



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EN CIANURACIÓN DE
MINERALES DE ORO PARA MEJORAR EL PORCENTAJE DE
RECUPERACIÓN EN LA EMPRESA MINERA SOL DE ORO S.R.L.
CHALA-AREQUIPA.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. GUIDO MARCELINO QUISPE APAZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EN CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO PARA MEJORAR EL PORCENTAJE DE RECUPE RACI

AUTOR

GUIDO MARCELINO QUISPE APAZA

RECUENTO DE PALABRAS

30570 Words

RECUENTO DE CARACTERES

159625 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

151 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.7MB

FECHA DE ENTREGA

Jul 8, 2024 8:45 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jul 8, 2024 8:47 PM GMT-5

● **6% de similitud general**

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

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)


ALFREDO MAMANI CANQUI
MSc. Ing. METALURGISTA
CIP: 45049
Asesor.



Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA

Resumen



DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano. A los docentes de la Escuela Profesional de Ing. Metalúrgica por contribuir en el proceso de mi formación profesional.

Att. Guido Mareglino Quispe Apaza



AGRADECIMIENTOS

Primero a dios ya que sin la bendición y su amor esto no hubiera sido posible, a mis padres por todo el aliento a lo largo de mi vida universitaria, por su paciencia apoyo que me brindaron, de igual manera al Dr. Alfredo Ammani Canqui por todo el apoyo para la realización de este proyecto. Así mismo agradezco a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno

Att. Guido Marcelino Quispe Apaza



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2.1 Problema general	21
1.2.2 Problema específico.....	21
1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.3.1 Hipótesis General.....	22
1.3.2 Hipótesis Específicas	22
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	22
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
1.5.1 Objetivo General.....	23
1.5.2 Objetivos Específicos	24



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	ANTECEDENTES	25
2.1.1	Internacionales	25
2.1.2	Nacionales.....	28
2.1.3	Locales	30
2.2	MARCO TEÓRICO	33
2.2.1	Carbón Activado	33
2.2.2	Adsorción del oro en carbón activado	35
2.2.3	Variables que afectan la adsorción del oro en el carbón activado	37
2.2.3.1	Efecto del carbón.....	37
2.2.3.2	Efecto de la concentración de oro	40
2.2.3.3	Efecto del pH.....	41
2.2.3.4	Efecto de la concentración de cianuro	42
2.2.3.5	Efecto de la temperatura.....	43
2.2.4	Cinética de adsorción.....	45
2.2.5	Proceso de Carbón en Pulpa (CIP)	53
2.2.6	Factores que influyen en el Proceso CIP	56
2.3	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	56
2.3.1	Principios Básicos de un Diseño Experimental	57
2.3.1.1	Repetición o Reiteración	57
2.3.1.2	Aleatorización	59
2.3.1.3	Control local.....	60
2.3.2	Ventajas y desventajas del Diseño Experimental	61
2.3.3	Etapas del Diseño Experimental	64



2.3.4	Diseño Factorial.....	65
2.3.5	Diseño Factorial 2^k	66
2.3.6	Diseño Factorial $2k$ con réplicas en el punto central del diseño.....	69
2.3.7	Cálculo de efectos.....	71
2.3.8	Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores.....	72
2.3.8.1	Hipótesis.....	74
2.3.9	Formulación del modelo matemático.....	76
2.3.10	Análisis de residuales.....	77
2.3.10.1	Técnicas gráficas para análisis de residuos.....	78

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....	80
3.1.1	Ubicación y acceso.....	80
3.1.1.1	Ubicación política.....	80
3.1.1.2	Ubicación geológica.....	80
3.2	PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO.....	81
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....	82
3.3.1	Población.....	82
3.3.2	Muestra.....	82
3.4	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA MUESTRA.....	83
3.5	DISEÑO ESTADÍSTICO.....	83
3.6	PROCEDIMIENTO.....	83
3.6.1	Metodología.....	83
3.6.2	Desarrollo del procedimiento de investigación.....	86
3.7	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERIMENTOS.....	87



3.8	MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO.....	90
3.8.1	Materiales.....	90
3.8.2	Equipos	91
3.8.3	Reactivos.....	92
3.8.4	Equipos de Protección	92
3.9	PRUEBAS EXPERIMENTALES CIP.....	92
3.10	PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS CIP A NIVEL DE LABORATORIO	93
3.11	DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA 108	
3.12	CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO	109
3.12.1	Carga de bolas.....	110
3.12.2	Volumen del molino	111
3.12.3	Velocidad crítica del molino.....	111
3.12.4	Velocidad de operación del molino	112
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1	VARIABLES DEL PROCESO.....	115
4.1.1	Variable Independiente	115
4.1.2	Variable Dependiente	115
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL 2^k, CON RÉPLICA CENTRAL	115
4.2.1	Cálculo de los efectos de las variables.....	117
4.2.2	Interpretación de los efectos	120



4.2.2.1 Interpretación de los efectos para el proceso de Carbón en Pulpa	121
4.2.3 Análisis de la varianza del diseño factorial	124
4.2.3.1 Suma de cuadrados de los efectos e interacciones	125
4.2.4 Aplicación del Teorema de Cochran	129
4.2.4.1 Media de cuadrados	130
V. CONCLUSIONES	137
VI. RECOMENDACIONES	138
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ANEXOS	144

Área: METALURGICA EXTRACTIVA

**Tema: EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EN CIANURACION PARA
MEJORAR EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN**

Fecha de sustentación: 23 de Julio del 2024



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Esquema de la estructura interna del carbón activado Mostrando la Porosidad.	36
Figura 2 Efecto de la granulometría en la velocidad de adsorción.....	39
Figura 3 Efecto del pH en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	42
Figura 4 Factores en el proceso CIP (Lixiviación carbón en pulpa).	56
Figura 5 Niveles: Diseño Factorial 2 ^k	67
Figura 6 Diseño factorial para 2k con tres factores y réplicas centrales.	70
Figura 7 Ubicación de la Planta Concentradora.	81
Figura 8 Etapas del trabajo experimental.	86
Figura 9 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN).....	96
Figura 10 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN).....	97
Figura 11 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1350 (g/L) ρ; 0.10 (%) NaCN y 36 H	98
Figura 12 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200; 1350 (g/L) ρ; 0.10 (%) NaCN y 36 H	99
Figura 13 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1250 (g/L) ρ; 0.20 (%) NaCN y 36 H	100
Figura 14 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200, 1250 (g/L) ρ; 0.20 (%) NaCN y 36 H	101
Figura 15 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1350 (g/L) ρ; 0.20 (%) NaCN y 36 H	102



Figura 16 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200, 1350 (g/L) ρ; 0.20 (%) NaCN y 36 H	103
Figura 17 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ; 0.15 (%) NaCN y 36 H	104
Figura 18 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) - 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ; 0.15 (%) NaCN y 36 H	105
Figura 19 Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ; 0.15 (%) NaCN y 36 H	106
Figura 20 Diagrama del procedimiento experimental.....	108
Figura 21 Molino de laboratorio experimental.....	109
Figura 22 % Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.....	114
Figura 23 Representación Geométrica de 2^3 (medias de los datos).	116
Figura 24 Grafica de Efectos principales.	123
Figura 25 Grafica de Interacción.....	123
Figura 26 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.	132
Figura 27 Normalidad de efectos estandarizados.....	134



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Valores de las variables codificadas	68
Tabla 2 Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor- p.....	74
Tabla 3 Ubicación política	80
Tabla 4 Coordenada WGS84 de la Planta Concentradora.	81
Tabla 5 Caracterización Mineralógica de la muestra.	83
Tabla 6 Niveles de las variables de estudio.	89
Tabla 7 Valores para realizar las réplicas centrales.	90
Tabla 8 Valores en las pruebas de Carbón en Pulpa (CIP).	90
Tabla 9 Prueba N° 01	95
Tabla 10 Prueba N° 02	96
Tabla 11 Prueba N° 03	97
Tabla 13 Prueba N° 04	98
Tabla 14 Prueba N° 05	99
Tabla 15 Prueba N° 06	100
Tabla 16 Prueba N° 07	101
Tabla 17 Prueba N° 08	102
Tabla 18 Prueba N° 09	103
Tabla 19 Prueba N° 10	104
Tabla 20 Prueba N° 11	105
Tabla 21 Características del molino de bolas de laboratorio.	109
Tabla 22 Características del molino de bolas de laboratorio.	111
Tabla 23 Características del molino de bolas de laboratorio.	113



Tabla 24	Niveles de las variables independientes.....	115
Tabla 25	Matriz del diseño factorial para el proceso de Carbón en Pulpa.....	116
Tabla 26	Matriz del diseño factorial y respuestas experimentales (codificada), para el proceso de Carbón en Pulpa.....	118
Tabla 27	Efectos de las variables e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.	120
Tabla 28	Resultado del cálculo de efectos.	122
Tabla 29	Suma de cuadrados de efectos e interacciones.....	126
Tabla 30	Análisis de varianza del diseño factorial.....	131
Tabla 31	Análisis de varianza (ANOVA).	133
Tabla 32	Análisis de T-Student.....	134



ACRÓNIMOS

%	:	Porcentaje
°C	:	Grados centígrados
µm	:	Micra
Bar	:	Unidad de presión
Cal	:	Caloría
cal/°K	:	Caloría por grado kelvin
Cal/g	:	Caloría por gramo
cm²	:	Centímetro cuadrado
cm²/seg	:	Centímetro cuadrado por segundo
cm³	:	Centímetro cúbico
Eh	:	Potencial rédox
g	:	Gramo
g/ cm³	:	Gramo por centímetro cubico
g/lt	:	Gramo por litro
g/TM	:	Gramo por tonelada métrica
g/Tn	:	Gramo por tonelada
K cal	:	Kilo caloría
Kg	:	Kilogramo
Kg/h	:	Kilogramos por hora
L/S	:	Relación líquido-sólido
m³/h	:	Metros cúbicos por hora
mg/cm²	:	Miligramo por centímetro cuadrado
mg/cm².h	:	Miligramo por centímetro cuadrado por hora
mg/lt	:	Miligramo por litro
min	:	Minuto
ml	:	Mililitro
mm	:	Milímetro
Oz/TM	:	Onza por tonelada métrica



p. p. b	:	Partes por billón
p. p. m:		Partes por millón
pH	:	Potencial de Hidrógeno
t/h	:	Toneladas por hora
TM	:	Toneladas métricas



