

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCION DE ORO UTILIZANDO EL PEROXIDO
DE HIDROGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE
MINERALES AURIFEROS COMPLEJOS DE LA COMPAÑÍA MINERA
TUNKYRO S.A.C. PULLO-AYACUCHO**

PRESENTADO POR:

Br. JOSE GABRIEL CCOLLANA QUISPE

Br. ANTHONI TOMASHINI CUELLAR CANDIA

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

ASESOR:

Ing. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

CUSCO - PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

El que suscribe el asesor: Ing. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA del trabajo de investigación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ORO UTILIZANDO EL PEROXIDO DE HIDROGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE MINERALES AURIFEROS COMPLEJOS DE LA COMPAÑÍA MINERA TUNKYRO S.A.C. PULLO-AYACUCHO.**

Presentado por los bachilleres **CUELLAR CANDIA, Anthoni Tomashini** con DNI N° **71559067** y **CCOLLANA QUISPE, Jose Gabriel** con DNI N° **77488790** para optar al Título Profesional / Grado Académico de **INGENIERO METALÚRGICO.**

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por **2 veces**, mediante el software antiplagio conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de: **cinco %.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros

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.	
Mayores 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, 12 de agosto del 2024



Firma

Post firma... *Eduardo Marcelo Quispe Nina* ..

Nro. De DNI... *2.39.57.149* ..

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: **27259:371828530**

NOMBRE DEL TRABAJO

OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ORO UTILIZANDO EL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN

AUTOR

CCOLLANA QUISPE, José Gabriel CUELLAR CANDIA, Anthoni Tomashini

RECUENTO DE PALABRAS

28925 Words

RECUENTO DE CARACTERES

152562 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

156 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

5.7MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 6, 2024 9:24 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 6, 2024 9:26 PM GMT-5

● 5% de similitud general

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

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

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

PRESENTACIÓN

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

Señores miembros del Jurado:

Dando cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica para optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la tesis intitulada:

OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ORO UTILIZANDO EL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS COMPLEJOS DE LA COMPAÑÍA MINERA TUNKYRO S.A.C. PULLO-AYACUCHO

El propósito de la tesis es mejorar la extracción de oro de los minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C. en Pullo-Ayacucho mediante el uso de peróxido de hidrógeno durante el proceso de cianuración por agitación. De esta manera, podemos ofrecer una alternativa para mejorar la extracción de oro en el tratamiento de minerales auríferos complejos que tienen bajas extracciones de oro mediante la cianuración convencional.

-Br. COLLANA QUISPE, Jose Gabriel

-Br. CUELLAR CANDIA, Anthoni Tomashini

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Expreso mi gratitud a Dios y a la Virgen Candelaria por concederme sus bendiciones y otorgarme la felicidad al tener a mi lado a una maravillosa familia.

En especial, dedico esta tesis a mi madre Ernestina Quispe, una de las personas más importante en mi vida, quien, con sus fortalezas y resiliencia en la vida, supo educarme y formarme con buenos principios y valores. Me siento orgulloso de ser tu hijo.

A mi padre Nilo Ccollana, un gran amigo, quien, a pesar a las circunstancias, él siempre está allí, para aconsejarme y motivarme para que mis sueños se puedan cumplir.

A mi Hermano Wilder, quien desde el cielo me cuida y guía. A mis hermanos Nélide y Edwin quienes me brindaron el apoyo incondicional para poder culminar una meta más en mi vida.

CCOLLANA QUISPE, Jose Gabriel

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Con el debido respeto, dedico esta tesis a la memoria de mi tía Eliana, así como a mi madre Marleni Candia y a mi abuela Magda Segura. Su apoyo y orientación han sido cruciales para mi trayectoria académica. Ofrezco este trabajo como muestra de gratitud por su inquebrantable paciencia y amor.

A mi padre Gregorio Cuellar y hermanos Eddy Cuellar y Jeyder Cuellar por ser fuente inagotable de estímulo y superación

A mis tíos Uver Candia y Wilmar Candia por su ayuda y enseñanza a través de mi vida.

CUELLAR CANDIA, Anthoni Tomashini

AGRADECIMIENTOS

Al todo poderoso por brindarnos vida, salud y fuerza; que han permitido que este proyecto se lleve a cabo. A la familia, por todo el apoyo incondicional que nos han brindado. A nuestra representativa, majestuosa y tricentenaria casa de estudios Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a nuestra querida Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

De igual manera nuestros agradecimientos al Ing. Eduardo M. Quispe Nina, nuestro mentor y asesor; por el apoyo brindado en nuestra investigación y fortalecimiento de nuestros conocimientos de manera analítica y experimental. A toda la plana de docentes ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica quienes nos han compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de nuestra vida universitaria.

Seguidamente, también nuestros agradecimientos a todos nuestros compañeros que durante e incluso después de egresar nos brindaron sus consejos para poder culminar con nuestros proyectos.

Los tesisistas.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
SIMBOLOGÍA.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	xxi

CAPÍTULO I

Planteamiento del Problema.....	1
1.1. Situación Problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema.....	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3. Objetivos de la Investigación.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	2
1.4. Justificación de la Investigación.....	3
1.4.1. Conveniencia.....	3
1.4.2. Relevancia Tecnológica.....	3
1.4.3. Justificación Económica.....	3
1.4.4. Relevancia Social.....	4
1.4.5. Valor Teórico.....	4
1.4.6. Utilidad Metodológica.....	4
1.5. Importancia de la Investigación.....	4
1.6. Delimitaciones Espacial y Temporal.....	5

CAPÍTULO II

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.....	10
2.2. Bases Teóricas	11
2.2.1. Minerales Auríferos.....	11
2.2.2. Clasificación de Minerales de Oro	12
2.2.2.1. Minerales Complejos.....	14
2.2.2.2. Refractariedad de Minerales Auríferos	14
2.2.3. Proceso de Lixiviación	16
2.2.4. Técnicas de Lixiviación	17
2.2.4.1. Lixiviación por Agitación	17
2.2.4.2. Lixiviación en Pila o Montón.....	18
2.2.4.3. Lixiviación Intensiva.....	19
2.2.4.4. Lixiviación en bateas.....	20
2.2.4.1. Lixiviación in situ.....	20
2.2.5. Efecto de las Variables de Cianuración.....	21
2.2.5.1. Efecto del Oxígeno.....	21
2.2.5.1. Efecto de la Concentración de Cianuro.....	22
2.2.5.2. Efecto de la Alcalinidad	24
2.2.5.3. Efecto del Tiempo de Cianuración.....	26
2.2.5.4. Efecto de la temperatura.....	26
2.2.5.1. Efecto del Tamaño de partícula.....	27
2.2.6. Termodinámica de la Cianuración	27
2.2.7. Cinética de la Lixiviación	33
2.2.7.1. Proceso de Difusión	34
2.2.7.2. Geometría de la Interfase	37
2.2.8. Mecanismos de Disolución del Oro	38
2.2.9. Solubilidad del Oro en Soluciones Acuosas de Cianuro.....	40

2.2.9.1.	Teoría del Oxígeno.....	40
2.2.9.2.	Teoría de Hidrógeno.....	40
2.2.9.3.	Teoría del Peróxido de Hidrógeno	41
2.2.9.4.	Teoría de Formación de Cianógeno	41
2.2.9.5.	Teoría de la Formación de Cianatos.....	42
2.2.9.6.	Teoría de la Corrosión.....	42
2.2.9.7.	Postulado de Habashi	43
2.2.10.	Peróxido de hidrógeno	43
2.2.10.1.	Propiedades físicas	43
2.2.10.2.	Propiedades químicas.....	44
2.2.11.	Proceso de Lixiviación Asistida por Peróxido de Hidrógeno (PAL).....	45
2.2.12.	Proceso “PAL” Aplicado a Cianuración del Oro	47
2.2.12.1.	Oxígeno disuelto: parámetro importante en cianuración	48
2.2.12.2.	Proceso PAL en la Cinética de extracción del oro.....	49
2.2.12.3.	Reducción en el tiempo de retención.	50
2.2.12.4.	Prevención de pérdida de cianuro por volatilización	51
2.2.12.5.	Pasivación de sulfuros que consumen cianuro.....	52
2.2.12.6.	Métodos de Control del Contenido del Peróxido de Hidrógeno en la Solución Lixivante.	53
2.2.13.	Termodinámica de la Cianuración con Peróxido de Hidrógeno.	53
2.2.14.	Peróxido de Hidrógeno en la Disolución del Oro	55
2.2.15.	Ventajas y Desventajas.....	58

CAPÍTULO III

Hipótesis y Variables	60
3.1. Hipótesis	60
3.1.1. Hipótesis General.	60
3.1.2. Hipótesis Específicas.....	60
3.2. Variables	60
3.2.1. Variables Dependientes.....	60
3.2.2. Variables Independientes	60
3.2.3. Variables Intervinientes.....	61

3.2.4. Operacionalización de Variables.....	62
---	----

CAPÍTULO IV

Metodología de la Investigación	63
--	-----------

4.1. Ámbito del Estudio	63
4.1.1. Información de la Empresa	63
4.1.2. Mineralogía del Objeto de Estudio.....	64
4.2. Diseño de la Investigación	65
4.2.1. Tipo de Investigación	65
4.2.2. Nivel de Investigación.....	66
4.2.3. Diseño de Investigación	67
4.2.4. Enfoque de la Investigación.	68
4.3. Población y Muestra	69
4.3.1. Población.....	69
4.3.2. Muestra.....	69
4.3.3. Selección de la Muestra.....	69
4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	70
4.4.1. Técnicas.....	70
4.4.2. Instrumentos.	70
4.5. Equipos y Materiales de Laboratorio.....	70
4.5.1. Herramientas o Materiales	70
4.5.2. Equipos:.....	71
4.5.3. Reactivos Químicos:	71
4.6. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información.....	72
4.7. Validez y Confiabilidad de Instrumentos.	72

CAPÍTULO V

Desarrollo Experimental	73
--------------------------------------	-----------

5.1. Introducción.	73
5.2. Procedimientos Preliminares a las Pruebas de Lixiviación.	74
5.2.1. Preparación Mecánica y Obtención de la Muestra.....	74
5.2.2. Determinación del Tiempo de Molienda Optimo.	75
5.2.3. Determinación de la Gravedad Específica.	78

5.2.4.	Preparación de la Pulpa para Pruebas de Agitación.....	79
5.2.5.	Calculo y Preparación de Reactivos.....	80
5.3.	Prueba de Lixiviación por Agitación en Botellas.....	84
5.3.1.	Variables del Proceso de Lixiviación.....	85
5.3.2.	Componentes Iniciales para las Pruebas de Lixiviación.....	85
5.3.3.	Reposición de Reactivos.....	86
5.3.4.	Resultados de las Pruebas de Cianuración por Agitación en Botellas.....	88
5.4.	Resultados de la Caracterización Mineralógica de las Muestra.....	89
5.4.1.	Caracterización Química.....	90
5.5.	Resultados de la Extracción de Oro Según Balance Metalúrgico.....	91
5.6.	Resumen del Balance Metalúrgico de las Pruebas de Lixiviación.....	102
5.7.	Cinética de la Extracción del Oro.....	103

CAPÍTULO VI

Análisis y Discusión de Resultados.....	106	
6.1.	Diseño Factorial 2^3 con Puntos Centrales Utilizando Minitab.....	106
6.1.1.	Representación Geométrica de los Ocho Tratamientos.....	107
6.1.2.	Efecto de las Variables y sus Interacciones.....	108
6.1.3.	Análisis Estadístico de Varianza.....	109
6.1.4.	Ecuación de regresión.....	113
6.1.4.1.	Unidades Naturales.....	113
6.1.4.2.	Unidades Codificados.....	114
6.1.5.	Optimización de Respuesta: % de Extracción de Oro.....	114
6.2.	Discusión de Resultados.....	114
CONCLUSIONES.....	116	
RECOMENDACIONES.....	117	
REFERENCIAS.....	118	
ANEXOS.....	122	

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Principales minerales de oro.</i>	12
<i>Tabla 2 Composición mineralógica del yacimiento minero.</i>	65
<i>Tabla 3 Matriz de Diseño Factorial 2³</i>	68
<i>Tabla 4 Determinación del Tiempo de Molienda.</i>	76
<i>Tabla 5 Determinación de la gravedad específica.</i>	79
<i>Tabla 6 Balance de pulpa para 30% de sólidos.</i>	80
<i>Tabla 7 Determinación de la cal inicial</i>	82
<i>Tabla 8 Condiciones Operativas de Lixiviación.</i>	84
<i>Tabla 9 Variables del Proceso de Lixiviación.</i>	85
<i>Tabla 10 Componentes iniciales para las pruebas de lixiviación.</i>	86
<i>Tabla 11 Principales compuestos mineralógicos en la muestra.</i>	90
<i>Tabla 12 Resultados de análisis por ICP-OES.</i>	90
<i>Tabla 13 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 1.</i>	92
<i>Tabla 14 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 2.</i>	93
<i>Tabla 15 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 3.</i>	94
<i>Tabla 16 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 4.</i>	95
<i>Tabla 17 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 5.</i>	96
<i>Tabla 18 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 6.</i>	97
<i>Tabla 19 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 7.</i>	98
<i>Tabla 20 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 8.</i>	99
<i>Tabla 21 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 9.</i>	100
<i>Tabla 22 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 10.</i>	101

Tabla 23 Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba Convencional.....	102
Tabla 24 Resumen del balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación.....	102
Tabla 25 Resultados de Cinética de Prueba 8 y Prueba 11.....	104
Tabla 26 Niveles de la Variables.....	106
Tabla 27 Variables con valores codificados y valores reales del diseño experimental 2^3	107
Tabla 28 Efectos estimados para la extracción del oro (unidades codificadas).....	109
Tabla 29 Análisis de la Varianza.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Oro nativo.....	11
Figura 2 Características de minerales auríferos.	13
Figura 3 Existencia del oro en los minerales.....	14
Figura 4 Elementos que involucra el proceso de cianuración.....	16
Figura 5 Tipo de agitadores para la lixiviación por agitación.....	18
Figura 6 Lixiviación en pilas.	19
Figura 7 Lixiviación en Bateas.	20
Figura 8 Efecto de la concentración de cianuro.....	22
Figura 9 Diagrama de estabilidad del cianuro.....	23
Figura 10 Efecto del pH sobre la velocidad de disolución.	25
Figura 11 Efecto de la temperatura sobre la velocidad de disolución de Au en 0.25% NaCN...	26
Figura 12 Diagrama de Pourbaix para el Sistema Au-CN-H ₂ O.	32
Figura 13 Difusión de una superficie plana.....	35
Figura 14 Modelo del núcleo recesivo con subproductos.....	39
Figura 15 Reacciones de media celda Disolución de oro.....	39
Figura 16 Velocidad de la cinética de extracción.....	51
Figura 17 Ahorro de cianuro, reduciendo tiempo de lixiviación con uso del H ₂ O ₂	52
Figura 18 Diagrama Eh-pH para los sistemas Au-CN-H ₂ O y Ag-CN- H ₂ O a 25°C.....	55
Figura 19 Diagrama de equilibrio del H ₂ O ₂ a 25°C.	56
Figura 20 Diagrama de estabilidad Au – H ₂ O a 25°C 1 Atm.....	57
Figura 21 Ubicación Geográfica de la Compañía Minera Tunkyro.	63
Figura 22 Compañía Minera Tunkyro S.A.C.	64

Figura 23 Corte esquemático de la mina	65
Figura 24 Diagrama de Flujo del Desarrollo Experimental.	73
Figura 25 Gráfico tiempo de molienda VS % -200 mallas.	76
Figura 26 Ajuste Lineal de la Gráfica de Molienda	77
Figura 27 Consumo de cianuro de sodio en las pruebas metalúrgicas.	88
Figura 28 Comparación del consumo de NaCN entre la prueba 8 y 11.....	89
Figura 29 Diagrama de barras	103
Figura 30 Cinética de extracción del oro.	104
Figura 31 Representación geométrica de las variables en el diseño experimental 2^3	108
Figura 32 Diagrama de Pareto.....	110
Figura 33 Gráfico de efectos principales para la extracción de oro.....	111
Figura 34 Gráfico de interacción para la extracción del oro.....	112
Figura 35 Gráfico normal de efectos estandarizados.....	113
Figura 36 Optimización de Respuesta: % extracción de Au.....	114

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1: Matriz de consistencia</i>	<i>111</i>
<i>Anexo 2 Informe de ensayo ley de cabeza.....</i>	<i>112</i>
<i>Anexo 3 Informe de análisis por ICP-OES</i>	<i>113</i>
<i>Anexo 4: Informe de ensayos de soluciones (prueba 1-11)</i>	<i>118</i>
<i>Anexo 5: Informe de ensayos de ripios (prueba 1-11).....</i>	<i>119</i>
<i>Anexo 6: Informe de ensayos PLS prueba 8 (cinética).....</i>	<i>120</i>
<i>Anexo 7: Informe de ensayos PLS prueba 11 (cinética).</i>	<i>121</i>
<i>Anexo 8: Reporte de pruebas de cianuración en botellas (1-11).....</i>	<i>122</i>
<i>Anexo 9: Fotografías de la preparación mecánica y muestreo del mineral.....</i>	<i>126</i>
<i>Anexo 10: Fotografías de preparación de pulpa</i>	<i>127</i>
<i>Anexo 11: Fotografías de los procedimientos de titulación.</i>	<i>128</i>
<i>Anexo 12: Fotografías de la determinación de gravedad específica.....</i>	<i>129</i>

RESUMEN

La presente investigación trata de la optimización de la extracción del oro utilizando el reactivo peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos. Para lo cual, las pruebas metalúrgicas fueron realizadas en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco con el objetivo de optimizar la extracción de oro, asimismo, determinar las variables, como la concentración de cianuro de sodio, concentración de peróxido de hidrógeno y el *pH* para alcanzar la mayor extracción de oro. El objeto de estudio de la investigación fueron los minerales provenientes de los nuevos depósitos auríferos de la concesión minera Valetita IV pertenecientes a la Compañía Minera Tunkyro S.A.C, que son minerales sulfurados y no son dóciles a la lixiviación convencional con cianuro de sodio. La investigación fue del tipo aplicada o experimental estudiada a un nivel explicativo; para la constatación de la hipótesis se aplicó el diseño experimental factorial 2^3 con dos pruebas en los puntos centrales y posteriormente los datos obtenidos se evaluaron con la ayuda del software MINITAB 19. Los resultados demostraron que, efectivamente la utilización del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración tiene una incidencia significativa en la extracción de oro y que, con una concentración de 1400 ppm de cianuro de sodio, 1.04% de peróxido de hidrógeno y un pH de 11.5 se obtiene la mayor extracción de 93.87 % de oro. Finalmente, la investigación concluye en que verdaderamente se optimiza la extracción de oro utilizando el peróxido de hidrógeno; logrando superar la extracción de 79.23 % de oro el cual se obtiene en la lixiviación sin el uso del peróxido de hidrógeno.

Palabras claves: *Cianuración, extracción de oro, minerales auríferos complejos, optimización y Peróxido de hidrógeno.*

ABSTRACT

The present research deals with the optimization of gold extraction using the hydrogen peroxide reagent in the process of cyanidation by agitation of complex gold minerals. For this, the metallurgical tests were carried out in the laboratories of the Professional School of Metallurgical Engineering of the National University of San Antonio Abad of Cusco with the aim of optimizing gold extraction, as well as determining the variables, such as the concentration of sodium cyanide, concentration of hydrogen peroxide and the pH to achieve the highest gold extraction. The object of study of the research were the minerals from the new gold deposits of the Valetita IV mining concession belonging to the Compañía Minera Tunkyro S.A.C, which are sulfide minerals and are not docile to conventional leaching with sodium cyanide. The research was of the applied or experimental type, studied at an explanatory level; To verify the hypothesis, the factorial experimental design 2^3 was applied with two tests at the central points and then the data obtained were evaluated with the help of the MINITAB 19 software. The results showed that, indeed, the use of hydrogen peroxide in the cyanidation process has a significant impact on gold extraction and that, with a concentration of 1400 ppm of sodium cyanide, 1.04% of hydrogen peroxide and a pH of 11.5, the highest extraction of 93.87% of gold is obtained. Finally, the research concludes that gold extraction is truly optimized using hydrogen peroxide; managing to exceed the extraction of 79.23% of gold which is obtained in leaching without the use of hydrogen peroxide.

Keywords: Cyanidation, gold extraction, complex gold minerals, optimization and hydrogen peroxide.

SIMBOLOGÍA

Ag	:	Plata
Au	:	Oro
atm	:	Atmósfera
cm	:	Centímetro
cm ³	:	Centímetro cúbico
g	:	Gramo
h	:	Hora
kg	:	Kilogramo
l	:	Litros
m	:	Metro
mg	:	Miligramo
ml	:	Mililitro
mm	:	Milímetro
msnm	:	Metro sobre el nivel del mar
PAL	:	Hydrogen Peroxide Assisted Leaching (lixiviación asistida por el peróxido de hidrógeno)
pH	:	Potencial de hidrogeniones
Ppm	:	Partes por millón
s	:	Segundo
S.A.C.	:	Sociedad Anónima Cerrada
TM	:	Tonelada métrica
V	:	Volumen
%	:	Porcentaje
μ	:	Micro
μm	:	Micrómetro
<	:	Menor que
°C	:	Grados centígrados
200M	:	Tamiz malla N° 200
ICP-OES	:	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

INTRODUCCIÓN

Los minerales auríferos se hallan en la naturaleza con diferentes composiciones mineralógicas, cuyas extracciones de oro a través del proceso de cianuración tradicionales son limitadas, ya que algunos constituyentes que acompañan al metal valioso dificultan o impiden el beneficio metalúrgico. En tal sentido, los minerales que fueron objeto de investigación constituyen minerales cianicidas y consumidores de oxígeno los cuales son perjudiciales para la cianuración convencional. Por consiguiente, el uso del peróxido de hidrógeno, por ser un poderoso oxidante para minerales sulfurados y aportante de oxígeno; es una importante alternativa para optimizar la extracción del oro.

Hoy en día, el oro posee un alto valor económico y su extracción es una actividad de gran relevancia en numerosos países. Además, la cianuración es un proceso hidrometalúrgico lucrativo y versátil, razón por la cual las compañías optan por emplear esta tecnología en la extracción de oro. De acuerdo con Austecol, (2022) "Dos de las capacidades más destacadas de este proceso son la selectividad del cianuro libre para la disolución de oro y la elevada estabilidad del complejo cianuro-oro". Además, el proceso de cianuración, considerado un proceso metalúrgico relevante, depende de muchos factores para la buena extracción de oro, como por ejemplo la presencia del oxígeno que se requiere para una mayor disolución de oro.

El primordial interés por el cual se desarrolló esta investigación, es la actual baja extracción del oro mediante el proceso de cianuración convencional de minera auríferos de la concesión minera Valetita IV debido la composición mineralógica del mineral y la falta del oxígeno en la cianuración a causa de la baja presión atmosférica. En consecuencia, la propuesta de incorporar el peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración tiene como objetivo mejorar la extracción de oro, lo cual es muy importante para el tratamiento de minerales auríferos complejos. En el marco

metodológico de la investigación, el objeto de investigación fueron los minerales auríferos complejos, provenientes de los nuevos depósitos de mineral de la Compañía Minera Tunkyro y que mediante las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio y el diseño experimental del tipo factorial 2^3 se podrán evaluar los efectos que tendrán las variables independientes en la variable dependiente.

CAPÍTULO I

Planteamiento del Problema

1.1. Situación Problemática

La Compañía Minera Tunkyro S.A.C, empresa dedicada al tratamiento de minerales auríferos extraídas de su propia concesión minera Valetita IV, vino realizando sus actividades de explotación y producción de oro y plata con buenos resultados de extracción de oro hasta fines del año 2023, donde se obtuvieron los mejores ingresos por la comercialización de sus productos (barras de doré). Esto debido principalmente a que los minerales tratados fueron óxidos y sulfuros (minerales dóciles a la cianuración).

Actualmente, la compañía minera viene explotando minerales auríferos a mayores profundidades, en los cuales los minerales presentan una composición mineralógica del tipo sulfurado. En consecuencia, estos minerales presentan extracciones de oro entre 72– 80 %.

El problema fundamental el cual dio lugar o motivó a la investigación, fue la baja extracción de oro mediante el proceso tradicional de cianuración, esto debido a la variación de la composición mineralógica de los nuevos depósitos de minerales auríferos descubiertos recientemente, prácticamente minerales auríferos acompañados de sulfuros, los cuales son consumidores de oxígeno en el proceso y tienen comportamientos cianicidas.

Asimismo, se sostiene que no es lo mismo aplicar la tecnología de cianuración a altitudes cerca al nivel del mar que superiores a 3000 msnm. Debido a que el oxígeno es un factor importante para la disolución del oro y este se ve afectado por la presión atmosférica. También se debe considerar que el agua utilizada en el proceso no cuenta con la oxigenación necesaria como cuando se usa el agua de río, ya que estas aguas son extraídas desde la mina para ser depositadas en grandes pozos.

En el desarrollo de esta investigación, se plantea como una opción viable la incorporación del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración con el propósito de optimizar la extracción de oro, debido a su capacidad para suministrar el oxígeno requerido en el proceso y por ser un poderoso oxidante.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General.

¿Será posible la optimización de la extracción de oro, utilizando el peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C. Pullo-Ayacucho?

1.2.2. Problemas Específicos.

- ¿Cuál será la concentración de cianuro de sodio que incremente la extracción de oro?
- ¿Cuál será la concentración de peróxido de hidrógeno más adecuada en el proceso de cianuración por agitación para optimizar la extracción de oro?
- ¿Cómo influye la interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Optimizar la extracción de oro, utilizando el peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación, de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C Pullo-Ayacucho.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de cianuro de sodio que va incrementar la extracción de oro.

- Establecer la concentración del peróxido de hidrógeno más adecuada en el proceso de cianuración por agitación para optimizar la extracción de oro.
- Determinar la influencia de la interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación.

1.4. Justificación de la Investigación

1.4.1. Conveniencia

Es conveniente, puesto que los resultados de esta investigación podrán contribuir para mejorar las extracciones de oro mediante la tecnología de cianuración utilizando el peróxido de hidrógeno y así dar beneficio a la Compañía Minera Tunkyro.

1.4.2. Relevancia Tecnológica

Es relevante tecnológicamente, porque a pesar de realizarse muchas investigaciones tecnológicas en la misma empresa, con objetivos de optimizar y así incrementar la extracción del oro mediante la cianuración convencional, estos a la fecha no brindan los mismos resultados, puesto que la explotación de minerales a mayores profundidades conlleva el procesamiento de minerales con diferentes composiciones mineralógicas que ya no son rentables económicamente.

La presente investigación evalúa la aplicación del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración para incrementar la extracción de oro, por lo que tecnológicamente será un aporte muy importante a la comunidad metalurgista.

1.4.3. Justificación Económica

Se justifica económicamente, por qué los buenos resultados involucrarían también un incremento en la rentabilidad económica, lo cual hace de la investigación muy importante y justificable. Además, consideramos que cada tonelada de mineral procesado representa un costo y el incremento de la extracción de oro representa más ganancias para la compañía.

1.4.4. Relevancia Social

La investigación tendrá un gran impacto positivo en la comunidad de la empresa minera, puesto que al lograr buenos resultados y por consiguiente contribuir al incremento de la rentabilidad económica, la empresa estará en la posibilidad de brindar mejores condiciones de trabajo como por ejemplo la calidad de los equipos de protección personal de seguridad, mejoramiento e implementación de un buen ambiente laboral y contribución para una minería más sostenible y responsable.

1.4.5. Valor Teórico

Teóricamente existe más conocimientos en la aplicación del peróxido de hidrógeno para la degradación del cianuro de sodio mas no en la aplicación en proceso de cianuración como un reactivo oxidante, en consecuencia, nuestro estudio contribuiría a llenar esos vacíos teóricos.

1.4.6. Utilidad Metodológica.

El método o el camino el cual se utilizará para llevar a cabo la verificación de la hipótesis es de mucha utilidad para próximas investigaciones, en donde la metodología aplicada deberá ser para un diseño experimental factorial 2^k con la interacción de tres factores manipulables, particularmente importantes como la concentración de cianuro de sodio, concentración de peróxido de hidrógeno y el pH, los cuales tendrían un efecto en la extracción del oro.

1.5.Importancia de la Investigación

La investigación es sumamente importante tanto para la propia empresa como para otras empresas mineras en donde constan de minerales semejantes, los cuales con esta alternativa de mejora podrán dar solución a sus bajas extracciones de sus metales valiosos. Y harán que logren altas tasas de extracción, asiéndolas más rentables y sostenibles a largo plazo. Por consiguiente, tiene demasiada importancia realizarlo primeramente a nivel laboratorio.

1.6.Delimitaciones Espacial y Temporal

La investigación fue realizada en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, cuyas muestras fueron obtenidas de los nuevos depósitos de la concesión minera Valetita IV pertenecientes a la Compañía Minera Tunkyro S.A.C.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Locales

Holguín Silva, A. (2023) *Optimización del proceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Valetita IV de la compañía minera Tunkyro SAC.* Tesis realizada en la ciudad de Cusco. El estudio se realizó en el laboratorio de la Compañía Minera TUNKYRO en 2023 con minerales sulfurados y óxidos donde el objetivo fue optimizar la extracción de oro de los minerales auríferos de la formación VALETITA IV mediante el proceso de cianuración por agitación. Adicionalmente, se determinó el tiempo de cianuración del mineral aurífero a partir de la etapa de molienda, que incluyó la cianuración por agitación en los respectivos tanques para incrementar la extracción de oro. Se determinó la cantidad de cianuro de sodio que maximiza la extracción de oro, así como el tamaño de partícula del mineral para mejorar la extracción de oro. La matriz de diseño se creó teniendo en cuenta las variables que se consideraron para el diseño DOE factorial, que incluía los valores mínimo y máximo de cada variable. Los resultados del estudio muestran una mayor extracción de oro igual a 95.12% el cual resulto a condiciones de tamaño de partícula igual a 90% malla -200, una concentración de cianuro de sodio de 0,14% y un tiempo total de disolución de 72 horas.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Zevallos Vizcarra, G. A. (2018) *Optimización de la recuperación de oro con el uso de peróxido de hidrógeno a nivel de laboratorio en la Mina Arasi S.A.C.* La tesis se realizó en la ciudad de Arequipa, Perú. El objetivo de este estudio fue examinar el impacto

del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como catalizador en el proceso de cianuración y determinar si su uso proporciona circunstancias ventajosas para mejorar la extracción de oro mediante la optimización utilizando diseños factoriales. En las pruebas PAL se utilizaron una combinación de minerales (sulfuros y óxidos) provenientes de la unidad minera ARASI SAC de la provincia de LAMPA, ubicada en el departamento de Puno. El estudio consiste en realizar numerosos experimentos para determinar el impacto del peróxido de hidrógeno en la cinética de cianuración en un ambiente libre de oxígeno. Se cambiaron las concentraciones de H_2O_2 en las pruebas de botella. Los resultados de laboratorio demuestran un potencial significativo para su futura aplicación, mejorando los resultados obtenidos en los procedimientos tradicionales. La adición de peróxido de hidrógeno dio lugar a una tasa de recuperación del 91%, pero sin la adición de este oxidante se alcanzó una tasa de recuperación del 82% durante el mismo periodo de tiempo. La segunda parte del estudio introdujo un modelo matemático que utilizaba diseños factoriales (fraccional y hexagonal) y el método de pendiente ascendente para optimizar la recuperación de oro mediante la adición de peróxido de hidrógeno. Se analizaron los resultados obtenidos en pruebas a escala de planta para evaluar la eficacia de este planteamiento.

Guillen Puma, H. M. (2019) *Análisis del proceso PAL en la recuperación aurífera en la Empresa Minera Century Gold Mines S.A.C*, la tesis de investigación realizada en la ciudad de Arequipa, Perú tuvo como objetivo mejorar la recuperación de oro en el proceso de cianuración de concentrados auríferos de pirita a través del método PAL. El estudio se centró en concentrados auríferos con un contenido de oro superior a 1714,00 g/TM y un contenido de plata de 6852,00 g/TM. El diseño experimental siguió un

diseño factorial $2^3 = N$, incorporando tres variables independientes: dosis de peróxido de hidrógeno, concentración de cianuro y tiempo de lixiviación. Los resultados indicaron una reducción significativa del tiempo de lixiviación y una disminución del 55% del consumo de cianuro. Además, la recuperación de concentrado de oro aumentó entre 1 a 2%, alcanzándose una recuperación de oro del 97,80%. Estos resultados se observaron con una dosis de cianuro de 2,5 kg/TM, un caudal de peróxido de hidrógeno de 24 ml/minuto y una duración de la lixiviación de 36 horas. El estudio realizado sobre la aplicación del método PAL en la cianuración de concentrados reveló un notable aumento de la concentración de oxígeno disuelto. Concretamente, la concentración pasó de 2 ppm a 15 ppm en un plazo de tan sólo 8 horas. En cambio, sin la utilización del método PAL, este aumento tardó 24 horas en producirse. Esta disparidad subraya el impacto significativo del método PAL en el tiempo de lixiviación necesario para lograr resultados óptimos mediante la mejora de los niveles de oxígeno disuelto en el proceso de cianuración.

