería un alto y un bajo.

El diseño factorial implementado es de tipo 2^3 , lo que resultó en 8 experimentos, a los que se sumaron 3 experimentos centrales, obteniendo un total de 11 experimentos. Este enfoque proporciona una mayor confiabilidad en el estudio y facilita la interpretación de los resultados. Los datos recopilados fueron procesados utilizando el software Minitab, generando 11 pruebas, cada una con diferentes combinaciones de las variables, seleccionadas de manera aleatoria. Estas combinaciones se presentan en la tabla 32.

Tabla 32*Diseño factorial del experimento 2³ con replica en el punto central*

OrdenEst	Orden Corrida	Pt. Central	Bloques	Tiempo (H)	C. NaCN	%solidos
1	1	1	1	20	300	30
2	2	1	1	24	300	30
3	3	1	1	20	600	30
4	4	1	1	24	600	30
5	5	1	1	20	300	35
6	6	1	1	24	300	35
7	7	1	1	20	600	35
8	8	1	1	24	600	35
9	9	0	1	22	450	32.5
10	10	0	1	22	450	32.5
11	11	0	1	22	450	32.5

Nota: Elaboración software MINITAB**5.5.2. Construcción de matriz de diseño**

La matriz de diseño es una estructura organizada que especifica cómo se combinarán los diferentes niveles de los factores en cada experimento. Esta matriz permite planificar y ejecutar los experimentos de manera eficiente, garantizando que todas las combinaciones relevantes de factores sean evaluadas y facilitando el análisis de sus efectos sobre las variables de respuesta.

En la tabla 32, se refleja los factores y los niveles con su codificación.

Tabla 33*Factores y Niveles Codificados*

Factores (variables)	Niveles (dominio experimental)	
	Bajo (-1)	Alto (+1)
Tiempo de Cianuración	20	24
Concentración NaCN (ppm)	300	600
Porcentaje de solidos (%)	30	35

Nota: Elaboración propia**Tabla 34***Matriz de diseño factorial 2³*

N° Pruebas	Tiempo (Horas)	Concentración (ppm)	% solidos	% Extracción de Au
P1	20	300	30	87.05
P2	24	300	30	77.16
P3	20	600	30	84.75
P4	24	600	30	87.40
P5	20	300	35	72.25
P6	24	300	35	77.87
P7	20	600	35	78.07
P8	24	600	35	90.19
P9	22	450	32.5	83.01
P10	22	450	32.5	80.46
P11	22	450	32.5	84.29

Nota: Elaboración propia

La Tabla 34 muestra la correspondencia entre las condiciones experimentales necesarias para llevar a cabo el diseño 2^3 . Cabe destacar que no se repite ninguna condición ni se omite ninguna combinación posible.

Tabla 35

Matriz experimental del diseño factorial, plan de ejecución y resultados.

Matriz de Experimentos				Plan de Experimentación			Respuesta
N° Pruebas	X1	X2	X3	Tiempo (Horas)	Concentración (%)	% solidos	Y
P1	-	-	-	20	0.03	30	87.05
P2	+	-	-	24	0.03	30	77.16
P3	-	+	-	20	0.06	30	84.75
P4	+	+	-	24	0.06	30	87.40
P5	-	-	+	20	0.03	35	72.25
P6	+	-	+	24	0.03	35	77.87
P7	-	+	+	20	0.06	35	78.07
P8	+	+	+	24	0.06	35	90.19

Nota: Elaboración Software MINITAB

Tabla 36*Cálculo de efectos.*

Término	Efecto	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Modelo	8	81,845	0,688	118,97	0,000	
Tiempo	2,624	1,312	0,688	1,91	0,197	1,00
C. NaCN	6,518	3,259	0,688	4,74	0,042	1,00
%solidos	-4,497	-2,249	0,688	-3,27	0,082	1,00
Tiempo*C. NaCN	4,760	2,380	0,688	3,46	0,074	1,00
tiempo*%solidos	6,247	3,123	0,688	4,54	0,045	1,00
C. NaCN*%solidos	2,551	1,275	0,688	1,85	0,205	1,00
tiempo*C.	-1,507	-0,754	0,688	-1,10	0,388	1,00
NaCN*%solidos						
Pt Ctral		0,74	1,32	0,56	0,630	1,00

Nota: Elaboración Software MINITAB

Tabla 37*Análisis de la varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	281,318	35,165	9,29	0,101
Lineal	3	139,195	46,398	12,25	0,076
Tiempo	1	13,775	13,775	3,64	0,197
C. NaCN	1	84,968	84,968	22,44	0,042
% solidos	1	40,451	40,451	10,68	0,082
Interacciones de 2 términos	3	136,376	45,459	12,01	0,078
Tiempo*C. NaCN	1	45,318	45,318	11,97	0,074
Tiempo*%solidos	1	78,048	78,048	20,61	0,045
C. NaCN*%solidos	1	13,010	13,010	3,44	0,205
Interacciones de 3 términos	1	4,544	4,544	1,20	0,388
Tiempo*C. NaCN*%solidos	1	4,544	4,544	1,20	0,388
Curvatura	1	1,203	1,203	0,32	0,630
Error	2	7,572	3,786		
Total	10	288,891			

Nota: Elaboración Software MINITAB

El valor de p del modelo obtenido es de 0.101, lo que indica que no todas las variables en el modelo son significativas, ya que este valor es mayor a 0.05. Al desglosar el análisis, observamos que, para las variables lineales, el tiempo tiene un valor de p de 0.197, lo que indica que no es una variable significativa en este contexto. Sin embargo, la concentración de NaCN tiene un

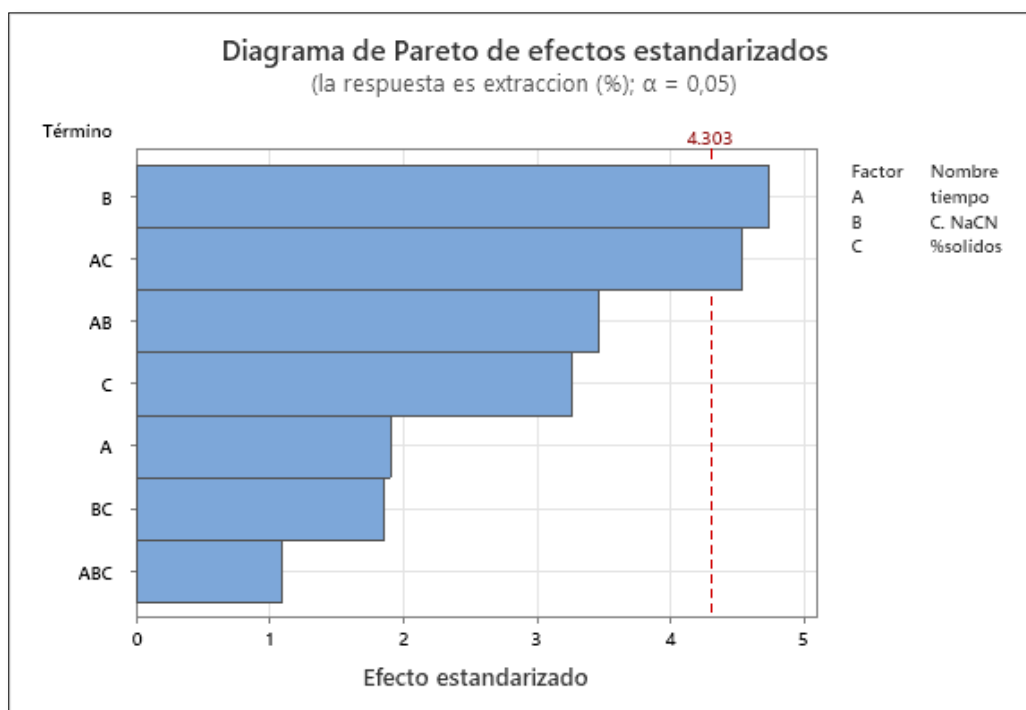
valor de p de 0.042, lo que la convierte en una variable significativa. Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta un valor de p de 0.082, lo que indica que no es significativo.