RESUMEN

La presente investigación se centra en la evaluación y recuperación de oro mediante el proceso de cianuración, considerando las variables más influyentes en dicho proceso, se llevó a cabo en la Empresa Minera sol de Oro S.R.L., ubicada en el centro poblado de Achanizo, distrito de Chaparra, Provincia de Caraveli. El objetivo principal es mejorar el porcentaje de recuperación de oro en cianuración, prestando especial atención a los parámetros clave: granulometría, concentración de cianuro de sodio y densidad de pulpa. Para lograr esto, se evaluaron los parámetros de operación óptimos, incluyendo la granulometría, la densidad de pulpa y la concentración de NaCN. La metodología utilizada fue una investigación experimental-cuantitativa, utilizando el método de cianuración en pulpa, se llevarán a cabo pruebas experimentales a escala de laboratorio mediante un diseño factorial 2^3 . Se llevaron a cabo 8 pruebas experimentales en el laboratorio, con tres réplicas en el punto central. Se consideraron tres factores y dos niveles para cada uno: la granulometría (de 80% -#200 a 90 % -#200), la densidad de pulpa (de 1250 g/L a 1350 g/L) y la concentración de NaCN (de 0.10 % a 0.20 %). Los resultados mostraron que la granulometría óptima fue de 90 % -#200, con una densidad de pulpa de 1250 g/L, con la concentración de NaCN óptima que fue de 0.20 % y un tiempo de agitación de 36 horas en las pruebas de agitación. Se obtuvo un modelo matemático completo del proceso de cianuración de oro, indicando que las tres variables contribuyeron para incrementar la recuperación de oro. La adsorción de oro con carbón activado alcanzó un porcentaje esperado de aproximadamente 92.301%, lo que impulsó el incremento económico y favoreció el beneficio social, así como la posible expansión de la Planta de tratamiento de minerales.

Palabras Clave: Cianuración, Evaluación, Fuerza del cianuro, Granulometría, Parámetros de lixiviación.



ABSTRACT

The present research focuses on the evaluation and recovery of gold through the cyanidation process, considering the most influential variables in this process. It was carried out at Minera Sol de Oro S.R.L., located in the town of Achanizo, Chaparra district, Caraveli Province. The main objective is to improve the gold recovery percentage in cyanidation, with special attention to key parameters: particle size, sodium cyanide concentration, and pulp density. To achieve this, optimal operating parameters were evaluated, including particle size, pulp density, and NaCN concentration. The methodology employed was an experimental-quantitative investigation, using the pulp cyanidation method. Laboratory-scale experimental tests were conducted using a 2³ factorial design. Eight experimental trials were performed in the laboratory, with three replications at the central point. Three factors and two levels were considered for each: particle size (from 80% -#200 to 90% -#200), pulp density (from 1250 g/L to 1350 g/L), and NaCN concentration (from 0.10% to 0.20%). The results indicated that the optimal particle size was 90% -#200, with a pulp density of 1250 g/L and an optimal NaCN concentration of 0.20%, along with a 36-hour agitation time in the tests. A comprehensive mathematical model of the gold cyanidation process was obtained, demonstrating that all three variables contributed to increased gold recovery. Adsorption of gold onto activated carbon achieved an expected percentage of approximately 92.301%, driving economic growth and benefiting the community, as well as potentially expanding the mineral treatment plant.

Keywords: Cyanidation, Cyanide strength, Evaluation, Granulometry, Leaching parameters.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La minería de oro ha sido una práctica de significativa relevancia económica y social desde tiempos antiguos. A lo largo de la historia, la extracción de este precioso metal ha impulsado el desarrollo de civilizaciones y ha sido un pilar en la economía de muchas naciones. No obstante, la realidad contemporánea presenta nuevos desafíos; el agotamiento de depósitos auríferos de alta pureza ha conducido a la necesidad de explotar minerales de oro refractario. Estos minerales, debido a su composición y propiedades físico-químicas, presentan complejidades en su procesamiento, tales como la presencia de minerales acompañantes que dificultan la extracción del oro. Actualmente se tiene tecnología para el tratamiento de minerales por medio del proceso de cianuración y algunas alternativas que actualmente se encuentran en la etapa de desarrollo, la aplicación de un proceso se debe a un gran número de factores propios de cada planta e independiente del proceso en sí (Vizcarra Medina, 2014).

En la minería del oro es fundamental la evaluación de los parámetros, las condiciones de operación de la planta, análisis de las actividades que actualmente se desarrolla en la Planta de Beneficio, identificando los impactos ambientales que generan estos en la calidad del agua, aire, suelo flora y fauna y socio cultural, a fin de establecer posteriores programas de manejo ambiental.

La cianuración se ha establecido como un método estándar para la extracción de oro de sus minerales. Sin embargo, su eficacia puede verse comprometida cuando el oro se encuentra en asociación con minerales sulfurados. En estos casos, la adición de nitrato de plomo a la mezcla de cianuración puede incrementar significativamente la recuperación del oro, además de disminuir el consumo de cianuro. Esta técnica ha sido



parte del arsenal de las plantas de cianuración desde los años 30. Otros compuestos, como el mercurio, el talio y el bismuto, han demostrado tener efectos beneficiosos similares en la extracción del oro.

En el cerro angostura a 16 Km del distrito de Chala camino al centro poblado de Achanizo, situado en el distrito de Chaparra, dentro de la pintoresca Provincia de Caraveli, en el departamento de Arequipa, los procesos de extracción de oro y plata implican el uso de sustancias tóxicas como el mercurio y el cianuro. Estos reactivos tienen un impacto ambiental significativo, especialmente en los recursos hídricos de la zona.

En años recientes, la cianuración por agitación se ha implementado en La Rinconada, ganando popularidad rápidamente debido a las ventajas económicas que ofrece y la eficiencia con la que permite recuperar el oro fino de los minerales pesados presentes en los concentrados gravimétricos. Este sistema se opera en lotes dentro de tanques cilíndricos de 12 x 12 pies, donde la pulpa es agitada mecánicamente. Con un contenido de sólidos del 30 al 40%, la agitación se mantiene por 24 horas utilizando una concentración de cianuro de sodio de 3,0 a 4,0 g/L. La solución rica en oro se separa mediante filtración en lechos de arena, seguida de la recuperación del oro disuelto usando zinc en viruta. Los metales preciosos se extraen finalmente mediante fundición en hornos tubulares.

A pesar de que la cianuración por agitación ha mejorado notablemente la disolución del oro, con tasas de recuperación entre el 80 y el 90% dependiendo de la granulometría del mineral, se enfrenta al problema de pérdidas significativas de cianuro y oro durante la humectación del mineral. Esto se debe a que la precipitación del oro con zinc requiere la filtración de la solución rica, etapa en la cual los sólidos retienen una cantidad considerable de la solución.



En el Perú, un país que sobresale del desarrollo económico, con un potencial mineralógico es de vital importancia los estudios evaluativos de los parámetros en las plantas de beneficio metalúrgica (Apolinario Santos & Ibarra Ceras, 2023), todo esto para mejorar el porcentaje de recuperación del oro en la Empresa Minera Sol de Oro. S.R.L.

La Empresa Minera Sol de Oro. S.R.L., consta de las siguientes secciones: Trituración, Molienda, Clasificación, Cianuración y Carbón en Pulpa. Es por ello que se presenta el presente trabajo titulado “Evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación en la empresa minera Sol de Oro S.R.L. Chala-Arequipa. El presente trabajo tiene por objetivo Evaluar los parámetros más influyentes como: la granulometría, densidad de pulpa y fuerza del cianuro; para así aumentar la recuperación de Oro (Vilca & Carlos, 2000).

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiencia en la recuperación de oro a través del proceso de cianuración es un desafío constante para la industria minera, especialmente para la empresa Minera Sol de Oro S.R.L. ubicada en Chala-Arequipa. A pesar de los avances tecnológicos y metodológicos, existen variables críticas dentro del proceso que aún no han sido optimizadas, lo que resulta en una recuperación subóptima del oro y, por ende, en una disminución de la rentabilidad y competitividad de la empresa.

La presente investigación se enfoca en evaluar cómo la granulometría, la concentración de cianuro de Sodio y la densidad de pulpa influyen directamente en la eficacia del proceso de cianuración y, por consiguiente, en el porcentaje de recuperación de oro. Se ha observado que la falta de control y optimización de estos parámetros puede conducir a una recuperación ineficiente y a una pérdida significativa de recursos.



El objetivo principal de este estudio es desarrollar un modelo experimental que permita determinar la relación entre estas variables y la recuperación de oro, con el fin de establecer un conjunto de parámetros óptimos que mejoren la eficiencia del proceso. Se utilizará un diseño factorial de tipo 2k para obtener un modelo matemático representativo, y se empleará el programa estadístico Excel 2021 para el análisis de los datos.

La relevancia de resolver este problema radica en la posibilidad de incrementar la recuperación de oro, lo que se traduciría en un aumento de la producción y calidad del mineral, mejorando así su valor en el mercado y asegurando la sostenibilidad y crecimiento de la empresa Minera Sol de Oro S.R.L. en un entorno competitivo y exigente.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿Como evaluar los parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de la recuperación de oro mediante pruebas metalúrgicas?

1.2.2 Problema específico

- ¿Cómo se determinará la granulometría óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro?
- ¿Cómo se determinará la concentración de cianuro óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro?



- ¿Cómo se determina la densidad de pulpa óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro?

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis General

- Realizando la evaluación en los parámetros en cianuración de minerales de oro se mejorará el porcentaje de recuperación de oro mediante pruebas metalúrgicas.