Ponce Mazuelos, J. M. (2022) *Evaluación de la recuperación de oro y plata en MINERA TUNKYRO S.A.C.* Tesis realizada en la ciudad de Arequipa – Perú. La tesis se realizó en la ciudad de Arequipa, Perú, con el objetivo de evaluar la recuperación de oro y plata en Minera Tunkyro S.A.C. La meta era mejorar la recuperación de estos metales preciosos en el proceso de producción para elevar el valor comercial del carbón rico o cargado. El tipo de investigación que se realizó fue experimental, porque en ella se evaluó los minerales mixtos (óxidos y sulfuros) que ingresaba a la planta mediante pruebas metalúrgicas, cuyos resultados fueron analizados mediante el diseño experimental factorial 2^k con dos variables controlables (Ph, tiempo de cianuración) y como respuesta la recuperación de oro y plata. La evaluación de la recuperación de oro y plata en el proceso

reveló que sólo se recuperaba con éxito el 60% de la plata. Este hallazgo motivó un estudio posterior destinado a mejorar la recuperación de plata en el proceso. Se realizaron pruebas metalúrgicas para mejorar la recuperación tanto de oro como de plata. Como resultado de la optimización del proceso de cianuración, se produjo una notable mejora en los índices de recuperación. Concretamente, se logró un aumento del 5% en la recuperación de oro y del 30% en la recuperación de plata manteniendo un tiempo de cianuración de 72 horas y un pH de 10,5.

Fora Jinez, J. (2018) *Mejoramiento del proceso de extracción de oro y plata usando peróxido de hidrógeno en la unidad minera Pucamarca – Minsur – Tacna*. Tesis realizada en la ciudad de Tacna – Perú. El objetivo del estudio fue potenciar la extracción de oro y plata de la alteración silíceo masiva mediante la adaptación del proceso de lixiviación asistida por peróxido de hidrógeno para mejorar el proceso de cianuración convencional en la planta extractiva de la unidad minera Pucamarca-Minsur. La metodología de investigación empleada fue experimental, mediante muestreo manual y cuarteo sucesiva para adquirir una muestra representativa para lograr resultados adecuados de disolución de oro y plata. Se realizaron pruebas exploratorias en columna para comparar diferentes variables del proceso, lo que permitió aumentar los niveles de oxígeno y la cinética de lixiviación. Esto condujo a una reducción del consumo de cianuro y del tiempo de lixiviación mediante la pasivación de los minerales de sulfuro que consumen cianuro. Además, se realizaron pruebas en botellas con ripsos de lixiviación en columnas, que implicaron la reducción del tamaño de las partículas de 63,6 mm a 6,35 mm, lo que dio como resultado un aumento del 29% al 46%. Los resultados contribuyeron a mejorar los parámetros del proceso de cianuración, obteniéndose extracciones de oro que oscilaron

entre el 76,3% y el 80,6%, con una variación de costes del 10% al 12% para el peróxido de hidrógeno.

2.1.3. Antecedentes Internacionales

Muñoz Morcillo, M.M. & Álvaro Ordoñez, L. (2023) *Evaluación de la recuperación de oro en solución aplicando el proceso de cianuración por agitación con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda a un mineral refractario*, tesis realizada en la ciudad de San Juan de Pasto – Colombia. La investigación realizada consistió en el análisis mineralógico y químico de cuatro menas de oro para identificar las características que influyen en el proceso de cianuración. Además, se realizaron pruebas metalúrgicas para recomendar el método de extracción más adecuado para cada mineral, considerando la recuperación de oro en la solución final mediante cianuración estándar como un factor crucial para determinar la refractariedad del mineral. Los resultados mostraron una recuperación de oro en solución del 62,4% para el mineral "Playa Dorada", indicando su naturaleza refractaria. Aplicando la cianuración con tratamientos oxidativos y la cianuración en molienda al mineral refractario, se determinó que los métodos de recuperación más eficaces eran la cianuración en agitación con tostado previo del mineral y la cianuración en agitación con adición de peróxido en la etapa de preaireación. Estos métodos arrojaron porcentajes de recuperación de oro en la solución final del 91,63% y 73,11% respectivamente, lo que pone de manifiesto la importancia de mitigar los factores que dificultan la fácil recuperación del metal precioso.

López Velecela, F. (2015) *Estudio de la lixiviación de oro refractario en un concentrado gravimétrico de minerales del sector minero de Torata, provincia de El Oro, usando peróxido de hidrógeno y ácido nítrico* revista del instituto de investigación

Geológico Minero Metalúrgico realizada en la ciudad de Quito – Ecuador. Investigación donde se estudió la aplicación de pretratamientos oxidativos con peróxido de hidrógeno y ácido nítrico a un concentrado gravimétrico con alto contenido de sulfuros metálicos proveniente de la zona minera de Torata, provincia de El Oro (Ecuador). Los resultados de la caracterización confirmaron la presencia de oro refractario en el mineral de estudio. Las pruebas experimentales de lixiviación luego de la oxidación mostraron disoluciones de oro superiores a los ensayos sin pretratamiento (98 vs 88 % de oro disuelto, respectivamente). También se encontró que la oxidación de la arsenopirita ocurre en mayor extensión que la pirita y la metodología aplicada resulto en una reacción incompleta pero que permite conseguir mayor rendimiento en la lixiviación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Minerales Auríferos*

En la figura 1, se observa una muestra donde se identifica claramente el oro nativo.

Figura 1

Oro nativo



Nota. Oro nativo en minerales de cuarzo, fuente (https://es.wikipedia.org/wiki/Oro_nativo)

Como señala Coetzee et al.,(2011; como se cita en Santos 2018) el oro:

El oro suele encontrarse en su forma nativa, a menudo mezclado con plata. Tiene gravedad específica que oscila entre 16.0 y 19.30 y puede extraerse mediante concentración gravimétrica siempre que el tamaño de las partículas sea suficientemente grande ($> 10\mu\text{m}$). El oro nativo y el electrum (una aleación de oro y plata) son fácilmente solubles en soluciones de cianuro. Además, los minerales de oro también pueden existir en combinación con elementos como antimonio, telurio, selenio, bismuto, mercurio, cobre, hierro y platino. Aparte de los minerales de oro naturales, también existen variedades artificiales como los óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos y sulfuros de oro. (p.142).

En la tabla 1 se muestra los principales minerales de oro.

Tabla 1

Principales minerales de oro.

Mineral	Composición	Contenido de oro (%)	Dureza	Densidad (g/ml)
Oro natural	Au	Mayor 75%	16-19	2.5 - 3
Electrum	(Au, Ag)	45% - 75%	13-16	2 - 2.5
Calaverita	AuTe_2	40%	9.2	2.5 - 3
Krennerite	AuTe_2	31% - 44%	8.6	2.5
Silvanita	AuAgTe_4	34% - 30%	8.2	1.5 – 2
Petzita	$(\text{Ag, Au})_2\text{Te}$	19% - 25%	9.1	2.5
Hessita	AuAg_2Te	Menor 5%	8.4	2.5 - 3

Nota. Adaptado de Hidrometalurgia química e ingeniería (Uceda Herrera, 2016, p. 470)

2.2.2. Clasificación de Minerales de Oro

De acuerdo a Marsden & House (2006):

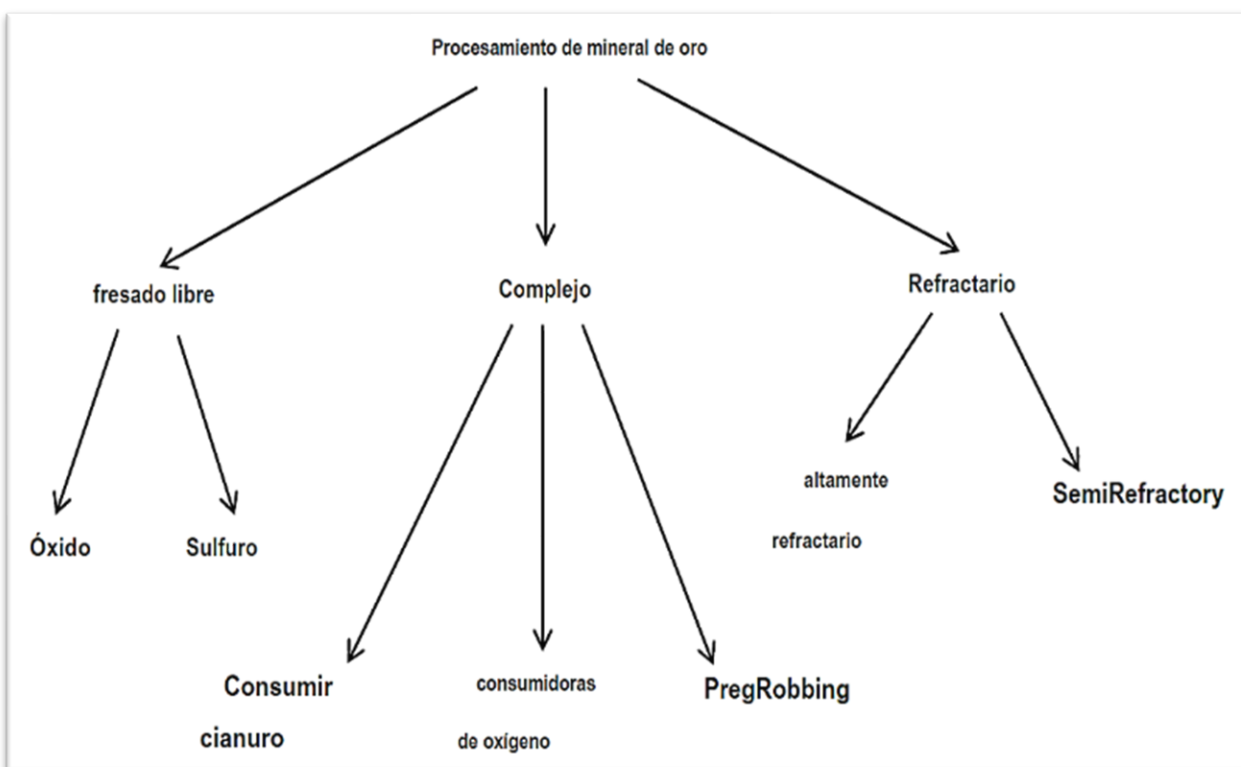
Los minerales de oro dependiendo del consumo de cianuro durante el proceso de lixiviación, los minerales se clasifican como de molienda libre, complejos o refractarios. Aquellos minerales que alcanzan recuperaciones superiores al 90% en un proceso

convencional de lixiviación, con un 80% de partículas que pasan por un tamiz de 75 μm , se clasifican como libres por molienda”, por otro lado, si el mineral consume cantidades excesivas de cianuro con pobre recuperación (<40 %) se lo conoce como “oro refractario” y entre los dos mencionados se encuentran los minerales “complejos” que resultan en recuperaciones de oro económicamente aceptables. (p.93).

En conclusión, a lo mencionado anteriormente podemos afirmar que los minerales que fueron objeto de investigación son minerales auríferos complejos puesto que las extracciones de oro no supera el 80%. En la figura 2, podemos observar las características que tienen los minerales auríferos según su consumo de cianuro.

Figura 2

Características de minerales auríferos.



Nota. Esquema adaptada de (La Brooy et al., 1994)

En la figura 3, se detalla los diferentes tipos de oro que hay presentes en el mineral y los métodos que se sugieren utilizar para la recuperación de este metal valioso.

Figura 3

Existencia del oro en los minerales.



Nota. Representación esquemática de la existencia de oro en minerales y los métodos de recuperación (Uceda Herrera, 2016, p. 471)

2.2.2.1. Minerales Complejos

De acuerdo a La Brooy et al., (1994) los minerales complejos pueden caracterizarse por:

“... el alto consumo de cianuro o consumo de oxígeno. La mala extracción de oro por cianuro de estos minerales se atribuye al preg-robbing, característica de la materia carbonosa. O también se caracteriza por tener al oro encerrado en minerales de sulfuro y ganga silíceas.”. (p.97).

2.2.2.2. Refractariedad de Minerales Auríferos

Según el autor Parga & Carrillo (1996) un mineral puede clasificarse como refractario.

Cuando no consigue recuperaciones de oro superiores al 70-80% mediante los métodos tradicionales de cianuración, incluso con una molienda fina. Además, un mineral también

puede considerarse refractario si, a pesar de lograr recuperaciones del 80%, genera relaves de cianuración que contienen oro en concentraciones tan elevadas como 3-10 g/TM.

Una de las razones más frecuentes de la refractariedad en la extracción de oro es el bloqueo o la dispersión de pequeñas partículas de oro submicroscópicas ($< 1 \mu\text{m}$) encerradas en minerales como la pirita (FeS_2), la arsenopirita (FeAsS) y el cuarzo (SiO_2). Estos minerales actúan como matrices insolubles en las que es difícil que se infiltren las soluciones de cianuro durante los procesos de lixiviación tradicionales. (p. 255).

Existen muchas características de los minerales las cuales causan la refractabilidad y de acuerdo a Parga & Carrillo (1996) son las siguientes:

- La incapacidad de disolución de los minerales de oro, se da por la presencia de telururos, auroestibnitas y las maldonitas, los cuales se combinan con los compuestos generados durante el proceso de tostado reductor de los minerales de plomo, antimonio y arsénico.
- En ciertos procesos de extracción, se generan capas de óxido y compuestos de hierro, plomo, arsénico y antimonio alrededor de las partículas de oro y plata. Estas capas o películas obstaculizan la disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuro.
- Durante el proceso de cianuración, la descomposición de minerales afines como la pirrotita, la covellita y la calcosina conduce a la formación de compuestos complejos que absorben el cianuro, reduciendo la eficacia de la disolución del oro al consumir oxígeno. El oxígeno factor importante para el proceso de disolución en la cianuración

- Las propiedades de predeposición (preg-robbing), de un mineral se atribuyen a la presencia de minerales de carbono amorfo o materia carbonosa. Este fenómeno consiste en la adsorción del oro por el carbono durante la cianuración, lo que impide la extracción del metal.

2.2.3. *Proceso de Lixiviación del Oro con Cianuro*

Desarrollado en 1887 por los químicos escoceses John MacArthur, Robert y William Forrest, el proceso consiste en la interacción de mineral finamente molido con una solución de cianuro, seguida de la extracción de metales valiosos de la solución mediante precipitación con polvo de zinc. Sorprendentemente, este método sigue utilizándose en la actualidad.

En la figura 4, se muestra los elementos que involucra un proceso de lixiviación, donde indica que para el proceso se necesitan los reactivos y el mineral para obtener productos como los rípios y la solución rica.

Figura 4

Elementos que involucra el proceso de cianuración



Nota. Adaptación de JXSC Mine Machinery Factory (<https://www.jxscmachine.com>)

2.2.4. Técnicas de Lixiviación

La selección del agente de lixiviación y de la técnica de lixiviación adecuada para tratar un mineral viene determinada por sus características físico-químicas.

- Entre las técnicas disponibles están la lixiviación con agitación en tanques y la lixiviación a presión.
- Mediante el proceso de percolación, se emplean varios métodos como la lixiviación in situ, la lixiviación en vertedero, la lixiviación en pilas y la lixiviación por percolación en tanques.

En el campo de la hidrometalurgia, se han observado diversos avances tecnológicos en el proceso de lixiviación. En el presente contexto, se procederá a analizar los diversos procedimientos de extracción por lixiviación que han sido desarrollados.

2.2.4.1. Lixiviación por Agitación

La lixiviación por agitación es una técnica ampliamente utilizada para diversos tipos de minerales. El mineral suele triturarse hasta alcanzar un tamaño que maximice la extracción de oro y plata, logrando normalmente una reducción del 80% entre 45 y 150 μm .

“El proceso de lixiviación por agitación suele tener lugar en tanques de acero donde los sólidos se mantienen en suspensión mediante el uso de aire o agitación mecánica. Los sistemas eficientes pueden utilizar eficazmente la mezcla de flujo dentro de un reactor singular para mejorar la cinética de reacción y aumentar la eficiencia del equipo de cianuración.” (Mamani Cabrera, 2022, p. 16).

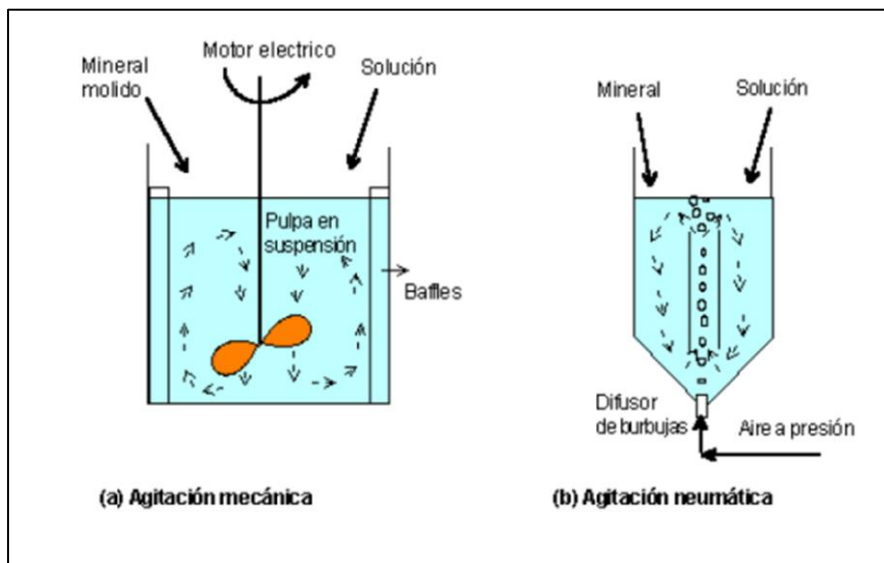
En la figura 5, podemos observar los tipos de agitadores para la lixiviación.

Como indica (Mamani Cabrera, 2022), “el sistema de lixiviación por agitación es adecuado para favorecer la cinética de la reacción, considerando factores, tales como: Agitación intensa,

temperaturas que pueden ser cercanas a 250°C y presiones superiores a la atmosférica, presión de gases controlada y uso de reactivos oxidantes y altamente agresivos.”(p.33).

Figura 5

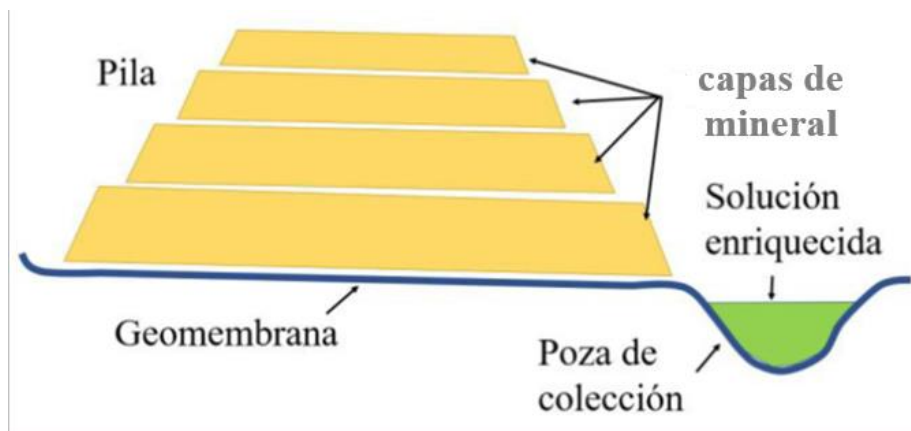
Tipo de agitadores para la lixiviación por agitación.



Nota. Agitación mecánica y neumática (*lixiviación*, 2014)

2.2.4.2. Lixiviación en Pila o Montón

“El proceso de lixiviación en pilas es una técnica rentable apropiado para procesar minerales de baja ley que no justifican los costosos procesos de molienda y lixiviación por agitación. Como se muestra en la figura 6, en la lixiviación en pilas, los minerales extraídos, triturados y transportados se tratan con cianuro sobre geomembranas impermeables. A continuación, la solución se rocía o vierte sobre la pila de mineral para permitir la percolación. La decisión de utilizar este método depende de factores como la ley del mineral, la cantidad de mineral disponible y su permeabilidad, que es un aspecto crucial. Una permeabilidad insuficiente dificultará la percolación, la disolución y la extracción económicamente viable del oro.” (Mamani Cabrera, 2022)

Figura 6*Lixiviación en pilas.*

Nota. Instituto de Ingenieros de Minas (<https://revistamineria.com.pe>)

2.2.4.3. Lixiviación Intensiva

Una lixiviación es intensiva porque las reacciones químicas ocurren de forma rápida, debido a condiciones agresivas de concentración de reactivos, temperatura, presión, etc. Y se realizan para minerales con elevada ley o también concentrados.

“El proceso de lixiviación intensiva implica la utilización de una solución concentrada de reactivos, principalmente cianuro y oxígeno. En muchos casos, la temperatura y/o la presión se elevan para aumentar la velocidad de disolución de los metales preciosos. Este método se emplea para procesar minerales de alta ley, lo que justifica los considerables gastos de tratamiento para lograr una alta extracción. Estos materiales abarcan concentrados de flotación y gravimétricos que pueden contener partículas de oro visibles o en los que el oro puede encontrarse en minerales solubles en cianuro, como los sulfuros. Además, este proceso es adecuado para situaciones en las que el oro está asociado a otros minerales que perturban la cianuración estándar, como el telurio y el mercurio.”(Mamani Cabrera, 2022)

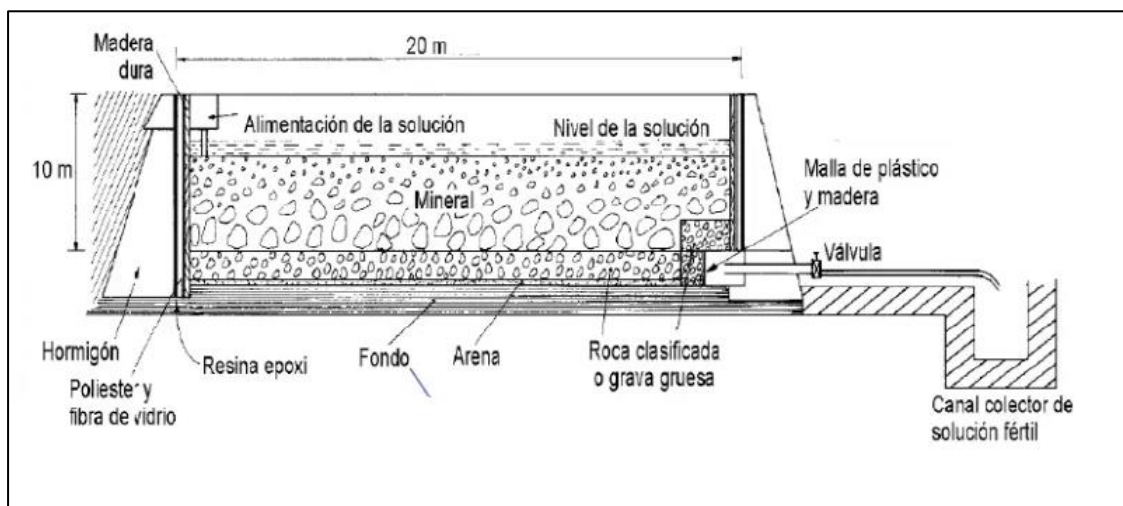
2.2.4.4. Lixiviación en bateas

“La lixiviación en bateas es un proceso en el que el mineral triturado (2,54 cm) se sumerge en una solución de cianuro dentro de grandes cubas que pueden contener cantidades significativas de mineral. El grado de trituración y aglomeración debe estar respaldado por una mayor recuperación de oro. El objetivo principal de la lixiviación en cuba en el tratamiento de minerales auríferos es acortar la duración de la lixiviación y mejorar la extracción y la concentración de oro en la solución procesada, en comparación con otras técnicas de lixiviación alternativos. A pesar de su uso poco frecuente debido a la considerable inversión inicial necesaria para la construcción de la cuba, esta técnica ofrece la ventaja de saturar eficazmente toda la superficie del mineral”.(Mamani Cabrera, 2022).

En la figura 7 podemos observar de manera clara y precisa como es la lixiviación en bateas.

Figura 7

Lixiviación en Bateas.



Nota: Adaptación de lixiviación en bateas (Ccansaya, 2019)

2.2.4.1. Lixiviación in situ

“El proceso implica la aplicación directa de una solución diluida de cianuro al mineral en su ubicación. Es necesario que el mineral tenga una permeabilidad suficiente

para permitir que la solución alcance una cantidad comercialmente valiosa del metal precioso. El requerimiento de permeabilidad puede ser una propiedad del cuerpo mineral (poroso o fracturado) o puede ser inducido por voladura para crear suficiente fragmentación. En la práctica el proceso ha sido aplicado solo en contados casos debido a la baja eficiencia de contacto metal – solución, baja recuperación de las soluciones cargadas y restricciones medioambientales.” (Mamani Cabrera, 2022)

2.2.5. Efecto de las Variables de Cianuración

Según (Ponce Mazuelos, 2022) las variables que inciden en el proceso de cianuración de los minerales de oro tienen efectos significativos, entre los cuales se destacan los siguientes: “Efecto del oxígeno, la concentración del cianuro, pH o alcalinidad, tiempo de cianuración, tamaño de partícula y cianicidas o descompensación de cianuro.”. (p.31).

2.2.5.1. Efecto del Oxígeno.

Es esencial destacar la importancia del oxígeno en el proceso de disolución del oro. Aunque para este fin se han empleado sustancias oxidantes como el peróxido sódico, el permanganato potásico, el bromo y el cloro, una aireación adecuada puede producir resultados igualmente eficaces que los oxidantes químicos, y a un ritmo más económico.

Según Ponce Mazuelos (2022), se discute la relación entre la concentración de NaCN y la presión de oxígeno en la disolución del oro.

“El oxígeno es fundamental en la disolución del oro, y su cantidad en soluciones de cianuro débiles se ve afectada por la altitud, la temperatura, la agitación y la fuerza iónica de la disolución.”. (p.23).

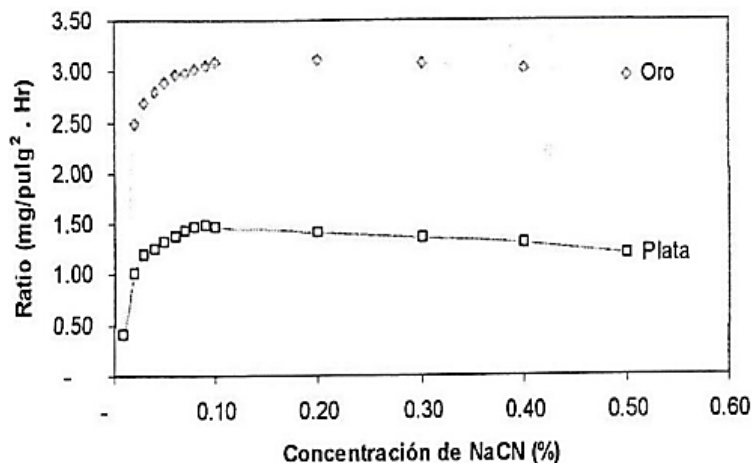
“Se observa que, a bajas concentraciones de cianuro, la presión de oxígeno no influye en la velocidad de disolución del oro. Por el contrario, a altas concentraciones de

cianuro, donde la velocidad de disolución no se ve afectada por la concentración del disolvente, la velocidad de reacción se ve influida por la presión de oxígeno. La tasa de transferencia de masa de oxígeno disminuye al aumentar la densidad de la suspensión y al disminuir el tamaño de las partículas.” (p.34).

Teniendo en cuenta la investigación de López Rosello (2014), “se ha establecido a través de datos experimentales y prácticos que mantener una relación $[CN^-]/[O_2]$ cercana a 6 es óptima para conseguir la mayor tasa de disolución de oro. La presencia excesiva de oxígeno conduce a la precipitación de plata en forma de sulfuro y a la generación de tiocianatos y sulfocianatos, con el consiguiente consumo de cianuro.” (p.21).

Figura 8

Efecto de la concentración de cianuro.



Nota. Hidrometalurgia del Oro, (Leobardo et al., 2011)

2.2.5.1. Efecto de la Concentración de Cianuro

En la investigación de (Soto Cahuana, 2021), “la velocidad de disolución del oro experimenta inicialmente un rápido incremento, mostrando una relación casi lineal con el aumento de la concentración de cianuro. Sin embargo, finalmente alcanza un valor máximo, tras el cual nuevos aumentos de la concentración de cianuro no conducen a un aumento proporcional de la

cantidad de oro disuelto. Por el contrario, se observa un ligero efecto inhibitor, acompañado de un aumento del consumo.” (p.20). Este fenómeno se ilustra en la figura 8 de la página anterior.

Por otra parte, en la figura anterior observamos el comportamiento de la disolución de oro y plata con respecto a la concentración de cianuro de sodio, donde prácticamente pasando la concentración máxima NaCN la disolución del oro y plata va tener otro efecto.

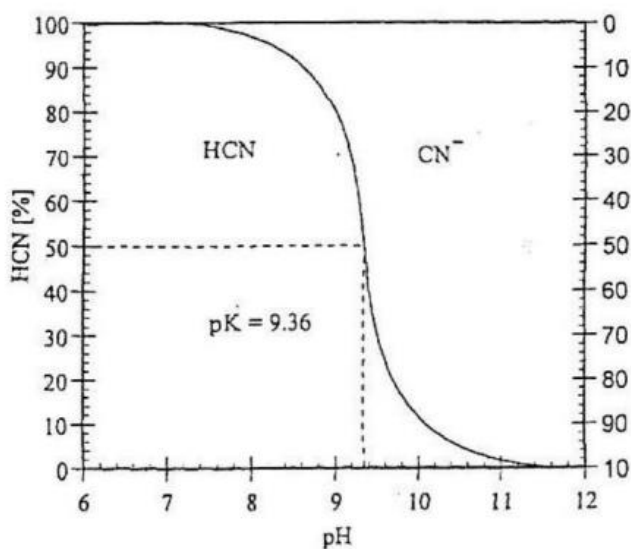
Como es muestra en la figura 9, la disminución de la concentración de cianuro se produce como resultado del incremento del pH en la solución, lo que provoca la hidrólisis del ion cianuro de acuerdo con la siguiente reacción:



Teniendo en cuenta la tesis de López Rosello (2014), donde indica que según J. S. Mac Laurin, “la velocidad a la que se disuelve el oro en soluciones de cianuro alcanza su punto máximo cuando las soluciones pasan de estar concentradas a estar más diluidas. Y que este pico se alcanza a una concentración de la solución de NaCN del 0,25%, equivalente a 2,5 g/L.” (p.19).

Figura 9

Diagrama de estabilidad del cianuro.



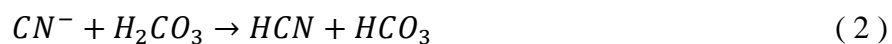
Nota. Hidrometalurgia del Oro, (Leobardo et al., 2011)

La figura 9, también indica que la estabilidad de formación de HCN será inversamente proporcional al pH.

2.2.5.2. Efecto de la Alcalinidad

Durante el proceso de lixiviación del oro, es fundamental mantener la solución de cianuro en un entorno alcalino por dos motivos:

- Para evitar la hidrólisis del cianuro.
- Evitar la descomposición del cianuro por la presencia de dióxido de carbono atmosférico



“La liberación de HCN se produce en ambos escenarios, y no funciona como disolvente para el oro y la plata. Por otra parte, una alcalinidad elevada provoca una reducción lineal de la velocidad de disolución dentro del espectro de pH de 11 a 13. La gestión precisa de la alcalinidad de la solución de cianuro es esencial para alcanzar velocidades óptimas de disolución del oro y la plata. Normalmente, el pH se mantiene entre 10,5 y 11,5 en las aplicaciones prácticas.”(Soto Cahuana, 2021, p. 21).

El ion hidroxilo desempeña un papel crucial en las soluciones de cianuro al crear un entorno básico o alcalino. Esta condición alcalina aumenta la eficacia y reduce los riesgos asociados al ion cianuro. Además, la alcalinidad facilita varias ventajas en el proceso de cianuración, como la lixiviación selectiva en un entorno alcalino, que reduce la interferencia de la ganga. Además, las soluciones alcalinas minimizan la corrosión en equipos fabricados con diversos materiales.