En cuanto a las interacciones de dos términos, el análisis muestra que la interacción entre el tiempo y la concentración de NaCN tiene un valor de p de 0.074, lo que indica que no es significativa. No obstante, la interacción entre el tiempo y el porcentaje de sólidos tiene un valor de p de 0.045, lo que la hace significativa. La interacción entre la concentración de NaCN y el porcentaje de sólidos, con un valor de p de 0.205, no es significativa.

Las interacciones de tres términos y la curvatura tampoco resultan significativas, con valores de p de 0.388 y 0.630, respectivamente.

Figura 26

Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados



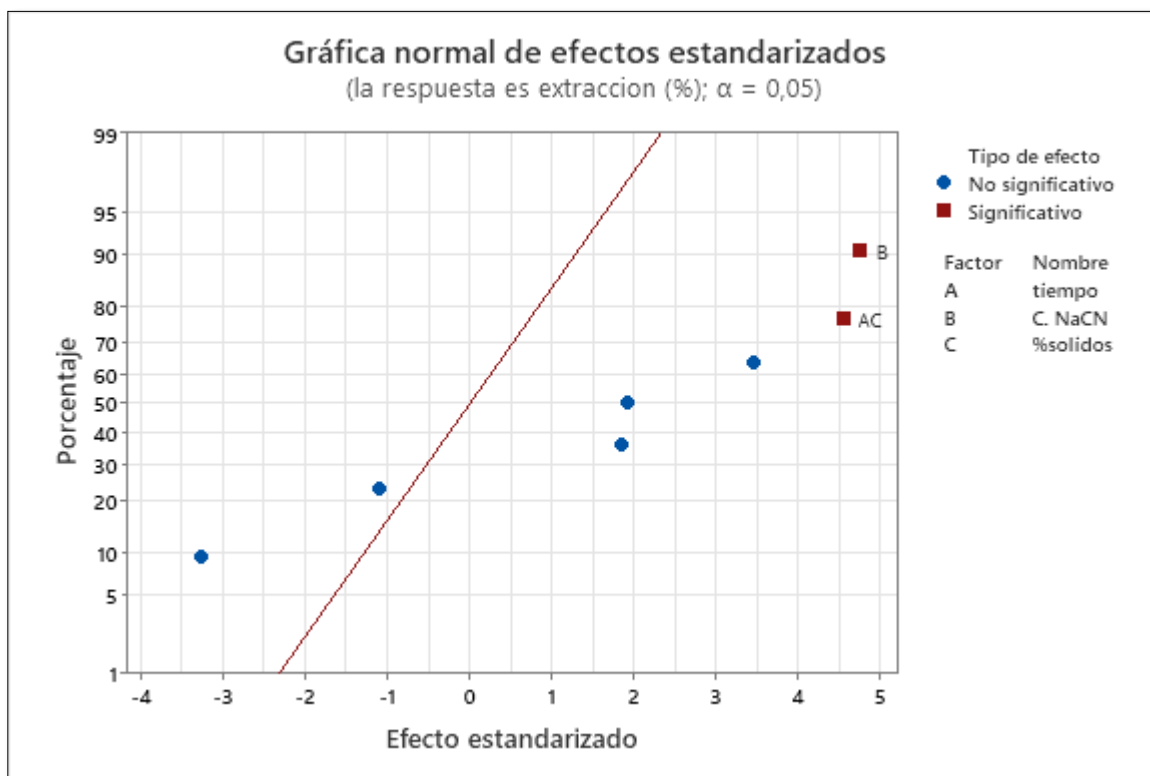
Nota: Software estadístico Minitab 2022

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados muestra los efectos de las variables y sus interacciones en el porcentaje de extracción. El eje horizontal representa el efecto estandarizado, mientras que el eje vertical lista de factores analizados. La línea roja discontinua marca el umbral de significancia (4.303) para un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

La concentración de NaCN (B) es la variable más significativa, seguida por la interacción entre el tiempo y el % de sólidos (AC). La interacción entre el tiempo y la concentración de NaCN (AB) también muestra una significancia cercana.

Figura 27

Efectos normales estandarizados para la respuesta



Nota: Software estadístico Minitab 2022

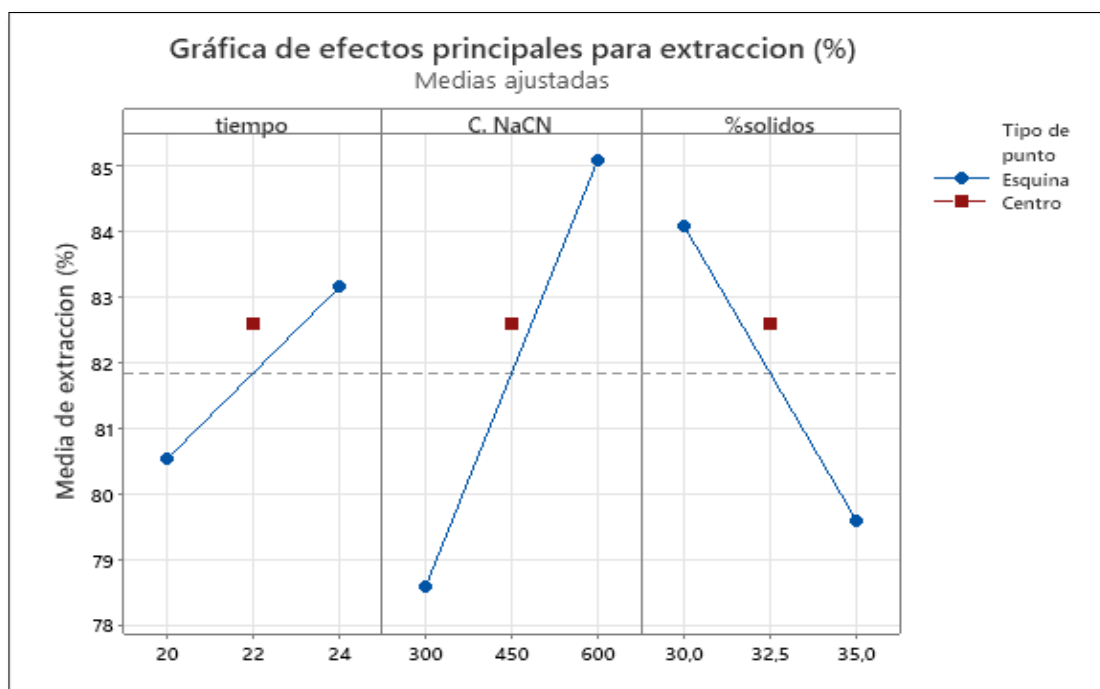
La gráfica normal de efectos estandarizados permite identificar qué factores y sus interacciones son significativos en el modelo. Los puntos que se alejan más de la línea roja (que representa los efectos nulos) son considerados significativos.