1.3.2 Hipótesis Específicas

- Determinando la granulometría óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro se mejorará el porcentaje de recuperación de oro.
- Determinando la concentración de cianuro óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro se mejorará el porcentaje de recuperación de oro.
- Determinar la densidad de pulpa óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro se mejorará el porcentaje de recuperación de oro.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Desde una perspectiva técnica, el proceso de carbón en pulpa (CIP) es reconocido por su capacidad para recuperar oro de soluciones de cianuro, siendo una de las tecnologías más avanzadas en la industria minera. Sin embargo, la eficiencia de este



proceso puede variar significativamente dependiendo de factores como la calidad del carbón activado utilizado, las condiciones operativas y la naturaleza del mineral procesado. Por lo tanto, es crucial evaluar y optimizar continuamente el proceso CIP para asegurar la máxima recuperación de oro.

Económicamente, la fluctuación en los precios del oro hace que la optimización de los procesos de recuperación sea aún más relevante. Una mejora en la eficiencia del proceso CIP puede resultar en un aumento significativo en la cantidad de oro recuperado, lo que a su vez puede tener un impacto directo en la rentabilidad de la empresa minera.

Además, desde el punto de vista ambiental, la optimización del proceso CIP puede contribuir a una operación más sostenible. Al mejorar la recuperación de oro, se puede reducir la cantidad de residuos generados y minimizar el impacto ambiental asociado con la extracción de minerales.

Finalmente, esta investigación también tiene un valor académico y metodológico, ya que puede proporcionar datos valiosos para futuros estudios y aplicaciones en el campo de la ingeniería metalúrgica, así como en la gestión de recursos minerales.

En resumen, la justificación para esta investigación radica en su potencial para mejorar la eficiencia operativa, aumentar la rentabilidad económica y promover prácticas de minería más responsables desde un punto de vista ambiental y social.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

- Realizar la evaluación los parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro mediante pruebas metalúrgicas.



1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar la granulometría óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro.
- Determinar la concentración de cianuro óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro.
- Determinar la densidad de pulpa óptima en la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro para mejorar el porcentaje de recuperación de oro.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Internacionales

La optimización de varios factores en la cianuración del oro ha sido un tema frecuente de investigación para mejorar el procesamiento del oro. Los hallazgos han sido diversos, dependiendo de las condiciones operativas y la composición mineralógica de los minerales de oro. Aunque la práctica de la cianuración en plantas de procesamiento de oro en Canadá ha mejorado significativamente en los últimos años, la optimización del proceso aún está en desarrollo. En este sentido, se han realizado esfuerzos para comprender el papel de las variables clave en la cianuración del oro y desarrollar una estrategia efectiva de utilización de reactivos para las plantas de procesamiento de oro. Se presentan y discuten estudios de laboratorio que involucran dos casos de minerales refractarios leves, analizando la relación entre la concentración de cianuro "libre", el nivel de oxígeno disuelto y la adición de nitrato de plomo, y su efecto en la tasa de disolución del oro, la extracción de oro y el consumo de cianuro. Se logró una reducción de hasta la mitad a tres veces en el consumo de cianuro y un aumento de hasta tres veces en la tasa de disolución del oro, en comparación con el rendimiento de la planta (Kondos et al., 1995).

El presente artículo es el segundo de una serie que aborda el efecto de las impurezas en la lixiviación y electroquímica del oro en soluciones de cianuro. En otra publicación, se demostró que el oro muy puro no se disuelve en soluciones de cianuro igualmente puras. Se cree que, bajo estas condiciones, el AuCN



bloquea completamente la superficie del oro, siendo la disolución de esta película el paso limitante. También se mostró que la lixiviación del oro depende críticamente de su pureza; en soluciones de cianuro de grado reactivo analítico (AR), el oro se disuelve a una velocidad mensurable. Por lo tanto, no es sorprendente que la mayoría de los estudios anteriores hayan arrojado resultados contradictorios. En el primer artículo de esta serie, se demostró que el plomo mejora significativamente la lixiviación del oro en soluciones de cianuro. El plomo modifica el oro mediante cementación, interrumpiendo la película que existe en su superficie. El presente artículo presenta un estudio sobre el papel de la plata en la lixiviación de oro con cianuro. A pesar de que la mayoría del oro natural contiene algo de plata, actualmente existe muy poco conocimiento sobre el efecto de la plata en la lixiviación del oro en soluciones de cianuro. Sun et al. han demostrado que el comportamiento electroquímico del oro en soluciones de cianuro difiere del de una aleación 50% oro/50% plata. Sin embargo, no se han publicado estudios sobre la oxidación o lixiviación de aleaciones de oro que contengan trazas de plata. El objetivo del presente artículo es abordar estas deficiencias (Jeffrey & Ritchie, 2000).

Durante los últimos 100 años, la cianuración ha sido el proceso más importante para extraer oro de sus minerales. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de artículos publicados sobre la reacción entre el oro y el cianuro, existe poca concordancia sobre la cinética y el mecanismo de esta reacción crucial. En el presente estudio, se investigó la lixiviación en función de la pureza de la solución utilizando un microbalance de cuarzo electroquímico rotativo. Sorprendentemente, los resultados experimentales muestran que el oro puro no se lixivía en soluciones de cianuro altamente puras y aireadas. Por otro lado, el oro



se lixivia a una velocidad mensurable en soluciones preparadas con reactivos de grado analítico (AR). Por lo tanto, no es de extrañar que muchas investigaciones anteriores hayan arrojado datos contradictorios. Se ha propuesto un modelo basado en la formación y disolución de una película en forma de cadena de AuCN para explicar estos resultados. Se cree que la disolución de AuCN ocurre solo en los extremos de la cadena, y la presencia de impurezas en la solución de cianuro acelera este proceso al depositarse en la superficie del oro y aumentar el número de extremos de cadena (Jeffrey & Ritchie, 2001).

A nivel global, las leyes de los yacimientos de cobre, plata y oro han estado disminuyendo, y la mineralogía que los rodea se ha vuelto más diversa y compleja. El proceso de cianuración para la producción de oro ha sido dominante durante más de 130 años debido a su selectividad y viabilidad en la industria minera. Por esta razón, la industria ha estado ajustando sus métodos para la extracción de oro, utilizando procesos y tecnologías más eficientes. A menudo, el oro se encuentra junto con el cobre y la plata en minerales y concentrados. Por lo tanto, la aplicación de cianuro a estos tipos de minerales puede presentar dificultades, ya que la diversidad de minerales encontrados en estos minerales puede complicar la cianuración. Este artículo describe las prácticas, procesos y reactivos propuestos para el tratamiento efectivo de estos minerales. El objetivo principal de este artículo de revisión es presentar los procesos hidrometalúrgicos que actualmente existen en la industria minera para el tratamiento de minerales de plata, cobre y oro, así como los tratamientos de concentrados. Además, este artículo tiene como objetivo presentar los desafíos más importantes que enfrenta actualmente la industria, para establecer futuros procesos más eficientes y factibles (Medina & Anderson, 2020).



2.1.2 Nacionales

Muñoz y Alvarado (2008), en su investigación se realizó un estudio mineralógico y químico de cuatro minerales auríferos para identificar las características que afectan el proceso de cianuración. Además, se sugirieron los métodos de extracción más adecuados para cada mineral. La recuperación de oro en solución final por cianuración estándar fue un factor crucial para determinar la refractariedad de los minerales estudiados. La prueba reveló que el mineral “Playa Dorada” es refractario, con una recuperación de oro en solución del 62.4%. Para el mineral refractario, se evaluaron tratamientos oxidativos y cianuración en molienda. Los métodos más efectivos resultaron ser la cianuración en agitación con previa tostación del mineral y la cianuración en agitación con adición de peróxido durante la preaireación. Estos enfoques lograron recuperaciones de oro en solución final del 91.63% y 73.11%, respectivamente, demostrando la importancia de superar los obstáculos que dificultan la recuperación eficiente del metal precioso. (Muñoz & Alvarado, 2008)

En este estudio de investigación, se analizó la extracción de oro mediante cianuración a nivel industrial, específicamente en la industria minera. El trabajo se llevó a cabo en la planta minera VICUS S.A.C., evaluando los parámetros de operación durante un período de 25 días. El objetivo principal fue diagnosticar el circuito de molienda y cianuración para establecer los parámetros de control en las operaciones de la mina, cuyos resultados clave son los siguientes: Para una carga circulante menor a 0.9, se observaron variaciones en las densidades de pulpa alimentada al hidrociclón y de rebose. El control de operación mantuvo una densidad de pulpa de alimentación al hidrociclón entre 1382.61 g/L y 1417.63 g/L, con densidades en el rebose de 1300.73 g/L a 1330.87 g/L. En la molienda, la



densidad de pulpa osciló entre 1726.2 g/L y 1783.16 g/L, logrando una liberación pasante a malla 200m del 71.736% al 77.948%. La recuperación de oro se controló mediante una fuerza de cianuro en el rango de 1.2178 g/L a 1.3486 g/L, con una recuperación en la extracción de oro del 88.873% al 90.825% (Cornelio La Rosa, 2017).

El objetivo de este estudio fue evaluar la recuperación de oro y plata en la mina Tres Valles SAC mediante los procesos de flotación y cianuración. A continuación, se presentan los resultados y las condiciones experimentales: Ley del mineral: 14.26 g/t de oro, 190 g/t de plata y 13.85% de hierro. Flotación: Se realizó con un mineral pasante a la malla 200 (80%) y un 33% de sólidos. Se añadieron 71 g/t de MX-945, 65 g/t de Z6 y 72 g/t de D250. Resultados de la flotación: 38.3 g/t de oro y 532 g/t de plata, con una recuperación del 94.34% y 91.38%, respectivamente. Cianuración: Se aplicó a este mineral con un consumo de 4.97 kg/t de NaCN y 1.15 kg/t de CaO. Para el mineral sulfurado, el proceso de **flotación** demostró ser más eficiente en la recuperación de oro y plata. Para el mineral oxidado, la **cianuración** logró una recuperación superior al 90% para el oro (Bonilla Cabello & Mendoza Rojas, 2022).