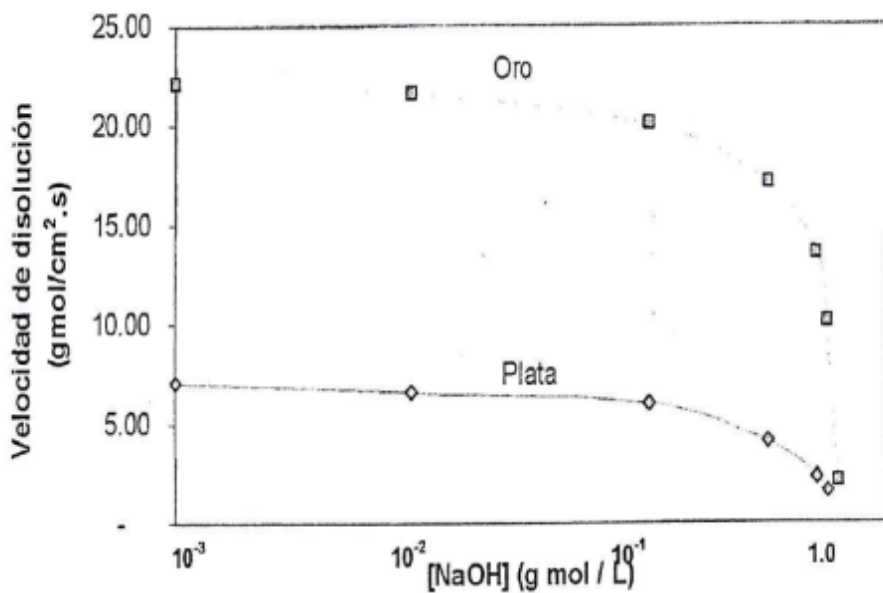
En las plantas de procesamiento de minerales, se utilizan agentes alcalinizantes como la cal o la sosa cáustica (NaOH) para mantener los niveles operativos de pH entre 10,5 y 11,5. La cal es la opción preferida por sus potentes propiedades alcalinizantes y su rentabilidad. Por otro lado,

la soda cáustica es más costosa, pero ofrece la ventaja de su alta solubilidad, lo que simplifica su preparación, manipulación y dosificación.

Para lograr una comprensión más profunda del impacto de la alcalinidad en la velocidad de disolución del oro y la plata, se sugiere referirse a la figura 10.

Figura 10

Efecto del pH sobre la velocidad de disolución.



Nota. Hidrometalurgia del Oro, (Leobardo et al., 2011)

Como señala (Soto Cahuana, 2021) en su investigación, la cal empleada en la lixiviación alcalina:

“...desempeña un papel de gran importancia en el proceso general de cianuración para la extracción del oro y la plata. Algunas de las funciones más relevantes incluyen: Inhibir la hidrólisis del cianuro, neutralizar los componentes ácidos de la mena, agua fresca y productos de reacciones, flocular las lamas, aglomerar finos en el pre-tratamiento de la mena a lixiviar en pilas y por último facilitar el tratamiento de efluentes y control de la contaminación ambiental.” (p.23).

2.2.5.3. Efecto del Tiempo de Cianuración.

“La tasa de recuperación del oro es muy variable y en ella influyen factores como la composición mineralógica, el tamaño de las partículas de oro, la porosidad del mineral, la concentración de cianuro en la solución y el grado de liberación.”(Soto Cahuana, 2021, p. 23)

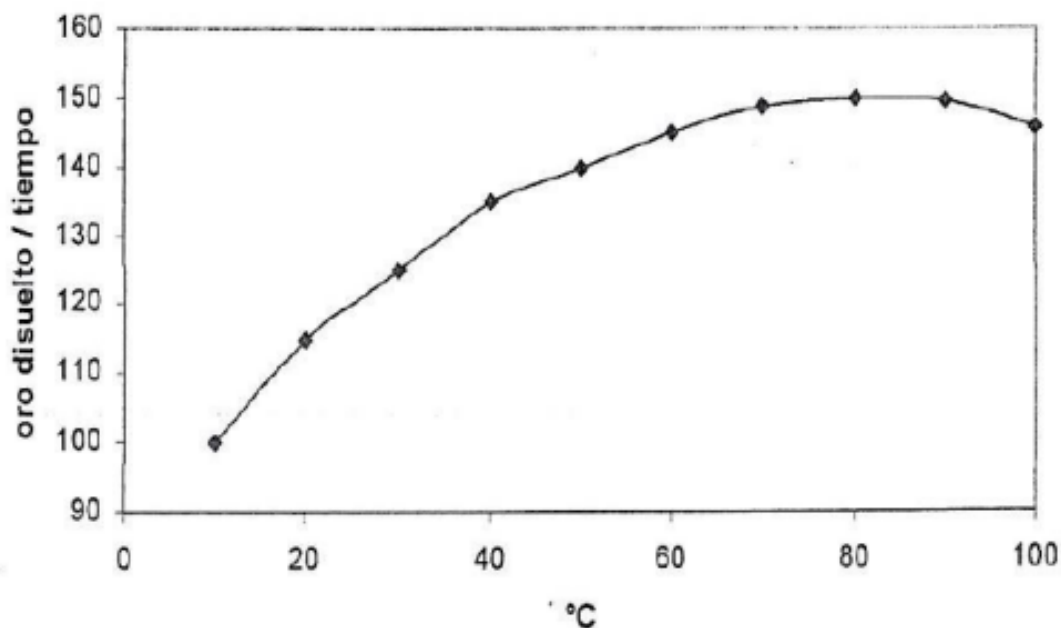
Según este estudio, la utilización de peróxido de hidrógeno en la lixiviación con NaCN afectará significativamente a la duración de la lixiviación.

2.2.5.4. Efecto de la temperatura.

Soto Cahuana (2021), evidencia que “el aumento de la temperatura aumenta la velocidad de disolución del oro, al tiempo que reduce el contenido de oxígeno en la solución. Por consiguiente, existe una temperatura óptima para alcanzar la mayor velocidad de disolución del oro, aproximadamente a 85°C” (p.24), este efecto se ilustra en la figura 11.

Figura 11

Efecto de la temperatura sobre la velocidad de disolución de Au en 0.25% NaCN.



Nota. Fuente: Hidrometalurgia del Oro, (Leobardo et al., 2011).

2.2.5.1. Efecto del Tamaño de partícula

En los minerales que contienen oro de grano grueso, es práctica común concentrarlo gravimétricamente mediante equipos gravimétricos, antes de la cianuración. Si no se hace así, puede producirse una disolución incompleta de estas partículas gruesas dentro del plazo de cianuración. Otro método para la reducción de la granulometría de minerales auríferos que entran en la cianuración consiste en moler y clasificar los minerales en un circuito cerrado.

“La velocidad de disolución del oro está directamente relacionada con la superficie expuesta, determinada por el tamaño de la partícula mineral y el grado de liberación del metal precioso. Por lo general, una reducción del tamaño de las partículas (que se traduce en una mayor liberación de oro) provoca un aumento de la velocidad de disolución. Sin embargo, la disminución del tamaño de las partículas aumenta la aparición de reacciones competitivas con otros elementos, lo que hace necesario un equilibrio entre el tamaño de las partículas, la tasa de extracción de oro y el consumo de cianuro.” (Marsden, 1992).

Una partícula de oro con un grosor de 45μ se disolvería en un máximo de 12 horas, mientras que una con un grosor de 150μ lo haría en un máximo de 48 horas. En cambio, una partícula de plata con un espesor equivalente al del oro necesitaría el doble de tiempo para disolverse.

2.2.6. Termodinámica de la Cianuración

Para hacer el estudio de la termodinámica de estos sistemas se estudian los diagramas tensión – pH conocidos en el todo el mundo como Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas de equilibrio termodinámico, se basan en las reacciones que pueden presentarse en los procesos Hidrometalúrgicos, mostrando la extensión de las mismas y la dependencia de variables tales como temperatura, presión, actividad, pH de la solución y potencial.

Los diagramas de Pourbaix, aportan información valiosa de estabilidad de especies, así como los diagramas de Ellingham son la base para la visualización gráfica de los fenómenos a alta temperatura. Estos diagramas permiten establecer posibles reacciones sin tener que recurrir a cálculos termodinámicos para las reacciones que tiene lugar en soluciones electrolíticas acuosas; tales como la corrosión, electrodeposición, geoquímica y química analítica.

En los procesos Hidrometalúrgicos, los diagramas de Pourbaix, permiten establecer las zonas y las condiciones en que es posible lixiviar los minerales o compuestos. Como estos diagramas potencial-pH son de carácter termodinámico, establecen tendencias o viabilidades para que sucedan ciertas reacciones, pero, su principal desventaja radica en el hecho de que no pueden establecer la velocidad con que estas reacciones pueden ocurrir.

La variación de la temperatura en los diagramas de Pourbaix tiene especial importancia debido a que cada diagrama es establecido para una temperatura específica, lo cual implica que se deben de construir para la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso y cuando sea necesario trabajar a varias temperaturas deberá disponerse de varios diagramas para explicar el proceso. La presión por el contrario tiene un efecto despreciable en la termodinámica de los sistemas acuosos, aunque su importancia puede asociarse a los aspectos cinéticos. Como parámetro de concentración solo se considerará los iones H^+ , luego si se desea variar la concentración de otras especies, se obtendrán familias de líneas, normalmente, los diagramas de Pourbaix se construyen a presión de una atmósfera y a $25^{\circ}C$.

Relaciones Termodinámicas (Cengel, Y; Boles, M;, 2012), (Suarez, 2014).

Los diagramas se derivan del conocimiento de la estequiometria de las reacciones y de los datos de las energías libres de formación de las especies que participan de ellas. Para una reacción química en la que solo participan moléculas neutras o iones positivos o

negativos la expresión que permite calcular la constante de equilibrio a la temperatura que interesa es:

$$\Delta G^\circ = -4.575T \log K \quad (3)$$

El valor de la energía libre se puede determinar conociendo las energías libres estándar de formación y calculando como la suma de productos menos la suma de reactivos, respetando la estequiometría de cada reacción así:

$$\Delta G^\circ = \sum v_i u_i^\circ \quad (4)$$

Dónde:

ΔG° : energía libre de Gibbs de la reacción

v_i : Coeficiente estequiométrico

u_i° : Energía libre de formación de los compuestos de la reacción

Tomando la ecuación 3, a 25°C queda entonces:

$$\Delta G^\circ = -1363.35 \log K \quad (5)$$

En donde K es la constante de equilibrio y puede asociarse a las actividades de las especies que participan en la reacción y hacerla así dependan de la actividad de los iones H^+ y de esta manera permite obtener el pH de equilibrio para la reacción química considerada a 25°C. Para el caso de una reacción electroquímica, es decir, en la que participan además electrones, la reacción a usar es la de Nernst y se plantea así:

$$E^\circ = -\frac{\Delta G^\circ}{nF} \quad (6)$$

En donde:

E° : Potencial de equilibrio estándar de la reacción electroquímica (voltios)

n: Número de electrones que participan en la reacción

F: Equivalente electroquímico, 96500 coulombios

ΔG° : Energía libre de Gibbs, se calcula en (3)

Como las tensiones absolutas o los potenciales de equilibrio de electrodos no son accesibles a la medición, pero puesto que, la tensión en los bordes de una cadena electroquímica formada por dos o más electrodos es medible, se puede entonces referenciar, todas las tensiones de electrodos con respecto a la tensión de uno de ellos elegido convencionalmente. Se ha elegido como referencia para toda temperatura de electrodo normal al hidrógeno (ENH). Lo que corresponde a un electrodo de platino, cubierto de negro de platino, continuamente en contacto con H_2 puro a una presión de 1 atm e inmerso dentro de una solución en donde los iones H^+ tienen una actividad de 1 y que no contiene ninguna otra sustancia que afecte el potencial de electrodo del platino. El potencial entre este electrodo y la solución se considera nulo a toda temperatura. Las reacciones correspondientes son:



En donde: $a_{H^+} = 1$; $P_{H_2} = 1$ atm; por convención entonces $E_0 = 0$ para $\Delta G_0 = 0$. Entonces se puede saber la tensión absoluta de un electrodo referido a la tensión del electrodo de hidrógeno en las condiciones del estado estándar. Escribiendo las reacciones electroquímicas en el sentido de la reducción se tiene:



Y la ecuación de Nernst se puede escribir:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox}{Red} \quad (9)$$

En donde E corresponde a la tensión de equilibrio de la reacción electroquímica, en voltios y el término logarítmico representa el valor recíproco de la constante de reacción K, la cual se hace depender de H^+ .

La ecuación (9) puede escribirse reemplazando términos así:

$$E = E^0 + \frac{0.06}{n} \ln \frac{Ox}{Red} \quad (10)$$

En forma general la reacción de transformación de una especie oxidada A en una especie reducida B se tiene:



Donde A y B pueden ser especies solubles o neutras o especies insolubles

Misari Chuquipoma (2010) según su publicación titulada Metalurgia del Oro afirma que:

“Para comprender los mecanismos fisicoquímicos involucrados en el proceso de lixiviación del oro, es fundamental analizar sus propiedades termodinámicas clave, especialmente sus estados estables y metaestables, los cuales suelen ser representados en el diagrama de Pourbaix.” (p.15).

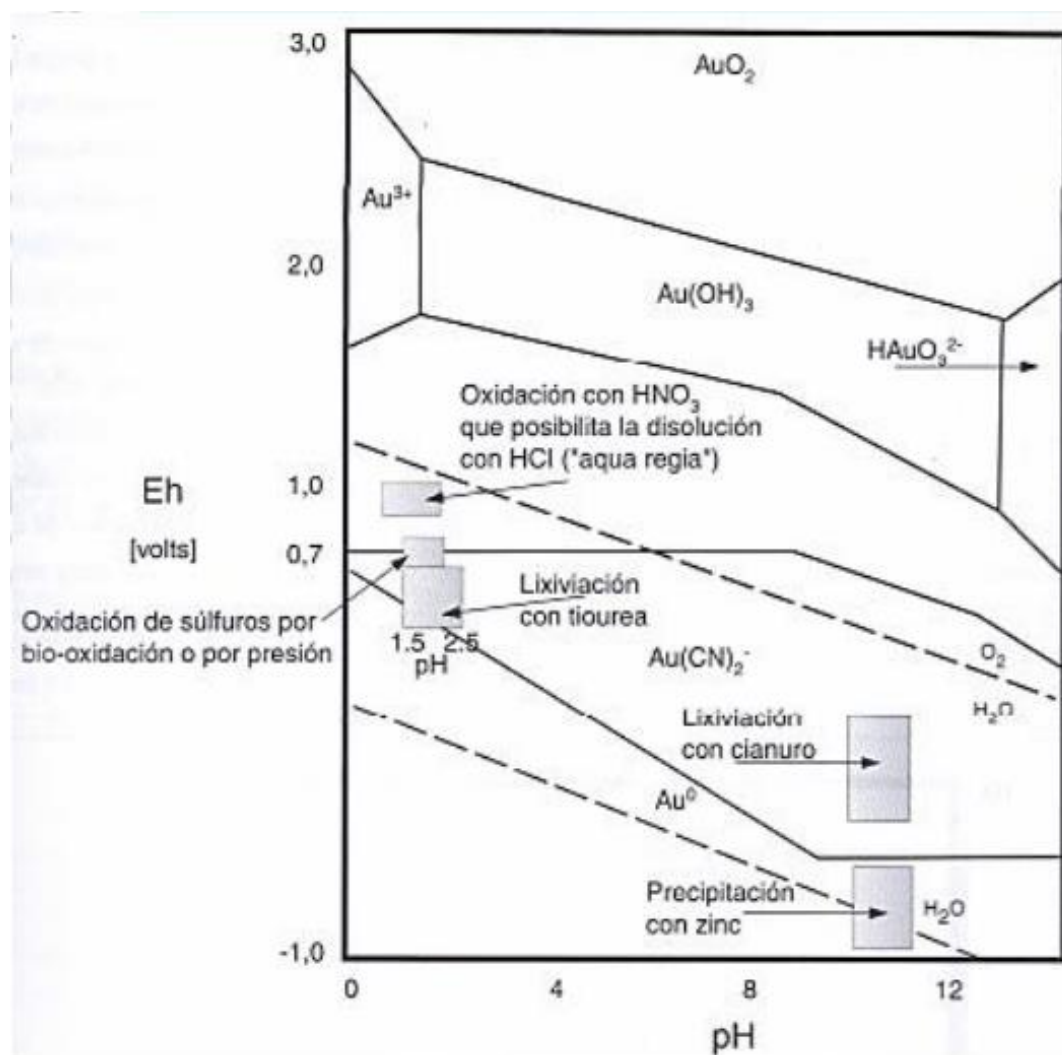
“Es crucial examinar las principales características termodinámicas del oro metálico, centrándose en sus estados estables y metaestables, tradicionalmente representados en el diagrama de Pourbaix. Este diagrama correlaciona el potencial de óxido-reducción (Eh) del oro con el pH de la solución. El diagrama de Pourbaix muestra que la formación de compuestos como Au (OH)₃, AuO₂, HAuO₃ y el ion Au³⁺ requiere potenciales redox elevados, superiores al potencial de descomposición del oxígeno. En consecuencia, la extracción de oro metálico resulta muy difícil debido a su notable estabilidad.” (p.15).

En la figura 12 se detalla “el diagrama Au-H₂O-CN, la reacción Au (CN)₂ + e = Au + 2CN se produce dentro del rango de estabilidad del agua. La región de estabilidad del complejo aurocianuro está delimitada por una frontera lineal que presenta una pendiente inicial pronunciada

(atribuible a la hidrólisis del cianuro a niveles de pH inferiores a 9) seguida de una tendencia casi horizontal debida a la influencia oxidante del oxígeno en un entorno alcalino. Este efecto de oxidación facilita la eficacia de la reacción de lixiviación mediante la formación de aurocianuro. Además, el diagrama ilustra que compuestos como $\text{Au}(\text{OH})_3$, Au^{3+} y HAuO_3 experimentan una reducción al introducir el cianuro” (Misari Chuquipoma, 2010, p. 15)

Figura 12

Diagrama de Pourbaix para el Sistema Au-CN-H₂O.



Nota: Diagrama de Pourbaix para el sistema Au – CN – H₂O a 25 °C para [Au]=10⁻⁴ M y [CN]=10⁻³ M

(Hiskey & Atlury, 1988)

2.2.7. *Cinética de la Lixiviación*

En todo proceso de metalurgia extractiva, la producción y la economía del proceso están directamente ligadas a la velocidad de las reacciones químicas que interviene en él. Además, es importante interpretar la velocidad de reacción en términos de los mecanismos o de los modelos cinéticos que explican cómo tiene lugar la reacción. Esta información es importante desde el punto de vista de la ingeniería del proceso porque ella permite predecir las velocidades obtenidas cuando las condiciones de operación varían.

Contrario a la pirometalurgia donde las temperaturas son elevadas y las velocidades de reacción son altas, de forma que el equilibrio se alcanza rápidamente; en los procesos hidrometalúrgicos se realizan bajo condiciones termodinámicamente favorables, pero, las temperaturas son poco elevadas, las velocidades de reacción son bajas y las limitaciones son sobre todo de orden cinético. Es por esta razón que la velocidad de reacción toma gran importancia en estos casos.

Generalmente y como ya se ha mencionado anteriormente, las reacciones son heterogéneas, en el caso de la lixiviación se trata de reacciones de un sólido con los reactivos en solución, la velocidad de la reacción global será determinadas por la velocidad de la etapa más lenta que es entonces aquella que controla la cinética global.

Las etapas a considerar son:

- Transporte de los reactivos en solución hacia la interfase sólido / líquido.
- Adsorción de los reactivos en la interfase.
- Reacción química en la interfase
- Desorción de los productos solubles que proviene de la reacción
- Transporte de estos productos hacia la solución.

Eventualmente, si se forma una capa porosa de productos subproductos sólidos de la reacción, en la interfase, se deben considerar:

- Difusión de reactivos a través de esta capa porosa.
- Difusión de productos a través de la capa porosa.

2.2.7.1. Proceso de Difusión

Un sólido en contacto con un líquido se recubre de una capa de líquido inmóvil a través de la cual los reactivos deben difundirse antes de alcanzar la interfase. Esta capa líquida, en el caso de las soluciones acuosas, tiene un espesor de $3 \cdot 10^{-3}$ cm y es llamada la capa de Nernst.

La existencia de esta capa está ligada a:

- La adhesión del líquido a la superficie.
- La velocidad de desplazamiento de la capa como consecuencia de la viscosidad del líquido. Ella crece de cero hasta la velocidad media del desplazamiento del líquido a una cierta distancia de la interfase.
- La difusión en el caso de las soluciones se fundamenta mediante la ley de Fick, así:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (12)$$

Dónde:

J = Debito de la sustancia que se difunde por unidad de tiempo en una dirección perpendicular a un plano de referencia de sección unitaria (mol/s/cm^2)

C = Concentración del agente lixivante (mol/cm^3)

$\partial C / \partial x$ = gradiente de concentración en una misma dirección.

D = coeficiente de difusión de la sustancia (cm^2/s)

También la ley de Fick puede escribirse:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dn}{dt} \quad (13)$$

En donde:

n = número de moles de la sustancia que se difunde

t = tiempo

A = área de la sección a considerar

Combinando las reacciones (12) y (13), se obtiene la expresión general de la ley de Fick:

$$\frac{dn}{dt} = -DA \frac{\partial C}{\partial x} \quad (14)$$

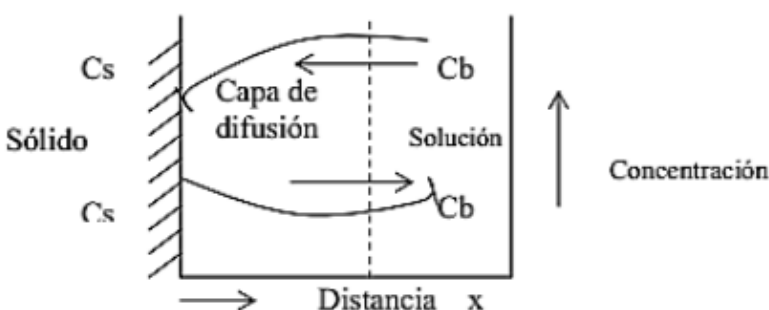
El signo menos (-), representa la disminución de n con el tiempo t . En la mayor parte de los sistemas encontrados en hidrometalurgia, no se comete un error si se considera a D como constante e independiente de la concentración. Para las soluciones acuosas, a 25°C , $D = 0.3 \cdot 10^{-5}$ a $3.5 \cdot 10^{-5}$ (cm^2/s). Consideremos una reacción (sólido / líquido) y el sólido tiene una superficie que es plana, como se indica en la Figura 13, así.

El gradiente de concentración se escribe:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_b - C_s}{\Delta x} = -\frac{J}{D} \quad (15)$$

Figura 13

Difusión de una superficie plana



Nota. Representación esquemática de la difusión (Espinoza, 2018)

Si x se cuenta como positiva a partir de la superficie del sólido hacia la solución, la difusión se hace en la dirección de la superficie. Normalmente, Δx , toma un valor medio determinado por las condiciones de agitación. Si la velocidad de agitación aumenta entonces Δx tiende a δ . La velocidad de la reacción, si la velocidad en la interfase es más rápida que la difusión de reactivos en la interfase, está determinada por:

$$\frac{D}{\Delta x} A(C_b - C_s)$$

Y en este caso C_s es nulo, por lo tanto, la velocidad es KAC , en donde $K=D/\delta$. Esto significa que $-\frac{dC}{dt} = KC$ y al integrar entre C y C_0 (concentración inicial para $t=0$) se obtiene

$$\ln \frac{C_0}{C} = Kt$$

En un diagrama ($t, \log C$), se obtiene una línea recta con una pendiente igual a $-2.303/K$.

A menudo es posible eliminar la variable “agitación”, si se adopta una velocidad de agitación suficientemente elevada. De todas maneras, esto podría asegurar que la difusión sea eliminada como etapa controlante de la cinética de reacción. Si la velocidad de agitación aumenta, entonces Δx tiende a δ y la difusión a través de la capa límite mínima puede todavía controlar la cinética, pero en este caso es necesario medir la energía de activación puesto que para un proceso difusional está es baja (2 a 5 kcal/mol).

Para medir esta energía de activación recurrimos a la ecuación de Arrhenius así:

$$K = \gamma e^{\frac{-\Delta E}{RT}} \quad (16)$$

En donde:

K = constante de velocidad específica

γ = factor de frecuencia

ΔE = energía de activación.

Tomando logaritmo a ambos lados de la ecuación de Arrhenius se tiene:

$$\ln K = \frac{-\Delta E}{RT} + \ln \gamma \quad (17)$$

$$\log K = \log \gamma - \frac{\Delta E}{2.303RT} \quad (18)$$

Si se consideran 2 valores de temperatura (T_1 y T_2) se puede calcular directamente el ΔE si se conocen los valores de K para las dos temperaturas, así:

$$\log \frac{K_2}{K_1} = \frac{\Delta E}{2.303R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

La ecuación de una línea recta cuya pendiente negativa es $-\Delta E/2.303R$

En un proceso controlado por difusión en lixiviación, la agitación aumenta la velocidad de disolución; mientras que, si es controlado químicamente, la agitación no tiene ningún efecto.

Una lixiviación controlada por difusión es poco sensible a la temperatura, contrario a un proceso controlado químicamente. En efecto el coeficiente de difusión, D , es función lineal de T , así si D crece si T crece. Mientras que la constante de velocidad química, como lo acabamos de ver en la ecuación de Arrhenius, depende exponencialmente de T , con valores elevados de la energía de activación entre 10 a 20 kcal/mol.

Una lixiviación controlada por difusión puede volverse un proceso controlado químicamente cuando se aumenta la concentración de los reactivos en la fase líquida.

2.2.7.2. Geometría de la Interfase

En lixiviación como hay transferencia de masa de una fase a la otra a través de una interfase, la velocidad de la reacción debe depender de la superficie de esta interfase, entre más área, mayor es la velocidad de reacción. Es por esto que las partículas finas sólidas se lixivian más rápido que las gruesas.

Pero, la forma del sólido tiene también una gran influencia sobre la velocidad de la reacción.

Muestras laminadas, tales como placas o discos donde una sola de las tres dimensiones x,y,z, es pequeña, presentan una mínima variación de la superficie en el proceso de lixiviación

Mientras que para partículas o granos de tendencia esférica, donde x,y,z son semejantes, presentan una gran variación de la superficie de la interfase dado que la velocidad de reacción es idéntica en todas direcciones.

Para el caso de una esfera, la velocidad de lixiviación se escribe así:

$$\frac{dn}{dt} = -KAC = -4\pi r^2 KC \quad (19)$$

Dónde:

n = es el número de moles del sólido que permanecen intactas a un tiempo t.

r = radio de la partícula esférica

C = Concentración del reactivo en la solución.

Si productos sólidos porosos se forman en la superficie de la reacción, la difusión a través de esta capa de productos de reacción puede llegar a controlar la cinética global de la lixiviación, este caso es muy frecuente en la práctica, ver Figura 14

2.2.8. Mecanismos de Disolución del Oro

Desde el punto de vista de Salazar Zeballos (2014), deducimos que “ El proceso de disolución puede ser considerado como un fenómeno electroquímico, en el cual el oxígeno adquiere electrones de la superficie metálica en la región catódica, mientras que el metal cede electrones en la región anódica.”(p.21). Para mayor claridad, en la Figura 15 se ilustran las dos reacciones de media celda.

Figura 14

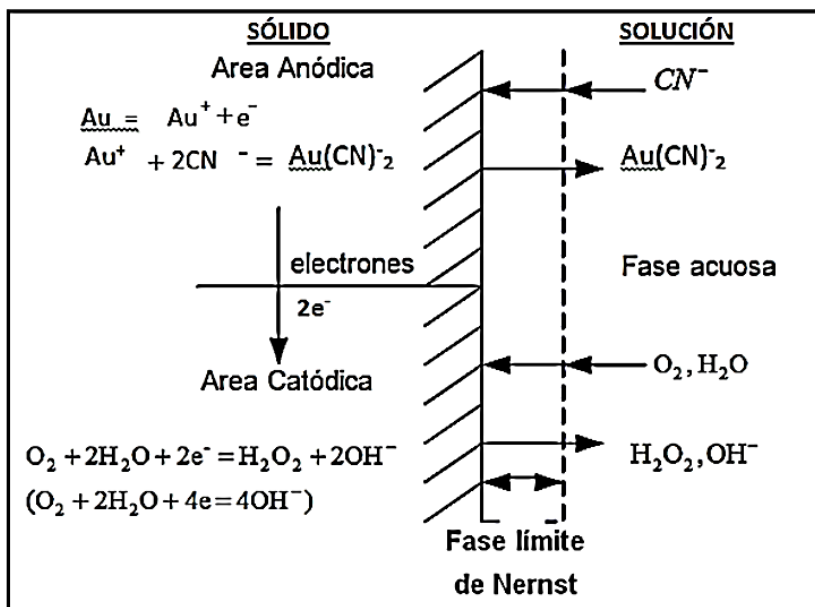
Modelo del núcleo recesivo con subproductos.



Nota. Representación gráfico adaptada (Espinoza, 2018)

Figura 15

Reacciones de media celda Disolución de oro.

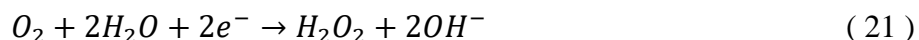


Nota: Celda de corrosión local en la superficie del oro en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno, i_a =corriente anódica, i_b =corriente catódica (Marsden & House, 2006)

La etapa de oxidación o reacción anódica es la formación del complejo aurocianuro.



Y la fase de reducción o reacción catódica se refiere a la generación de peróxido de hidrógeno:

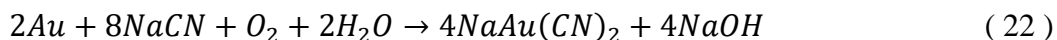


2.2.9. Solubilidad del Oro en Soluciones Acuosas de Cianuro

A través del tiempo se desarrollaron varias teorías con el objetivo de explicar el proceso de disolución de oro y plata en soluciones acuosas de cianuro. Algunas de las teorías propuestas son las siguientes:

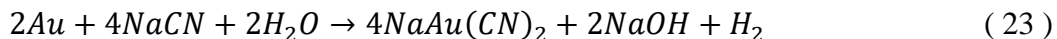
2.2.9.1. Teoría del Oxígeno

En 1846, Elsner formuló una propuesta que destacó la relevancia del oxígeno en la disolución del oro en soluciones de cianuro. La reacción química postulada por Elsner se expresa de la siguiente manera:



2.2.9.2. Teoría de Hidrógeno

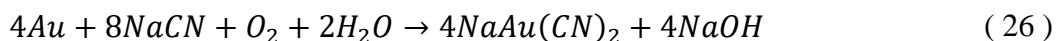
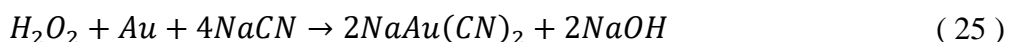
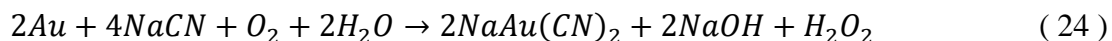
Entre los años 1888 y 1892, J. Janin presentó una propuesta en la que patentó una solución de oro que evidencia que, durante el proceso de cianuración del oro, se produce gas hidrógeno. La reacción química involucrada es la siguiente:



En 1893, Maclaurin y en 1896 Chrity llevaron a cabo pruebas experimentales que confirmaron que el oxígeno es un elemento esencial en el proceso de cianuración del oro, respaldando así la teoría de Elsner.

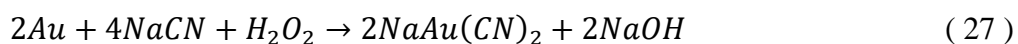
2.2.9.3. Teoría del Peróxido de Hidrógeno

En 1896, G. Bodlander planteó que el proceso de disolución del oro a través de una solución de cianuro se lleva a cabo en dos etapas diferenciadas, las cuales siguen las siguientes reacciones:



El peróxido de hidrógeno se produce como un producto intermedio, tal como se puede apreciar. Según Bodlander, se produce un 70% de la cantidad teórica de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que debería formarse de acuerdo con la reacción química.

Diversas investigaciones han evidenciado que el proceso de disolución de oro y plata en una solución de cianuro de sodio y peróxido de hidrógeno, en ausencia de oxígeno, ocurre de forma progresiva. En consecuencia, se alude a la segunda reacción de Bodlander.:

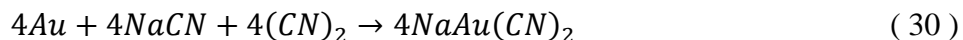
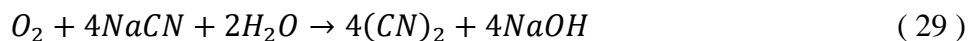


La cual es una reacción de reducción:



2.2.9.4. Teoría de Formación de Cianógeno

En 1896, S. B. Chisty planteó que la existencia de oxígeno era un requisito esencial para la producción de gas cianógeno, el cual identificó como el agente activo encargado de la disolución de los metales oro y plata. Las reacciones propuestas son las siguientes:



La suma de estas dos reacciones da la ecuación de Elsner.