La concentración de NaCN (B) y la interacción entre el tiempo y el % de sólidos (AC) son los factores que tienen un efecto significativo en la extracción, lo que coincide con lo observado en el diagrama de Pareto.

Los demás factores y sus interacciones (como el tiempo, el % de sólidos por separado, y otras combinaciones) no son significativos, ya que sus efectos están más cercanos a la línea de referencia y se muestran como puntos azules.

Figura 28

Efectos Principales para Extracción



Nota: Software estadístico Minitab 2022

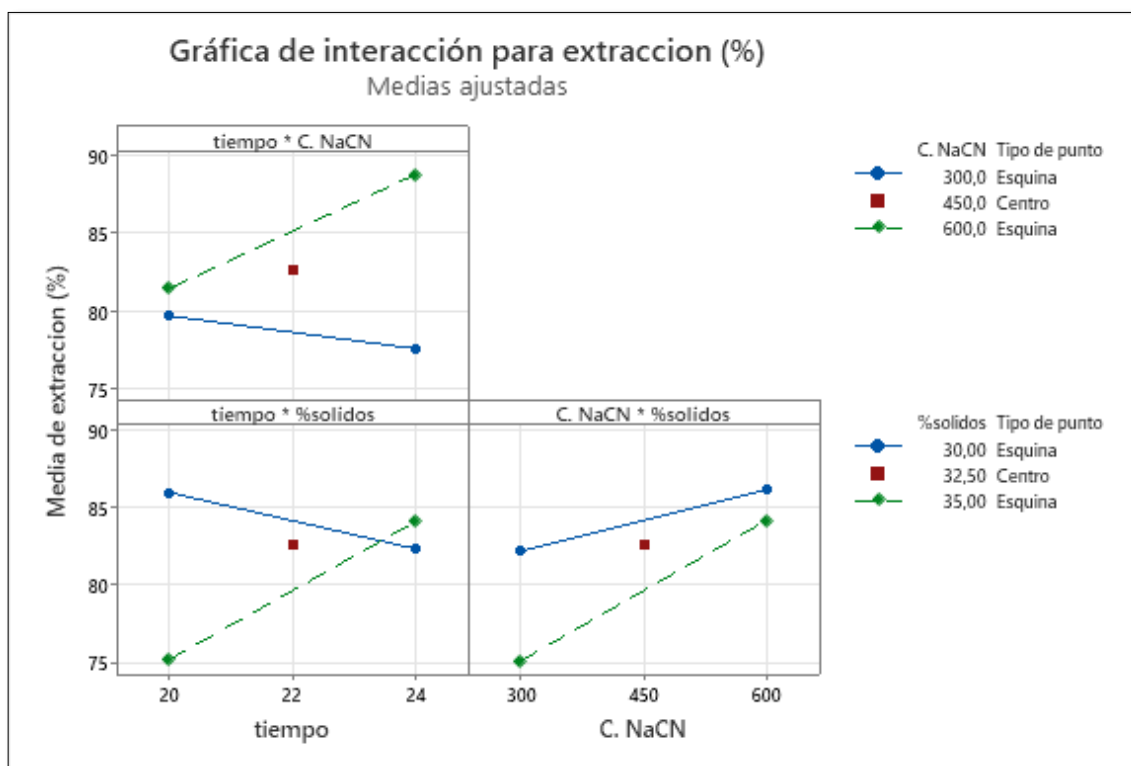
La gráfica de efectos principales para la extracción (%) muestra cómo cada factor individual (tiempo, concentración de NaCN, y % de sólidos) afecta la media de extracción de oro. Cada línea conecta los puntos de medias ajustadas para diferentes niveles de los factores.

La gráfica de efectos principales indica que la concentración de NaCN es el factor más influyente en la extracción de oro, con un aumento significativo en la eficiencia al elevar la concentración de 300 ppm a 600 ppm. El tiempo de cianuración también tiene un efecto positivo, aunque más moderado, mientras que un mayor porcentaje de sólidos reduce la eficiencia de extracción. Por lo tanto, para optimizar el proceso, se debería priorizar una mayor concentración de NaCN y un control adecuado del porcentaje de sólidos.

Esta gráfica refuerza lo que se observó en los diagramas anteriores: la concentración de NaCN es un factor crítico, mientras que el tiempo y el % de sólidos tienen efectos menos pronunciados.

Figura 29

Grafica de interacción para la Extracción (%)

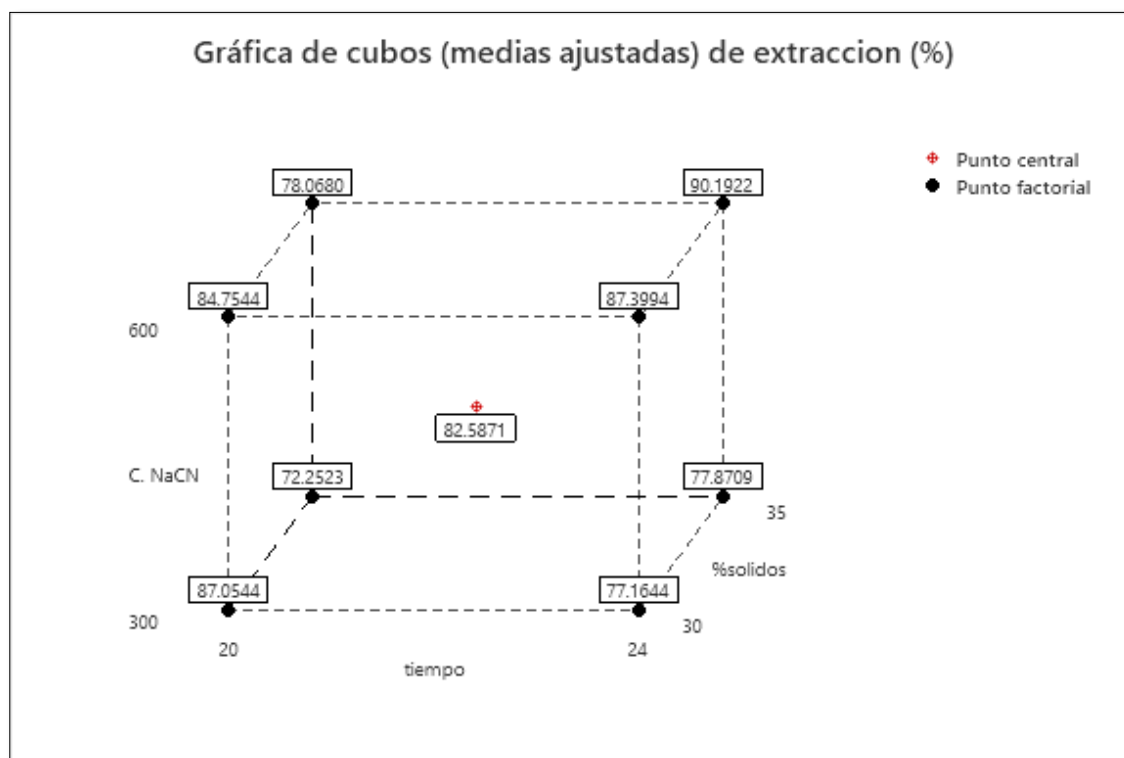


Nota: Software estadístico Minitab 2022

La gráfica de interacción revela que la concentración de NaCN es el factor más influyente en la eficiencia de extracción de oro, mejorando significativamente cuando se combina con un tiempo de cianuración mayor o un porcentaje (%) de sólidos más bajo. Sin embargo, un aumento en el tiempo o en el porcentaje (%) de sólidos, especialmente cuando ambos factores son elevados, puede disminuir la eficiencia de extracción. Por lo tanto, se sugiere priorizar una alta concentración de NaCN mientras se controla cuidadosamente el tiempo y el porcentaje (%) de sólidos para optimizar el proceso.