Fernandez Astete y Caso Collachagua (2022), se sumergió en el análisis detallado de los parámetros de cianuración aplicados a los relaves de la mina Catalina, ubicada en la región de La Libertad. El objetivo central de este estudio fue mejorar la eficiencia en la recuperación de oro a partir de estos materiales residuales, que contienen valiosos minerales auríferos. Los resultados obtenidos fueron alentadores. Después de ajustar los parámetros mencionados, se logró un incremento significativo del 8% en la recuperación de oro en comparación con las condiciones iniciales. Este avance tiene implicaciones económicas y ambientales,



ya que la recuperación eficiente de oro a partir de relaves contribuye a la sostenibilidad de la industria minera. (Fernandez Astete & Caso Collachagua, 2022)

Apolinario Santos y Ibarra Ceras (2023), llevaron a cabo un estudio exhaustivo en la mina La Virgen, ubicada en la región de Cajamarca. Su objetivo principal fue mejorar la eficiencia de la cianuración en minerales auríferos refractarios, que presentan dificultades en la extracción convencional de oro debido a su composición mineralógica. Los autores se centraron en la optimización de varios parámetros clave para lograr una mayor recuperación de oro. A continuación, se detallan los aspectos evaluados: Concentración de cianuro, pH del medio, Granulometría del mineral y Agentes oxidantes. Los resultados fueron prometedores. Mediante la optimización conjunta de estos parámetros, los investigadores lograron un incremento del 12% en la recuperación de oro en comparación con las condiciones iniciales. Este avance es significativo, especialmente considerando la importancia económica y ambiental de la minería aurífera. (Apolinario Santos & Ibarra Ceras, 2023)

2.1.3 Locales

Los procesos de beneficio y tratamiento de minerales auríferos en la zona minera actualmente son poco eficientes, con porcentajes de recuperación de oro que no superan el 40%. En este trabajo, se recopilan los resultados de análisis y caracterización de minerales auríferos de la Compañía Minera Arias. El objetivo es fomentar la colaboración entre los mineros y la universidad, ya que, según los hallazgos de esta investigación, es posible lograr una disolución de oro de hasta el 85% en los minerales auríferos. Esta afirmación se basa en los análisis



microscópicos y la lixiviación en botella del mineral, que permitieron estimar las condiciones óptimas para los procesos metalúrgicos en una futura planta de tratamiento. El porcentaje de sólidos más adecuado para el manejo de la pulpa fue del 36% en peso. Además, la alta concentración de minerales en las áreas de labor serpentina superficie, labor serpentina galería y nueva esperanza no presentó dificultades en los procesos de separación sólido-líquido, entre otras especificaciones operativas. Según la caracterización mineralógica y metalúrgica, el tamaño promedio del oro presente en el mineral es menor a 75 μm , lo que sugiere que el proceso de cianuración por agitación sería el más adecuado. Los resultados del diagnóstico de lixiviación fueron muy satisfactorios, ya que el 94% del oro en las muestras se encuentra en forma libre, lo que podría acelerar los tiempos de cianuración (Huaricapcha & Yonel, 2019).

En este estudio, se buscó identificar las condiciones y variables óptimas para procesar un mineral de oro y lograr una alta eficiencia en la recuperación del metal precioso. Se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar el mineral y se ejecutó un ensayo de moliendabilidad. Luego, se clasificó una muestra de mineral mediante tamices Tyler y se sometió a concentración gravimétrica en una mesa Wilfley. Los finos resultantes de la concentración, con una granulometría 100% pasante de 170 mallas Tyler, se sometieron a pruebas de flotación convencional. Para optimizar la recuperación de oro, se aplicó un diseño experimental de análisis factorial 2k con punto central y tres variables, utilizando el método de superficie de respuesta. Los resultados mostraron que el mineral es altamente lixiviable en cianuro, logrando una recuperación del 89.35% de oro. Esto confirma que el diseño experimental estadístico es valioso para el procesamiento eficiente de minerales, permitiendo encontrar los parámetros



óptimos para la cianuración, como el tiempo de lixiviación, la granulometría del mineral y la concentración de NaCN (Ruiz-Córdoba et al., 2019).

El objetivo de esta investigación es proporcionar información valiosa a mineros artesanales, pequeños mineros y otros interesados para que puedan desarrollar experimentalmente el proceso de cianuración. Esto busca llenar el vacío existente en este tipo de trabajos. Se reconoce la importancia del proceso experimental, que debe comenzar desde la exploración inicial y continuar hasta la explotación completa del yacimiento. El objetivo es modificar o mejorar los métodos empleados para hacerlos más eficientes y económicos, evitando los fracasos comunes en la minería peruana. El mineral estudiado proviene de yacimientos en la Región Ica, específicamente en la Provincia de Nazca, Distrito de El Ingenio. En estos yacimientos, el oro y otros elementos valiosos se encuentran en forma de inclusiones en la ganga, con un tamaño promedio de partícula de 0.02 mm y un contenido metálico de 1 a 2 gramos por tonelada corta de oro. El trabajo experimental se divide en dos partes: pruebas de diagnóstico para verificar si el mineral cumple con el proceso propuesto, y pruebas a escala de laboratorio en columnas con 20 kilogramos de mineral. Estas últimas utilizan variables establecidas en las pruebas de diagnóstico, con la única diferencia de una mayor granulometría (Cacha, 2018).

El oro se encuentra asociado con minerales sulfurados como la pirita, pirrotita y marcasita. Estos minerales son refractarios y no responden bien a la cianuración convencional debido a los altos consumos de cianuro de sodio y las recuperaciones limitadas. Por lo tanto, se han investigado nuevos métodos de tratamiento para estos minerales. En un estudio, se aplicó un proceso de lavado alcalino de la pulpa, aireado con cal y adición de óxido de plomo antes de la



cianuración del mineral sulfurado. Los resultados mostraron una recuperación del 92,84 % y un consumo de NaCN de 3,78 kg/TM. El aireado alcalino tuvo el mayor impacto en la recuperación de oro y la reducción del consumo de NaCN, alcanzando niveles de 86,78 % y 3,81 kg/TM, respectivamente. Estos valores mejoraron significativamente en comparación con el mineral sin tratamiento previo, que tenía una recuperación del 76,39 % y un consumo de 4,93 kg/TM (Valverde, 2023).

Villca Aro (2023), en este estudio, se analizó una muestra de colas auríferas refractarias provenientes del proceso de concentración gravimétrica de mineral de veta. La muestra, proporcionada por la Empresa Minera Goldmins SRL., tenía una ley de cabeza aproximada de 31 gAu/t y una granulometría que variaba entre 1,06 pulgadas y malla 20 de la serie ASTM. Se llevaron a cabo dos etapas importantes para la recuperación del oro de estas colas: Se realizó una remolienda de la muestra a dos tamaños de partícula: -150 y -200 mallas (equivalentes a 105 y 75 micrómetros, respectivamente). Luego, se oxidó la carga utilizando peróxido de hidrógeno (H₂O₂) o oxígeno industrial (O₂). La cianuración se llevó a cabo en un tanque de agitación con una concentración de cianuro de sodio (NaCN) entre 0,94 y 3,77 g/L. Se realizaron nueve pruebas experimentales, manteniendo constantes los parámetros de porcentaje de sólidos, temperatura, velocidad de agitación y pH. (Villca Aro, 2023)

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Carbón Activado

El carbón activado, según (Crittenden, 2005), es una denominación que abarca diversas formas del carbono amorfo. Este material se caracteriza por su



estructura microcristalina caótica y mutuamente interconectada, la cual forma una red porosa notable. La singularidad de esta estructura radica en su vasta área superficial, que le confiere una capacidad de adsorción excepcional.

En el análisis molecular, (Trujillo Fajardo, 2008) describen al carbón activado como un pariente cercano de la estructura cristalina del grafito. Sin embargo, es la presencia de imperfecciones en los microcristales lo que potencia su reactividad y le permite interactuar eficazmente con su entorno.

Yannopoulos (1991) resalta la porosidad intrínseca del carbón activado, definiéndolo como un material con una extensa superficie interna por unidad de masa. Este término engloba una familia de compuestos con variadas propiedades adsorptivas, sin una fórmula estructural o composición química uniforme.

Ibragimova et al. (2007) amplía esta definición, señalando que el carbón activado se obtiene a partir de la carbonización de materiales orgánicos, seguida de un tratamiento con agentes oxidantes como CO_2 , aire o vapor de agua, o incluso con productos químicos como el H_3PO_4 . Estos procesos se realizan con el fin de incrementar la porosidad del material.

Además, se destaca que, aunque el carbón activado comparte similitudes estructurales con el grafito, su orden interno es menos perfecto. Esta imperfección contribuye a su extrema porosidad, que puede alcanzar áreas superficiales entre 500 y 1,500 m^2/g . Esta característica es crucial para su función en la adsorción de metales preciosos, como el oro, según (Fernández et al., 2006).