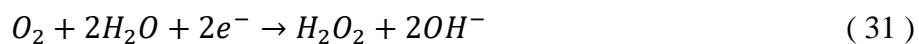
2.2.9.5. Teoría de la Formación de Cianatos

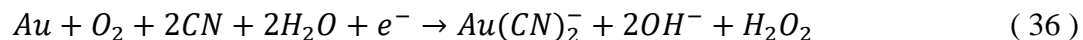
En 1905, Mac Acur planteó la hipótesis de que el cianato de potasio, generado a través de la oxidación del cianuro, podría actuar como el agente activo en el proceso de disolución, en el cual se necesitaría oxígeno. No obstante, en 1913, Green desacreditó esta teoría al comprobar que el cianato no ejerce ningún efecto como disolvente en el oro y la plata.

“En 1934, *Barsky* y sus colegas establecieron la energía libre estándar de formación de los iones complejos de cianuro de oro y plata. Posteriormente utilizaron esta información para calcular la variación de la energía libre en las reacciones químicas propuestas. *Las teorías de Elsner y Bodlander*, que muestran un elevado valor de constante de equilibrio, han sido preferidas, lo que indica que la reacción persistirá hasta que se haya consumido todo el cianuro o se haya disuelto todo el oro. La ecuación de *reacción de Janin* se considera termodinámicamente inviable debido a su constante de equilibrio notablemente baja”(Soto Cahuana, 2021, p. 17)

2.2.9.6. Teoría de la Corrosión

Como señala Soto Cahuana (2021) que “en 1943, B. Boonstra fue el pionero en identificar y evidenciar que la disolución del oro en una solución acuosa de cianuro guarda similitudes con un proceso de corrosión de metales. En este proceso, el oxígeno presente en la solución es reducido a peróxido de hidrógeno e iones oxhidrilo. Boonstra postuló que la reacción de Bodlander podía desglosarse en los siguientes pasos” (p.18):

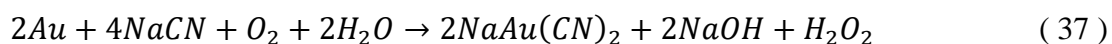




Más tarde en 1947, esta teoría fue experimentada demostrada por Thompson.

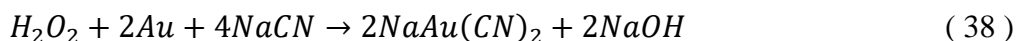
2.2.9.7. Postulado de Habashi

Durante los años 1966 y 1967, Habashi respalda la primera ecuación de reacción de Bodlander.



- Por cada dos equivalentes de oro extraído, se requiere la oxidación de 1 mol de (O₂)
- Cada 2 equivalentes de Au disuelto reaccionan con 4 moles de NaCN.
- Durante la disolución de oro y plata, se genera peróxido de hidrógeno, produciéndose un mol de H₂O₂ por cada dos equivalentes de metal disuelto.

Experimentalmente se ha comprobado que la disolución del oro y la plata en una solución de NaCN + H₂O₂ y escasez de (O₂) es un proceso de velocidad reducida. Por lo contrario, la reacción 38:



La disolución de oro y plata se ve más efectivamente inhibida en condiciones óptimas, lo que se evidencia por el exceso de H₂O₂ que provoca la oxidación del ion cianuro a cianato. Este último no interviene en el proceso de disolución de los metales.



2.2.10. Peróxido de hidrógeno

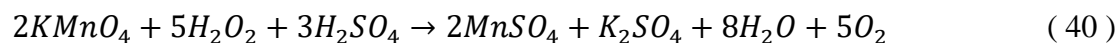
2.2.10.1. Propiedades físicas

“El peróxido de hidrógeno es un líquido más denso que el agua y es completamente soluble en agua. Aunque las soluciones acuosas de peróxido de hidrógeno tienen

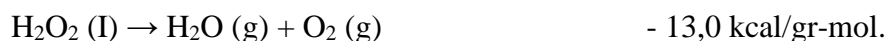
similitudes con el agua, presentan un olor sutil y penetrante. A pesar de su falta de inflamabilidad, la descomposición del peróxido de hidrógeno puede generar calor y oxígeno que pueden encender materiales inflamables. Algunas de sus propiedades físicas incluyen un peso molecular de 30,01, una densidad de 1,45, un color incoloro, un olor inodoro, un sabor metálico y una consistencia aceitosa.” (Guillen Puma, 2019, p. 44)

2.2.10.2. Propiedades químicas

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un potente agente oxidante capaz de oxidar una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos. También presenta propiedades reductoras débiles, como la reducción del óxido de plata a plata y de los permanganatos al estado manganoso. El proceso de reducción del peróxido de hidrógeno siempre da lugar a la liberación de oxígeno (O_2)



Incluso las soluciones de peróxido de hidrógeno de mayor pureza presentan un nivel de inestabilidad, ya que experimentan una descomposición constante en oxígeno y agua, liberando energía en forma de calor.



Teniendo en cuenta la investigación de Guillen Puma (2019), rescatamos lo siguiente:

“El índice de descomposición aumenta con la temperatura, incrementándose en un factor de 2,3 por cada $10^\circ C$ de aumento.” (p.45).

“La tasa de descomposición estándar del peróxido comercial es notablemente baja, con una disminución inferior al 1% anual. No obstante, el proceso de degradación puede acelerarse dentro de la instalación industrial por la presencia de cantidades mínimas (menos

de 1 ppm) de impurezas solubles, o por la interacción con superficies inadecuadas (como acero dulce, cobre y bronce).” (p.45).

“Los iones metálicos con diferentes estados de oxidación sirven como catalizadores para la descomposición homogénea del peróxido de hidrógeno. Además de éstos, también existen catalizadores orgánicos solubles, siendo la catalasa el más conocido. La catalasa, una enzima presente en varios organismos vivos, acelera la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno.” (p.46).

La mayoría de las situaciones peligrosas que se producen durante el almacenamiento, manipulación y uso del H_2O_2 se atribuyen a su poder oxidativo, así como al gas y al calor producidos durante su descomposición. Los incendios y descomposiciones, que a menudo conducen a explosiones por la presión de los equipos, son los incidentes más frecuentes. Sin embargo, los sucesos relacionados con este tipo de actividad suelen ser poco frecuentes.

2.2.11. Proceso de Lixiviación Asistida por Peróxido de Hidrógeno (PAL)

El proceso PAL se implantó inicialmente en la industria minera en la década de 1980, y varias minas adoptaron esta tecnología. El aumento de la extracción de minerales de óxidos y sulfuros de oro ha provocado un incremento potencial de la utilización de PAL en los procesos de cianuración. La cianuración consiste en convertir el oro (Au) y la plata (Ag) en complejos de cianuro solubles en agua. Además de los iones de cianuro, se necesita un agente oxidante para oxidar el oro elemental. Durante casi un siglo, se empleó aire comprimido para introducir oxígeno en el lodo de mineral, sin abordar el problema del suministro de oxígeno. En los últimos años, se ha producido un cambio hacia la mejora del contenido de oxígeno disuelto en el lodo a medida que la tecnología de extracción de oro se ha ido perfeccionando. La insuficiente transferencia de oxígeno de la fase gaseosa (burbujas de aire) a la fase líquida (pulpa de mineral) se ha identificado

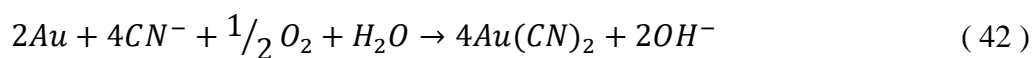
como la causa principal de los bajos niveles de oxígeno disuelto y de la lentitud de la cinética de extracción, lo que se traduce en una reducción de las tasas de recuperación de oro. En consecuencia, se ha reconocido la importancia de los oxidantes en los procesos de cianuración, lo que ha llevado a centrarse en la mejora del suministro de oxígeno mediante la aplicación de técnicas avanzadas de dispersión de gases y la sustitución del aire comprimido por oxígeno puro.

En el sector minero, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) está reconocido como un agente oxidante con capacidad para reaccionar con el cianuro y eliminarlo:



La aplicación de este concepto puede parecer contradictoria con el procedimiento mencionado.

“Hace cinco años, una empresa alemana desarrolló un proceso para aplicar peróxidos en la cianuración, sin causar efectos nocivos en el cianuro. El interés en buscar un proveedor de oxígeno como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en lugar de aire surge de la condición importante para la disolución del oro, la presencia de oxígeno disuelto en la pulpa,”(Morales Laurente, 2016, p. 24).



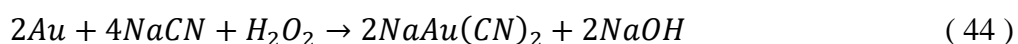
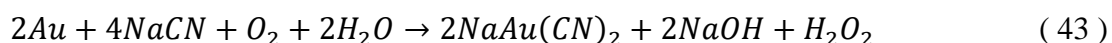
El principal objetivo del proceso PAL es suministrar oxígeno en estado líquido. Gracias a los esfuerzos de investigación, se ha demostrado que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) puede servir como proveedor de (O_2) en el proceso de cianuración del mineral de oro. Para prevenir reacciones secundarias, es necesario cumplir las siguientes condiciones:

- Antes de añadir peróxido de hidrógeno a la pulpa, ésta debe diluirse a una concentración inferior al 30%.

- La dosis de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) debe ajustarse en función de la concentración de oxígeno en la pulpa.
- Un aspecto crucial del sistema de control es un electrodo de oxígeno especializado diseñado para resistir la naturaleza abrasiva de la pulpa.

2.2.12. *Proceso “PAL” Aplicado a Cianuración del Oro*

El proceso asistido por peróxido de hidrógeno (PAL) se fundamenta en el papel que desempeña el peróxido de hidrógeno en dos ecuaciones fundamentales de disolución del oro.



Las propuestas realizadas por Bodlaender (reacciones 43 y 44) en 1896 demuestran la formación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como intermedio en el proceso de disolución del oro. Esto apoya los hallazgos de Elsner y Faraday, que establecieron la importancia del oxígeno en la disolución del oro.

De ello se deduce que tanto el peróxido de hidrógeno como el oxígeno facilitan la disolución del oro en presencia de cianuro. Es probable que una asociación comparable se aplique también a la cianuración de la plata.

El proceso PAL no sólo proporciona peróxido de hidrógeno diluido (H_2O_2) como oxidante en la segunda ecuación de las ecuaciones BODLAENDER, sino que también produce oxígeno en la primera ecuación a través de la descomposición del H_2O_2 . Por consiguiente, se puede inferir que tanto el peróxido como el oxígeno favorecen la disolución del oro en presencia de cianuro, y se podría esperar una relación similar en el proceso de cianuración de la plata.

El proceso PAL no solo proporciona el oxidante en la segunda ecuación de BODLAENDER en forma de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) diluido, sino que también libera oxígeno en la primera ecuación al permitir la descomposición del H_2O_2 .



La cinética excepcionalmente rápida observada en el proceso PAL, en comparación con los métodos convencionales que utilizan aire comprimido u oxígeno puro, puede atribuirse a la velocidad de reacción más rápida de la segunda ecuación de BODLAENDER, en la que el peróxido se utiliza directamente como agente oxidante, a diferencia de la primera ecuación.

El oxígeno producido a través de la descomposición del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se disuelve ampliamente en la fase líquida, dando lugar a una distribución homogénea dentro del lodo. Esta distribución mejora las propiedades de transferencia de masa en comparación con los métodos de aireación tradicionales. Es crucial asegurar que la concentración de oxígeno disuelto en la pulpa no supere el umbral de saturación de 8 ppm (Guillen Puma, 2019, p. 80).

2.2.12.1. Oxígeno disuelto: parámetro importante en cianuración

El objetivo principal del proceso de cianuración es transformar el oro (Au) y la plata (Ag) en complejos de iones de cianuro que puedan disolverse en agua. Para crear complejos solubles, es necesario oxidar los metales preciosos. Para conseguirlo, se añade aire comprimido a la pulpa para proporcionar oxígeno (O_2) como agente oxidante. La velocidad a la que se disuelven el oro y la plata está estrechamente relacionada con la cantidad de oxígeno disuelto en la solución.

Lograr la extracción completa del oro que es accesible a través del cianuro sólo puede lograrse dentro de un período de lixiviación apropiado. Las pérdidas de oro en los procesos de

lixiviación suelen producirse si la pulpa está saturada de oxígeno, esto ocurre por dos razones principales:

En numerosas situaciones, los procedimientos habituales de aireación resultan inadecuados para lograr la saturación de oxígeno deseada, ya que se enfrentan a desafíos en la transferencia de oxígeno de la fase gaseosa a la fase líquida. Esta dificultad es especialmente importante en las pulpas de alta viscosidad. A pesar de los intensos esfuerzos de aireación, estas pulpas suelen presentar bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Es importante señalar que las importantes burbujas de aire que se forman en estas pulpas viscosas no poseen la misma capacidad oxidante sobre el oro que el oxígeno disuelto.

Otra razón es que siempre es necesario un oxidante durante la fase inicial del proceso de lixiviación.

Por lo tanto, lograr la saturación del nivel de oxígeno disuelto en el tanque de lixiviación inicial es crucial. Una menor concentración de oxígeno disuelto en la pulpa se traduce en una mayor cantidad de material que se desplaza por la planta de tratamiento sin someterse a una lixiviación completa.

La razón de ello es que la duración de la retención es a menudo inadecuada para recuperar todo el oro que puede ser lixiviado por cianuro.

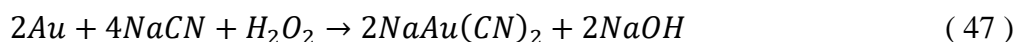
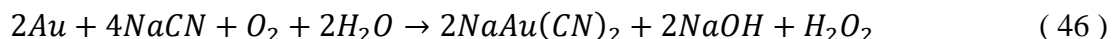
La distribución homogénea del oxígeno en la pulpa se garantiza introduciendo el oxidante en forma líquida. El peróxido de hidrógeno realiza esta tarea con mayor eficacia que los métodos tradicionales de aireación.

2.2.12.2. Proceso PAL en la Cinética de extracción del oro.

“La concentración de oxígeno disuelto en la solución de lixiviación afecta la velocidad de extracción del oro. No obstante, en el proceso PAL, no se evidencia esta relación. A pesar de

trabajar con niveles de oxígeno similares a la lixiviación convencional, en el método PAL se observa una cinética de extracción notablemente más acelerada.”(Morales Laurente, 2016, p. 27)

La justificación del empleo de una cinética más rápida radica en la posible presencia de H_2O_2 y oxígeno disuelto. Bajo la premisa de la generación de H_2O_2 como intermedio, se puede plantear una reacción de cianuración que luego participa directamente como agente oxidante.



La reacción inicial que implica O_2 oxidante presenta una velocidad notablemente inferior en comparación con la reacción posterior que implica H_2O_2 .

Durante el proceso PAL, la cantidad de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que puede utilizarse es ajustando fácilmente en comparación con los métodos tradicionales de cianuración. Como resultado, se prefiere la reacción de cianuración más rápida.

La aplicación del PAL en Norteamérica es un ejemplo notable de la mejora de la velocidad de reacción. Este proceso implica el tratamiento de un mineral de sulfuro con un tamaño de partícula fino mediante flotación, seguido de la lixiviación del concentrado resultante. El concentrado de alta ley, que contiene 3 kg de oro por tonelada métrica (TM) y 8 kg de plata por TM, requirió un período de lixiviación de 5 a 9 días para lograr una extracción del 98% de oro y del 90% de plata. La utilización de PAL dio lugar a una recuperación final de oro en sólo el 25% del tiempo de retención original, mientras que la tasa de recuperación de plata pasó del 8% al 98% (640 oz/TM).

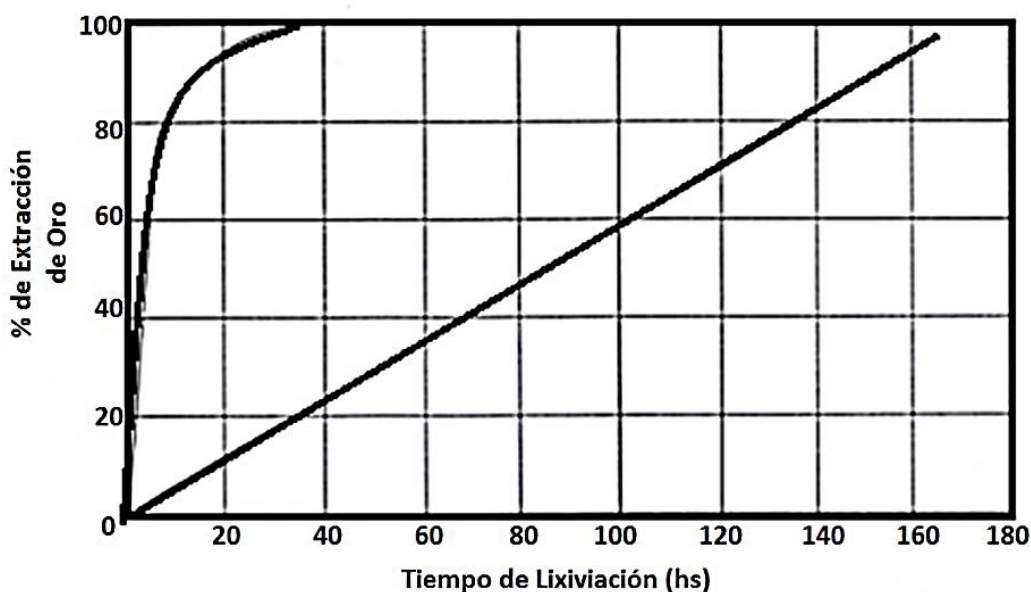
2.2.12.3.Reducción en el tiempo de retención.

“La exitosa implementación de la lixiviación con aire y peróxido (PAL) conlleva a una disminución notable en el tiempo requerido para la extracción total del oro susceptible de ser

disuelto por cianuro. Esta reducción en el tiempo de proceso resulta en una disminución en la cantidad de cianuro consumido en reacciones no vinculadas a la disolución del oro. En un caso específico en América del Norte, la duración del proceso se redujo al 25% de la retención original, lo que generó un ahorro del 75% en el uso de cianuro.”(Guillen Puma, 2019, p. 84). Ver Figura 16.

Figura 16

Velocidad de la cinética de extracción.



Nota: Reduce el tiempo de retención en 25% del proceso convencional (Guillen Puma, 2019)

2.2.12.4. Prevención de pérdida de cianuro por volatilización

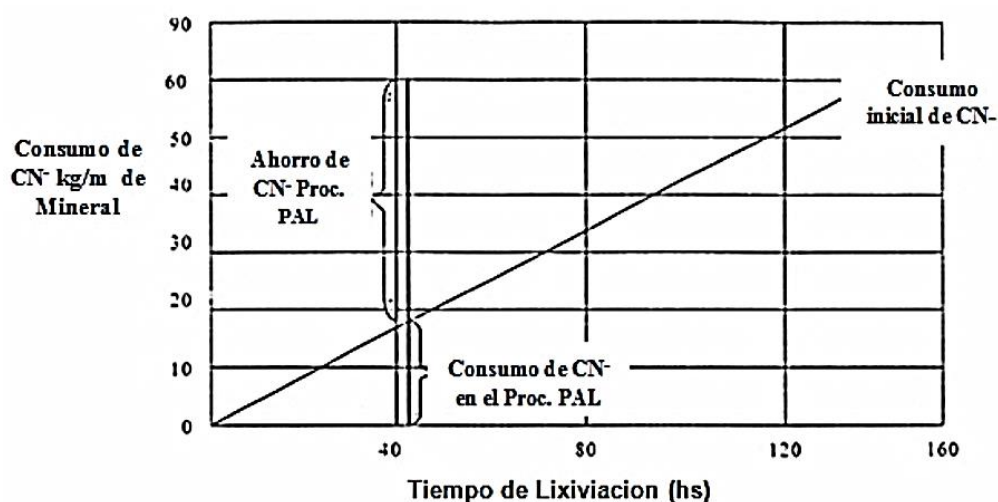
Según la investigación realizada por Guillen Puma (2019), durante los procesos de cianuración, siempre hay una cierta cantidad de cianuro que se pierde a través de la volatilización de cianuro de hidrógeno (HCN). Esto ocurre debido al equilibrio entre los iones cianuro (CN⁻) y el ácido cianhídrico (HCN), que es un gas disuelto en la solución. De acuerdo a Guillen Puma (2019) “el grado de pérdida de cianuro depende del nivel de pH y de la intensidad de la aireación. A niveles de pH más bajos, una parte significativa del cianuro existe como HCN (50% a pH 9,4 y 20% a pH

10), que puede liberarse mediante aireación.” (p.84). A medida que aumenta el pH, el equilibrio se desplaza hacia los iones CN^- , con lo que se reduce la pérdida de cianuro. La intensidad de la aireación, junto con el pH, desempeña un papel crucial en la pérdida de cianuro por volatilización. (p.84)

En la figura 17, observamos el ahorro significativo del cianuro utilizando el proceso PAL.

Figura 17

Ahorro de cianuro, reduciendo tiempo de lixiviación con uso del H_2O_2 .



Nota. Fuente:(Guillen Puma, 2019)

2.2.12.5. Pasivación de sulfuros que consumen cianuro

El peróxido de hidrógeno, como agente oxidante, posee la capacidad de pasivar minerales de sulfuro. Las investigaciones de Guillen Puma (2019) indican que:

Los minerales sulfurados, en particular la pirrotita y la arsenopirita, tienen tendencia a absorber cantidades significativas de cianuro, dando lugar a la formación de tiocianato (SCN^-). Mediante la intensa oxidación proporcionada por el H_2O_2 , la superficie de los minerales que contienen azufre se pasiva. Este fenómeno ha sido corroborado por la disminución simultánea del consumo de cianuro y de la formación de SCN^- (p. 84)

En la investigación realizada, se puede concluir que el peróxido de hidrógeno no sólo suministra oxígeno, sino que también provoca menos gastos de consumo de cianuro. En consecuencia, se produciría un aumento favorable de la rentabilidad económica del tratamiento de minerales auríferos complejos.

2.2.12.6. Métodos de Control del Contenido del Peróxido de Hidrógeno en la Solución Lixivante.

La compañía española DEGUSSA ha creado un sistema de dosificación automatizado para llevar a cabo la dosificación de peróxido de hidrógeno de manera alternativa, supervisando el nivel de oxígeno en la pulpa. El sistema se fundamenta en el siguiente principio:

- Antes de incorporarse a la pulpa, es necesario diluir el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), siendo factible utilizar agua del proceso convencional en lugar de agua purificada.
- Para la medición continua del oxígeno disuelto en la pulpa, es necesario utilizar una sonda de oxígeno especial que sea resistente a su acción extremadamente abrasiva.
- Es posible mantener un nivel constante de oxígeno disuelto en las plantas al ajustar la velocidad de adición de peróxido de hidrógeno de acuerdo con la señal recibida de la sonda de oxígeno

2.2.13. Termodinámica de la Cianuración con Peróxido de Hidrógeno.

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un compuesto químico que puede descomponerse en agua y oxígeno. La termodinámica del peróxido de hidrógeno se refiere al estudio de sus propiedades en relación con el calor y la energía. Algunos aspectos termodinámicos importantes del peróxido de hidrógeno incluyen su entalpía de formación, entalpía de descomposición, entropía y energía libre de Gibbs.

La entalpía de formación del peróxido de hidrógeno se define como la variación de energía que se produce al formarse una molécula de H_2O_2 a partir de sus elementos constituyentes (hidrógeno y oxígeno) en sus estados estándar. La entalpía de descomposición se refiere a la cantidad de calor necesaria para descomponer una molécula de H_2O_2 en agua y oxígeno.

La entropía es una medida del desorden o la distribución de la energía en un sistema, y la energía libre de Gibbs es una medida de la disponibilidad de energía para realizar trabajo. Estas propiedades termodinámicas son importantes para comprender el comportamiento del peróxido de hidrógeno en diferentes condiciones de temperatura y presión.

En resumen, la termodinámica del peróxido de hidrógeno proporciona información crucial sobre su estabilidad, reactividad y comportamiento en diferentes entornos, lo que es fundamental para su aplicación en diversas industrias y procesos químicos.

El agua oxigenada, denominada científicamente peróxido de hidrógeno, se emplea en el procedimiento de lixiviación con el fin de optimizar la extracción de metales contenidos en minerales. El peróxido de hidrógeno actúa como agente oxidante, ayudando a disolver los minerales metálicos y liberar los metales de interés.

Algunos de los beneficios de usar peróxido de hidrógeno en la lixiviación incluyen:

- ✓ Aumento de la velocidad de disolución de minerales.
- ✓ Mejora en la recuperación de metales.
- ✓ Reducción del consumo de reactivos más costosos.

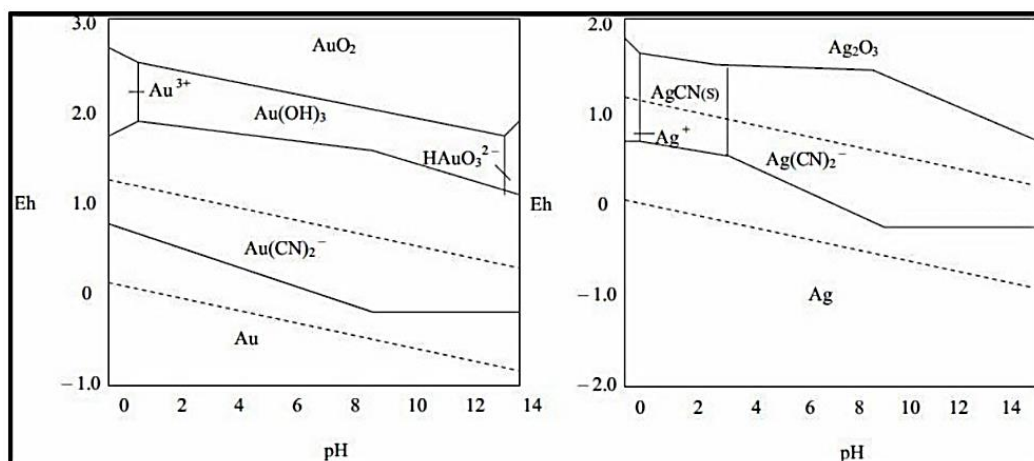
Sin embargo, es importante considerar que el uso de peróxido de hidrógeno puede requerir condiciones específicas de pH, temperatura y concentración para lograr los resultados deseados.

Los gráficos proporcionados por Pourbaix (1966) son herramientas valiosas para presentar datos termodinámicos en diagramas de potencial frente a pH. Estos diagramas permiten visualizar las fases estables en condiciones que van de la oxidación fuerte a la reducción.

Finalmente, en la figura 18, podemos observar los diagramas que ofrecen información sobre la descripción de las reacciones, su distribución y las fases que inciden en los procesos hidrometalúrgicos.

Figura 18

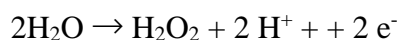
Diagrama Eh-pH para los sistemas Au-CN-H₂O y Ag-CN-H₂O a 25°C.



Nota: Adaptada de Concentración de todas las especies solubles = 10⁻⁴M, [CN⁻]=10⁻³M, PO₂ =1atm (Xue & Osseo-Asare, 1985)

2.2.14. Peróxido de Hidrógeno en la Disolución del Oro

El estudio del comportamiento electroquímico de las disoluciones de agua oxigenada no es tan simple como podría parecer a primera vista, a pesar de la reacción que se produce.



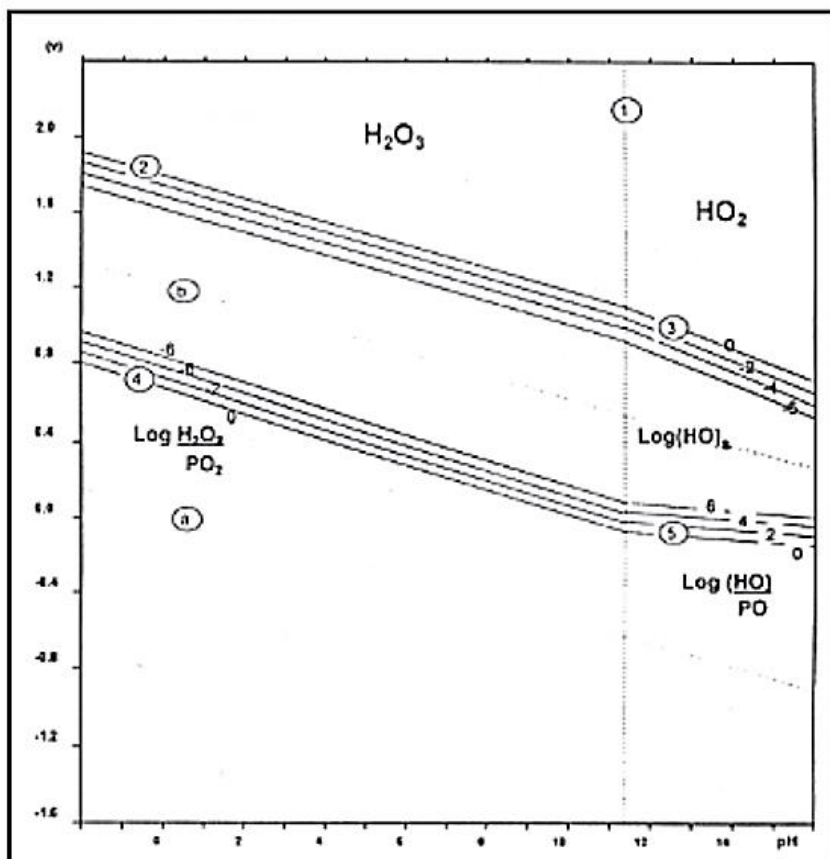
Cuya condición de equilibrio es:

$$E = 1,776 - 0,0591 \text{ pH} + 0,0295 \log (\text{H}_2\text{O}_2)$$

Las condiciones de equilibrio son utilizadas para trazar el diagrama de equilibrio del peróxido de hidrógeno a una temperatura de 25°C. Se puede observar en la Figura 19 las condiciones de equilibrio de la disolución de peróxido de hidrógeno.

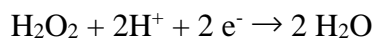
Figura 19

Diagrama de equilibrio del H₂O₂ a 25°C.

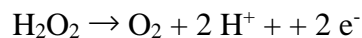


Nota: (Xue & Osseo-Asare, 1985)

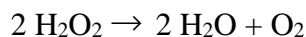
A 25°C, las disoluciones de agua oxigenada son siempre termodinámicamente inestables, independientemente del pH y el potencial. En la región entre las dos familias de líneas previamente analizadas, el agua oxigenada exhibe una inestabilidad doble, lo que la lleva a reducirse a agua, como se expresa en la reacción.



Y al oxidarse a O₂ según la reacción:

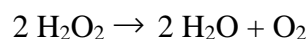


Es decir, a descomponerse en agua y oxígeno según.



Por lo tanto, un compuesto que incluye oxígeno se encuentra en proximidad a una superficie metálica cuyo potencial se sitúa en una zona de doble inestabilidad.

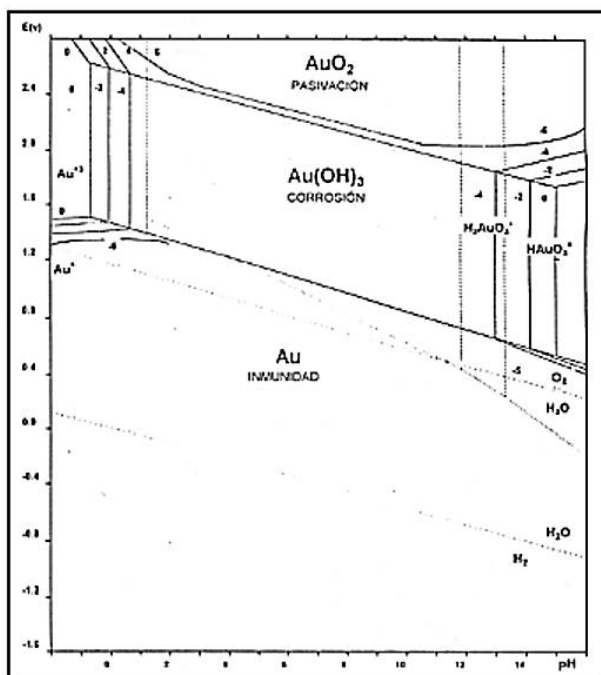
La descomposición espontánea del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno se produce a través de la siguiente reacción:



Si el agua oxigenada se descompone de manera espontánea en agua y oxígeno sobre una superficie metálica, entonces dicha superficie debe tener un potencial cuyo punto representativo se encuentre en la región de doble inestabilidad.

Figura 20

Diagrama de estabilidad $\text{Au} - \text{H}_2\text{O}$ a 25°C 1 *Atm.*



Nota: (Xue & Osseo-Asare, 1985)

En la figura 20, podemos apreciar el diagrama de estabilidad del oro a condiciones de 25°C de temperatura y una atmosfera de presión.