Figura 30

Grafica de cubos (medidas ajustadas) de extracción (%)



Nota: Software estadístico Minitab 2022

La gráfica de cubos muestra las medias ajustadas de extracción de oro en función de las combinaciones de tiempo, concentración de NaCN y % de sólidos. Se observa que la mayor eficiencia de extracción (90.19%) se alcanza con la combinación de 600 ppm de NaCN, 24 horas de cianuración y un 35% de sólidos. En contraste, la menor eficiencia (72.25%) se obtiene con 300 ppm de NaCN, 20 horas de cianuración y un 30% de sólidos. El punto central, con valores intermedios para todas las variables, muestra una eficiencia significativamente menor (82.59%), indicando que los extremos en concentración de NaCN y tiempo, combinados con un menor % de sólidos, son más efectivos para optimizar la extracción.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Extracción(%)

$$= 985 - 37,9 \text{ tiempo} - 0,982 C. NaCN - 26,12\% \text{ solidos} + 0,0406 \text{ tiempo} \\ * C. NaCN + 1,077 \text{ tiempo} * \% \text{solidos} + 0,0255 C. NaCN * \% \text{solidos} \\ - 0,001005 \text{ tiempo} * CNaCN * \% \text{solidos} + 0,74Pt \text{ Ctral}$$

Donde:

x_1 = Tiempo de cianuración

x_2 = Concentración de cianuro de sodio (NaCN)

x_3 = Porcentaje de solidos (%S)

Extracción (%)

$$= 985 - 37.9 \cdot x_1 - 0.982 \cdot x_2 - 26.12 \cdot x_3 + 0.0406 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1.077 \cdot x_1 \cdot x_3 \\ + 0.0255 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.001005 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.74 \cdot Pctrl$$

CAPITULO VI

6. DISCUSIÓN DE RESULTADO

6.1. Análisis de resultados mediante análisis químico.

En la tabla 18, los resultados obtenidos en el reporte de contenido de oro en la solución muestran una variabilidad en las concentraciones de oro extraído, con un rango de 6,71 mg/L a 9,15 mg/L. Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la calidad del mineral o en las condiciones del proceso. Por ejemplo, las muestras P-1 a P-4, con condiciones similares, presentan una ligera fluctuación en los valores de concentración, sugiriendo una posible influencia de la homogeneidad del mineral.

El porcentaje de extracción de oro varía entre 72,25% y 90,19%. La muestra P-8, con un porcentaje de extracción del 90,19%, indica una eficiencia alta en la extracción. Esta muestra podría haber tenido condiciones óptimas o un mineral con características favorables para la extracción. Como se ve en la tabla 30

En la tabla 34, el análisis temporal de la extracción en la prueba 8 muestra un incremento progresivo en el porcentaje de extracción con el tiempo, alcanzando un máximo de 90,19% a las 24 horas. Este comportamiento es consistente con la expectativa de que la extracción completa requiere tiempo para alcanzar el equilibrio. La tasa de extracción sugiere que el proceso es eficiente y que el tiempo de 24 horas es adecuado para maximizar la recuperación de oro.

6.2. Análisis de los resultados mediante diseño factorial

En la tabla 36, el análisis factorial muestra que el modelo en su conjunto es significativo con un valor F de 118,97 ($p < 0,001$), indicando que los factores considerados tienen un impacto considerable en la respuesta. La concentración de NaCN es el único factor principal que tiene

un efecto estadísticamente significativo con un valor p de 0,042, sugiriendo que es un factor clave para considerar en el proceso.

La interacción entre el tiempo y el porcentaje de sólidos también muestra significancia ($p = 0,045$), lo que indica que estos dos factores interactúan de manera significativa y deben ser considerados conjuntamente para optimizar el proceso. Sin embargo, la interacción entre la concentración de NaCN y el porcentaje de sólidos, así como la interacción triple, no muestran significancia, sugiriendo que estos efectos combinados pueden no ser relevantes en el rango de condiciones estudiadas.

La falta de significancia en el tiempo y en el punto central sugiere que estos factores no tienen un efecto directo en la respuesta medida bajo las condiciones actuales. En experimentos futuros, se recomienda enfocar los esfuerzos en optimizar la concentración de NaCN y explorar más a fondo la interacción entre el tiempo y el porcentaje de sólidos.

En la figura 26, el diagrama de Pareto de efectos estandarizados muestra que el factor B (NaCN) y la interacción AC (% sólidos y tiempo) son los únicos efectos que superan el umbral crítico de 4.303, lo que los identifica como significativos en el proceso de extracción. Esto confirma que la concentración de NaCN y la interacción entre el % de sólidos y el tiempo son los factores más influyentes en la extracción. Los demás efectos, incluyendo las interacciones AB y BC, así como los factores individuales A (tiempo) y C (% sólidos), no superan el umbral de significancia y, por lo tanto, no tienen un impacto considerable en el rendimiento de la extracción cuando se consideran de manera aislada. La optimización debe centrarse en los efectos significativos para mejorar el proceso.

En la figura 27, los resultados del análisis factorial muestran que los factores significativos que influyen en la extracción (%) son el factor B (NaCN) y la interacción AC (% sólidos y tiempo), indicando que tanto la concentración de NaCN como la combinación del

tiempo y el % de sólidos tienen un impacto importante en el proceso. Los factores A (tiempo) y C (% sólidos), por sí solos, no resultaron significativos, lo que sugiere que no afectan considerablemente la extracción cuando se consideran individualmente. Se recomienda optimizar estos factores significativos para mejorar la eficiencia del proceso.

En la tabla 37, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) revelan que el modelo en general es significativo con un valor F de 9.29 y un valor p de 0.101, lo que indica una tendencia a explicar la variación en la extracción, aunque no sea completamente concluyente con el nivel de significancia usual de 0.05. Entre los factores individuales, el NaCN (factor B) tiene un impacto significativo con un valor p de 0.042, confirmando su fuerte influencia en el proceso de extracción. El % de sólidos y el tiempo no son significativos individualmente ($p = 0.082$ y $p = 0.197$, respectivamente), pero su interacción (AC) es significativa ($p = 0.045$), lo que destaca que estos factores influyen cuando actúan juntos. Además, la interacción entre el tiempo y el NaCN (AB) tiene una significancia marginal ($p = 0.074$), sugiriendo un posible impacto que merece mayor estudio. Las interacciones de tres términos y la curvatura no muestran efectos significativos, con valores p altos (0.388 y 0.630, respectivamente). Por lo tanto, se concluye que la concentración de NaCN y la interacción entre % de sólidos y tiempo son los factores más críticos en la extracción, y deben ser optimizados para mejorar el rendimiento del proceso.