2.2.2 Adsorción del oro en carbón activado

Misari Chuquipoma (2010) destaca que, en el proceso de adsorción, el oro disuelto en soluciones cianuradas es efectivamente recuperado mediante el uso de carbón activado. Los iones de calcio presentes en dichas soluciones actúan como catalizadores, mejorando la adsorción del complejo aurocianuro, mientras que los iones de sodio tienden a inhibir este proceso, especialmente en condiciones con un pH superior a 10. Para comprender más a fondo este fenómeno, se han propuesto diversas teorías:

- **Teoría de adsorción física:** Esta teoría sugiere que la adsorción es un proceso físico, principalmente influenciado por las fuerzas de Van der Waals.
- **Teoría química compleja:** Según esta teoría, la adsorción es el resultado de la neutralización de grupos ácidos en la superficie del carbón.
- **Mecanismo electroquímico:** Este mecanismo ocurre cuando el oxígeno entra en contacto con una suspensión acuosa de carbón, resultando en la reducción a grupos hidrófilos y la liberación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

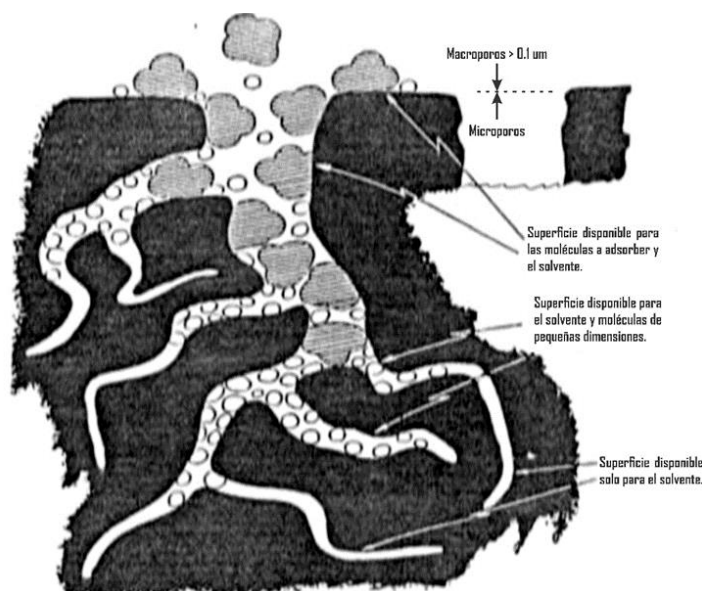
Además, se observa que el carbón activado posee una estructura compuesta tanto por macro como por microporos. Estos poros, a través de la atracción electrostática, capturan los complejos cianurados de oro, entre otros. La etapa en la que ocurre este fenómeno se conoce como Adsorción. La cinética de adsorción del oro es notablemente rápida, y la cantidad de carbón que se introduce en el proceso depende de un balance meticuloso entre los metales presentes y la

capacidad del carbón para capturar oro o cualquier otro metal, lo cual está directamente relacionado con la calidad y cantidad del carbón utilizado (Asalde Horna, 2010).

Por su parte, (Apfata Taipe, 2017) señala que el principio de la recuperación de oro mediante carbón activado se basa en la habilidad de las materias carbonáceas activadas para adsorber el oro de las soluciones de cianuro. Aunque esta propiedad es bien conocida, especialmente por los problemas que puede causar durante la cianuración de minerales con contenido de carbón, su aplicación y desarrollo efectivo son relativamente recientes. Esto se debe en gran medida al diseño de un proceso de elusión eficiente que permite extraer el oro del carbón, facilitando así su reciclaje en lugar de su incineración. Una ventaja significativa del carbón activado es su capacidad para procesar no solo las soluciones auríferas sino también la pulpa mineral que ha sido tratada previamente con cianuro.

Figura 1

Esquema de la estructura interna del carbón activado Mostrando la Porosidad.



Fuente: (Apfata Taipe, 2017)



2.2.3 Variables que afectan la adsorción del oro en el carbón activado

En los últimos diez años, la implementación del carbón activado en la extracción de oro ha experimentado un crecimiento significativo. Este auge ha impulsado numerosas investigaciones y proyectos de desarrollo con el fin de profundizar en la comprensión de la química y los mecanismos subyacentes al proceso de adsorción. El propósito de estos estudios es la creación de modelos predictivos y manejables que optimicen la operatividad de las plantas de procesamiento. Estos modelos buscan garantizar un control eficiente y una reducción al mínimo de las pérdidas de oro. Esto es crucial tanto en la solución barren, que es el líquido residual post-extracción, como en los residuos finos del carbón, donde aún puede haber partículas valiosas. La meta es alcanzar una eficiencia máxima en la recuperación del oro, minimizando cualquier desperdicio durante el proceso (Villegas Quispe, 2015).

2.2.3.1 Efecto del carbón

Numerosas marcas de carbón se encuentran disponibles comercialmente y estudios recientes fueron llevados a cabo para establecer una relación entre la constante de capacidad de equilibrio del carbón activado para el oro y los parámetros fácilmente determinados, como: contenido de cenizas, área superficial y pH, respectivamente. Se encontró que existe una correlación significativa en la cantidad de oro adsorbido. Las partículas finas aportan una cinética más rápida, pero probablemente ellas causan una alta caída de presión en las columnas. Las partículas finas, también pueden incrementar las pérdidas de oro en las colas de las



operaciones del circuito CIP, por lo que se usan tamaños relativamente gruesos de 10 a 20 malla (Villegas Quispe, 2015).

El carbón activado utilizado en los procesos de adsorción de oro presenta una amplia variedad de marcas y características comerciales. Estudios recientes han buscado establecer una correlación entre la capacidad de adsorción de oro del carbón activado y sus propiedades físico-químicas fácilmente determinables, como el contenido de cenizas, el área superficial y el pH (Villegas Quispe, 2015).

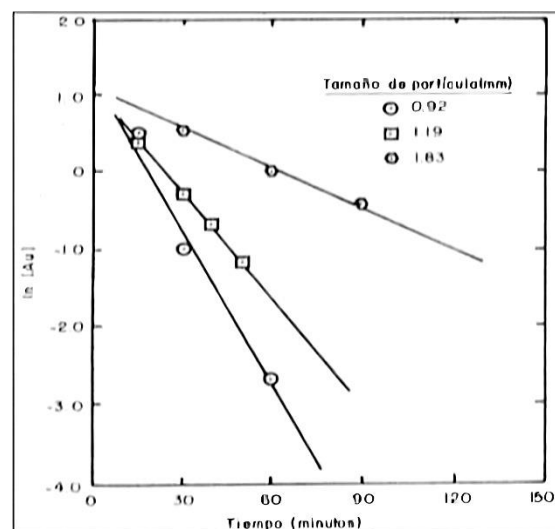
Se ha encontrado que existe una correlación significativa entre estas propiedades y la cantidad de oro adsorbido por el carbón activado. El tamaño de partícula del carbón activado también juega un papel crucial en el proceso de adsorción. Las partículas más finas ofrecen una cinética de adsorción más rápida debido a su mayor área superficial expuesta. Sin embargo, estas partículas finas pueden causar una caída de presión excesiva en las columnas de adsorción, lo que dificulta la operación del proceso, además, las partículas finas de carbón activado pueden incrementar las pérdidas de oro en las colas del circuito de adsorción por carbón en pulpa (CIP, por sus siglas en inglés), ya que estas partículas pueden ser arrastradas junto con el flujo de salida. Por lo tanto, en la industria minera se suelen utilizar tamaños de partícula relativamente gruesos, generalmente entre 10 y 20 mallas (2 mm a 0,84 mm), para evitar estas complicaciones operativas y minimizar las pérdidas de oro (Villegas Quispe, 2015).

La elección adecuada del carbón activado y la optimización de sus propiedades son fundamentales para maximizar la eficiencia del proceso de adsorción de oro. Además del tamaño de partícula, otros factores como la distribución del tamaño de poros, la química superficial y la resistencia mecánica del carbón activado también deben ser considerados para lograr un rendimiento óptimo en las operaciones de adsorción en columna (Villegas Quispe, 2015).

Es importante destacar que el carbón activado es un material versátil y sus propiedades pueden ser ajustadas y mejoradas mediante procesos de activación y modificación específicos. Por ejemplo, la impregnación del carbón activado con sustancias oxidantes o la oxidación térmica pueden mejorar su afinidad por los iones de oro y plata, incrementando así su capacidad de adsorción (Villegas Quispe, 2015).

Figura 2

Efecto de la granulometría en la velocidad de adsorción.



Fuente: (Villegas Quispe, 2015)



2.2.3.2 Efecto de la concentración de oro

El **efecto de la concentración de oro** en la capacidad de equilibrio del carbón es un aspecto crucial en el estudio de la adsorción de oro. La capacidad de equilibrio del carbón, que es la cantidad máxima de oro que puede ser adsorbida por el carbón, está directamente relacionada con la concentración de oro presente en la solución.

Se ha observado que la velocidad a la que se alcanza el equilibrio es notablemente más lenta cuando las concentraciones de oro son bajas. Esto significa que, a menor concentración de oro, el proceso de adsorción toma más tiempo para alcanzar un estado de equilibrio.

Por lo tanto, para lograr bajos contenidos de oro en las colas, es decir, la parte residual de la solución después de la adsorción, se requiere un mayor tiempo de residencia o un incremento en la concentración de carbón en la pulpa. El tiempo de residencia se refiere al tiempo que el oro permanece en contacto con el carbón durante el proceso de adsorción.

La segunda opción, que implica aumentar la concentración de carbón en la pulpa, puede resultar en una carga de oro en el carbón significativamente menor a su capacidad de equilibrio de carga. Esto significa que, aunque el carbón puede adsorber más oro, la cantidad real de oro adsorbido puede ser menor debido a la mayor concentración de carbón.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la concentración de oro y la concentración de carbón en la pulpa al diseñar y optimizar procesos de adsorción de oro.



2.2.3.3 Efecto del pH

El **pH** de una solución juega un papel crucial en la **adsorción**, un proceso que se ve afectado por los cambios en el pH. Cuando el pH de la solución disminuye, se observa un aumento en la tasa de adsorción y la capacidad de carga. Esto significa que a medida que el pH se vuelve más ácido, la solución puede adsorber más sustancias y hacerlo a una velocidad mayor.

Sin embargo, es importante notar que el efecto del pH en la tasa de adsorción no es tan significativo en el rango de pH de 9 a 11. En otras palabras, las variaciones en la tasa de adsorción son relativamente pequeñas dentro de este rango de pH.