2.2.15. Ventajas y Desventajas

Según Guillen Puma (2019), en relación al proceso PAL, se puede afirmar que:

“El avance más reciente en la mejora química de la cianuración implica la incorporación de H_2O_2 como agente oxidante líquido. El sistema de lixiviación asistida por peróxido (PAL) permite la utilización de este potente oxidante en los procesos de cianuración, al tiempo que evita cualquier interacción entre el H_2O_2 y el cianuro. La integración del H_2O_2 en la cianuración conduce a una aceleración de la cinética de extracción en comparación con los métodos convencionales que dependen del aire comprimido o del oxígeno como oxidantes. Esta cinética de extracción mejorada ha dado lugar a mayores tasas de recuperación de oro y a una reducción de la duración de la lixiviación. La utilización de un oxidante potente en la cianuración sirve para disminuir el consumo de cianuro acortando el tiempo de procesamiento, evitando las pérdidas de cianuro causadas por la volatilización del HCl y pasivando el mineral sulfurado que consume cianuro.” (p.93)

“La principal área de aplicación del proceso PAL es el tratamiento de minerales sulfurosos, que requieren cantidades significativas de cianuro y oxígeno. A diferencia de los métodos de aireación convencionales, el proceso PAL demuestra una gran eficacia y rentabilidad cuando se trata de este tipo de mineral. Permite aumentar las tasas de recuperación de oro (entre un 5 y un 20%) y reducir el uso de cianuro hasta en un 50%. En consecuencia, en estos escenarios se justifica económicamente el empleo del más costoso H_2O_2 .” (p.94)

Según la investigación bibliográfica de Guillen Puma, (2019) “La primera implementación de la adición controlada de peróxido de hidrógeno en el proceso PAL, introducida en 1987 en la mina de FAIRVIEW en TRANSVAAL, Sudáfrica Oriental, demostró significativas ventajas en comparación con la técnica de aireación convencional.” (p.94)

Estas ventajas son:

- Una cinética de lixiviación mejorada.
- Se logra una mayor recuperación de oro al extraer la totalidad del oro que es accesible al cianuro.
- El ahorro en el consumo de cianuro se ha logrado mediante la implementación de medidas de eficiencia en el proceso.
- La reducción del costo de operación es un factor clave a considerar.

CAPÍTULO III

Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General.*

La optimización de la extracción de oro se logra utilizando el peróxido de hidrógeno como un reactivo aportante de oxígeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C.

3.1.2. *Hipótesis Específicas.*

- Una concentración de 1400 ppm de NaCN incrementa los resultados en la extracción de oro.
- La concentración de peróxido de hidrógeno más adecuada que optimiza la extracción de oro es de 1.04%.
- La interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno influye significativamente en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación.

3.2. Variables

3.2.1. *Variables Dependientes*

- % de extracción de Au.

3.2.2. *Variables Independientes*

- Concentración de cianuro de sodio (ppm)
- Concentración de peróxido de hidrógeno (%)
- pH

3.2.3. *Variables Intervinientes*

- Composición mineralógica.
- Temperatura del ambiente.
- Concentración de oxígeno del ambiente.
- Presión ambiental.

3.2.4. Operacionalización de Variables

	Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Rango/Niveles	unidades	Indicador	Técnicas e instrumentos
Dependientes	Extracción de Au	“Es la fracción de oro presente en la solución rica, en relación al oro presente en mineral, multiplicado por 100 para ser porcentaje.”(Uceda Herrera, 2016)	“La cuantificación del porcentaje de oro diluido en el proceso de lixiviación por agitación es esencial en los balances metalúrgicos.” (Uceda Herrera, 2016)	70 - 95	%	mg de oro existente en la solución PLS	Ensayo al fuego, balance metalúrgico
	Concentración de NaCN	La relación entre los solutos disueltos en un reactivo de lixiviación y el volumen total de la solución se conoce como eficacia de lixiviación.	Cuantificación de la concentración de cianuro de sodio (NaCN) presente en un volumen específico de una solución acuosa.	0.06- 0.14	%	Concentración del reactivo NaCN que se requiere en una solución lixivante	Titulación
Independientes	Concentración de H₂O₂	Es la proporción del reactivo disuelta con relación con la totalidad de solución.	Determinación de la concentración de H ₂ O ₂ que se necesita para mejorar la extracción de oro.	0.31 – 1.04	%	Concentración del peróxido de hidrógeno a la que se obtendrá mayor extracción	Medición del volumen de H ₂ O ₂ adicionado al proceso
	pH	“El coeficiente que indica el nivel de acidez o basicidad de una solución acuosa se conoce como pH.” (Uceda Herrera, 2016)	Determinación del coeficiente del grado de basicidad para la cianuración	10.5 – 11.5	pH	Coeficientes de valores en medio alcalino	Papel panpeha

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

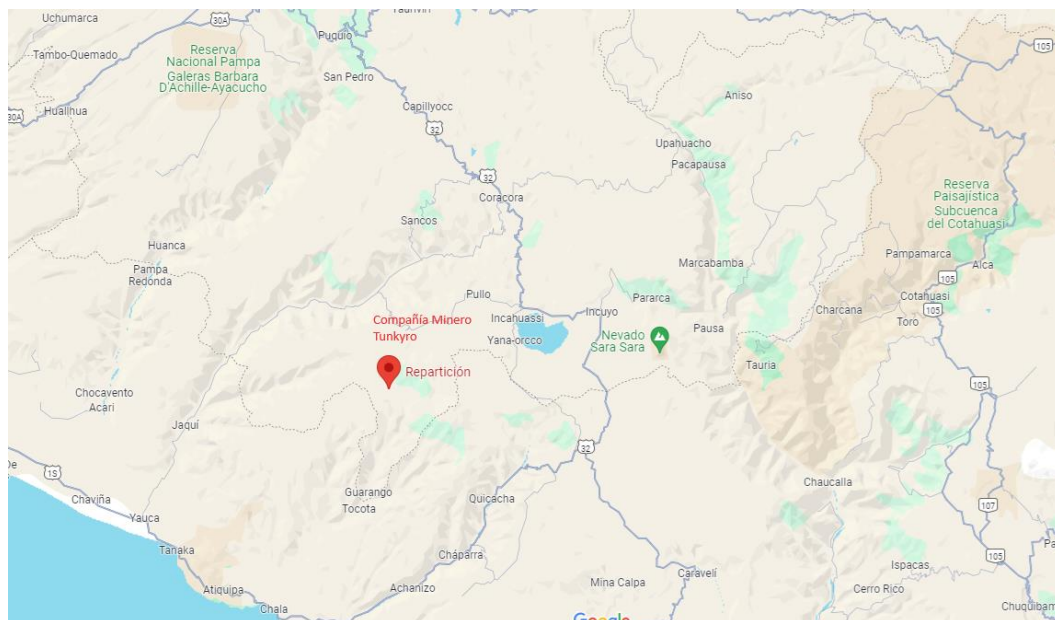
Metodología de la Investigación

4.1.Ámbito del Estudio

Los minerales auríferos complejos que fueron objeto de estudio para esta investigación, fueron obtenidos del yacimiento minero Valetita IV pertenecientes a la Compañía Minera Tunkyro S.A.C, localizadas en el departamento de Ayacucho, provincia de Parinacochas y distrito de Pullo. Y a una altitud de 3005 msnm.

Figura 21

Ubicación Geográfica de la Compañía Minera Tunkyro.



Nota: Adaptado de Google Mapa (<https://www.google.com/maps/dir/Pullo,+05620/-15.399024,-74.0081662>)

4.1.1. Información de la Empresa

Según la información de la SUNAT la empresa minera es identificada de las siguientes formas:

- **RUC:** 20602717403

- **Razón Social:** COMPAÑIA MINERA TUNKYRO S.A.C. - TUNKYRO S.A.C.
- **Nombre Comercial:** Tunkyro S.A.C.
- **Tipo Empresa:** Sociedad Anónima Cerrada
- **Condición:** Activo

Figura 22

Compañía Minera Tunkyro S.A.C.



Nota. Adaptado de Google Mapa (<https://www.google.com/maps/dir/Pullo,+05620/-15.399024,-74.0081662>)

4.1.2. Mineralogía del Objeto de Estudio.

El yacimiento minero Valetita IV consiste en relleno de fisuras con una mineralización de Au-Fe-Pb-Zn-(Cu) de origen hidrotermal, con cuarzo lechoso, pirita, arsenopirita, esfalerita, galena, calcopirita y oro nativo

Tabla 2

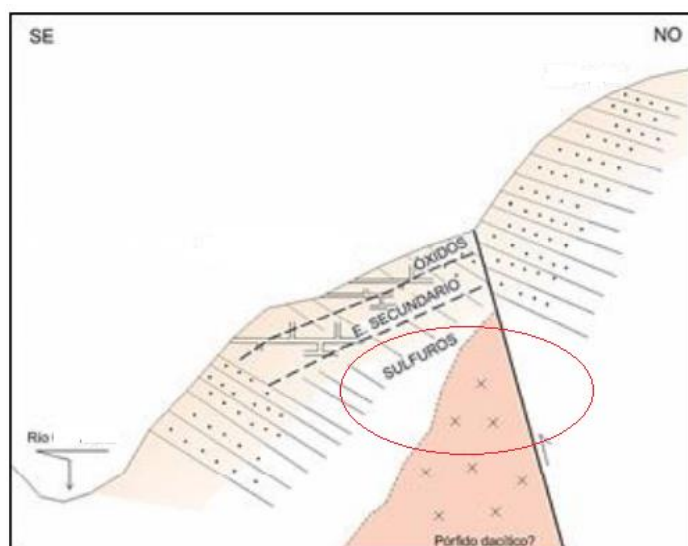
Composición mineralógica del yacimiento minero.

Especie	Formula	%
Cuarzo	SiO ₂	45
Pirita	FeS ₂	15
Arsenopirita	FeAsS	10
Calcopirita	CuFeS ₂	<1
Esfalerita	ZnS	<1
Galena	PbS	<1

Nota. Fuente (Compañía Minero Tunkyro)

Figura 23

Corte esquemático de la mina



Nota. Nuevos depósitos de mineral en proceso de explotación, Adaptada de (INGEMMET,2017)

4.2. Diseño de la Investigación

4.2.1. Tipo de Investigación

La tesis titulada *“Optimización de la Extracción de Oro Utilizando el Peróxido de Hidrógeno en el Proceso de Cianuración por Agitación de Minerales Auríferos Complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C. Pullo-Ayacucho.”* de acuerdo a la clasificación por su

orientación de los objetivos trazados, es una investigación del tipo aplicado, tecnológico o experimental.

De acuerdo a Rivero Lazo et al., (2021),” la investigación **aplicada** tiene como objetivo comprender la realidad y sus problemáticas, con el propósito de intervenir, transformar y mejorar dicha realidad, en aras del bienestar humano. Es fundamental contar con un marco teórico en toda investigación aplicada, aunque en el caso de la investigación empírica, son las implicaciones prácticas las que cobran verdadera relevancia.” (p. 25).

Según Arias Odón (2017), “la investigación **tecnológica** se caracteriza por la búsqueda y adquisición de nuevos conocimientos prácticos y aplicables en el diseño, fabricación o avance de productos y servicios innovadores, así como la creación de nuevos materiales, prototipos, maquinaria o procesos que ayuden a la resolución de problemas, satisfacción de necesidades y mejora de la calidad de vida de la sociedad”.(p.72).

La investigación **experimental** “se caracteriza por la manipulación de la variable independiente por parte del investigador, quien aplica diversos tratamientos o estímulos para alterar la realidad con el fin de observar los efectos resultantes sobre la variable dependiente. Este enfoque permite establecer una relación causa-efecto.”(Arias Odón, 2017, p. 26)

4.2.2. Nivel de Investigación.

La presente tesis de investigación se realizó a un nivel explicativo.

- **Nivel Explicativo.** Son estudios que plantean relaciones de causalidad; aquí la estadística es insuficiente para completar sus objetivos, por lo que aparece el concepto de “criterios de causalidad”, donde el experimento es el criterio más importante, aunque no es indispensable para llegar a una conclusión. Desde el punto de vista analítico, explica el comportamiento de una variable dependiente en función de otras variables

independientes. Pero requiere de control, la finalidad del control es descartar las asociaciones aleatorias, casuales o espurias; de las verdaderas relaciones causales, que no se pueden diferenciar en los estudios relacionales

4.2.3. *Diseño de Investigación*

La investigación está desarrollada mediante el diseño experimental, ya que se busca lograr resultados a base de control, muestreo y observación de nuestras variables. Durante la experimentación se manipula más de una variable independiente para controlar de esa manera el incremento o disminución de ellas y sus respectivos efectos. En esta investigación se hizo cambios en los valores de las variables independientes y determinar su efecto con la variable dependiente. Los métodos experimentales nos permiten poner a prueba la hipótesis de relaciones causales.

En la presente investigación, las causas vendrían a ser: La concentración de NaCN, concentración de H₂O₂ y el pH, el efecto es el porcentaje de extracción de oro.

$$X \rightarrow Y$$

CAUSA → EFECTO

Donde:

X: Es la variable independiente, que es manipulada (causa).

Y: Es la variable dependiente, que es el efecto.

En tal sentido, nos apoyaremos en la teoría de diseño factorial 2^k porque nos permite relacionar las variables independientes y la variable dependiente que en este caso es la extracción de oro. Según la teoría de diseño factorial para un diseño de 2^3 , presentan 8 pruebas y en las cuales adicionamos dos pruebas en los puntos centrales. Y fueron desarrollados usando valores de: un mínimo, un máximo y un intermedio.

- ✓ -1: Mínima
- ✓ +1: Máxima
- ✓ 0 : Intermedio

Por consiguiente, la matriz de nuestro diseño factorial se muestra en la siguiente tabla 3.

Tabla 3

Matriz de Diseño Factorial 2³

N° Prueba	Valores Codificados			Valores reales			Respuesta
	X1	X2	X3	Concentración de NaCN (PPM)	Concentración de H ₂ O ₂ (%)	(pH)	Y
1	-1	-1	-1	600	0.31	10.5	Y1
2	1	-1	-1	1400	0.31	10.5	Y2
3	-1	1	-1	600	1.04	10.5	Y3
4	1	1	-1	1400	1.04	10.5	Y4
5	-1	-1	1	600	0.31	11.5	Y5
6	1	-1	1	1400	0.31	11.5	Y6
7	-1	1	1	600	1.04	11.5	Y7
8	1	1	1	1400	1.04	11.5	Y8
9	0	0	0	1000	0.675	11	Y9
10	0	0	0	1000	0.675	11	Y10

Por otra parte, se desarrolló una prueba convencional (**prueba 11**), el cual consistió en realizar la lixiviación con los mismos parámetros de la prueba en la que se obtuvo la mayor extracción de oro, para fines de comparar la incidencia del peróxido de hidrógeno, se realizó sin la adición de este reactivo oxidante.

4.2.4. Enfoque de la Investigación.

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, ya que involucra variables o fenómenos que pueden cuantificarse o medirse fácilmente. Según Fernández (2014), este enfoque utiliza la recopilación de datos para examinar hipótesis a través de la medición numérica y el análisis estadístico, con el objetivo de identificar patrones de comportamiento y validar teorías.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

El objeto de investigación de la presente tesis son los minerales auríferos complejos del nuevo depósito de mineral de la concesión minera Valetita IV pertenecientes a la Compañía Minera Tunkyro, los cuales presentan bajas extracciones de oro mediante el proceso convencional de cianuración por agitación.

4.3.2. Muestra

La muestra brindada por el área de Geología de la Compañía fue de 400 kg inicialmente, de los cuales se obtuvo otra muestra de 50 kg para su posterior traslado a las instalaciones del laboratorio de la Universidad para obtener una muestra final de 12 kg, primeramente, mediante métodos manuales no estadísticos de coneo y cuarteo, posteriormente se cuarteo mediante la técnica de rifleado, donde las cantidades obtenidas se ajustan a los requerimientos de las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio, determinación ley de cabeza, caracterización de mineral y pruebas de molienda.

4.3.3. Selección de la Muestra

Para la selección de la muestra representativa, se realizó mediante diferentes técnicas de muestreos muy importantes, en primera instancia el área de geología utilizó la técnica del muestreo de ranurado discontinuo en los diferentes frentes que disponía la mina, esto para obtener una muestra inicial de 400 kg.

Seguidamente se utilizaron las técnicas de coneo y cuarteo hasta por segunda vez y terminando con la técnica de muestreo por rifles hasta obtener la cantidad de muestra requerida para cumplir con los objetivos de la investigación. Y cabe recalcar que el tipo de muestreo es

probabilístico puesto que cuando se selecciona la muestra aleatoriamente, cada uno de los elementos de la población tiene la misma probabilidad de integrar parte de la muestra.

4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.4.1. Técnicas.

- ✓ Técnicas de muestro de minerales
- ✓ Pruebas a nivel de laboratorio.
- ✓ Información bibliográfica.
- ✓ Reportes de análisis químico, mineralógico.
- ✓ Análisis del sitio web.

4.4.2. Instrumentos.

- ✓ Libros, revistas, artículos, tesis, etc.

4.5. Equipos y Materiales de Laboratorio

4.5.1. Herramientas o Materiales

- ✓ 4 reactores
- ✓ 8 bandejas de metal
- ✓ Plumón indeleble o de pizarra
- ✓ Cuchara de metal
- ✓ 1 manta de geomembrana de 1.5 x 1.5m
- ✓ 1 cuarteador por rifles de metal
- ✓ Badilejo
- ✓ Malla 200
- ✓ Brocha
- ✓ Espátula

- ✓ Bolsas SIPLOP
- ✓ Soporte universal
- ✓ Bureta
- ✓ Vasos precipitados de 20mL
- ✓ Gotero de vidrio
- ✓ Pipeta de 10mL
- ✓ Papel PANPHEA
- ✓ Matraz de 1 L
- ✓ Jarra de 4.5
- ✓ Papel filtro

4.5.2. Equipos:

- ✓ Agitadores de rodillos
- ✓ Balanza Electrónica
- ✓ Estufa eléctrica de secado de muestras de 300 °C
- ✓ Molino de bolas de laboratorio.
- ✓ Molino de rodillos de laboratorio
- ✓ Laptop
- ✓ Cámara fotográfica.
- ✓ Equipos de protección personal.

4.5.3. Reactivos Químicos:

Entre los reactivos utilizados para las pruebas metalúrgicas son:

- ✓ Cianuro de sodio (NaCN)
- ✓ Cal

- ✓ Ioduro de potasio (KI)
- ✓ Nitrato de plata (AgNO_3)
- ✓ Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)
- ✓ Floculante.

4.6. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información.

El tratamiento y el análisis de los datos del estudio se realizaron utilizando modelos estadísticos, concretamente el modelo de diseño factorial 2^3 en el marco del diseño experimental. El objetivo principal del experimento era determinar el efecto de las variables independientes en la variable dependiente. Además de los modelos estadísticos, se empleó el software Minitab 19 para validar los resultados del diseño experimental y evaluar la eficacia del experimento mediante la interpretación de tablas y gráficos.

4.7. Validez y Confiabilidad de Instrumentos.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C., acreditado por el Instituto Nacional de Calidad según la norma NTP ISO/IEC 17025-2017, lo que garantiza la reproducibilidad de los ensayos. Asimismo, las pruebas metalúrgicas se realizaron en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la estimada Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, bajo la supervisión de instructores especializados.

CAPÍTULO V

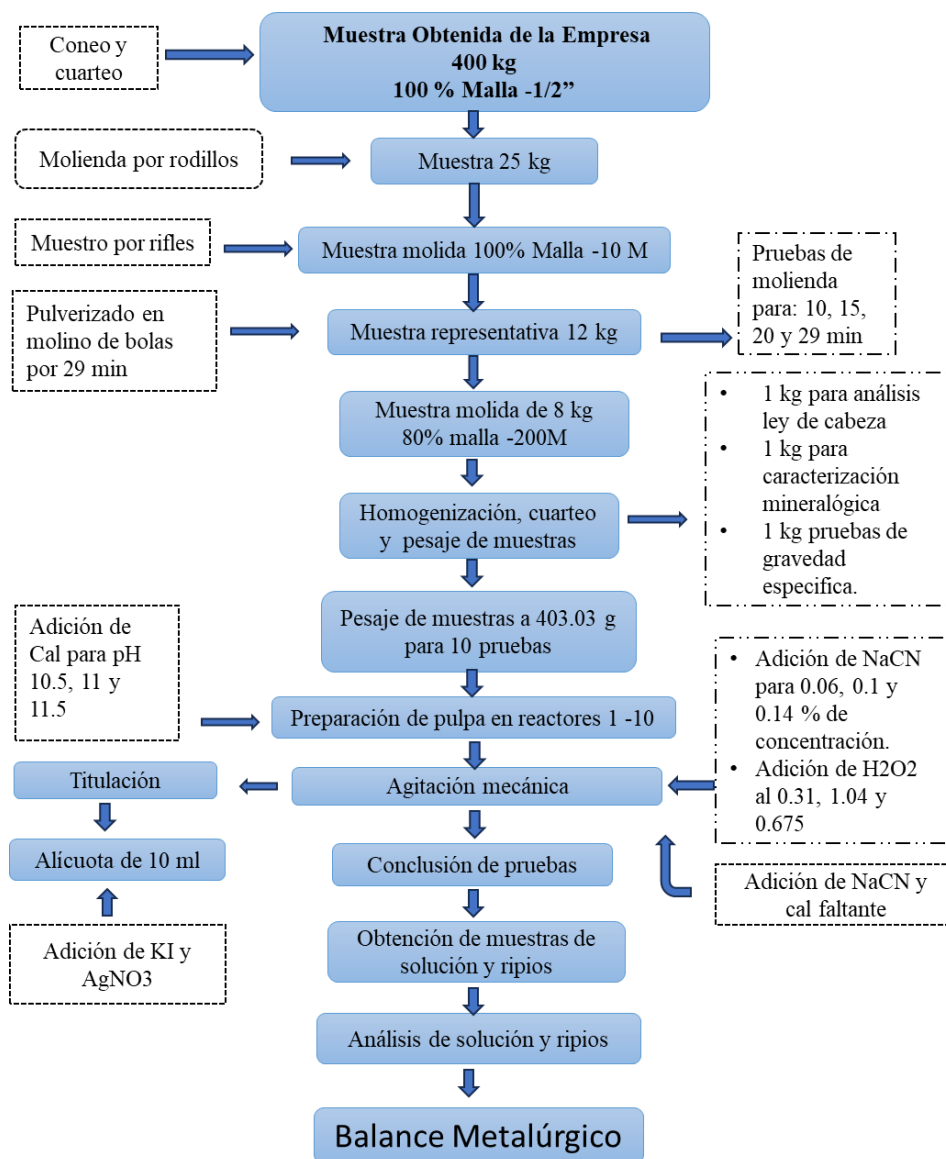
Desarrollo Experimental

5.1.Introducción.

El desarrollo experimental se realizó de acorde al objetivo de optimizar la extracción de oro utilizando el peróxido de hidrógeno. Por lo cual, en la siguiente figura 22, observaremos a manera de resumen, el diagrama de flujo de todo el procedimiento experimental que se realizó.

Figura 24

Diagrama de Flujo del Desarrollo Experimental.



5.2. Procedimientos Preliminares a las Pruebas de Lixiviación.

A continuación, se desarrolla de manera clara y precisa cada procedimiento experimental previos a las pruebas de lixiviación, los cuales fueron necesarios e importantes antes de realizar la agitación mecánica de los reactores:

5.2.1. Preparación Mecánica y Obtención de la Muestra.

En primera instancia, el objeto de investigación fueron los minerales presentes en los nuevos depósitos de minerales descubiertos recientemente en la Compañía Minera Tunkyro S.A.C. los cuales fueron obtenidos mediante el área de geología de la empresa, en total una muestra representativa de 400 kg, suficientes para la investigación tecnológica. Los procedimientos a los cuales fueron sometidos son:

- ✓ La preparación mecánica de la muestra comenzó al someter a una operación de chancado, en cual se obtuvo una reducción del 100% pasante de ½ pulgada, los cuales, mediante la homogenización y cuarteo consecutivo para fines de la investigación realizada en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC, se obtuvo otra segunda muestra de 50 kg de mineral. Ver anexo 9.
- ✓ A partir de los 50 kg de muestra de mineral aurífero y someterlo a la operación de molienda por rodillos, obtuvimos otra tercera muestra representativa de 25 kg de mineral con una reducción del 100% malla – 10M, mediante la técnica manual homogenización y cuarteo.
- ✓ Mediante la técnica de muestreo por rifles se obtuvo otra muestra de 12 kg de mineral. En donde una fracción representativa fue sometido a pruebas de molienda

con el objetivo de determinar el tiempo óptimo de molienda en el cual se obtendría una reducción del 80% de malla -200M.

- ✓ Teniendo el tiempo de Molienda optimo, se procedió a reducir la granulometría del mineral restante mediante la molienda en el molino de bolas durante un tiempo de 29 minutos, estimados de acuerdo a las pruebas de molienda.
- ✓ Finalmente, la parte del procedimiento culmina con la homogenización, cuarteo y pesaje de las muestras requeridas para fines de: 1 kg para el análisis de determinación de ley de cabeza, 1 kg para el análisis de caracterización mineralógica, 1 kg para la determinación de la gravedad específica del mineral y el pesaje de 403.03 kg de mineral en un total de 11 muestras necesarias para realizar la preparación de la pulpa.

En el anexo 9, se puede observar las fotografías de la preparación mecánica y los muestreos realizados.

5.2.2. *Determinación del Tiempo de Molienda Optimo.*

Tomando en cuenta la revisión bibliográfica y las referencias por profesionales en pruebas metalúrgicas, se llegó a la conclusión de tomar como una condición operativa la granulometría del 80% pasante de la malla 200.

Es así como, a partir de una muestra de mineral representativa de 12 kg con 100% de malla -10M, se tomó 4 kg de mineral mediante la técnica de homogenización y cuarteo, para realizar 4 pruebas de molienda con el objetivo de establecer el tiempo óptimo de molienda en el cual se obtuvo una granulometría de mineral igual a 80 % de malla -200M. En la Tabla 4, detallamos los resultados de los análisis granulométricos de minerales, solamente para una malla -200M a diferentes tiempos de molienda. Y en la figura 25 se observa el grafico del tiempo de molienda

versus % -200 malla, donde aún tiempo de 10 minutos se redujo el mineral a una granulometría relativamente baja y que al partir del mismo punto comienza una disminución en la pendiente hasta el punto de obtener una granulometría de 58.8 %. Por consiguiente, pudimos deducir que para una granulometría del 80 % pasante malla 200 se requeriría un intervalo de tiempo mayor a 5 minutos y esto en consecuencia que en el mineral predomina el cuarzo. En la tabla 4 se muestra los resultados de la cinética de molienda.

Tabla 4

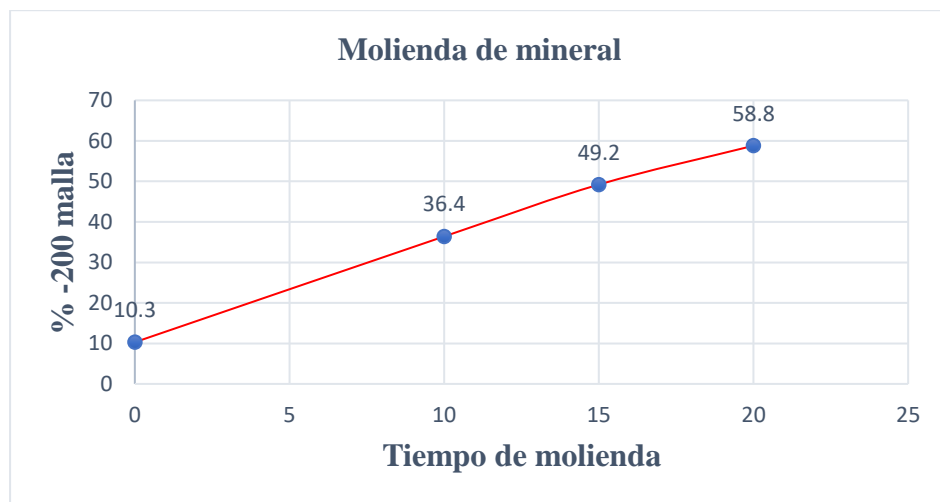
Determinación del Tiempo de Molienda.

Tiempo de Mol. (X) min	% -200 M (Y)
0	10.3
10	36.4
15	49.2
20	58.8

Nota: Elaboración propia.

Figura 25

Gráfico tiempo de molienda VS % -200 mallas.



Nota: Microsoft Excel

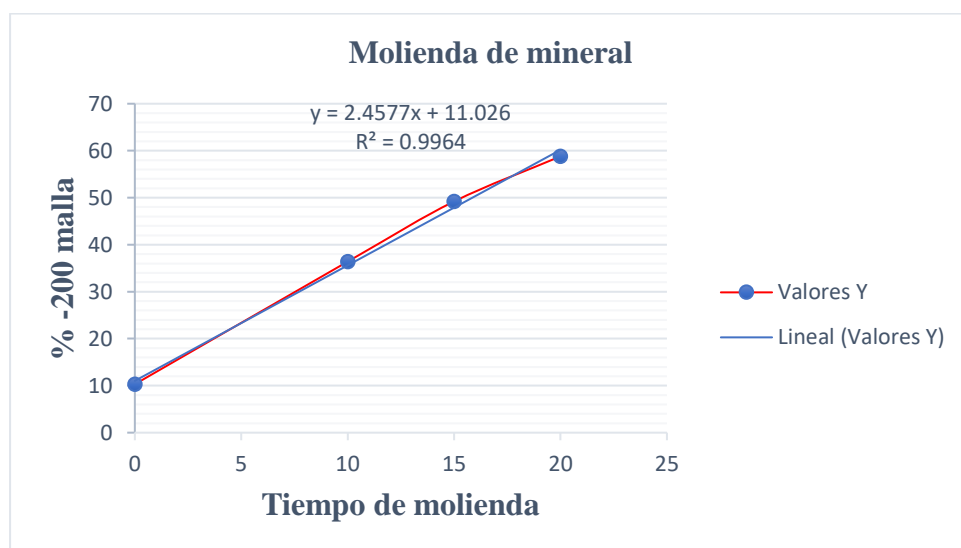
En la Figura 26, el gráfico ilustra la correlación lineal entre el tiempo de molienda y el porcentaje de mineral que pasa a través de la malla 200. Se observa una variación notable de la

pendiente en cada punto de datos, lo que indica que a medida que aumenta la duración del tiempo, disminuye la pendiente del gráfico.

A fin de determinar la duración prevista de la molienda para porcentajes de paso de mineral iguales o superiores al 80%, se llevó a cabo un estudio de regresión lineal con el fin de derivar la ecuación lineal en forma de $Y = mX + b$ a partir del gráfico existente.

Figura 26

Ajuste Lineal de la Gráfica de Molienda



Nota: Microsoft Excel

Al comparar la ecuación lineal con el valor obtenido en el ajuste lineal, se puede observar que:

$$Y = mX + b$$

$$Y = 2.4577 X + 11.026$$

Para lograr porcentajes elevadas de extracción exitosa de minerales, específicamente 80% - 200 malla, se empleará la ecuación subsiguiente:

$$80 = 2.4577 X + 11.026$$

$$X = 28.06$$

Para conseguir un tamaño de partícula del 80% que pase por un tamiz de 200 mallas, es necesaria una duración de molienda del mineral de 28,06 minutos.

5.2.3. *Determinación de la Gravedad Específica.*

A continuación, la determinación de la gravedad específica se determinó a partir de 1 kg de mineral debidamente homogenizada y cuarteada. Pasando este último a una molienda en un molino de bolas de una capacidad de 1 kg, durante un tiempo de molienda de 28.06 minutos el cual se había determinado anteriormente.

Mediante la homogenización y cuarteo se tomó el pesaje de 3 muestras de a 100 gramos y otra muestra de 500 gramos; los de a 100 gramos para determinar la gravedad específica del mineral mediante el promedio de los resultados de 3 pruebas y la de 500 gramos para comprobar el análisis del 80% de la malla -200M.

La ecuación que determina la gravedad específica es la siguiente:

$$G. E = \frac{Wm}{Wm + W1 - W2} \quad (48)$$

Donde:

Wm: Peso del Mineral

W1: Peso de la fiola + agua

W2: Peso de la fiola + agua + mineral

Para obtener un resultado más certero, se realizó tres pruebas en las mismas condiciones.

Cuyos resultados fueron reemplazados en la ecuación 32, como, por ejemplo:

$$G. E = \frac{100}{100+675.5-750} = 3.92$$

Pudiendo obtener diferentes resultados de gravedad específica para luego promediarlos y obtener un resultado más exacto, ver la tabla 5.

Además, en el anexo 12 podemos observar las fotografías de la determinación de la gravedad específica, los cuales fueron determinadas por el método de la fiola, con muestras de 100 kg de mineral obtenidas en la operación del muestreo.

Tabla 5

Determinación de la gravedad específica.

N° de prueba	Wm (g)	W1 (g)	W2 (g)	G.E
1	100	675.5	750	3.92
2	100	675.1	749.9	3.97
3	100	675	750.1	4.02
Promedio				3.97

Nota. Elaboración propia

Este resultado de la gravedad específica fue de mucha importancia para posteriores cálculos y así poder realizar la preparación de la pulpa para la lixiviación.