CONCLUSIONES

- La hipótesis de este estudio planteado fue, que mediante el proceso de cianuración por agitación permitiría alcanzar una extracción de oro superior al 90% de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac. A lo cual se hace un estudio de las variables determinando que, la interacción de estas no permitirá extracción mayor al 90%, logrando solo obtener una extracción de oro 90.19% valor que no es superior al planteado, por tanto, se niega esta hipótesis general.
- Se acepta que el tiempo de cianuración debe ser el máximo valor para obtener un mayor porcentaje de extracción de Oro, durante la experimentación de este trabajo de tesis, el valor del tiempo es de 24 horas.
- Se concluye que la concentración de 600 ppm de NaCN mostró un impacto significativo en la eficiencia del proceso de extracción. Por tanto, se debe mantener la mayor concentración de cianuro de sodio (NaCN).
- El porcentaje de sólido en la pulpa influye negativamente en la extracción si subimos su valor. Por tanto, se tiene una aceptación parcial del 35% de sólidos en la pulpa para maximizar la extracción de Oro.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener la concentración de cianuro de sodio (NaCN) su máximo valor, ya que este valor ha mostrado ser el más significativo para maximizar la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación. Realizar pruebas adicionales dentro de este rango para confirmar si una pequeña variación podría optimizar aún más la extracción.
- Recomienda optimizar la interacción entre el tiempo de cianuración y el porcentaje de sólidos. También se recomienda realizar experimentos para determinar el mejor equilibrio entre estos factores, ya que su interacción es significativa para mejorar la eficiencia de extracción.
- Se recomienda realizar un análisis más detallado del grado de liberación y homogeneidad del mineral, ya que influye en la variabilidad de la extracción y asegurar que las muestras sean representativas y homogéneas para obtener resultados más consistentes y fiables.
- Se recomienda realizar un análisis químico de las características mineralógicas y poder evaluar su influencia durante el proceso de cianuración por agitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS:

- Avila Acosta, R. B. (1997). *Introducción a la metodología de la investigación*. Universidad Nacional de San Marcos.
- Box, G. E., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. (2005). *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. (2nd ed.). Wiley.
- Davidson, J. A. (2001). *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*. . Elsevier.
- Fisher, R. A. (1935). *The Design of Experiments*. Oliver and Boyd.
- Gutiérrez, P. H. (2008). *Diseño de Experimentos*.
- Habashi, F. (1999). *Principios de la metalurgia extractiva*. Prensa CRC.
- Hedley, J. D., & Tabachnick, M. A. (1968). *The Treatment of Gold-Silver Ores*. Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- Heinen, J., & Verloo., M. (1999). *Introduction to the Principles of Extraction and Processing*. Elsevier.
- Johnson, L., & Smith, J. (2019). *Procesos de extracción de oro: cianuración y más allá*. Mining Press.
- La Brooy, S., McNab, H., & Parker, H. S. (1994). *Gold Extraction Technology*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Miranda Zanardi, L. F., & Medina de Miranda, E. (2015). *Investigando en ingeniería* (segunda ed.). Universidad Nacional San Agustín.
- Misari, F. S. (2010). *Metalurgia del Oro*. San Marcos
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. (9th ed.). Wiley.

- Hadi Mohamed, M. M., Martel Carranza, C. P., Huayta Meza, F. T., Rojas León, C. R., & Arias Gonzales, J. L. (2023). Metodología de la investigación. Instituto Universitario de Innovación de Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.
- Pecho Gutiérrez, V. (1981). *GEOLOGÍA DE LOS CUADRÁNGULOS DE Chalhuanca, ANTABAMBA Y SANTO TOMAS*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Ros Moreno, A. (2017). Metalurgia del Oro .
https://doi.org/https://issuu.com/antonioros/docs/metalurgia_del_oro_au
- Schlesinger, M., King, M., & Sole, K. (2011). Extractive Metallurgy of Copper, Nickel, and Cobalt. Elsevier.
- Sampieri, R. H. (2014). Metodología de la investigación (SEXTA ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES.
- TECSUP. (2023). Hidrometalurgia del Oro.
- Uceda, D. A. (2016). HIDROMETALURGIA - QUÍMICA E INGENIERÍA. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- Yannopoulos, J. C. (1991). The extractive metallurgy

TESIS DE GRADO:

- Holguin, A. (2023). *Optimización del porceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Valetita IV de la compañía minera Tunkyro SAC*.
- Merizalde, J., & Vicanco, B. (2020). *Recuperación de oro en la lixiviación alcalina por agitación utilizando goldmax como agente alternativo al cianuro de sodio*. Machala :
Universidad Técnica de Machala.
<https://doi.org/http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15660>
- Morales, D. (2018). *Evaluación del proceso de cianuración por agitación de minerales de oro y plata de la zona minera de malco en el distrito de Puyo – Ayacucho*.

- Quispe Pampa, Á. (2024). *Estudio Geológico y Estimación de Recursos del Proyecto Ayahuay-Amtabamba-Apurimac*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Romero, J. (2020). *Extracción de oro mediante el proceso de lixiviación con reactivos Sandios del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco-Chunvivilcas, Region Cusco*.
- Srithammavut, W. (2008). *Modeling of gold cyanidation. Master of Science*. . Lappeenranta University of Technology.

ARTICULO:

- Ling, P. (1996). *An Improved Rate Equation for Cyanidation of a Gold Ore*. Canadian Metallurgical Quarterly.
- Prasad, S., Mensah-Biney, R., & Pizarro, R. (1991). *Tendencias modernas en el procesamiento del oro*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90171-Q](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90171-Q)

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>Problema General: ¿Se podrá extraer oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac?</p>	<p>Objetivo general: Extraer oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac.</p>	<p>Hipótesis genera: El proceso de cianuración por agitación permite alcanzar una extracción de oro superior al 90% de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.</p>	<p>Variables dependientes: Extracción de Oro</p>	<p>Tipo de investigación: Experimental</p> <p>Nivel de investigación</p> <p>Nivel de investigación: Descriptivo y Explicativo</p>
<p>Problemas específicos</p>	<p>Objetivos específicos</p>	<p>Hipótesis específicas</p>	<p>Variables independientes</p>	<p>Población y muestra: Reservas de minerales auríferos del yacimiento de Ayahuay.</p> <p>Tamaño de muestra: 25 kg de mineral (11 muestras)</p> <p>Técnicas: Pruebas a nivel de laboratorio, software MINITAB, reporte de análisis químico</p> <p>Equipos: Molino de Bolas, Balanza Analítica, Reactores de Agitación.</p> <p>Reactivos: Nitrato de Plata, Cal, Cianuro de Sodio</p>
<p>¿Qué tiempo de cianuración se requiere para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac?</p>	<p>Determinar el tiempo óptimo de cianuración necesario para maximizar la extracción de oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac.</p>	<p>La extracción de oro incrementa conforme aumenta el tiempo de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.</p>	<p>Tiempo de cianuración</p>	
<p>¿Qué concentración de cianuro de sodio (NaCN) se requiere para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac?</p>	<p>Identificar la concentración óptima de cianuro de sodio (NaCN) para el proceso de cianuración por agitación que permita una extracción eficiente del oro de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac.</p>	<p>La concentración óptima de cianuro de sodio (NaCN), para maximizar la extracción de oro es de 600 ppm de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.</p>	<p>Concentración de Cianuro de Sodio (NaCN) en la solución</p>	
<p>¿Cuánto será el porcentaje de sólidos en la pulpa para extraer Oro en el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac?</p>	<p>Determinar el porcentaje de sólidos en la pulpa que permita una extracción óptima de oro mediante el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, provincia Antabamba–Región Apurímac.</p>	<p>La cantidad óptima de porcentaje de sólidos en la pulpa para una extracción eficiente de Oro es 35% de los minerales auríferos del yacimiento Ayahuay, Antabamba, Apurímac.</p>	<p>Porcentaje de sólidos en la pulpa</p>	