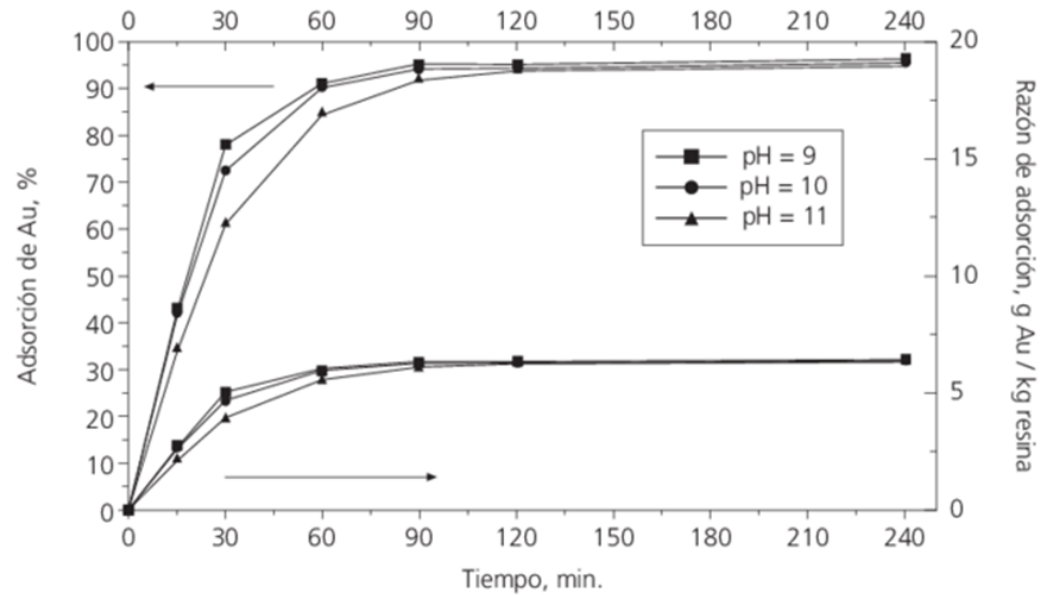
Además, se ha observado que la capacidad de carga de la solución generalmente aumenta en un 10% a medida que el pH disminuye progresivamente desde 11 hasta 9. Esto sugiere que a medida que el pH se acerca a la neutralidad desde el lado alcalino, la solución puede llevar una mayor cantidad de sustancias adsorbidas.

En la práctica, es común mantener el pH por encima de 10. La razón de esto es evitar la pérdida de cianuro a través de la hidrólisis, un proceso químico en el que una molécula de agua se añade a una sustancia. Mantener un pH alto ayuda a prevenir este proceso y, por lo tanto, minimiza la pérdida de cianuro.

Estos hallazgos fueron reportados por Navarro et al., en su estudio del 2006, y han sido fundamentales para entender cómo el pH afecta la adsorción y la capacidad de carga de una solución." (Navarro et al., 2006).

Figura 3

Efecto del pH en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M (NH₄)₂S₂O₃.



Fuente: (Navarro et al., 2006)

2.2.3.4 Efecto de la concentración de cianuro

La influencia de la concentración de cianuro en la adsorción de oro es un fenómeno complejo y de gran relevancia en la hidrometalurgia. Se ha observado que a medida que aumenta la cantidad de cianuro libre en la solución, la eficiencia con la que el carbón activado puede cargar oro disminuye. Este efecto se debe a la competencia que surge entre las moléculas de cianuro libre y las especies de aurocianuro por los sitios disponibles en la superficie del carbón activado para la adsorción.

El carbón activado, debido a su estructura porosa y superficie amplia, es altamente efectivo para capturar ciertas especies químicas. En el caso del oro, las especies de aurocianuro son las que típicamente se unen a estos sitios. Sin embargo, cuando la concentración de cianuro libre es



alta, estas moléculas interfieren con la adsorción del aurocianuro, ya que ambas compiten por los mismos sitios de adsorción. Como resultado, la tasa y la capacidad de adsorción del oro disminuyen significativamente (Figuroa & Flórez, 2010).

A pesar de este desafío, se ha encontrado que el carbón activado muestra una selectividad incrementada hacia las especies de aurocianuro en comparación con otros cianuros metálicos cuando la concentración de cianuro es más alta. Esto sugiere que, aunque la presencia de cianuro libre puede interferir con la adsorción de oro, el carbón activado aún prefiere selectivamente las especies de aurocianuro sobre otros complejos de cianuro metálico (Figuroa & Flórez, 2010).

Es importante destacar que la concentración óptima de cianuro para la adsorción de oro no solo depende de la competencia por los sitios de adsorción, sino también de otros factores como la granulometría del mineral y la presencia de otros iones en la solución que pueden influir en la velocidad de adsorción. Por ejemplo, se ha reportado que el incremento en la concentración de cationes complementarios puede aumentar la velocidad de adsorción, siguiendo un orden de preferencia específico (Figuroa & Flórez, 2010).

2.2.3.5 Efecto de la temperatura

La temperatura es un factor clave que influye en el proceso de adsorción de oro sobre carbón activado. En general, la capacidad de carga de oro en el carbón activado disminuye a medida que aumenta la



temperatura, debido a la naturaleza exotérmica del proceso de adsorción (Figueroa & Flórez, 2010).

La adsorción de oro sobre carbón activado es un proceso exotérmico, es decir, libera calor al medio circundante. Según el principio de Le Chatelier, un aumento en la temperatura desplaza el equilibrio de la reacción hacia el lado endotérmico, lo que favorece la desorción y dificulta la adsorción. En consecuencia, a temperaturas más altas, la capacidad de carga de oro en el carbón activado se ve reducida (Figueroa & Flórez, 2010).

Por esta razón, la mayoría de los circuitos de adsorción de oro en la industria minera operan a temperaturas ambientes, evitando así el calentamiento excesivo de la solución, lo cual podría disminuir la eficiencia del proceso. Sin embargo, el calentamiento de la solución puede ser beneficioso en ciertas etapas, como la desorción y la regeneración del carbón activado cargado con oro (Figueroa & Flórez, 2010).

En el proceso de desorción, donde se busca remover el oro adsorbido del carbón activado, se aplican temperaturas cercanas al punto de ebullición de la solución. Este aumento de temperatura favorece la desorción de los complejos de aurocianuro del carbón activado, facilitando su recuperación y la posterior regeneración del adsorbente para su reutilización, además de la temperatura, otros factores como el pH de la solución, la concentración de cianuro y la presencia de otros iones metálicos también pueden influir en el proceso de adsorción de oro sobre carbón activado. Por lo tanto, es importante considerar todos estos factores

de manera conjunta y optimizar las condiciones de operación para maximizar la eficiencia del proceso (Figuroa & Flórez, 2010).

2.2.4 Cinética de adsorción

La cinética de adsorción describe la velocidad a la que ocurre el proceso de adsorción de una especie química sobre la superficie de un adsorbente, en este caso, la adsorción de cianuro de oro sobre carbón activado. La ecuación presentada representa una forma de expresar la velocidad de esta reacción de adsorción.

$$-\frac{d[Au]}{dt} = A \frac{Km}{V} \quad (1)$$

Donde:

$\frac{d[Au]}{dt}$: Representa la tasa de cambio en la concentración de oro (Au) con respecto al tiempo (t), es decir, la velocidad de adsorción de oro.

A : Es el área superficial disponible del carbón activado para la adsorción.

Km : Es la constante de velocidad de adsorción, que depende de factores como la temperatura, la concentración de reactivos, el pH, entre otros.

V : Representa el volumen de la solución que contiene el cianuro de oro.

Esta ecuación establece que la velocidad de adsorción de oro ($d[Au]/dt$) es directamente proporcional al área superficial del carbón activado (A) y la constante de velocidad de adsorción (Km), e inversamente proporcional al volumen de la solución (V).



Es importante destacar que esta ecuación es una aproximación simplificada del proceso de adsorción, y en la práctica, la cinética puede ser más compleja y depender de varios factores adicionales. Por ejemplo, la difusión de las especies de oro hacia los sitios de adsorción en los poros del carbón activado puede ser un factor limitante y afectar la velocidad de adsorción.

Además, la naturaleza química de la superficie del carbón activado, la presencia de otros iones en la solución y las interacciones específicas entre el adsorbato (cianuro de oro) y el adsorbente (carbón activado) pueden influir en la cinética de adsorción.

Para obtener una descripción más precisa y completa de la cinética de adsorción, a menudo se utilizan modelos cinéticos más detallados, como el modelo de difusión intrapartícula, el modelo de Elovich o el modelo de pseudo-primer y pseudo-segundo orden. Estos modelos consideran factores adicionales, como la transferencia de masa, la difusión en los poros y las etapas limitantes del proceso de adsorción.

En el contexto de las reacciones químicas, particularmente aquellas que están controladas por la película de difusión, la concentración de oro ([Au]) en el núcleo de la partícula se considera tan mínima que se puede despreciar. Esto sugiere que la concentración de [Au] no tiene un efecto significativo en la velocidad o el progreso de la reacción global.

Además, para determinar el área de superficie de una partícula, se puede aplicar la siguiente fórmula matemática:

$$A = \frac{6\psi M}{d.e} \quad (2)$$



Donde:

A : representa el área de superficie, es un factor de forma que depende de la geometría de la partícula.

d : Es el diámetro.

ψ : Es el factor de forma.

e : Es la densidad.

M : Es la masa de partícula de carbón.

Esta ecuación permite calcular con precisión el área de superficie basándose en propiedades físicas fundamentales de la partícula y la película de difusión que la rodea.

En el estudio en cuestión, se ha adoptado un modelo simplificado para las partículas de carbón, tratándolas como si fueran esferas perfectas. Esta suposición permite asignar al factor de forma (ψ) un valor de uno, lo que simplifica significativamente los cálculos matemáticos relacionados con la dispersión de la luz y otras propiedades físicas.

Bajo esta premisa, la Ecuación (1) que describe el fenómeno estudiado puede ser reformulada de manera más directa y sencilla. La ecuación se convierte en una herramienta valiosa para predecir y entender el comportamiento de las partículas de carbón en diversas condiciones experimentales o aplicaciones prácticas.

La ecuación proporcionada en la imagen, que es una expresión diferencial, se puede interpretar de la siguiente manera:



$$-\frac{d[Au]}{dt} = \frac{6M}{d.e} Km[Au] \quad (3)$$

Esta fórmula establece la relación entre la tasa de cambio de la concentración de oro ($[Au]$) con respecto al tiempo y varios parámetros físicos y químicos. Aquí, (M) representa la masa de la partícula de carbón, (d) es la densidad del material, (e) es el espesor de la película de difusión, y (Km) es la constante de la tasa de masa. La ecuación es crucial para comprender la dinámica de la adsorción de oro en la superficie de las partículas de carbón y es fundamental en el diseño y optimización de procesos industriales relacionados con la extracción de oro.