5.2.4. Preparación de la Pulpa para Pruebas de Agitación.

Para realizar las pruebas de agitación primeramente se debe realizar un balance de pulpa, en tal sentido, se tomó como condición operativa un porcentaje de sólidos del 30% para los siguientes cálculos:

Si nuestra gravedad específica es igual de 3.97.

Cálculo de la constante de sólidos

$$K = \frac{G.E - 1}{G.E} \quad (49)$$

$$K = \frac{3.97 - 1}{3.97}$$

$$K = 0.748$$

Primeramente, se realizó cálculos para un volumen de pulpa de 1000 ml y 30% de sólidos, para obtener datos y posteriormente hacer el balance de pulpa para un reactor de 1042 ml.

✓ Densidad de pulpa:

$$\%S * W * K = (W - 1000) * 100\% \quad (50)$$

$$30 * W * 0.748 = (W - 1000) * 100\%$$

$$W = 1289.32 \text{ g/L}$$

✓ Peso del mineral (W_s):

$$W_s = (W - 1000)/K \quad (51)$$

$$W_s = (1289.32 - 1000)/0.748$$

$$W_s = 386.78 \text{ g}$$

✓ Volumen del mineral (V_s):

$$V_s = W_s/G.E \quad (52)$$

$$V_s = 386.78/3.97$$

$$V_s = 97.43 \text{ cm}^3$$

Tabla 6

Balance de pulpa para 30% de sólidos.

Producto	Porcentaje (%)	Para 1 L de pulpa		Para 1.042 L de pulpa	
		Peso (g)	Vol. (cm ³)	Peso (g)	Vol. (cm ³)
Mineral	30	386.78	97.43	403.03	102
Sol. lixiviante	70	902.54	902.54	940	940
Pulpa	100	1289.32	1000	1343.03	1042

Nota. Elaboración propia

En la tabla 6, observamos que todas las pruebas fueron diseñadas para una pulpa de 1042 cm³ al 30% de sólidos, donde se requirió 403.03 g de mineral y una solución lixiviante de 940 cm³.

5.2.5. *Calculo y Preparación de Reactivos.*

Los reactivos que necesarios para la lixiviación fueron:

- ✓ Cianuro de sodio al 98% de pureza.
- ✓ Cal para modificar el pH.
- ✓ Peróxido de Hidrógeno al 50%.
- ✓ Nitrato de plata
- ✓ Ioduro de potasio

5.2.5.1. Determinación del cianuro de sodio a utilizar

- Para una fuerza de 1400 ppm = 0.14 %

$$X (g NaCN) = \frac{0.14 g * 940 ml}{100 ml}$$

$$X = 1.32 g NaCN$$

- Para una fuerza de 1000 ppm = 0.1 %

$$X (g NaCN) = \frac{0.1 g * 940 ml}{100 ml}$$

$$X = 0.94 g NaCN$$

- Para una fuerza de 600 ppm = 0.06%

$$X (g NaCN) = \frac{0.06 g * 940 ml}{100 ml}$$

$$X = 0.564 g NaCN$$

5.2.5.2. Determinación de la cal a utilizar

Para determinar la cantidad de cal inicial necesaria y lograr los pH de 10.5, 11 y 11.5 en el experimento, se comenzó midiendo el pH natural de la pulpa una vez agitada en los reactores durante un lapso de 20 minutos. Posteriormente, se agregaron pequeñas cantidades de cal (0.2 g) con la debida agitación hasta alcanzar el pH deseado según la matriz del diseño experimental.

En la tabla 7, se observa los resultados de la determinación del pH inicial y adición de cal inicial, para modificar al pH requerido según el diseño experimental.

Tabla 7*Determinación de la cal inicial*

pH	pH inicial	Cal (g) para 403.03 g de mineral	Total
Para pH 10.5	6.5	1	1 gramo
Para pH 11	6.5	1+0.3	1.3 gramos
Para pH 11.5	6.5	1.3 + 0.3	1.6 gramos

Nota. Elaboración propia

5.2.5.3. Cálculos para el Peróxido de hidrógeno a diferentes concentraciones.

De acuerdo a la matriz del diseño factorial, las concentraciones de peróxido de hidrógeno son: 1.04% como valor máximo, 0.31% valor mínimo y 0.675% como punto central. El cálculo y la preparación de las soluciones a esas concentraciones, se realizó mediante la ecuación 36.

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2 \quad (53)$$

Donde:

V_1 : volumen del peróxido de hidrógeno al 50% que se requiere.

C_1 : Concentración del peróxido de hidrógeno inicial (50%)

V_2 : Volumen de la solución de H_2O_2 a distinta concentración.

C_2 : Concentración de la solución preparada.

Por consiguiente, la diferencia de V_2 y V_1 resultara el volumen del agua que se necesitara para preparar dicha solución con una concentración 2.

En la presente investigación, se necesitó calcular el volumen de peróxido de hidrógeno al 50 % que se necesita para tener una solución lixiviante a distintas concentraciones de peróxido de hidrógeno según la matriz del diseño experimental. Por lo tanto, V_2 vendría a ser igual a 940 ml, C_2 tomara los valores (1.04%, 0.31% y 0.675%) y C_1 igual a 50%. Por lo tanto, V_1 viene a ser la incógnita el cual deberá ser calculado mediante la ecuación 53.

- Para una solución de 1.04% de H₂O₂

$$V_1 = \frac{940\text{ml} * 1.04\%}{50\%}$$

$$V_1 \approx 19.5 \text{ ml}$$

- Para una solución de 0.31% de H₂O₂.

$$V_1 = \frac{940\text{ml} * 0.31\%}{50\%}$$

$$V_1 \approx 5.8 \text{ ml}$$

- Para una solución de 0.675% de H₂O₂.

$$V_1 = \frac{940\text{ml} * 0.675\%}{50\%}$$

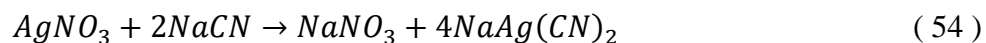
$$V_1 \approx 12.7 \text{ ml}$$

Por lo tanto, los resultados de V₁ para cada concentración es el peróxido de hidrógeno al 50% que se necesitaron para tener las soluciones respectivas.

5.2.5.4. Preparación solución titulante de nitrato de plata (AgNO₃)

En este caso trabajaremos con una solución con concentración de 4.3333 g (AgNO₃) /L, valor que también se trabaja a partir de la siguiente reacción 38.

La muestra de solución cianurada estará en mililitros entonces decimos que: En 1000 ml de solución hay 4.3333 g de (AgNO₃) entonces en 1 ml de solución hay 0.0043333g de (AgNO₃).



$$169.87\text{g AgNO}_3 \dots\dots\dots 2(46)\text{g NaCN}$$

$$0.004335\text{g AgNO}_3 \dots\dots\dots X(\text{g})$$

$$X = \frac{0.004335 \text{ g} * 98 \text{ g}}{168.87 \text{ g}}$$

$$X = 0.002499 \text{ g NaCN}$$

El resultado es para 1 ml si nosotros trabajamos a otro volumen de muestra el factor cambiará en nuestro caso el volumen de alícuota que tomaremos será de 10 ml entonces el factor en este caso es 0.025

5.2.5.5. Preparación del indicador yoduro de potasio 5 %

Primero se procede a pesar 5 gramos de yoduro de potasio para luego agregar a la fiola previamente con agua destilada hasta la mitad, después de agregar el yoduro se enrasa hasta la línea de aforo de un volumen de 100 ml y se agita por unos minutos hasta que todo el sólido este disuelto luego se envasa en una botella ámbar para evitar su descomposición. Para su uso en las pruebas la solución se vaciará poco a poco de acuerdo con el requerimiento a un gotero de 100 ml.

5.3. Prueba de Lixiviación por Agitación en Botellas

Para realizar las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio, debemos tomar en consideración que las condiciones de lixiviación fueron tomadas de acuerdo a la revisión bibliográfica y la experiencia que se tiene con respecto a las pruebas metalúrgicas y en especial con el tipo de especie mineralógica. Estas condiciones operativas de lixiviación lo vemos en la tabla 8.

Tabla 8

Condiciones Operativas de Lixiviación.

<i>Mineral:</i>	<i>Sulfurado</i>
<i>Granulometría</i>	80% -200 mallas
<i>Ph natural del mineral</i>	6.5
<i>volumen de la pulpa (L)</i>	1.024
<i>Peso de la pulpa (g)</i>	1343.03
<i>Densidad de pulpa (g/L)</i>	1289.32
<i>agua (L)</i>	0.94
<i>Peso mineral (g)</i>	403.03
<i>G.E</i>	3.97
<i>%sólidos</i>	30.008
<i>%líquidos</i>	69.992
<i>Dilución(L/S)</i>	2.33
<i>pH</i>	Valores entre 10.5 y 11.5
<i>Dosis de Cal inicial (g)</i>	Depende del pH a lixiviar (1 a 1.6 gramos)
<i>Concentración de NaCN (ppm)</i>	Valores entre 600 y 1400
<i>Dosis de NaCN inicial (g)</i>	Depende de la concentración a lixiviar (0.564 a 1.32 gramos)
<i>Concentración de H2O2 (%)</i>	Valores entre 0.31 y 1.04
<i>Tiempo de lixiviación</i>	48 horas

Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de hidrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco con el propósito de evaluar los resultados de la extracción de oro.

Además, el desarrollo experimental de la lixiviación se realizó en base a un diseño experimental 2^3 el cual nos permitió evaluar los resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas y que dichas pruebas se pueden observar en la matriz del diseño experimental donde se tomaron como variables independientes la concentración del cianuro de sodio, concentración del peróxido de hidrógeno y el pH, ver la tabla 3 en la página 69.

5.3.1. Variables del Proceso de Lixiviación

En la Tabla 9 se presentan los intervalos de las variables analizadas, los cuales variarán en función de las diferentes combinaciones según el diseño experimental y se puede afirmar que es la base de los análisis estadísticos que se mostrará más adelante.

Tabla 9

Variables del Proceso de Lixiviación.

Variables	Niveles		
	Bajo	Intermedio	Alto
Concentración de cianuro de sodio (ppm)	600	1000	1400
Concentración de peróxido de hidrogeno (%)	0.31	0.675	1.04
pH	10.5	11	11.5

Nota. Elaboración propia

5.3.2. Componentes Iniciales para las Pruebas de Lixiviación

A continuación, en la tabla 10 se muestra los componentes o características iniciales que se debe tener en cuenta antes de comenzar con la agitación mecánica. Los cuales se obtuvieron en los procedimientos preliminares a las pruebas de lixiviación.

Tabla 10*Componentes iniciales para las pruebas de lixiviación.*

N° de prueba	Muestra	Peso de Mineral (g)	Volumen de agua (L)	Peso de Cal (g)	Peso de NaCN (g)	Volumen de H2O2 (ml) al 50 %
1	M1	403.03	0.94	1	0.564	5.8
2	M2	403.03	0.94	1	1.32	5.8
3	M3	403.03	0.94	1	0.564	19.5
4	M4	403.03	0.94	1	1.32	19.5
5	M5	403.03	0.94	1.6	0.564	5.8
6	M6	403.03	0.94	1.6	1.32	5.8
7	M7	403.03	0.94	1.6	0.564	19.5
8	M8	403.03	0.94	1.6	1.32	19.5
9	M9	403.03	0.94	1.3	0.94	12.7
10	M10	403.03	0.94	1.3	0.94	12.7
11	M11	403.03	0.94	1.6	1.32	0

Nota. Elaboración propia

5.3.3. Reposición de Reactivos

5.3.3.1. Reposición de Cal

En el caso de la presente tesis, según el reporte de las respuestas de las pruebas de lixiviación en botellas, ver anexo 8, indican que, durante las 48 horas de lixiviación en los tiempos de control de parámetros, no se observó los cambios de pH de la pulpa más al contrario permanecieron constantes al pH inicial

Por consiguiente, no se realizó la reposición de Cal porque no fueron necesarios, pero si fuese el caso, se realizaría con la siguiente ecuación matemática:

$$\text{reposición de } X(g) \text{ de Cal} = \frac{(g) \text{ de cal inicial} * X \text{ pH (lectura final)}}{\text{pH de la Prueba}} \quad (55)$$

5.3.3.2. Reposición de NaCN

Al realizar la reposición de cianuro de sodio, es fundamental llevar a cabo el procedimiento de titulación con meticulosidad. Es necesario seguir rigurosamente cada paso para evitar obtener resultados inexactos que puedan afectar cálculos futuros.

Los pasos a seguir durante la titulación fueron:

- En primer lugar, se debe tener mucho en cuenta el orden y limpieza del ambiente de trabajo antes, durante y después.
- Seguidamente se debe parar la agitación en botellas en los tiempos establecidos y dejar sedimentar los sólidos y la solución filtrar en papel filtro. Por lo cual se tendrá que medir el pH y separar 10 ml como solución alícuota suficientes para realizar la titulación.
- Realizar la titulación, adicionando 3 gotas del reactivo indicador (yoduro de potasio) a la solución alícuota y tomando el volumen inicial del AgNO_3 , adicionar y mezclar AgNO_3 con la solución de 10 ml hasta diferenciar el más cambio mínimo de color.

Teniendo el gasto de la solución titulante que es el nitrato de plata, Seguidamente se tuvo que calcular la fuerza de cianuro libre mediante la ecuación 40:

$$\% \text{ cianuro libre} = \text{gasto}(\text{ml}) * \text{factor} \quad (56)$$

En este caso al tomar una alícuota de 10 ml para la titulación, el factor que se considera es igual a 0.025.

Ahora, para determinar la cantidad de cianuro de sodio para la reposición a las pruebas y mantengan su fuerza inicial se debe determinar mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{NaCN (reponer en g)} = \frac{(C_{i(\% \text{NaCN})} - C_{f(\% \text{NaCN})})}{100} * V_{\text{solución (ml)}} \quad (57)$$

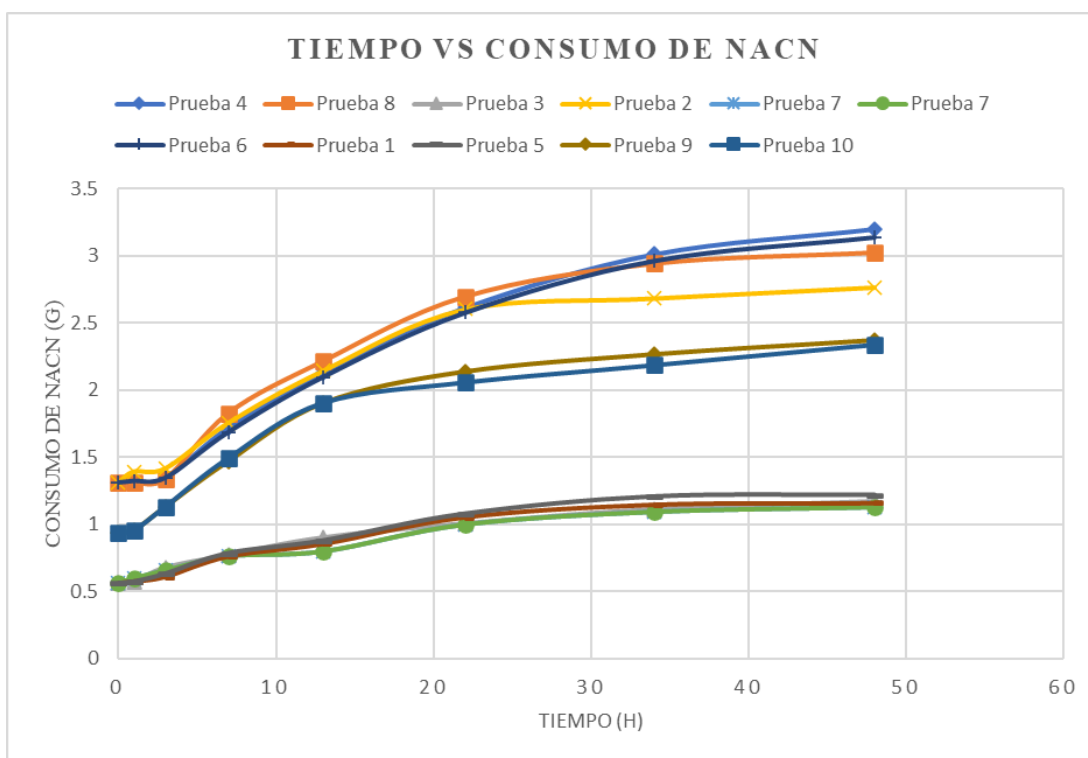
Este cálculo es válido para todas las pruebas, cabe resaltar que se mantendrán datos en todos los cálculos como son Volumen de solución, volumen de solución alícuota el único dato variable para todas las pruebas sería la concentración final que debe ser determinada por titulación volumétrica.

5.3.4. Resultados de las Pruebas de Cianuración por Agitación en Botellas.

El reporte de los resultados de todos los experimentos ensayados en el laboratorio de la Universidad se muestra en el ANEXO 8, donde observaremos el reporte del control de parámetros, como son el pH, la fuerza del cianuro de sodio libre y el consumo de reactivos (cal, NaCN y H₂O₂).

Figura 27

Consumo de cianuro de sodio en las pruebas metalúrgicas.

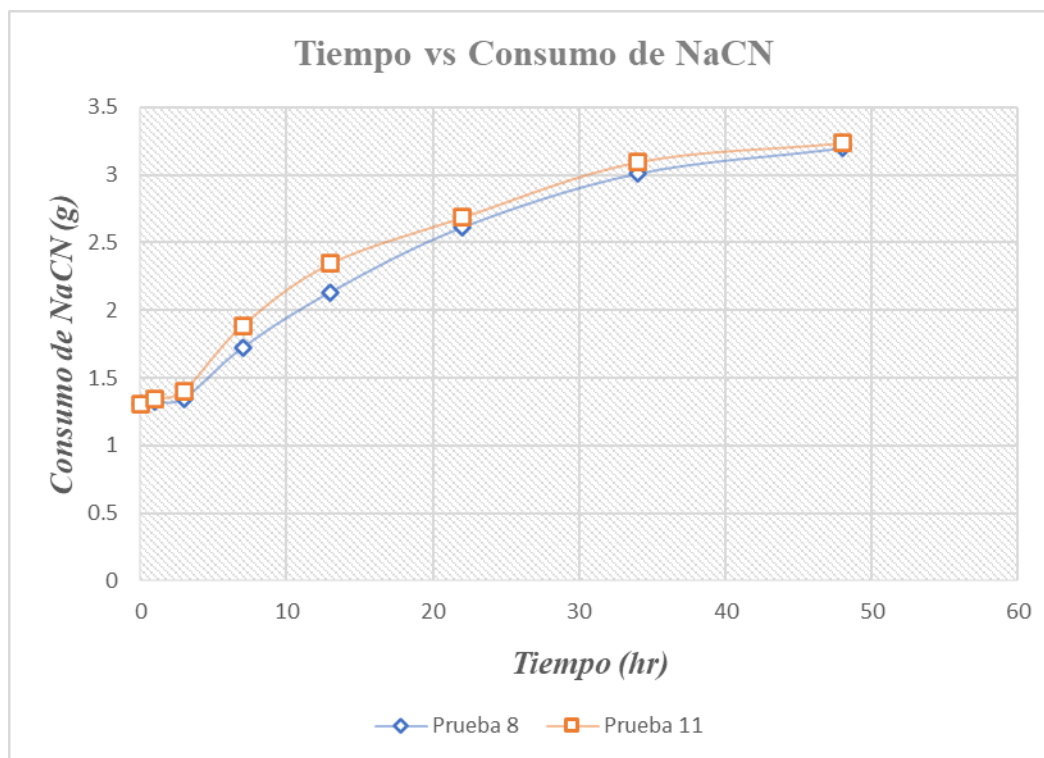


Nota. Elaboración propia (Microsoft Excel)

En la siguiente figura 27, se representa gráficamente el tiempo de lixiviación vs el consumo de NaCN acumulado de todas las pruebas metalúrgicas realizadas. Por otro lado, en la figura mencionada se puede resaltar que hay un mayor consumo de cianuro en las primeras 24 horas de lixiviación cuando se trata de pruebas en las cuales la fuerza de cianuro de sodio estuvo por encima de los 1000 ppm a diferencia cuando fueron de 600 ppm.

Figura 28

Comparación del consumo de NaCN entre la prueba 8 y 11.



Nota. Elaboración propia (Microsoft Excel)

En la figura 28, podemos observar los resultados del consumo de NaCN acumulado tanto de la prueba 8 y la 11. Además, cabe resaltar que la prueba 11 se realizó en las mismas condiciones de lixiviación que la 8, con la diferencia que a la 11 no se le adicione el peróxido de hidrógeno. La prueba 11, fue realizada de una manera convencional con el propósito de comprobar la incidencia que tiene el peróxido de hidrógeno. Efectivamente podemos notar que también tiene una relativa influencia en el consumo de cianuro de sodio, la prueba 8 tiene menor consumo del reactivo lixivante que la prueba 11.

5.4. Resultados de la Caracterización Mineralógica de las Muestra.

Para las 11 pruebas experimentales se trabajó con muestras de minerales obtenidos de los nuevos depósitos de mineral de la concesión minera Valetita IV pertenecientes a la Compañía

Minera Tunkyro. Para determinar los elementos de la muestra que acompañan al metal valioso se optó por realizar la Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) y también se determinó los minerales predominantes por un estudio mineralógico realizado por la misma compañía minera. Los minerales predominantes para el estudio lo podemos observar de manera ordenada según la cantidad, en la tabla 11.

Tabla 11

Principales compuestos mineralógicos en la muestra.

Especie	Formula
Cuarzo	SiO ₂
Pirita	FeS ₂
Arsenopirita	FeAsS
Calcopirita	CuFeS ₂
Esfalerita	ZnS
Galena	PbS

Nota. Fuente (Compañía minera Tunkyro)

5.4.1. Caracterización Química

El análisis para la determinación de los elementos presentes en la muestra con fines de la investigación, fueron realizados en el Laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C en el cual se desarrolló el método de (ICP-OES). Los resultados del análisis de la muestra representativa de 1 kg se pueden observar en la siguiente tabla 12, los cuales presentaran la presencia de elementos químicos en partes por millón o porcentajes, según sea el elemento a tratar.

Tabla 12

Resultados de análisis por ICP-OES.

Símbolo de Analito	Weighth.	*Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca
		P Mtra.	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Código de Análisis								
Símbolo de Unidad	g	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%
Límite Detección	0.01	0.2	0.01	3	1	0.5	5	0.01
1 000697-10-MINERALOGIA	241.70	1.5	1.33	> 10000	88	< 0.5	< 5	1.15

Símbolo de Analito	Cd	Co	Cr	*Cu	Fe	Ga	Hg	K
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%
Límite Detección	1	1	1	0.5	0.01	10	1	0.01
1 000697-10-MINERALOGIA	4	6	79	49.9	1.86	< 10	< 1	0.70

Símbolo de Analito	La	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%
Límite Detección	0.5	0.01	2	1	0.01	1	1	0.01
1 000697-10-MINERALOGIA	6.2	0.16	720	10	0.04	< 1	12	0.02

Símbolo de Analito	Pb	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Te
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite Detección	2	0.01	5	0.5	10	10	0.5	10
1 000697-10-MINERALOGIA	189	0.85	< 5	1.6	< 10	< 10	1.2	87

Símbolo de Analito	Ti	Tl	V	W	Y	Zn	Zr
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite Detección	0.01	2	2	10	0.5	0.5	0.5
1 000697-10-MINERALOGIA	0.03	< 2	15	< 10	4.5	663.1	< 0.5

Nota. Ver anexo 03 Resultados de Laboratorio Actlabs Skyline Perú.

Según los resultados del análisis por ICP-OES presentadas en la tabla 12, pudimos resaltar que los elementos de Arsénico (As), Azufre (S), Hiero (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Plomo (Pb) fueron los más predominantes en la muestra sometida al análisis químico.

Además, a la cantidad que se presentan en la tabla 12, podemos corroborar la tabla 11, en cual observamos en orden las especies mineralógica predominantes en la muestra.

5.5. Resultados de la Extracción de Oro Según Balance Metalúrgico.

Se empleó el balance metalúrgico para calcular el porcentaje de rendimiento en la extracción de oro, una herramienta muy importante para realizar la evaluación del proceso de lixiviación, donde los resultados que se obtuvieron por el análisis químico de las muestras de soluciones, rípios y ley de cabeza del mineral en el Laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C; nos

brindaron los valores necesarios para el cálculo de la cabeza calculada y por ende la extracción de oro.

Los datos que se debe tener en cuenta para el balance metalúrgico son: el peso del mineral (403.03 gramos) utilizado para todas las pruebas, volumen de la solución lixiviante (940 ml) y la ley de cabeza del mineral ensayada que es igual a 9.67 g/TM (muestra tomada a un inicio mediante la técnica por rifles)

5.5.1. Resultados de la Prueba 1

➤ *Contenido metálico:*

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.022 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 2.841 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 2.54 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 1.03\text{mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 2.841 \text{ mg} + 1.03 \text{ mg} = 3.867 \text{ mg}$$

➤ *Extracción de oro (%)*

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{32.841 \text{ mg}}{3.867 \text{ mg}} * 100\% = 73.48 \%$$

Tabla 13

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 1.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.022 (mg/L)	2.841
Ripios	403.03	2.54	1.025
Cabeza calculada	403.03	9.59	3.867
Extracción de Au (%)			73.48

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 13, se presenta el balance metalúrgico de cabeza calculado de la prueba 1, el cual fue evaluado utilizando los resultados y con los cálculos nos resultó un porcentaje de extracción de oro del 73.48%.

5.5.2. Resultados de la Prueba 2

➤ *Contenido metálico:*

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.601 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.116 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 1.08 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.437 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.116 \text{ mg} + 0.437 \text{ mg} = 3.822 \text{ mg}$$

➤ *Extracción de oro (%)*

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.116 \text{ mg}}{3.822 \text{ mg}} * 100\% = 88.57 \%$$

Tabla 14

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 2.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.601 (mg/L)	3.385
Ripios	403.03	1.08	0.437
Cabeza calculada	403.03	9.48	3.822
Extracción de Au (%)			88.57

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 14, se presenta el balance metalúrgico de cabeza calculado, el cual fue evaluado utilizando los resultados de la prueba 2 y arrojando un porcentaje de extracción de oro del 88.57%.

5.5.3. Resultados de la Prueba 3

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.126 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 2.938 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 2.18 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.879 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 2.938 \text{ mg} + 0.88 \text{ mg} = 3.817 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{2.938 \text{ mg}}{3.817 \text{ mg}} * 100\% = 76.98 \%$$

Tabla 15

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 3.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.126 (mg/L)	2.938
Ripios	403.03	2.18	0.879
Cabeza calculada	403.03	9.47	3.817
Extracción de Au (%)			76.98

Nota. Elaboración propia

En la tabla 15, se presenta el balance metalúrgico de cabeza calculada, el cual fue evaluado utilizando los resultados de la prueba 3, resultando un % de extracción de oro del **76.98%**.

5.5.4. Resultados de la Prueba 4

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.758 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.533 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 0.78 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.313 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.533 \text{ mg} + 0.313 \text{ mg} = 3.846 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.533 \text{ mg}}{3.846 \text{ mg}} * 100\% = 91.86 \%$$

Tabla 16

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 4.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.758 (mg/L)	3.533
Ripios	403.03	0.78	0.313
Cabeza calculada	403.03	9.54	3.846
Extracción de Au (%)			91.86

Nota. Elaboración propia

En la tabla 16, se presenta el balance metalúrgico de cabeza calculada, el cual fue evaluado utilizando los resultados de la prueba 4 y arrojando un porcentaje de extracción de oro del **91.86%**.

5.5.5. Resultados de la Prueba 5

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 2.971 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 2.793 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 2.64 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 1.063 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 2.793 \text{ mg} + 1.063 \text{ mg} = 3.856 \text{ mg}$$

➤ *Extracción de oro (%)*

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{2.783 \text{ mg}}{3.856 \text{ mg}} * 100\% = 72.44 \%$$

Tabla 17

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 5.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	2.971 (mg/L)	2.793
Ripios	403.03	2.64	1.063
Cabeza calculada	403.03	9.57	3.856
Extracción de Au (%)			72.44

Nota. Elaboración propia

En la tabla 17, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 5 y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **72.44%**.

En la prueba 5, debemos dar énfasis que es el experimento en el cual se obtuvo la menor extracción de oro. Por otro lado, las condiciones de lixiviación con cianuro de sodio fueron una concentración de NaCN igual a 600 ppm, concentración del reactivo peróxido de hidrógeno de 0.31% y en un medio alcalino de 11.5. Ver anexo 8, resultados de las pruebas metalúrgicas de cianuración en botellas, donde reporta el consumo de reactivos en cada tiempo de control de parámetros para 48 horas de lixiviación.

5.5.6. Resultados de la Prueba 6

➤ *Contenido metálico:*

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.553 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.340 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 1.25 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.505 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.340 \text{ mg} + 0.505 \text{ mg} = 3.845 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.340 \text{ mg}}{3.845 \text{ mg}} * 100\% = 86.87 \%$$

Tabla 18

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 6.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.553 (mg/L)	3.34
Ripios	403.03	1.25	0.505
Cabeza calculada	403.03	9.54	3.845
Extracción de Au (%)			86.87

En la tabla 18, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 6 y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **86.87%**.

5.5.7. Resultados de la Prueba 7

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.274 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.078 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 1.81 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.728 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.078 \text{ mg} + 0.7282 \text{ mg} = 3.806 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.078 \text{ mg}}{3.806 \text{ mg}} * 100\% = 80.86 \%$$

Tabla 19

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 7.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.274 (mg/L)	3.078
Ripios	403.03	1.81	0.728
Cabeza calculada	403.03	9.44	3.806
Extracción de Au (%)	80.86		

Nota. Elaboración propia

En la tabla 19, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 7 y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **80.86 %**.

5.5.8. Resultados de la Prueba 8

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.825 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.596 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 0.58 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.235 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.897 \text{ mg} + 0.235 \text{ mg} = 3.831 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.596 \text{ mg}}{3.831 \text{ mg}} * 100\% = 93.87 \%$$

En la tabla 20, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 8, donde se obtuvo un porcentaje de extracción de oro del **93.87 %**.

Por consiguiente, vendría a ser la prueba donde se obtuvo la mayor extracción de oro. Las condiciones de operación fueron una concentración de NaCN igual a 1400 ppm, 1.04% de peróxido de hidrógeno y un medio alcalino de 11.5.

En el anexo 8, se podrá observar el reporte del control de parámetros de la prueba 8 y el consumo de los reactivos como NaCN, H₂O₂ y cal. De igual manera se realizó para un tiempo de lixiviación de 48 horas

Tabla 20

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 8.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.825 (mg/L)	3.596
Ripios	403.03	0.58	0.235
Cabeza calculada	403.03	9.5	3.831
Extracción de Au (%)			93.87

Nota. Elaboración propia

A continuación, se presentan las pruebas metalúrgicas 9 y 10, las cuales fueron realizadas tomando como condiciones operativas de concentración de NaCN, concentración de peróxido de hidrógeno y pH los puntos centrales.

5.5.9. Resultados de la Prueba 9

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.468 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.260 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 1.35 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.544 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.260 \text{ mg} + 0.544 \text{ mg} = 3.804 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.260 \text{ mg}}{3.804 \text{ mg}} * 100\% = 85.70 \%$$

Tabla 21

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 9.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.468 (mg/L)	3.26
Ripios	403.03	1.35	0.544
Cabeza calculada	403.03	9.44	3.804
Extracción de Au (%)			85.7

Nota. Elaboración propia

En la tabla 21, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 9 y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **85.70%**.

5.5.10. Resultados de la Prueba 10

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.486 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.277 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 1.32 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.533 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.277 \text{ mg} + 0.533 \text{ mg} = 3.809 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.277 \text{ mg}}{3.809 \text{ mg}} * 100\% = 86.02 \%$$

Tabla 22

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba 10.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.486 (mg/L)	3.277
Ripios	403.03	1.32	0.533
Cabeza calculada	403.03	9.45	3.809
Extracción de Au (%)			86.02

Nota. Elaboración propia

En la tabla 22, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba 10 y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **86.02%**.

Por último, tenemos la prueba 11, realizada convencionalmente con el propósito de comparar con los resultados de la prueba 8. La única diferencia de condición operativa de lixiviación fue que en esta última no se utilizó el peróxido de hidrógeno.

5.5.11. Resultados de la Prueba 11 (Convencional sin peróxido de hidrógeno)

➤ **Contenido metálico:**

$$\text{Cabeza ensayada} = 403.03 \text{ g} * 9.67 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 3.897 \text{ mg}$$

$$\text{Solución} = 940 \text{ ml} * 3.266 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{L}}{10^3 \text{ ml}} = 3.070 \text{ mg}$$

$$\text{Ripios} = 403.03 \text{ g} * 2.00 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{10^6 \text{ g}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 0.805 \text{ mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 3.070 \text{ mg} + 0.805 \text{ mg} = 3.875 \text{ mg}$$

➤ **Extracción de oro (%)**

$$\% \text{ extracción Au} = \frac{3.070 \text{ mg}}{3.875 \text{ mg}} * 100\% = 79.23 \%$$

Tabla 23

Balance metalúrgico de cabeza calculada Prueba Convencional.