APÉNDICE 1

7. CUADROS DE PARÁMETROS OPERATIVOS

Balance de Pulpa para las Pruebas P1, P2, P3, P4

Vol. de Reactor	1100 ml
Vol. de reactor 80%	880 ml
G.E.	2,735

	100 pulpa		880 pulpa	
	PESO (g)	VOLUMEN (cc)	PESO (g)	VOLUMEN (cc)
Mineral	30,00	10,97	326,05	119,22
Agua	70,00	70,00	760,78	760,78
Pulpa	100,00	80,97	1086,82	880,00

Balance de Pulpa para las Pruebas P5, P6, P7, P8

Vol de Reactor	1100 ml
Vol. de reactor 80%	880 ml
G.E.	2,735

	100 pulpa		880 pulpa	
	PESO (g)	VOLUMEN (cc)	PESO (g)	VOLUMEN (cc)
Mineral	35,00	12,80	371,99	136,02
Agua	65,00	70,00	743,98	743,98
Pulpa	100,00	82,80	1115,97	880,00

Balance de Pulpa para las Pruebas P9, P10, P11

Vol. de Reactor	1100 ml
Vol. de reactor 80%	880 ml
G.E.	2,735

	100 pulpa		880 pulpa	
	PESO (g)	VOLUMEN (cc)	PESO (g)	VOLUMEN (cc)
Mineral	32,50	11,88	349,27	127,72
Agua	65,00	70,00	752,28	752,28
Pulpa	100,00	81,88	1101,56	880,00

Tabla de control de proceso de cianuración

Prueba 1

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	760,78	0,03	0,10	0,22	5,22	11
2	760,78	0,03	0,35	0,11	5,22	11
4	760,78	0,03	0,55	0,02	5,22	11
8	760,78	0,03	0,65	-0,02	5,22	11
16	760,78	0,03	1,10	-0,22	5,22	11
20	760,78	0,03			5,22	11

Prueba 2

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	760,78	0,03	0,05	0,24	5,22	11
2	760,78	0,03	0,50	0,04	5,22	11
4	760,78	0,03	0,55	0,02	5,22	11
8	760,78	0,03	0,70	-0,04	5,22	11
16	760,78	0,03	0,60	0,00	5,22	11
24	760,78	0,03			5,22	11

Prueba 3

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	760,78	0,06	0,30	0,17	5,22	11
2	760,78	0,06	0,25	0,01	5,22	11
4	760,78	0,06	0,55	0,22	5,22	11
8	760,78	0,06	0,55	0,19	5,22	11
16	760,78	0,06	1,40	-0,08	5,22	11
20	760,78	0,06			5,22	11

Prueba 4

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	760,78	0,06	0,20	0,44	5,22	11
2	760,78	0,06	1,05	0,06	5,22	11
4	760,78	0,06	0,85	0,06	5,22	11
8	760,78	0,06	0,75	0,11	5,22	11
16	760,78	0,06	1,40	-0,08	5,22	11
24	760,78	0,06			5,22	11

Prueba 5

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	743,98	0,03	0,05	0,24	5,95	11
2	743,98	0,03	0,35	0,01	5,95	11
4	743,98	0,03	0,45	0,06	5,95	11
8	743,98	0,03	0,65	-0,02	5,95	11
16	743,98	0,03	0,65	-0,02	5,95	11
20	743,98	0,03			5,95	11

Prueba 6

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	743,98	0,03	0,15	1,98	5,95	11
2	743,98	0,03	0,35	0,11	5,95	11
4	743,98	0,03	0,55	0,02	5,95	11
8	743,98	0,03	0,60	0,00	5,95	11
16	743,98	0,03	0,75	-0,06	5,95	11
24	743,98	0,03			5,95	11

Prueba 7

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	743,98	0,06	0,10	0,39	5,95	11
2	743,98	0,06	0,35	0,28	5,95	11
4	743,98	0,06	0,90	0,04	5,95	11
8	743,98	0,06	1,00	0,00	5,95	11
16	743,98	0,06	1,20	-0,08	5,95	11
20	743,98	0,06			5,95	11

Prueba 8

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	743,98	0,06	0,75	0,19	5,95	11
2	743,98	0,06	1,05	0,06	5,95	11
4	743,98	0,06	1,10	0,04	5,95	11
8	743,98	0,06	1,00	0,08	5,95	11
16	743,98	0,06	1,25	-0,02	5,95	11
24	743,98	0,06			5,95	11

Prueba 9

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	752,28	0,045	0,05	0,41	5,59	11
2	752,28	0,045	0,50	0,22	5,59	11
4	752,28	0,045	0,60	0,17	5,59	11
8	752,28	0,045	0,80	0,08	5,59	11
16	752,28	0,045	1,00	0,00	5,59	11
20	752,28	0,045			5,59	11

Prueba 10

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	752,28	0,045	0,10	0,22	5,59	11
2	752,28	0,045	0,45	0,06	5,59	11
4	752,28	0,045	0,30	0,13	5,59	11
8	752,28	0,045	0,55	0,02	5,59	11
16	752,28	0,045	0,60	0,00	5,59	11
20	752,28	0,045			5,59	11

Prueba 11

Tiempo (H)	Vol. Reactor (ml)	Conc. Cianuro	Gasto Titulante (AgNO3) ml	Cianuro que reponer	Cal inicial (g)	pH
1	752,28	0,045	0,15	0,37	5,59	11
2	752,28	0,045	0,60	0,17	5,59	11
4	752,28	0,045	0,65	0,15	5,59	11
8	752,28	0,045	0,80	0,08	5,59	11
16	752,28	0,045	1,10	-0,04	5,59	11
20	752,28	0,045			5,59	11

APÉNDICE 2

8. FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO EXPERIMENTAL

Foto 1. Muestreo de mineral en veta del yacimiento-Ayahuay





Foto 2: Caracterización del mineral



Foto 3. Preparación mecánica de mineral-conminución de mineral-reducción de tamaño



Foto 4: Molienda de mineral en molino de bolas a 19.90 min



Foto 5. Homogenización de mineral aurífero



Foto 6. Muestreo de mineral por método de incrementos



Foto 7. Mineral muestreado para las 11 pruebas



Foto 8. Determinación de Gravedad Especifica del mineral



Foto 9. Determinación del pH de Mineral inicial



Foto 10. Agitación de mineral en botellas



Foto 11. Toma de muestra de PLS y filtrado para la titulación y determinación de gasto de cianuro y evaluación del Ph de pulpa.