En sistemas donde la densidad de las partículas sólidas y la solución son semejantes, el coeficiente de transferencia de masa, denotado como (km), adquiere una importancia crítica. Este coeficiente (km) es un parámetro esencial que describe la eficiencia con la que la masa se transfiere entre la partícula y el fluido circundante.

La igualdad en densidades entre las partículas y la solución simplifica la dinámica del sistema y permite que el coeficiente de transferencia de masa se exprese de la siguiente manera:

$$km = \frac{2D}{d} \quad (4)$$

Aquí, (D) representa el coeficiente de difusión del soluto en la solución, y (d) es el diámetro de la partícula sólida. Esta relación es fundamental para modelar y predecir el comportamiento de la transferencia de masa en procesos industriales y experimentos científicos donde las partículas y la solución tienen densidades comparables. La comprensión de este coeficiente facilita el diseño de sistemas



más eficientes para la mezcla, reacción y separación de sustancias en diversas aplicaciones de ingeniería química.

Al combinar y reorganizar las ecuaciones (3) y (4), se obtiene la siguiente relación matemática:

$$-\frac{d[Au]}{[Au]} = \frac{12D_m}{d^2e} dt \quad (5)$$

Esta ecuación diferencial describe cómo la concentración de oro ($[Au]$) en la solución cambia con el tiempo. Aquí, (D_m) representa el coeficiente de difusión de masa, (d) es el diámetro de la partícula y (e) es el espesor de la película de difusión. La ecuación es fundamental para entender la cinética de la reacción y la eficiencia del proceso de transferencia de masa en sistemas donde la difusión es el mecanismo controlante.

Para resolver esta ecuación y obtener una expresión para $[Au]$ como función del tiempo, se requeriría integrar ambos lados de la ecuación. Esto proporcionaría una comprensión más profunda de la dinámica de la concentración de oro a lo largo del tiempo en el sistema dado.

La expresión de la velocidad integrada que has proporcionado:

$$\ln [Au] = \ln [Au]_0 - Kt \quad (6)$$

Es una forma de la ley de velocidad integrada para reacciones de primer orden. En esta ecuación, $\ln [Au]$ representa el logaritmo natural de la concentración del reactivo Au en el tiempo t , $\ln [Au]_0$ es el logaritmo natural de la concentración inicial de Au, K es la constante de velocidad de la reacción, y t es el tiempo.



Para ampliar la información sobre esta expresión, podemos decir que es fundamental en la cinética química, ya que permite calcular la constante de velocidad (K) de una reacción basándose en la concentración del reactivo a diferentes intervalos de tiempo. Además, esta ecuación es útil para determinar la vida media de un reactivo, que es el tiempo necesario para que la concentración del reactivo se reduzca a la mitad de su valor inicial.

En el contexto de una reacción de primer orden, la velocidad de reacción depende únicamente de la concentración de un reactivo. Esto significa que, si duplicamos la concentración de A, la velocidad de la reacción también se duplicará. Las reacciones de primer orden son comunes en procesos como la desintegración radiactiva y las reacciones enzimáticas.

Donde $[Au]_0$ es la concentración inicial de oro en la solución:

$$K = \frac{12Dm}{d^{2*e}} = \textit{Constante de velocidad observada} \quad (7)$$

Se refiere a un parámetro importante en el estudio de las reacciones químicas que involucran oro. La concentración inicial ($[Au]_0$) actúa como un punto de referencia para observar cómo cambia la concentración de oro a lo largo del tiempo durante una reacción. Esto es esencial para entender la cinética de la reacción y para diseñar procesos químicos eficientes.

parece ser una fórmula que relaciona la constante de velocidad observada (K) con el coeficiente de difusión de masa (Dm) y el diámetro efectivo de las partículas (d^*e). Esta relación es crucial para comprender cómo los factores físicos, como el tamaño de las partículas y la difusión, afectan la velocidad de una reacción química.



Para ampliar aún más, la constante de velocidad (K) es un indicador de qué tan rápido ocurre una reacción. En el contexto de la ecuación proporcionada, (K) se calcula considerando la difusión de masa, que es el movimiento de las moléculas de oro a través de la solución, y el tamaño de las partículas de oro, que puede influir en la superficie de contacto y, por lo tanto, en la velocidad de la reacción.

Describe un método común en cinética química para analizar la velocidad de reacciones de primer orden. Al graficar el logaritmo natural de la concentración de oro, ($\ln [Au]$), en función del tiempo (t), se espera obtener una línea recta si la reacción sigue una cinética de primer orden. La pendiente de esta línea recta debería ser igual a la negativa de la constante de velocidad ($-K$), y el punto donde la línea corta al eje vertical (la intersección con el eje Y) corresponderá al logaritmo natural de la concentración inicial de oro, ($\ln [Au]_0$).

Puede ser expresada en términos de la concentración de oro en cualquier momento dado, y se ve así:

$$[Au] = [Au]_0 e^{-Kt} \quad (8)$$

Esta es la ley de velocidad integrada para una reacción de primer orden en forma exponencial. Aquí, ($[Au]$) es la concentración de oro en el tiempo (t), ($[Au]_0$) es la concentración inicial de oro, (e) es la base del logaritmo natural, (K) es la constante de velocidad, y (t) es el tiempo. Esta forma de la ecuación es útil porque muestra directamente cómo la concentración de oro disminuye exponencialmente con el tiempo a una tasa determinada por la constante de velocidad.

Esta relación es fundamental en procesos como la purificación de soluciones que contienen oro, donde el carbón activado se utiliza para capturar el oro debido a su alta afinidad por este metal precioso.

La ecuación proporcionada:

$$[Au]_{ads} = \frac{V}{A} ([Au]_0 - [Au]) \quad (9)$$

Describe matemáticamente esta relación. Aquí, $([Au]_{ads})$ representa la concentración de oro adsorbido sobre el carbón activado, (V) es el volumen de la solución, (A) es el área superficial del carbón activado, $([Au]_0)$ es la concentración inicial de oro en la solución, y $([Au])$ es la concentración de oro que queda en la solución después de la adsorción.

Podemos decir que esta ecuación es un componente clave en la ingeniería de procesos de adsorción. Permite a los ingenieros calcular la eficiencia de la adsorción y optimizar el diseño de los sistemas de purificación. Por ejemplo, al aumentar el área superficial del carbón activado, se puede mejorar la captura de oro, lo que resulta en una menor cantidad de oro en la solución después del proceso de adsorción, además, esta ecuación también es útil para predecir la capacidad de adsorción del carbón activado en diferentes condiciones, lo que es esencial para la planificación y el control de procesos industriales que involucran la recuperación de oro.

La ecuación que combina las ecuaciones (8) y (9) para expresar la cantidad de oro adsorbido, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$[Au]_{ads} = \frac{V}{A} [Au]_0 (1 - e^{-Kt}) \quad (10)$$

Esta fórmula representa la cantidad de oro adsorbido ($[Au]_{ads}$) en el carbón activado en función del tiempo (t), la concentración inicial de oro ($[Au]_0$), la constante de velocidad (K), el volumen de la solución (V), y el área superficial del carbón activado (A). La ecuación muestra que la cantidad de oro adsorbido aumenta con el tiempo hasta alcanzar un equilibrio, donde toda la capacidad de adsorción del carbón activado se ha utilizado.

Para ampliar la información sobre esta ecuación, es importante entender que la constante de velocidad (K) es un indicador de qué tan rápido el oro se adsorbe en el carbón activado. Un valor más alto de (K) significa que la adsorción ocurre más rápidamente. La exponencial negativa (e^{-Kt}) refleja cómo la probabilidad de que las partículas de oro sean adsorbidas disminuye con el tiempo, ya que menos sitios de adsorción están disponibles en el carbón activado a medida que se acumula más oro.

Esta ecuación es muy útil en la industria de la minería y la metalurgia, ya que permite a los ingenieros calcular la eficiencia de la adsorción de oro y optimizar el proceso para maximizar la recuperación del metal precioso. Además, ayuda a predecir la cantidad de carbón activado necesaria para procesar una solución de oro y determinar cuándo se debe reemplazar o regenerar el carbón para mantener la eficiencia del proceso.

2.2.5 Proceso de Carbón en Pulpa (CIP)

El proceso de recuperación de oro mediante la técnica de Carbón en Pulpa (CIP) representa un avance significativo en la metalurgia extractiva. Esta metodología implica la introducción directa de **carbón activado** en la solución enriquecida con oro, sin necesidad de clarificar previamente la pulpa. Esta



innovación ofrece ventajas sustanciales sobre los métodos tradicionales, especialmente en el tratamiento de minerales con mineralización compleja que presenta desafíos en la decantación y filtración (Misari, 1993).

El **proceso CIP** se caracteriza por la alimentación de una solución cianurada que contiene oro disuelto en tanques con carbón activado. La solución se agita mecánicamente, permitiendo que el oro sea adsorbido por el carbón. La pulpa, con oro cada vez más escaso, se transfiere de un tanque a otro hasta llegar al último, donde se separa una solución “barren” con bajos valores de oro, que junto con los desechos sólidos, se dirigen a las áreas de relaves (Villegas Quispe, 2015).

Misari Chuquipoma (2010) destaca que la técnica CIP ha demostrado ser un método exitoso para la extracción de oro. El proceso comienza con la lixiviación del mineral molido en una solución de cianuro en ambientes alcalinos aireados, seguido por la adsorción del oro en el carbón activado.

Huerta Solano (2019) resume el Proceso CIP de la siguiente manera:

- **La pulpa rica** proveniente de la cianuración entra al circuito de adsorción, compuesto generalmente por cuatro tanques agitadores con carbón activado.
- Los tanques están diseñados para manejar el volumen de pulpa a tratar y cuentan con un **airlift central**. La pulpa fluye continuamente de un tanque a otro, reteniendo el carbón en cada tanque mediante una zaranda.