Producto	Peso (g)	Au (g/TM)	Contenido Metálico (mg)
Cabeza ensayada	403.03	9.67	3.897
Solución	940 (ml)	3.266 (mg/L)	3.07
Ripios	403.03	2	0.805
Cabeza calculada	403.03	9.61	3.875
Extracción de Au (%)	79.23		

Nota. Elaboración propia

En la tabla 23, se observa el balance metalúrgico de cabeza calculada, evaluado a partir de los resultados de la prueba convencional sin peróxido de hidrógeno y obteniendo un porcentaje de extracción de oro del **79.23%**.

5.6. Resumen del Balance Metalúrgico de las Pruebas de Lixiviación.

En la tabla 24, se muestra el resumen de los balances metalúrgicos de las 8 pruebas según el diseño experimental 2³, 2 pruebas en los puntos centrales y una última prueba 11 (convencional sin el uso del peróxido de hidrógeno).

Tabla 24

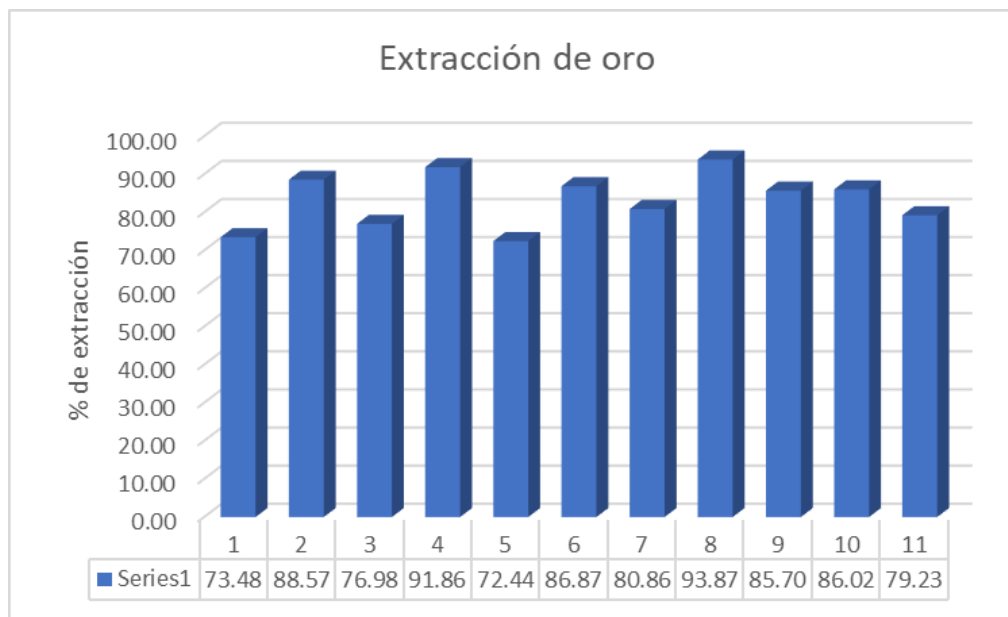
Resumen del balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación.

PRUEBA	Peso Mineral (g)	Volumen (ml)	Ley (mg/L)	Ley Ripios (g/TM)	Contenido M. (mg)	Ripios (mg)	Cabeza C. (mg)	Extracción (%)
1	403.03	940	3.022	2.54	2.841	1.025	3.867	73.48
2	403.03	940	3.601	1.08	3.385	0.437	3.822	88.57
3	403.03	940	3.126	2.18	2.938	0.879	3.817	76.98
4	403.03	940	3.758	0.78	3.533	0.313	3.846	91.86
5	403.03	940	2.971	2.64	2.793	1.063	3.856	72.44
6	403.03	940	3.553	1.25	3.340	0.505	3.845	86.87
7	403.03	940	3.274	1.81	3.078	0.728	3.806	80.86
8	403.03	940	3.825	0.58	3.596	0.235	3.831	93.87
9	403.03	940	3.468	1.35	3.260	0.544	3.804	85.70
10	403.03	940	3.486	1.32	3.277	0.533	3.809	86.02
11	403.03	940	3.266	2.00	3.070	0.805	3.875	79.23

En la Figura 29 se observa el diagrama de barras donde se compara los resultados de extracciones de oro según cada prueba experimental realizada.

Figura 29

Diagrama de barras



5.7. Cinética de la Extracción del Oro

Por otro lado, la prueba 11, una prueba convencional el cual consistió justamente en una prueba metalúrgica con las mismas condiciones operativas de lixiviación que la prueba 8, pero con la excepción que no se le dosifico el peróxido de hidrógeno. Por consiguiente, se realizó esta prueba 11 con la finalidad de evaluar la cinética de la extracción de oro con respecto a la prueba 8 en cual se obtuvo la mayor extracción de oro.

Para lo cual se tomó muestras de solución de 30 ml suficientes, en tiempos puntales de 7, 13, 22, 34 y 48 horas de lixiviación con la finalidad de analizar el contenido de oro en la solución.

En la Tabla 25 se muestra los resultados de la cinética de extracción de oro tanto de la prueba 8 como la prueba 11. Detallando el contenido metálico (mg) y el porcentaje de extracción de oro para cada prueba.

Tabla 25

Resultados de Cinética de Prueba 8 y Prueba 11.

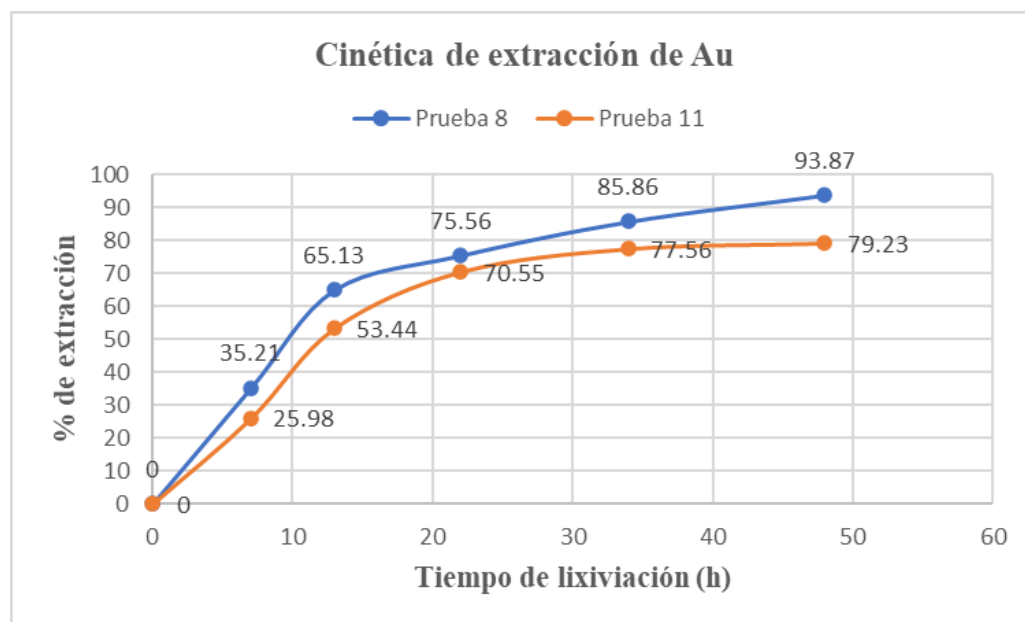
Tiempo de Lixiviación	Prueba 8			Prueba 11		
	Contenido M. (mg)	Cabeza calculada (mg)	% de extracción de Au	Contenido M. (mg)	Cabeza calculada (mg)	% de extracción de Au
0	0	3.846	0	0.000	3.875	0
7	1.354	3.846	35.21	1.007	3.875	25.98
13	2.505	3.846	65.13	2.071	3.875	53.44
22	2.906	3.846	75.56	2.734	3.875	70.55
34	3.302	3.846	85.86	3.005	3.875	77.56
48	3.591	3.831	93.87	3.070	3.875	79.23

Cabe recalcar que el porcentaje de extracción de oro en cada tiempo de lixiviación y para cada prueba metalúrgica, fue calculada en relación solamente a la cabeza calculada, puesto que solamente obtuvimos información de la ley o tenor de la solución mas no de la ley de ripios.

Consecuentemente a la tabla 25 obtuvimos el grafico 30, donde se observa la tendencia de la cinética de extracción de oro tanto de la prueba 8 como la prueba 11:

Figura 30

Cinética de extracción del oro.



Nota. Fuente Microsoft Excel

En la figura 30 podemos apreciar que efectivamente la prueba 8 alcanza una mayor extracción de oro a comparación de la prueba 11 en el que se realizó sin el uso del peróxido de hidrógeno.

CAPÍTULO VI

Análisis y Discusión de Resultados

6.1. Diseño Factorial 2³ con Puntos Centrales Utilizando Minitab

El presente estudio detalla el procedimiento óptimo para llevar a cabo experimentos con el fin de analizar de manera simultánea los efectos de tres factores (concentración de NaCN, concentración de H₂O₂ y pH) sobre una respuesta (% de extracción de Au) y descubrir si interaccionan entre ellos. Los experimentos de cianuración por agitación nos permitieron obtener la información por el cual pudimos calcular la variable respuesta.

Según el diseño experimental 2³ nos permitió correr 8 pruebas (con factores combinados de mínimos y máximos) y a las cuales se les añadió 2 pruebas en los puntos centrales, haciendo un total de 10 pruebas metalúrgicas. Seguidamente, en la tabla 26 se manifiesta las variables evaluadas en el proceso, indicando su bajo y alto.

Tabla 26

Niveles de la Variables.

Variables		Niveles		
		<i>Bajo (-)</i>	<i>Intermedio (0)</i>	<i>Alto (+)</i>
A	Concentración de cianuro de sodio (ppm)	600	1000	1400
B	Concentración de peróxido de hidrogeno (%)	0.31	0.675	1.04
C	pH	10.5	11	11.5

Nota. Elaboración propia.

Seguidamente, en la tabla 27 se muestra la planificación del diseño experimental, la matriz con valores codificados comprende las columnas (**X₁**, **X₂** y **X₃**), que corresponden a los 3 factores en estudio y expresadas en valores reales (**A**, **B** y **C**). Se observa también, que han sido dispuestas donde cada columna empieza con los valores mínimos, y se alternan mínimos y máximos. Naturalmente, la respuesta del diseño representa la extracción de oro del proceso de cianuración por agitación.

Tabla 27

Variables con valores codificados y valores reales del diseño experimental 2³.

N° Prueba	Valores Codificados			Valores reales			Respuesta
	X1	X2	X3	A	B	C	Y
1	-1	-1	-1	600	0.31	10.5	73.48
2	1	-1	-1	1400	0.31	10.5	88.57
3	-1	1	-1	600	1.04	10.5	76.98
4	1	1	-1	1400	1.04	10.5	91.86
5	-1	-1	1	600	0.31	11.5	72.44
6	1	-1	1	1400	0.31	11.5	86.87
7	-1	1	1	600	1.04	11.5	80.86
8	1	1	1	1400	1.04	11.5	93.87
9	0	0	0	1000	0.675	11	85.7
10	0	0	0	1000	0.675	11	86.02

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, también observamos que la prueba 8 fue la que obtuvo la mayor extracción igual a 93.87% de oro. Cabe precisar que los valores de los factores resultaron ser los más altos en concentración de cianuro de sodio, concentración de peróxido de hidrógeno y pH.

6.1.1. Representación Geométrica de los Ocho Tratamientos.

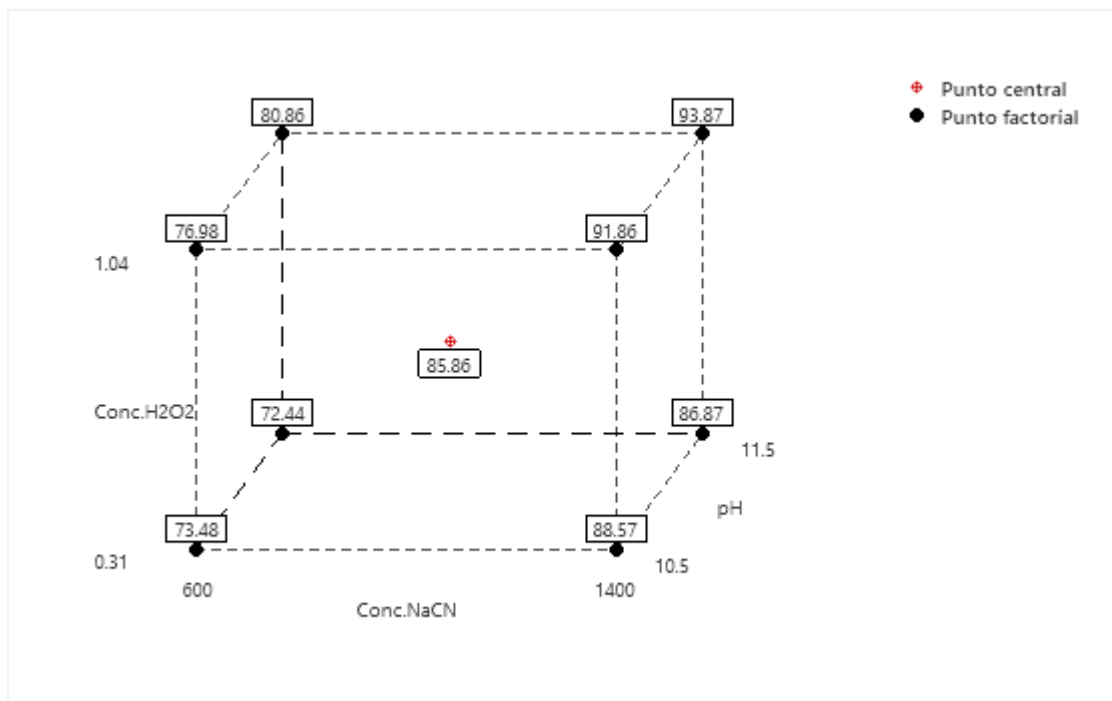
En la actualidad, la región experimental se representa mediante un cubo regular cuyos vértices corresponden a los ocho tratamientos. Este enfoque nos ha posibilitado analizar siete efectos, los cuales son los siguientes: Existen tres principales factores, designados como A, B y C, que interactúan entre sí en tres pares: AB, AC y BC, y por último una interacción de tres elementos, denominada ABC.

En términos generales, se ha prestado atención al estudio de los efectos principales y las interacciones dobles. Se ha observado que es recomendable garantizar que la interacción ABC no descienda por debajo de un umbral mínimo. Se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de los factores controlables en la variable de respuesta. La figura 31, podemos notar que el mayor porcentaje de extracción de oro es de 93.87 % producto de valores altos de cada variable

independiente, además una extracción de 85.86 % como punto central del producto de valores intermedios de las variables independientes.

Figura 31

Representación geométrica de las variables en el diseño experimental 2^3



Nota. (Software Minitab)

6.1.2. Efecto de las Variables y sus Interacciones.

Los resultados cuantitativos de los efectos que tienen las variables sobre la respuesta se detallan en la tabla 28, los cuales fueron obtenidos por el software Minitab. El efecto de la concentración de cianuro de sodio igual a 14.3525, indica que es la más significativa para una mayor extracción. Seguidamente los efectos cuantificables de 5.5525 y 2.1575, correspondientes a los efectos de la concentración de peróxido de hidrógeno y la interacción doble (Concentración de peróxido de hidrógeno y pH), indican que también son significativos.

Tabla 28*Efectos estimados para la extracción del oro (unidades codificadas)*

Término	Efecto
Constante	
Conc. NaCN	14.3525
Conc.H2O2	5.5525
pH	0.7875
Conc. NaCN*Conc.H2O2	-0.4075
Conc. NaCN*pH	-0.6325
Conc.H2O2*pH	2.1575
Conc. NaCN*Conc.H2O2*pH	-0.3025
Pt Ctral	

Nota. (Software Minitab)

6.1.3. Análisis Estadístico de Varianza

“El análisis de la varianza (ANOVA) es una técnica estadística utilizada para determinar la significación de los resultados de las pruebas, lo que ayuda a tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula o aceptar la hipótesis alternativa. En este estudio, el análisis se realizó con la ayuda del software Minitab 19.”(ANÁLISIS DE VARIANZA - Revista Chilena de Anestesia, s. f.)

Tabla 29*Análisis de la Varianza*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	497.559	99.99%	497.559	62.195	1214.74	0.022
Lineal	3	474.889	95.43%	474.889	158.296	3091.73	0.013
Conc. NaCN	1	411.989	82.79%	411.989	411.989	8046.65	0.007
Conc.H2O2	1	61.661	12.39%	61.661	61.661	1204.31	0.018
pH	1	1.24	0.25%	1.24	1.24	24.22	0.128
Interacciones de 2 términos	3	10.442	2.10%	10.442	3.481	67.98	0.089
Conc. NaCN*Conc.H2O2	1	0.332	0.07%	0.332	0.332	6.49	0.238
Conc. NaCN*pH	1	0.8	0.16%	0.8	0.8	15.63	0.158
Conc.H2O2*pH	1	9.31	1.87%	9.31	9.31	181.83	0.047
Interacciones de 3 términos	1	0.183	0.04%	0.183	0.183	3.57	0.31
Conc. NaCN*Conc.H2O2*pH	1	0.183	0.04%	0.183	0.183	3.57	0.31
Curvatura	1	12.045	2.42%	12.045	12.045	235.26	0.041
Error	1	0.051	0.01%	0.051	0.051		
Total	9	497.61	100.00%				

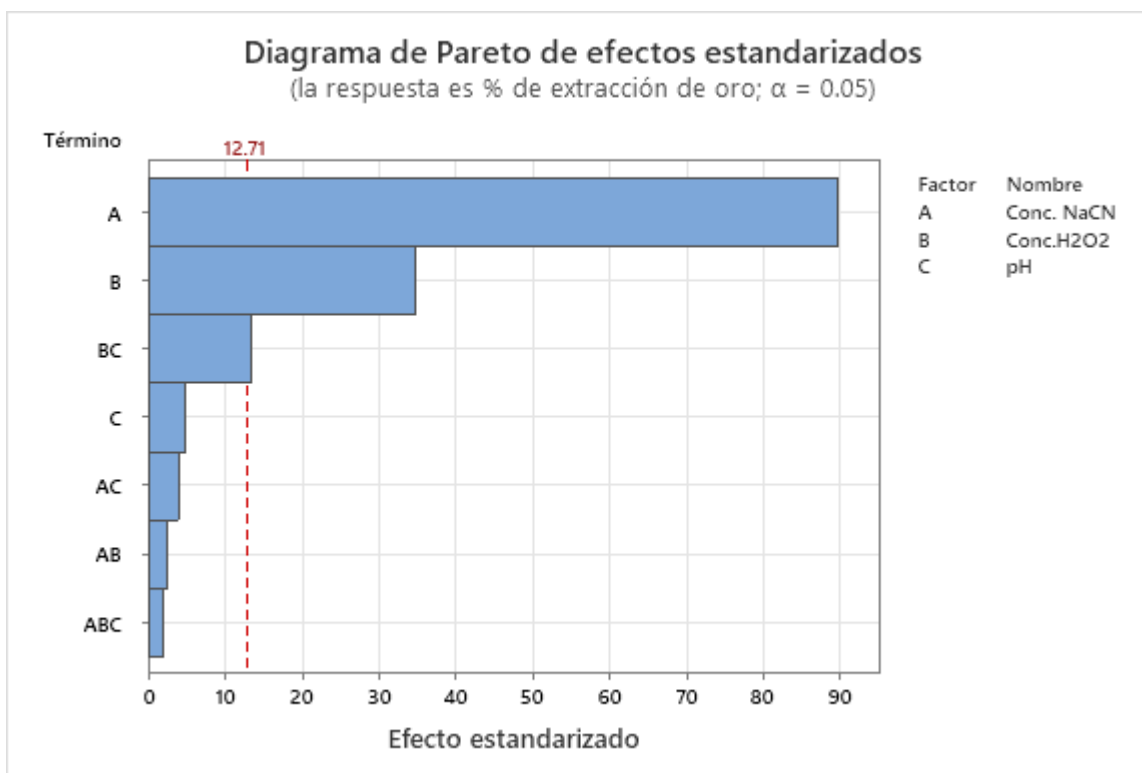
Nota. (Software Minitab)

En consecuencia, a la tabla 29, podemos sostener que el valor p del modelo es menor 0.05 lo que significa que el análisis de varianza presenta variables significativas, siendo la concentración del cianuro de sodio, concentración del peróxido de hidrógeno y la interacción (Concentración de H₂O₂ y pH) con valores p iguales 0.007, 0.018 y 0.047 respectivamente. Siendo estos últimos menores a 0.05.

En el caso del pH según su valor p igual a 0.128, no es considerado como una variable con una significancia para la extracción del oro. Pero si tiene una significancia con la interacción del peróxido de hidrógeno para lograr una mayor extracción de oro.

Figura 32

Diagrama de Pareto



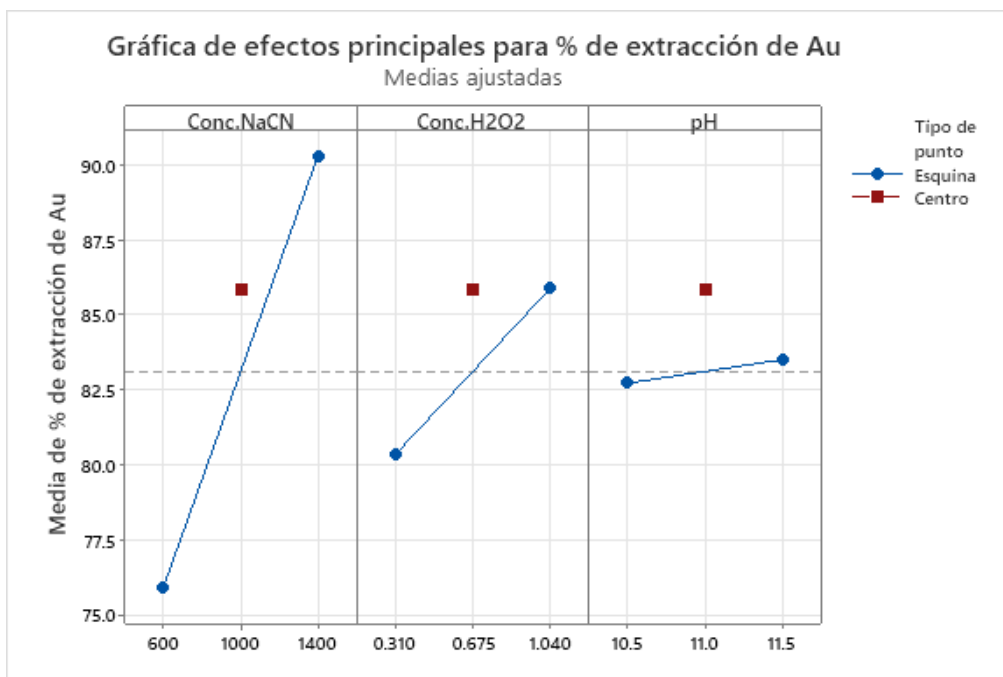
Nota. (Software Minitab)

En la figura 32, se observa los siguientes puntos:

1. El efecto de la concentración del cianuro de sodio es mayor que los efectos de las demás variables por lo que se concluye que es la más significativa e influyente en la variable respuesta.
2. El efecto de la concentración del peróxido de hidrógeno vendría a ser también una variable con un efecto considerable e influyente, por tal motivo también es considerado una variable con significancia para la extracción de oro.
3. De igual manera la interacción de la concentración del peróxido de hidrógeno y pH son considerados significantes puesto que también superan el punto crítico de 12.71.
4. Los demás factores no son considerados significantes para la extracción de oro puesto que no superan el punto crítico.

Figura 33

Gráfico de efectos principales para la extracción de oro.



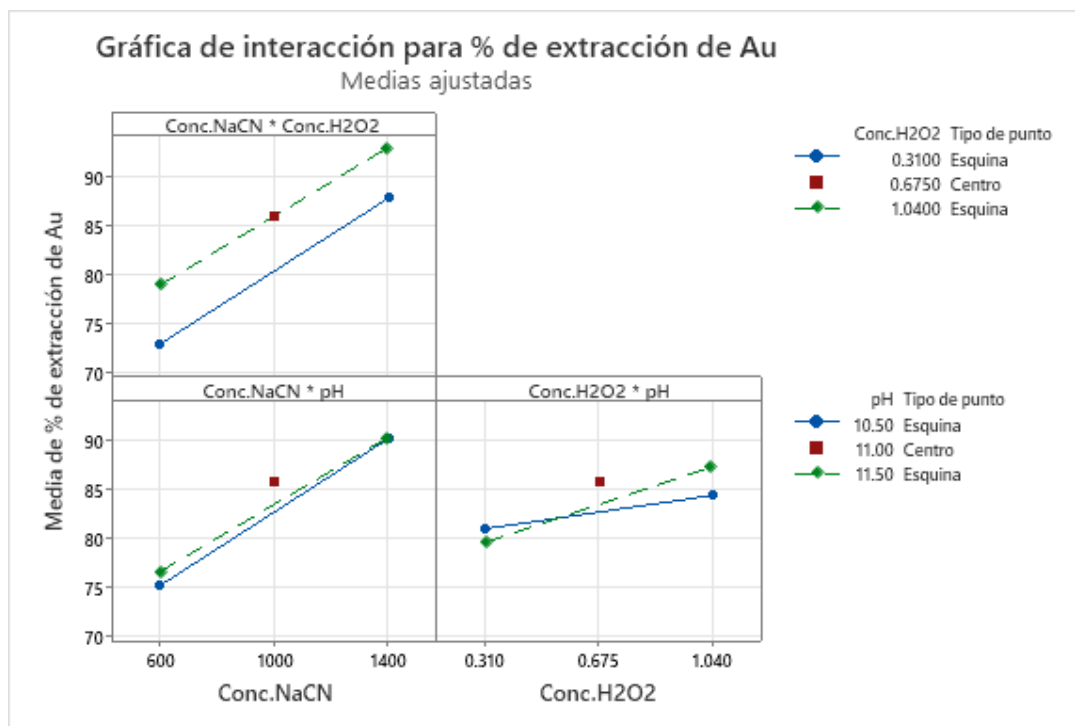
Nota. (Software Minitab)

En la figura 33, observamos los efectos principales de las variables independientes y se observa lo siguiente:

1. En la gráfica media de % de extracción de oro vs Conc.NaCN, indica que la extracción de oro es baja cuando la concentración de NaCN es igual a 600 ppm, pero tiende a incrementarse hasta obtener una extracción mayor con una concentración de NaCN igual a 1400.
2. De igual forma en la gráfica media de % de extracción de oro vs Conc.H₂O₂, observamos que el efecto es menor a la anterior y que para mayores extracciones de oro se requiere mayor concentración del H₂O₂.
3. Por último, en lo concerniente al pH se observa que el efecto no es demasiado pronunciado como si lo tienen las anteriores variables. Pero cabe rescatar que a mayor pH igual a 11.5 se obtuvo una mayor extracción de oro.

Figura 34

Gráfico de interacción para la extracción del oro



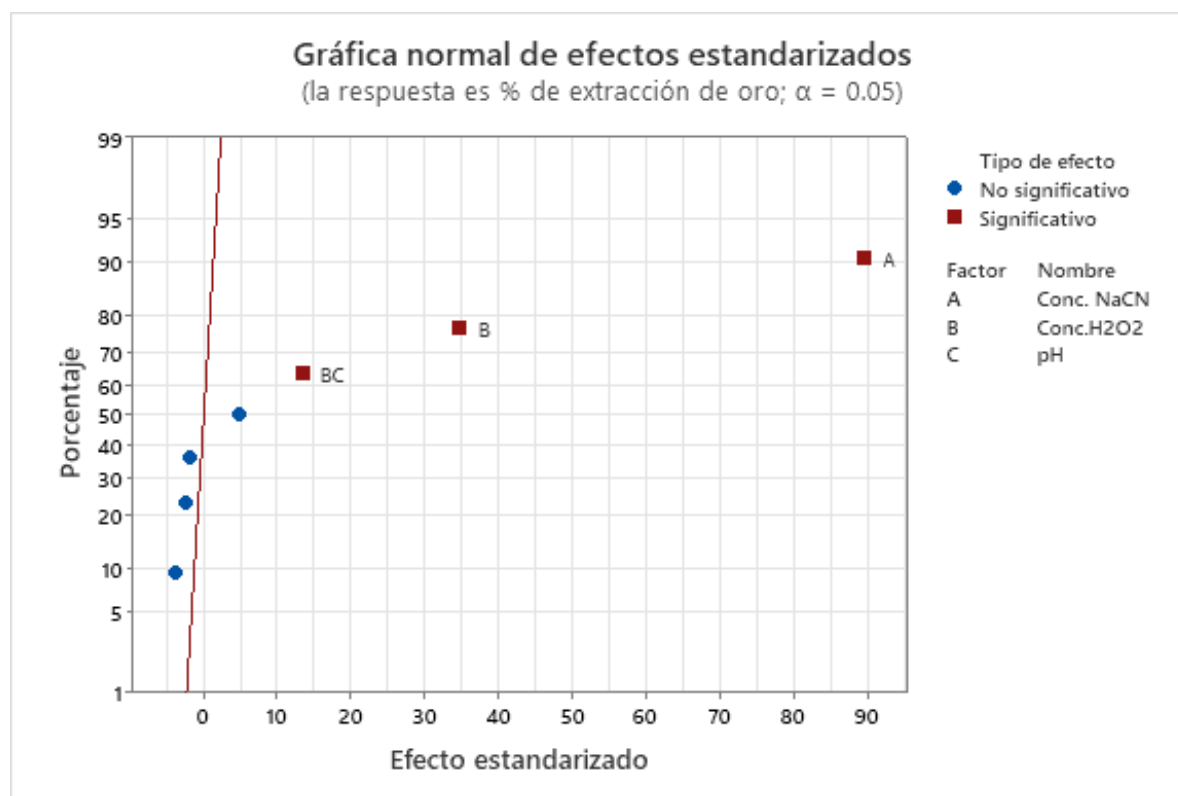
Nota. (Software Minitab)

Para analizar el efecto de las interacciones sobre la variable respuesta se utilizó la anterior figura 34. Donde en la gráfica de la interacción de Conc.H₂O₂ y pH se observa una clara significancia con respecto a la extracción de oro. En consecuencia, a que los segmentos se interceptan en un punto.

Por otro lado, la interacción de la Conc.NaCN y Conc.H₂O₂ no muestran tal significancia puesto que sus segmentos están aparentemente paralelos entre sí.

Figura 35

Gráfico normal de efectos estandarizados



Nota. (Software Minitab). Por medio de la gráfica podemos deducir que los factores Conc.NaCN, Conc. H₂O₂ y la interacción de la Conc. H₂O₂ y pH tienen alta incidencia o son significativos en el fenómeno de cianuración por agitación para obtener mayores resultados de extracción de oro.

6.1.4. Ecuación de regresión

6.1.4.1. Unidades Naturales

$$\begin{aligned} \%extracción Au = & 76.46 + 0.01993 Conc. NaCN - 36.90 Conc. H2O2 - 1.510 pH + \\ & 0.01052 Conc. NaCN * Conc. H2O2 - 0.000091 Conc. NaCN * pH + 3.991 Conc. H2O2 * pH - \\ & 0.001036 Conc. NaCN * Conc. H2O2 * pH + 2.744 Pt Ctral \end{aligned}$$

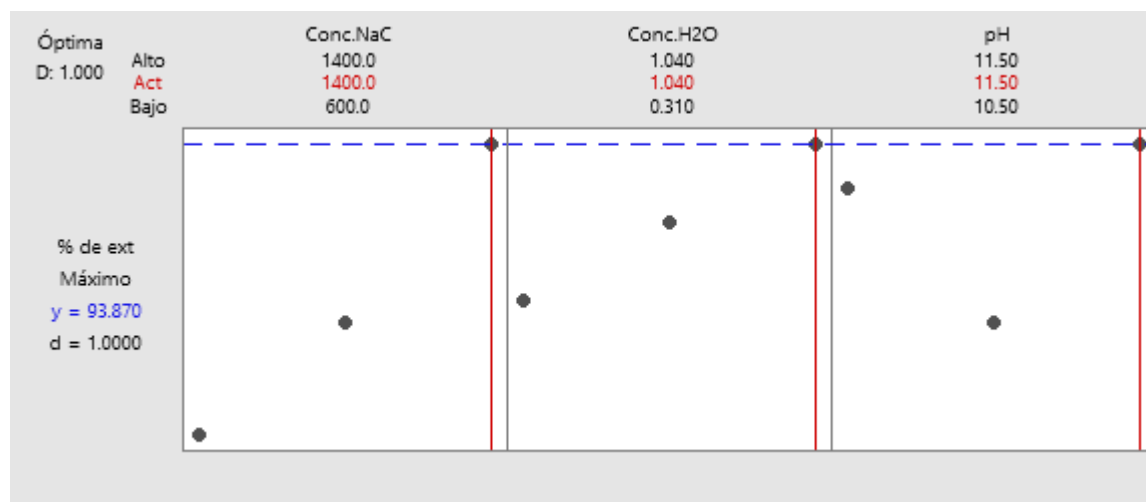
6.1.4.2. Unidades Codificados

$$\begin{aligned} \% extracción de Au = & 83.1163 + 7.1763 Conc. NaCN + 2.7763 Conc. H2O2 + 0.3938 pH \\ & - 0.2037 Conc. NaCN * Conc. H2O2 - 0.3162 Conc. NaCN * pH + 1.0787 Conc. H2O2 * pH \\ & - 0.1513 Conc. NaCN * Conc. H2O2 * pH + 2.744 Pt Ctral \end{aligned}$$

6.1.5. Optimización de Respuesta: % de Extracción de Oro

Figura 36

Optimización de Respuesta: % extracción de Au



Nota. (Software Minitab). Por medio del gráfico podemos notar que las variables óptimas para obtener la extracción máxima de oro.