Foto 12. Titulación de muestras de PLS para determinar el gasto de cianuro



Foto 13. Secado de ripio de las muestras.



ANEXO 1

9. REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO



RoLAB
LABORATORIO



RUC: 20608492179

CERTIFICADO DE ANÁLISIS

CLIENTE : NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN

SOLICITUD DE ANÁLISIS : Newmont Au

RECEPCIÓN DE MUESTRAS

DESCRIPCIÓN : ROCA

CODIGO DE CLIENTE : 1012 V.Z

CODIGO DE LABORATORIO : 0923-3

MUESTRA ENVASADA EN : BOLSA DE PLÁSTICO

PESO DE LA MUESTRA : 2.80 Kg Aprox

FECHA DE RECEPCIÓN : 19/07/2024

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 19/07/2024

CODIGO DE LAB	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS			
		Ley Au +150 Oz/Tc (GRUESO)	Ley Au -150 Oz/Tc (FINO)	LEY FINAL Au Oz/Tc	LEY FINAL Au g/TM
0923-3	1012 V.Z	61,902	21,804	0,5918	20,290

MÉTODO
Fire Assay

Nota:
Los resultados presentados solo corresponden a la muestra indicada.



Lilian Chavarrán Vásquez
Ingeniera Metalurgista
Reg. CIP. N° 316499

OFICINAS:

- Calle Panamericana Sur 140, Nasca 11401 - Vista Alegre - Nasca - Ica
- Panamericana Sur N° km Intr 453 - Vista Alegre - Nasca - Ica

 **934 779 532**  **rolablaboratorio30@gmail.com**



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 38528001

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00366

Fecha de emisión: 2/08/2024

Página 1 de 1

Señores: NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN
Dirección: CUSCO
Atención: EDITH ESLACHIN QUISPÉ
Recepción: 1/08/2024
Realización: 1/08/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901
				Au mg/L
SS24001502	Prueba 1	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,57
SS24001503	Prueba 2	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	6,71
SS24001504	Prueba 3	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,37
SS24001505	Prueba 4	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,60
SS24001506	Prueba 5	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,33
SS24001507	Prueba 6	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,90
SS24001508	Prueba 7	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,92
SS24001509	Prueba 8	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	9,15
SS24001510	Prueba 9	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,82
SS24001511	Prueba 10	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,58
SS24001512	Prueba 11	Ayahuay - Antabamba - Apurímac	Solución de cianuro	7,94

Fin del informe

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE, 2/08/2024 08:43:35

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú (0541443294 - 0541444582)



Validar el informe
Vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : A1BC6996

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00382

Fecha de emisión: 20/08/2024

Página 1 de 1

Señores: NORA VILLARDA COTRINA GUILLEN
Dirección: CUSCO
Atención: EDITH ESLACHIN QUISPE
Recepción: 20/08/2024
Realización: 20/08/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	'901
				Au mg/L
SS24001576	P8-1 h	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2,98
SS24001577	P8-4 h	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,56
SS24001578	P8-8 h	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6,76
SS24001579	P8-16 h	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8,85

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE, 20/08/2024 17:17:34

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el Informe
vía web

ANEXO 2

10. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE MINERALES

Muestra: Mineral de Ayahuay

Ubicación: Distrito del Oro, Provincia de Antabamba, Región Apurímac

Fecha: 09/07/2024

Analista: Ing. Elías Macrobio Espinoza Cardenas

El presente informe tiene como objetivo la caracterización del mineral de Ayahuay, proveniente del distrito del Oro en la provincia de Antabamba, región Apurímac. Se realizó un análisis detallado para determinar las propiedades mineralógicas y la composición química de la muestra.

El porcentaje (%) de minerales existentes en la muestra.

Mineral valor económico	Porcentaje
Pirita 20%	20%
Calcita 5%	5%
Cuarzo 6%	6%
Malaquita	Trazas
Jarosita	
Gothita	
Hematita	
Limonita propiamente dicha	
Ferromagnesianos 25%	25%
Plagioclasas y feldespatos (argelización)	35%

La caracterización del mineral de Ayahuay revela una diversidad de procesos de alteración mineral, destacando la oxidación de la pirita y las transformaciones en las plagioclasas. La presencia de minerales como la jarosita y la goethita sugiere un entorno de oxidación significativo, lo cual es relevante para futuras evaluaciones económicas y geológicas de la muestra. Los porcentajes y la distribución de los minerales indican un potencial económico que debe ser considerado en estudios posteriores.


Elías Macrobio Espinoza Cardenas
Ingeniero

Ing. Elías Macrobio Espinoza Cardenas



Fotografía N° 001. Aumento (1920x1080) Alteración de las plagioclasas de color blanquecino que son los más saltantes, en medio de los ferromagnesianos que muestra un color gris plomo mate. Con presencia de limonitas, de tipo jarosita y goethita.



Fotografía N° 002. Aumento (1920x1080) Alteración de plagioclasas en proceso de formación a una argelización, la pirita como producto de un hidrólisis se encuentra oxidando a un sulfato de color gris plomo mate, como se observa. Calcita de forma esporádica.

E. Prado
 E. Prado
 E. Prado
 E. Prado



Fotografía N° 003. Aumento (1920x1080) La alteración de la pirita a goethita y un pequeño % de hematita y fuerte presencia de sulfato de magnesio y cloruros de hierro de color gris oscuro a mate. La presencia de plagioclasa se observa en menor %. Presencia de cuarzo en un tipo de descomposición (alteración).



Fotografía N° 004. Aumento (1920x1080) Una mezcla de alteraciones de ferromagnesianos y plagioclasas. La presencia de pirita en su estado de oxidación de color amarillo mate a café (jarosita, goethita y la limonita propiamente dicha). Presencia esporádica de calcita

España
 Elias Macrobio Espinosa Cárdenas
 INGENIERO GEÓLOGO
 CP N° 10284



Fotografía N° 005. Aumento (1920x1080) Clara oxidación de plagioclasa, para convertirse en óxido de hierro como se observa la coloración café, en medio de la alteración argílica y presencia esporádica de ferromagnesianos de color gris mate y calcita de color blanquesino.



Fotografía N° 006. Aumento (1920x1080) Clara observación de la pirita en un estado de oxidación como se observa, en medio de la alteración argílica, presencia de cuarzo de tipo blanquesino y trazas de malaquita.

Espinoza
 Elías Macrobio Espinoza Cárdenas
 Ingeniero Geólogo
 C.R. 102677




Fotografía N° 007. Aumento (1920x1080) Alteración visible de una plagioclasa en medio de ferromagnesianos alterados y pobre presencia de la hematita y jarosita. Con esporádica traza de melanterita



En % de minerales existentes en la muestra.