6.2. Discusión de Resultados

Según el resumen de los resultados experimentales expresados en la tabla 24, encontramos que en la prueba 8 se obtuvo la mayor extracción de oro igual a 93.87 % y una menor en la prueba 5 con un resultado de 72.44 % en un tiempo de 48 horas de lixiviación. Consecuentemente a los resultados, mediante el análisis de varianza se afirma que la concentración de cianuro de sodio es

la variable determinante para la extracción de oro, la concentración de peróxido de hidrogeno tiene influencia significativa y la interacción del H_2O_2 mas el pH de igual forma es significativo para la extracción de oro.

En comparación con la investigación realizada en la Compañía Minera Tunkyro por Holguín Silva, A. (2023) con un resultado de 95.12 % de extracción de oro mayor a 93.87 % el cual resultó en esta investigación, se debió principalmente a la composición mineralógica del mineral, puesto que se realizaron estudios con minerales mixtos (óxidos y sulfuros) provenientes de la misma concesión minera Valetita IV. Además, que el tiempo de lixiviación fue de 72 horas

Con la investigación de Zevallos Vizcarra, G.A. (2018), reafirmamos que efectivamente el uso del peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación incide significativamente en la extracción, aumentando la extracción de 82% a 91% de oro.

De igual forma en la investigación Guillen Puma, H.M. (2019), los resultados arrojaron el incremento de la extracción de oro entre 1 a 2%, en la lixiviación de concentrados de pirita aurífera con leyes de oro por encima de 1700 g/TM y en un tiempo de 36 horas de lixiviación.

Según a nuestros antecedentes, los resultados de esta investigación se diferencian de los otros, principalmente debido a la composición mineralógica y al tiempo de lixiviación. Y concluimos que el uso del peróxido de hidrógeno es muy importante como reactivo oxidante y aportante de oxígeno para mejorar la extracción de metales preciosos como es el caso del oro.

CONCLUSIONES

Después de realizar las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio con minerales auríferos complejos y evaluar los resultados, se llegaron a las siguientes conclusiones.

1. Efectivamente se logró optimizar en gran medida la extracción de oro utilizando el reactivo del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación, logrando así una extracción del 93.87% de oro. Por otro lado, también se concluye que la incidencia del peróxido de hidrógeno es significativa puesto que al realizar una prueba metalúrgica sin el uso de este reactivo y a las mismas condiciones de lixiviación de la prueba anterior, se obtuvo una menor extracción de oro, llegando a ser el 79.23 %.
2. Asimismo, es conveniente realizar la lixiviación con el reactivo NaCN con una concentración de 1400 ppm con el cual se obtuvo la mayor extracción de oro igual a 93.87%. Y según el análisis de varianza la concentración del reactivo lixivante tiene una incidencia determinante en el proceso. En cuestión al consumo del reactivo lixivante hay una pequeña diferencia cuando se usa el peróxido de hidrógeno, llegando a reducirse en 1.13 %.
3. La concentración de peróxido de hidrógeno más adecuada y con el cual se logró optimizar la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación es igual a 1400 ppm
4. Por último, se concluye que efectivamente la interacción del pH y la concentración de peróxido de hidrógeno si influye de manera significativa en los resultados de extracción de oro para un pH igual a 11.5.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la comunidad metalurgista:

1. Se recomienda investigar la interacción del pH y la concentración de peróxido de hidrógeno a pH superiores a 12 para así conocer la influencia que tendrá en los resultados de extracción de oro.
2. Para profundizar y realizar un mejor control en la dosificación del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración, se recomienda hacer el control del parámetro del oxígeno disuelto en la pulpa, este control se debería llevar mediante un medidor portátil de oxígeno disuelto capaz de resistir la abrasión de la pulpa y evaluar en diferentes tiempos.
3. Asimismo, se recomienda realizar la evaluación del uso del peróxido de hidrógeno como pretratamiento a la lixiviación, para reducir aún más el consumo del cianuro de sodio y aumentar la extracción de oro.
4. Por último, se recomienda realizar pruebas a nivel piloto para determinar la viabilidad de utilizar el reactivo del peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración a una mayor escala.

REFERENCIAS

- Análisis de Varianza - Revista Chilena de Anestesia*. (s. f.). Recuperado 5 de agosto de 2024, de <https://revistachilenadeanestesia.cl/analisis-de-varianza/>
- Arias Odón, F. (2017). Efectividad y eficiencia de la investigación tecnológica en la universidad. *RECITIUTM Revista Electrónica de Ciencia y Tecnología del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo*, 3, 64.
- Austecol. (2022, septiembre 23). Optimización del Proceso de Cianuración del Oro. *Austecol-ingeniería a tu alcance*. <https://www.austecol.com/optimizacion-del-proceso-de-cianuracion-del-oro/>
- Fora Jinez, J. L. (2018). *Mejoramiento del proceso de extracción de oro y plata usando peróxido de hidrógeno en la unidad minera Pucamarca – Minsur – Tacna* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional UNJBG. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3184>
- Guillen Puma, H. M. (2019). *Análisis del proceso PAL en la recuperación aurífera en la Empresa Minera Century Gold Mines S.A.C* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12428>
- Holguin Silva, A. (2023). *Optimización del proceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Valetita IV de la compañía minera Tunkyro SAC. (Investigación Tecnológica)* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8254>
- La Brooy, S. R., Linge, H. G., & Walker, G. S. (1994). Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10), 1213-1241. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0892687594901147>

Leobardo, V. G. J., T, J. R. P., Salvador, A. S., García, J. L. V., & R, P. T. J. (2011).

Hidrometalurgia del Oro: Extracción por Solventes. Editorial Académica Española.

Lixiviación. (2014, julio 14). SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/info-lixipya/36982573>

López Rosello, A. (2014). *Efecto de la densidad de pulpa y de la concentración de cianuro de sodio en la lixiviación por agitación para la recuperación de oro en la planta de beneficio doble D – Arequipa* [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/2813>

López Velecela, F. (2015). Estudio de la lixiviación de oro refractario en un concentrado gravimétrico, usando peróxido de hidrógeno y ácido nítrico. *Instituto de Investigación Geológico Minero Metalúrgico*, 1(1), 1-7. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31761.25443>

Mamani Cabrera, Y. A. (2022). *Estudio de procesos para el tratamiento de minerales auríferos sulfurados de la Concesión Minera Nuevo Moisés Yungar—Huaraz* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/3910>

Marsden, J., & House, I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. SME.

Misari Chuquipoma, F. (2010). *Metalurgia del oro* -. San Marcos. <https://www.librosperuanos.com/libros/detalle/10999/Metalurgia-del-oro>

Morales Laurente, E. L. (2016). *Extracción de plata y oro del relave sulfurado de la Minera Santa Fe por lixiviación con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5518>

- Muñoz Morcillo, M. M., & Alvarado Ordoñez, L. (2008). *Evaluación de la recuperación de oro en solución aplicando el proceso de cianuración por agitación con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda a un mineral refractario* [Tesis de Grado, Universidad de Nariño]. SIRED Universidad de Nariño. <https://sired.udenar.edu.co/5632/>
- Parga, J. R., & Carrillo, F. R. (1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, 32(4), Article 4. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1996.v32.i4.907>
- Ponce Mazuelos, J. M. (2022). *Evaluación de la recuperación de oro y plata en minera Tunkyro S.A.C.* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14519>
- Quispe Castro, N. M. (2022). *Implementación del proceso para incrementar la recuperación de oro y plata en La Joya Mining SAC* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14793>
- Rivero Lazo, M., Meneses Jara, P., García Céspedes, J., Anibal Rivero, R., & Zevallos Choy, E. (2021). *Metodología de la Investigación*. Universidad Nacional Hermilio Valdizán. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-hermilio-valdizan/investigacion-i/metodologia-de-la-investigacion/68336146>
- Salazar Zeballos, M. A. (2014). Optimización de pruebas metalúrgicas para la lixiviación de relaves con contenido de planta aplicando peróxido. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2448>

- Santos Madrid, R. (2018). *Evaluación de cuatro metodos para recuperaci3n de oro a partir de un mineral refractario* [Tesis de Post-Grado, Centro de Investigaci3n en Materiales Avanzados, S.C.]. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2323>
- Soto Cahuana, A. E. (2021). *Evaluacion de la cianuraci3n de concentrados de oro y plata* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agust3n de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/774de808-45b9-40db-a011-5c60c86dcb57>
- Uceda Herrera, D. A. (2016). *Hidrometalurgia qu3mica e ingenier3a*. Instituto de Ingenieros de Minas del Per3. <https://iimp.org.pe/archivos/publicaciones/a621-20210824-062743-1552.pdf>
- Villca Aro, N. (2023). *Estudio experimental de pretratamiento de un mineral aur3fero refractario para la recuperaci3n de oro en la Empresa Minera Goldmins S.R.L.* [Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andres]. Repositorio Institucional UMSA. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/32768>
- Zevallos Vizcarra, G. G. (2014). *Optimizaci3n de la recuperaci3n de Oro con el uso de per3xido de hidr3geno a nivel de laboratorio en la Mina Arasi S.A.C.* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agust3n de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2628>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

TESIS TITULADA: “OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ORO UTILIZANDO EL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS COMPLEJOS DE LA COMPAÑÍA MINERA TUNKYRO S.A.C. PULLO-AYACUCHO”				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
General				
¿Sera posible la optimización de la extracción de oro, utilizando el peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C. Pullo-Ayacucho?	Optimizar la extracción de oro, utilizando el peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C Pullo-Ayacucho.	La optimización de la extracción de oro se logra utilizando el peróxido de hidrógeno como un reactivo aportante de oxígeno en el proceso de cianuración por agitación de minerales auríferos complejos de la Compañía Minera Tunkyro S.A.C.	<p>DEPENDIENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ % de extracción de Au. <p>INDEPENDIENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Concentración de NaCN. ✓ Concentración de peróxido de hidrógeno. ✓ pH. <p>INTERVINIENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Composición mineralógica. ✓ Temperatura del ambiente. ✓ Concentración de oxígeno del ambiente. ✓ Presión ambiental. 	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>Aplicada, tecnológico o experimental</p> <p>NIVEL DE INVESTIGACIÓN</p> <p>Explicativa</p> <p>DISEÑO EXPERIMENTAL</p> <p>Diseño factorial 2^k</p> <p>POBLACIÓN</p> <p>Mineral aurífero sulfurado provenientes de la concesión minera Valetita IV de la Compañía Minera Tunkyro</p> <p>MUESTRA</p> <p>400 kg de mineral Aurífero</p>
Específicos				
¿Cuál será la concentración de cianuro de sodio que incremente la extracción de oro?	Determinar la concentración de cianuro de sodio que va incrementar la extracción de oro.	Una concentración de 1400 ppm de NaCN incrementa los resultados en la extracción de oro.		
¿Cuál será la concentración de peróxido de hidrógeno más adecuada en el proceso de cianuración por agitación para optimizar la extracción de oro?	Establecer la adecuada concentración de peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración por agitación para la extracción de oro.	La concentración de peróxido de hidrógeno más adecuada que optimiza la extracción de oro es de 1.04%.		
¿Cómo influye la interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación?	Determinar la influencia de la interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación.	La interacción del pH y la concentración del peróxido de hidrógeno influye significativamente en la extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación.		

Anexo 2

Informe de ensayo ley de cabeza.

Quality Analysis...



Innovative Technologies

INFORME DE ENSAYO

AQ24-9849-05

A SOLICITUD DE:	CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL Cusco Cusco
POR CUENTA DE:	CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL Cusco Cusco
ASUNTO:	Análisis químico *Lote Au
CONTACTO:	Ccollana Quispe Jose Gabriel
TIPO DE MUESTRA(S)	Granulado
CANTIDAD DE MUESTRAS:	01
CONDICIONES DE RECEPCIÓN:	En bolsa de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN:	03-05-2024
FECHA DE REPORTE:	03-05-2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO:	Código Au-EF3, Au 30 gr FA – GRAV

RESULTADOS

Código interno	ITEM	Símbolo de Analito	Au	Au
		Código de Análisis	Au-EF3	Au-EF3
		Símbolo de Unidad	g/TM	Oz/TC
		Límite Detección	0.04	0.001
000697-5	1	CABEZA	9.67	0.282

Innovative Technologies

Ing. Ingrid Landeo Garay
CIP 94034

Nota: La Empresa no se responsabiliza por muestras con presencia de oro grueso, que no ha sido analizado por Newmont. Se recomienda analizar por Newmont para mayor exactitud en los resultados.

www.actlabsperu.com

Mza. 29 Lote 11 C.P. Pachacutec, Urb. Cerro Colorado - Arequipa / Central Telefónica (54) 665 625
Móvil: 974 353 366 / 956 240 326 / Correo: arequipa@actlabsperu.com

Anexo 3**Informe de análisis por ICP-OES**

Quality Analysis...

**INFORME DE ENSAYO****P24-625**

A SOLICITUD DE:	JOSE GABRIEL CCOLLANA QUISPE
POR CUENTA DE:	JOSE GABRIEL CCOLLANA QUISPE
ASUNTO:	Análisis Químico
CONTACTO:	Sr. Ccollana
TIPO DE MUESTRA(S):	Pulpa
CANTIDAD DE MUESTRA(S):	1
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	Secas
CONDICIONES DE RECEPCION:	En bolsas de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN:	Martes, 07 de Mayo de 2024
FECHA DE EJECUCION DE ENSAYO:	07-05-24 al 10-05-24
FECHA DE REPORTE:	Viernes, 10 de Mayo de 2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO:	Code P Mtra. peso de muestra Code VH-ME-ICP2 Análisis por ICP-OES Agua Regia
TOTAL DE PAGINAS:	11 (Incluida esta)

Los resultados corresponden al ensayo solicitado en la (s) muestra (s) recibida (s)

Los ensayos se realizaron en :
ACTLABS SKYLINE PERU SAC.
 Calle Martín de Murua N° 170-174
 Urb. Maranga- San Miguel, Lima - Peru

Innovative Technologies

Ing. Veronica Caso
Jefe de Laboratorio
ACTLABS SKYLINE PERU SAC

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de "Actlabs Skyline Perú S.A.C."
 "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".



Quality Analysis...



Innovative Technologies



P24-625

Page 2 of 11

RESULTADOS

Simbolo de Analito	Weight.	*Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	
Código de Análisis	P Mtra.	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	
Simbolo de Unidad	g	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	
Límite Detección	0.01	0.2	0.01	3	1	0.5	5	0.01	
1	000697-10-MINERALOGIA	241.70	1.5	1.33	> 10000	88	< 0.5	< 5	1.15

Quality Analysis...



Innovative Technologies

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de "Actlabs Skyline Perú S.A.C."
 "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".



Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú
 Central Telefónica: (51-1) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

Quality Analysis...



Innovative Technologies



P24-625

Page 3 of 11

RESULTADOS

Símbolo de Analito	Cd	Co	Cr	*Cu	Fe	Ga	Hg	K
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%
Límite Detección	1	1	1	0.5	0.01	10	1	0.01
1 000697-10-MINERALOGIA	4	6	79	49.9	1.86	< 10	< 1	0.70

Quality Analysis...



Innovative Technologies

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de "Actlabs Skyline Perú S.A.C."
 "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".



Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú
 Central Telefónica: (51-1) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

Quality Analysis...



Innovative Technologies



P24-625

Page 4 of 11

RESULTADOS

Símbolo de Analito	La	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%
Límite Detección	0.5	0.01	2	1	0.01	1	1	0.01
1 000697-10-MINERALOGIA	6.2	0.16	720	10	0.04	< 1	12	0.02

Quality Analysis...



Innovative Technologies

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de "Actlabs Skyline Perú S.A.C."
 "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".

Certificados por:



Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú
 Central Telefónica: (51-1) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

Quality Analysis...



Innovative Technologies



P24-625

Page 5 of 11

RESULTADOS

	Pb	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Te
Símbolo de Analito								
Código de Análisis	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2	VH-ME-ICP2
Símbolo de Unidad	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite Detección	2	0.01	5	0.5	10	10	0.5	10
1 000697-10-MINERALOGIA	189	0.85	< 5	1.6	< 10	< 10	1.2	87

Quality Analysis...



Innovative Technologies

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de "Actlabs Skyline Perú S.A.C."
 "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".


Certificados por:



Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú
 Central Telefónica: (51-1) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

Anexo 4: Informe de ensayos de soluciones (prueba I-11)

Quality Analysis...



Innovative Technologies

INFORME DE ENSAYOS

AQ24-9845-05

A SOLICITUD DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

POR CUENTA DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

ASUNTO: Análisis químico *Reconocimiento Au

CONTACTO: Ccollana Quispe Jose Gabriel

TIPO DE MUESTRA(S): Solución

CANTIDAD DE MUESTRAS: 11

CONDICIONES DE RECEPCIÓN: En botella de plástico


FECHA DE RECEPCIÓN: 03-05-2024

FECHA DE REPORTE: 03-05-2024

INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Código Au-LA1, Oro lectura AAS

RESULTADOS

Código interno	ITEM	Símbolo de Analito Código de Análisis Símbolo de Unidad Limite Detección	Au Au-EF3 PPM 0.04
000697-1	1	PLS-P1	3.022
000697-2	1	PLS-P2	3.601
000697-3	1	PLS-P3	3.126
000697-4	1	PLS-P4	3.758
000839-5	1	PLS-P5	2.971
000839-6	1	PLS-P6	3.553
000839-7	1	PLS-P7	3.274
000839-8	1	PLS-P8	3.825
000839-9	1	PLS-P9	3.468
000840-1	1	PLS-P10	3.486
000840-2	1	PLS-P11	3.266


Ing. Ingrid Landeo Garay
CIP 94034

www.actlabsperu.com

Mza. 29 Lote 11 C.P. Pachacutec, Urb. Cerro Colorado - Arequipa / Central Telefónica (54) 665 625
Móvil: 974 353 366 / 956 240 326 / Correo: arequipa@actlabsperu.com

Anexo 5: Informe de ensayos de rипios (prueba 1-11)

Quality Analysis...



Innovative Technologies

INFORME DE ENSAYOS

AQ24-9851-05

A SOLICITUD DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

POR CUENTA DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

ASUNTO: Análisis químico *Reconocimiento Au
CONTACTO: Ccollana Quispe Jose Gabriel
TIPO DE MUESTRA(S): En polvo
CANTIDAD DE MUESTRAS: 11
CONDICIONES DE RECEPCIÓN: En bolsa de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN: 03-05-2024
FECHA DE REPORTE: 03-05-2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Código Au-EF3, Au 30 gr FA – GRAV

RESULTADOS

Código interno	ITEM	Símbolo de Análito Código de Análisis Símbolo de Unidad Límite Detección	Au Au-EF3 g/TM 0.04	Au Au-EF3 Oz/TC 0.001
000697-6	1	RIPIOS-P1	2.54	0.074
000697-7	1	RIPIOS-P2	2.18	0.063
000697-8	1	RIPIOS-P3	2.18	0.063
000697-9	1	RIPIOS-P4	0.78	0.023
000839-9	1	RIPIOS-P5	2.64	0.077
000839-10	1	RIPIOS-P6	1.25	0.036
000839-11	1	RIPIOS-P7	1.81	0.052
000839-12	1	RIPIOS-P8	0.58	0.017
000839-13	1	RIPIOS-P9	1.35	0.039
000839-14	1	RIPIOS-P10	1.32	0.038
000839-15	1	RIPIOS-P11	2.00	0.058

Ing. Ingrid Landeo Garay

CIP 94034

Nota: La Empresa no se responsabiliza por muestras con presencia de oro grueso, que no ha sido analizado por Newmont. Se recomienda analizar por Newmont para mayor exactitud en los resultados.

www.actlabsperu.com

Mza. 29 Lote 11 C.P. Pachacutec, Urb. Cerro Colorado - Arequipa / Central Telefónica (54) 665 625
Móvil: 974 353 366 / 956 240 326 / Correo: arequipa@actlabsperu.com

Anexo 6: Informe de ensayos PLS prueba 8 (cinética)

Quality Analysis...



INFORME DE ENSAYOS

AQ24-10160-05

A SOLICITUD DE:	CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL Cusco Cusco
POR CUENTA DE:	CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL Cusco Cusco
ASUNTO:	Análisis químico *Reconocimiento Au
CONTACTO:	Ccollana Quispe Jose Gabriel
TIPO DE MUESTRA(S)	Solución
CANTIDAD DE MUESTRAS:	04
CONDICIONES DE RECEPCIÓN:	En botella de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN:	14-05-2024
FECHA DE REPORTE:	14-05-2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO:	Código Au-LA1, Oro lectura AAS

RESULTADOS

Código interno	ITEM	Símbolo de Analito Código de Análisis Símbolo de Unidad Límite Detección	Au Au-EF3 PPM 0.04
000840-3	1	PLS-P8(T1)	1.441
000840-4	1	PLS-P8(T2)	2.665
000840-5	1	PLS-P8(T3)	3.092
000840-6	1	PLS-P8(T4)	3.513

Ing. Ingrid Landeo Garay

CIP 94034

Anexo 7: Informe de ensayos PLS prueba 11 (cinética).

Quality Analysis...

**INFORME DE ENSAYOS****AQ24-10161-05**

A SOLICITUD DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

POR CUENTA DE: **CCOLLANA QUISPE JOSE GABRIEL**
Cusco
Cusco

ASUNTO: Análisis químico *Reconocimiento Au
CONTACTO: Ccollana Quispe Jose Gabriel
TIPO DE MUESTRA(S): Solución
CANTIDAD DE MUESTRAS: 04
CONDICIONES DE RECEPCIÓN: En botella de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN: 14-05-2024
FECHA DE REPORTE: *alysis...* 14-05-2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Código Au-LA1, Oro lectura AAS

RESULTADOS

Código interno	ITEM	Símbolo de Análisis Código de Análisis Símbolo de Unidad Limite Detección	Au Au-EF3 PPM 0.04
000841-3	1	PLS-P11(T1)	1.071
000841-4	1	PLS-P11(T2)	2.203
000841-5	1	PLS-P11(T3)	2.908
000841-6	1	PLS-P11(T4)	3.197

Ing. Ingrid Landeo Garay**CIP 94034**www.actlabsperu.com

Mza. 29 Lote 11 C.P. Pachacutec, Urb. Cerro Colorado - Arequipa / Central Telefónica (54) 665 625
Móvil: 974 353 366 / 956 240 326 / Correo: arequipa@actlabsperu.com

Anexo 8: Reporte de pruebas de cianuración en botellas (1-11)

N° de PRUEBA		1	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	10.5	0	600	1	0.56	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	10.5	2.35	587.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	10.5	2.25	562.5	0	0.04	0.00038	
22:30	7	10.5	1.75	437.5	0	0.15	0.00163	
06:30	13	10.5	2	500	0	0.09	0.00100	
06:30	22	10.5	1.55	387.5	0	0.20	0.00213	
18:30	34	10.5	2	500	0	0.09	0.00100	
15:30	48	10.5	2.35	587.5	0	0.01	0.00013	
TOTAL					1	1.15925	0.006375	

NaCN consumido 1.152875

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	2.86	Consumo H2O2 (kg/TM)	17.27

N° de PRUEBA		2	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	10.5	0	1400	1	1.31	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	10.5	5.55	1387.5	0	0.08	0.00088	
18:30	3	10.5	5.5	1375	0	0.02	0.00025	
22:30	7	10.5	4	1000	0	0.34	0.00363	
06:30	13	10.5	3.85	962.5	0	0.39	0.00413	
06:30	22	10.5	3.56	890	0	0.46	0.00488	
18:30	34	10.5	3.9	975	0	0.08	0.00088	
15:30	48	10.5	4.8	1200	0	0.08	0.00088	
TOTAL					1	2.767	0.0155	

NaCN consumido 2.7515

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	6.83	Consumo H2O2 (kg/TM)	17.27

N° de PRUEBA		3	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	10.5	0	600	1	0.56	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	10.5	2.35	587.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	10.5	1.95	487.5	0	0.11	0.00113	
22:30	7	10.5	2	500	0	0.09	0.00100	
06:30	13	10.5	1.85	462.5	0	0.13	0.00138	
06:30	22	10.5	1.95	487.5	0	0.11	0.00113	
18:30	34	10.5	1.95	487.5	0	0.11	0.00113	
15:30	48	10.5	2.15	537.5	0	0.06	0.00063	
TOTAL					1	1.171	0.0065	

NaCN consumido 1.1645

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	2.89	Consumo H2O2 (kg/TM)	58.07

N° de PRUEBA		4	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	10.5	0	1400	1	1.31	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	10.5	5.55	1387.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	10.5	5.5	1375	0	0.02	0.00025	
22:30	7	10.5	4	1000	0	0.38	0.00400	
06:30	13	10.5	3.85	962.5	0	0.41	0.00438	
06:30	22	10.5	3.56	890	0	0.48	0.00510	
18:30	34	10.5	3.9	975	0	0.40	0.00425	
15:30	48	10.5	4.8	1200	0	0.19	0.00200	
TOTAL					1	3.1994	0.0201	

NaCN consumido 3.1793

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	7.89	Consumo H2O2 (kg/TM)	17.27

N° de PRUEBA		5	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11.5	0	600	1.6	0.56	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11.5	2.35	587.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	11.5	2.15	537.5	0	0.06	0.00063	
22:30	7	11.5	1.75	437.5	0	0.15	0.00163	
06:30	13	11.5	2	500	0	0.09	0.00100	
06:30	22	11.5	1.55	387.5	0	0.20	0.00213	
18:30	34	11.5	1.85	462.5	0	0.13	0.00138	
15:30	48	11.5	2.35	587.5	0	0.01	0.00013	
TOTAL					1.6	1.218	0.007	

NaCN consumido 1.211

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	3.97	Consumo de NaCN (kg/TM)	3.00	Consumo H2O2 (kg/TM)	58.07

N° de PRUEBA		6	W mineral	403.03	Agregado		Eliminado	
Hora	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11.5	0	1400	1.6	1.31	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11.5	5.55	1387.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	11.5	5.5	1375	0	0.02	0.00025	
22:30	7	11.5	4.15	1037.5	0	0.34	0.00363	
06:30	13	11.5	3.85	962.5	0	0.41	0.00438	
06:30	22	11.5	3.56	890	0	0.48	0.00510	
18:30	34	11.5	3.95	987.5	0	0.39	0.00413	
15:30	48	11.5	4.85	1212.5	0	0.18	0.00188	
TOTAL					1.6	3.14065	0.019475	

NaCN consumido 3.121175

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	3.97	Consumo de NaCN (kg/TM)	7.74	Consumo H2O2 (kg/TM)	58.07

N° de PRUEBA		7	<i>W mineral</i>	403.03	Agregado		Eliminado	
<i>Hora</i>	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11.5	0	600	1	0.56	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11.5	2.25	562.5	0	0.04	0.00038	
18:30	3	11.5	2.15	537.5	0	0.06	0.00063	
22:30	7	11.5	1.95	487.5	0	0.11	0.00113	
06:30	13	11.5	2.25	562.5	0	0.04	0.00038	
06:30	22	11.5	1.55	387.5	0	0.20	0.00213	
18:30	34	11.5	2	500	0	0.09	0.00100	
15:30	48	11.5	2.25	562.5	0	0.04	0.00038	
TOTAL					1	1.124	0.006	

NaCN consumido 1.118

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	2.77	Consumo H2O2 (kg/TM)	58.07

N° de PRUEBA		8	<i>W mineral</i>	403.03	Agregado		Eliminado	
<i>Hora</i>	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11.5	0	1400	1.6	1.31	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11.5	5.6	1400	0	0.00	0.00000	
18:30	3	11.5	5.5	1375	0	0.02	0.00025	
22:30	7	11.5	3.5	875	0	0.49	0.00525	
06:30	13	11.5	3.95	987.5	0	0.39	0.00413	
06:30	22	11.5	3.55	887.5	0	0.48	0.00513	
18:30	34	11.5	4.55	1137.5	0	0.25	0.00263	
15:30	48	11.5	5.25	1312.5	0	0.08	0.00088	
TOTAL					1.6	3.0255	0.01825	

NaCN consumido 3.00725

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	3.97	Consumo de NaCN (kg/TM)	7.46	Consumo H2O2 (kg/TM)	58.07

N° de PRUEBA		9	<i>W mineral</i>	403.03	Agregado		Eliminado	
<i>Hora</i>	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11	0	1000	1.3	0.94	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11	3.95	987.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	11	3.25	812.5	0	0.18	0.00188	
22:30	7	11	2.55	637.5	0	0.34	0.00363	
06:30	13	11	2.15	537.5	0	0.43	0.00463	
06:30	22	11	3	750	0	0.24	0.00250	
18:30	34	11	3.45	862.5	0	0.13	0.00138	
15:30	48	11	3.55	887.5	0	0.11	0.00113	
TOTAL					1.3	2.3735	0.01525	

NaCN consumido 2.35825

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	3.23	Consumo de NaCN (kg/TM)	5.85	Consumo H2O2 (kg/TM)	37.81

N° de PRUEBA		10	<i>W mineral</i>	403.03	Agregado		Eliminado	
<i>Hora</i>	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11	0	1000	1.3	0.94	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11	3.95	987.5	0	0.01	0.00013	
18:30	3	11	3.25	812.5	0	0.18	0.00188	
22:30	7	11	2.45	612.5	0	0.36	0.00388	
06:30	13	11	2.25	562.5	0	0.41	0.00438	
06:30	22	11	3.35	837.5	0	0.15	0.00163	
18:30	34	11	3.45	862.5	0	0.13	0.00138	
15:30	48	11	3.35	837.5	0	0.15	0.00163	
TOTAL					1.3	2.33825	0.014875	

NaCN consumido 2.323375

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	3.23	Consumo de NaCN (kg/TM)	5.76	Consumo H2O2 (kg/TM)	37.81

N° de PRUEBA		11	<i>W mineral</i>	403.03	Agregado		Eliminado	
<i>Hora</i>	Tiempo de Lix. (Hr)	pH	AgNO3 (ml)	F NaCN libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)	NaCN (g)	Obs.
15:30	0	11.5	0	1400	1	1.31	0	Volumen de alícuota 10ml (factor 0.025)
16:30	1	11.5	5.45	1362.5	0	0.04	0.00038	
18:30	3	11.5	5.35	1337.5	0	0.06	0.00063	
22:30	7	11.5	2.85	712.5	0	0.48	0.00513	
06:30	13	11.5	3.15	787.5	0	0.46	0.00488	
06:30	22	11.5	4.95	1237.5	0	0.34	0.00363	
18:30	34	11.5	5	1250	0	0.41	0.00438	
15:30	48	11.5	5.15	1287.5	0	0.14	0.00150	
TOTAL					1	3.237	0.0205	

NaCN consumido 3.2165

Consumo de Reactivos					
Consumo de Cal (kg/TM)	2.48	Consumo de NaCN (kg/TM)	7.98	Consumo H2O2 (kg/TM)	0

Anexo 9: Fotografías de la preparación mecánica y muestreo del mineral.

Homogenización y cuarteo



Reducción de tamaño en molino de rodillos



Cuarteo mediante rifles



Pulverización del mineral



Anexo 10: Fotografías de preparación de pulpa

Pesaje del mineral para la prueba



Abastecimiento de agua



Abastecimiento de mineral



Etiquetado de reactores



*Anexo II: Fotografías de los procedimientos de titulación.***Agitación mecánica de reactores****Filtrado de solución****Solución alícuota (10 ml)****Adición de indicador (3 gotas de KI)**

Titulación con nitrato de plata**Reposición de reactivo (NaCN)****Anexo 12: Fotografías de la determinación de gravedad específica****Pesado de elementos para determinar G.E****Aforamiento de fluido**