Mineral valor económico	Porcentaje
Pirita	20%
Calcita	5%
Cuarzo	6%
Malaquita	Trazas
Jarosita	
Gothita	
Hematita	
Limonita propiamente dicha	
Ferromagnesianos	25%
Plagioclasas y feldespatos (argelización)	35%

Prado
 Del Macrobloque Cuadrado C-1000
 2010-2011

ANEXO 3

a	Hoja de Datos de Seguridad de Materiales (MSDS)	
---	--	---

Cianuro de Sodio		
-----------------------------	--	---

Sección I : Información del Producto Químico y de la Compañía	
Nombre del Material	Cianuro de Sodio.
Fórmula Química	NaCN
Número CAS	143-33-9
Código UN	1689
Guía de Respuesta	157
Clasif. Mat. Pelig.	6.1
Código Hazchem	2X
Sinónimos	Sal de Sodio, Cianuro blanco.
Uso	Pilas de Lixiviación.
Manufacturero	TICOR CHEMICAL COMPANY PTY LTD. P.O. Box 1305, Gladstone. Queensland, 4680. Teléfono (07) 4976-1777.
Usuario	Emergencias (07) 4973-6660 las 24 horas. MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A Emergencias (51-1) 217-0180.

Sección II : Composición / Información de Componentes			
Ingredientes	Proporción	Número CAS	
Cianuro de Sodio	98 %	143-33-9	
HCOONa	1 %		
H2O	0,3 %		
Na2CO3	0,6 %		
NaOH	0,1 %	1310-73-2	
	PEL de OSHA : 5 mg/m3		
	TLV de ACGIH : C 5 mg/m3		

Sección III : Identificación de Riesgos	
Entradas Principales	Inhalación, absorción, Ingestión, contacto.
Inhalación	El polvo o neblina (solución) puede ser irritante a las vías respiratorias y garganta. En NaCN reacciona con la humedad liberando gas cianhídrico.
Ojos	El cianuro en forma de polvo o como gas de cianhídrico, es rápidamente absorbido por los ojos y puede ser las vía de severas irritaciones e intoxicación. Debido al contenido de hidróxido de sodio puede causar daños a los tejidos severos y dolorosos.
Piel	Es un tóxico por absorción de la piel. El contacto prolongado o repetido puede causar escozor, caracterizado por erupciones musculares, papilares y vesiculares. A través de la piel se puede absorber cantidades fatales de cianuro de sodio
Ingestión	El cianuro inhibe la oxidación tisular provocando la muerte por asfixia química en minutos.
Carcinogenicidad	No figura como cancerígeno.

Sección IV : Medidas de Primeros Auxilios	
Inhalación	Remover a la víctima al aire fresco. Si hay dificultad al respirar y los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno y nitrato de amilo y no inducir al vómito. Contactar un médico inmediatamente.
Contacto con los ojos	En caso de contacto lavar arriba y abajo de los párpados por 15 minutos. Llamar al médico.
Contacto con la piel	En caso de contacto lavar la zona afectada inmediatamente con abundante agua. Retirar la ropa contaminada. Si los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno. Llamar al médico.
Ingestión	Si respira y esta consciente, lavar la boca con agua. Si esta inconsciente no darle de beber nada. Dar carbón activado (Carbosorb) y buscar ayuda médica inmediatamente.
Facilidades para primeros auxilios	Donde esté presente el cianuro asegúrese que las instalaciones deben contar con ducha y lavajojos disponibles.

Sección V : Medidas para la extinción de incendios	
Medios de Extinción	Usar polvo químico seco para fuegos. No usar extintores de dióxido de carbono (CO ₂) ya que pueden liberar HCN. No utilice agua a menos que los contenedores se encuentren intactos.
Riesgos Especiales	No es combustible y sus límites de inflamabilidad son bajos.

Sección VI : Medidas para derrames accidentes	
Procedimientos de Recojo y Limpieza	Barra y recoja con pala y deposite en un recipiente cerrado o una bolsa plástica para detener el derrame mientras se transporta. Etiquete los contenedores. Cubra y mantenga seco el derramamiento.
Derrames Pequeños (soluciones)	Utilice material absorbente adecuado que no reaccione con el material derramado tales como arena. No utilice aserrín en ningún caso (ácido). Recoja el material derramado y etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante.
Derrames Pequeños (sólidos)	Recupere todo lo que es posible con lampas o escobas, etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante. Cuidado : El hipoclorito de sodio es un agente contaminante del medio ambiente. Use solo donde existen fugas y es improbable causar problemas.
Derrames Grandes	Contacte al servicio de emergencia y proveedor inmediatamente. Contener utilizando sacos de arena o tierra, recuperar el material si es seguro hacerlo. No trate de neutralizar sin asistencia.

Sección VII : Manejo y Almacenamiento	
Almacenamiento	Almacenar en lugares frescos y secos. Las áreas deben contar con buena ventilación y fuera de contacto directo con los rayos solares. Evitar su almacenamiento cerca de materiales incompatibles como productos oxidantes, ácidos, agua y productos que contienen agua.
Manipulación	El cianuro en lo posible debe ser almacenado solo. Utilice siempre su equipo de protección personal.

Sección VIII : Controles de Exposición / Protección Personal	
Protección Respiratoria	Los niveles de exposición deben ser mantenidos bajo los límites. Hacer uso de respiradores canister para NaCN en polvo y con niveles bajos de HCN. En todo caso usar respiradores aprobados por NIOSH si fuera posible con suministro de aire en concentraciones altas.
Equipo de Protección	Usar ropa de seguridad, guantes largos de jebes y lentes o antiparras para una protección total.
Ventilación	Tener una ventilación forzada en las áreas de exposición, para mantener los niveles de exposición por debajo de los límites permisibles.

Sección IX : Propiedades Físicas y Químicas	
Estado físico	Sólido en briquetas
Peso	15 gr
Dimensiones	31 mm x 30 mm x 11 mm
Color	Blanco
Olor	Ligero olor a amoniaco o almendras amargas
Punto de Fusión	562 °C (1043 °F).
Punto de Ebullición	1497 °C (2726 °F).
Solubilidad	480 gr/lt de solución a 20 °C
Gravedad Específica	1.61
Presión de Vapor	0.10 Kpa (800 °C)
Otros	PH : 11-12

Sección X : Estabilidad y Reactividad	
Estabilidad	Estable en condiciones normales.
Incompatibilidad	Ocurre reacciones químicas cuando entran en contacto con ácidos fuertes o bases fuertes. El cianuro de sodio es altamente corrosivo a muchos metales. Reacciona violentamente con agentes oxidantes que liberarán gases tóxicos.
Prod descomposición Peligrosos	Puede formar gases tóxicos como HCN y óxidos de nitrógeno.

Sección XI : Información Toxicológica	
Toxicidad	Los efectos sobre la salud humana debidos a una exposición excesiva por inhalación, ingestión o contacto con la piel o los ojos pueden incluir irritación de la piel con malestar o erupciones, irritación de los ojos o quemadura con malestar, lagrimeo, visión borrosa y la posibilidad de daño permanente a los ojos. No figura como cancerígeno. Los individuos con enfermedades ya existentes del sistema nervioso central pueden ser más susceptibles a la toxicidad de exposiciones excesivas.

Sección XII : Información Ecológica	
Ecotoxicidad	El cianuro es un producto tóxico. Todo manejo debe regirse por las leyes locales.