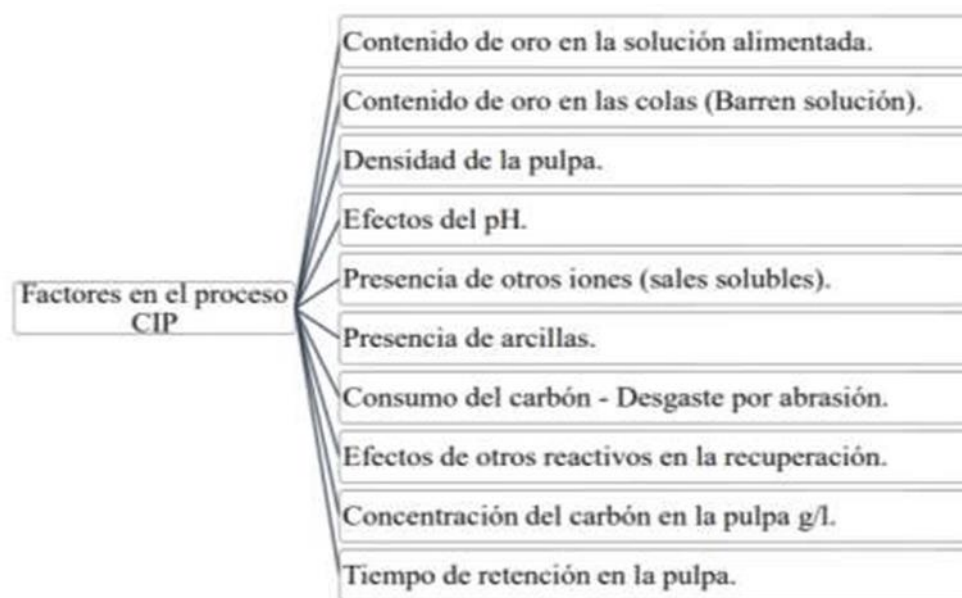
- Se añade **carbón fresco** al tanque con la pulpa más agotada y se recolecta el carbón saturado del primer tanque, que contiene la pulpa más rica en oro/plata. El carbón se mueve en dirección contraria a la pulpa.
- El traslado del carbón entre tanques es intermitente y se realiza en ciclos para enriquecer el carbón en el primer tanque hasta alcanzar una concentración de **300 a 400 oz/TM de Au**.
- El **pH operativo** debe mantenerse entre **10 y 11**.
- La **densidad de pulpa** debe ser de **40 – 45% sólidos**.
- La concentración de **cianuro libre** debe ser de **0,05%** dentro del circuito y no más de **0,015%** fuera de él.
- Es crucial mantener la densidad de pulpa adecuada para evitar la sedimentación o flotación del carbón.
- Bajo las condiciones óptimas de CIP, el oro se adsorberá en el carbón, junto con otros metales como Pb, Zn, As, Sb, Co y Ni, que no representan problemas.
- La cantidad de oro en el carbón debe ser óptima, considerando los costos de operación. Se recomienda mantener una carga de oro en el carbón entre **4 250 - 8 500 g/t** para minimizar las pérdidas y controlar el contenido de oro.

2.2.6 Factores que influyen en el Proceso CIP

Los factores que determinan la eficacia del Proceso de Carbón en Pulpa (CIP) son múltiples y su interacción es crucial para el éxito de la extracción de oro. Entre estos factores, se destacan:

Figura 4

Factores en el proceso CIP (Lixiviación carbón en pulpa).



Fuente: (Vargas, 1990)

Estos factores deben ser cuidadosamente controlados y optimizados para asegurar que el Proceso CIP sea eficiente y económicamente viable, maximizando la recuperación de oro y minimizando las pérdidas y el impacto ambiental.

2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es una herramienta vital en la optimización de procesos, su meticulosa elaboración es esencial para obtener datos cruciales que satisfagan los requisitos establecidos por las pruebas realizadas. Según (Varela & Reyes, 2011), la precisión en la planificación de un diseño experimental es fundamental para el éxito de



cualquier investigación. La literatura científica está repleta de ejemplos donde la falta de atención o el desinterés en el modelo estadístico han llevado al fracaso de experimentos, como señalan (Egan et al., 2016).

Las interrogantes esenciales que se buscan responder en un diseño experimental son: el propósito, la razón, el método, el momento y el lugar de realización del experimento. Es crucial que el diseño sea sencillo y directo. Un diseño experimental eficiente y efectivo se caracteriza por seguir una secuencia lógica de pasos que determinan el número de pruebas a ejecutar, como indica (Fernández Bao, 2020), y establece el orden en que se llevarán a cabo dichas pruebas.

La importancia del diseño experimental radica en su capacidad para proporcionar un marco estructurado que guíe la experimentación. Este marco permite a los investigadores y profesionales no solo ejecutar pruebas de manera ordenada, sino también interpretar los resultados de forma que se puedan tomar decisiones informadas sobre la mejora de procesos. El diseño experimental es una estrategia que, cuando se aplica correctamente, puede conducir a mejoras significativas en la producción y la eficiencia (Fernández Bao, 2020).

2.3.1 Principios Básicos de un Diseño Experimental

2.3.1.1 Repetición o Reiteración

El principio mencionado se refiere a la importancia de realizar réplicas en los experimentos o pruebas experimentales. Las réplicas implican repetir el mismo experimento bajo las mismas condiciones controladas, utilizando diferentes unidades experimentales o muestras. Esto permite al investigador obtener una estimación más precisa del error



experimental y de los efectos o interacciones entre los factores estudiados (Gutiérrez Pulido, 2012).

Cuanto más réplicas se realicen, mayor será la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto se debe a que las réplicas permiten cuantificar la variabilidad inherente al proceso o sistema en estudio, lo que a su vez permite realizar inferencias estadísticas más robustas y tomar decisiones mejor fundamentadas (Gutiérrez Pulido, 2012).

Es importante destacar que la replicación del experimento no debe confundirse con la toma repetida de mediciones u observaciones sobre la misma unidad experimental o muestra. Estas mediciones repetidas no constituyen réplicas genuinas, ya que no proporcionan una estimación independiente del error experimental ni permiten evaluar adecuadamente los efectos de los factores estudiados (Gutiérrez Pulido, 2012).

En cambio, las réplicas implican utilizar diferentes unidades experimentales o muestras, independientes entre sí, para cada combinación de los niveles de los factores evaluados. De esta manera, se pueden capturar las fuentes de variabilidad inherentes al proceso y obtener una estimación más precisa del error experimental, además, las réplicas permiten estimar con mayor exactitud los efectos de interacción entre los factores estudiados. Los efectos de interacción ocurren cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentre otro factor. Estos efectos de interacción pueden ser difíciles de detectar y cuantificar con precisión sin un número adecuado de réplicas (Gutiérrez Pulido, 2012).



2.3.1.2 Aleatorización

La asignación aleatoria de las unidades experimentales a los tratamientos es un aspecto fundamental en el diseño experimental, ya que permite evitar sesgos y garantizar la validez de los resultados obtenidos. Este principio establece que cada unidad experimental (muestra, sujeto, etc.) debe tener la misma probabilidad de ser asignada a cualquiera de los tratamientos o condiciones experimentales evaluadas (Escalante et al., 2014).

Al realizar una asignación aleatoria, se reduce el riesgo de que factores no controlados o variables extrañas influyan de manera sistemática en los resultados, lo que podría sesgar el experimento y llevar a conclusiones erróneas. Esto es especialmente importante cuando existen factores que pueden intervenir de manera indirecta o directa en el rendimiento del proceso en estudio, además de evitar sesgos, la asignación aleatoria también garantiza que todos los niveles de un factor tengan las mismas posibilidades de ser evaluados en combinación con los niveles de otros factores. Esto es crucial cuando se estudian efectos de interacción entre factores, ya que permite una estimación imparcial y precisa de estos efectos (Escalante et al., 2014).

Es importante destacar que la aleatoriedad en la asignación de tratamientos no significa que las unidades experimentales sean elegidas al azar. Por el contrario, las unidades experimentales deben ser seleccionadas de manera cuidadosa y representativa de la población o proceso en estudio. Una vez seleccionadas, estas unidades se asignan aleatoriamente a los



diferentes tratamientos, existen diversos métodos para realizar la asignación aleatoria, como el uso de tablas de números aleatorios, programas informáticos específicos o técnicas de aleatorización estratificada, dependiendo de las características del experimento y los factores involucrados, es importante realizar una planificación adecuada del experimento para garantizar que la asignación aleatoria se lleve a cabo de manera correcta y que se cumplan los supuestos y requisitos necesarios para el análisis estadístico posterior de los datos (Escalante et al., 2014).

2.3.1.3 Control local

En el ámbito del diseño experimental, la implementación de medidas específicas es crucial para mejorar la eficiencia del proceso. Estas medidas están diseñadas para disminuir el error experimental, aumentando así la sensibilidad del experimento frente a las pruebas de significación estadística. El propósito principal de estas acciones es erradicar o, al menos, reducir al mínimo las fuentes de variabilidad no deseadas que puedan afectar los resultados del experimento. Esto se logra mediante la organización de los experimentos en grupos homogéneos, lo que permite una comparación más precisa y controlada entre las diferentes condiciones experimentales (Antony, 2003).

La homogeneización de los grupos experimentales es una técnica que busca igualar las condiciones de los sujetos o elementos de prueba antes de la aplicación de los tratamientos experimentales. Esto se consigue a través de la **randomización** o asignación aleatoria, que distribuye de manera equitativa las características intrínsecas de los sujetos entre los



diferentes grupos, asegurando que cualquier efecto observado sea atribuible al tratamiento y no a diferencias preexistentes, además, el control riguroso de las variables, tanto dependientes como independientes, es esencial para garantizar la validez interna del experimento. Esto incluye la estandarización de procedimientos, la utilización de instrumentación precisa y la capacitación adecuada de los operadores o investigadores para minimizar el sesgo y la variabilidad en la recopilación de datos (Antony, 2003).

2.3.2 Ventajas y desventajas del Diseño Experimental

El diseño experimental es una metodología poderosa que ofrece numerosas ventajas en la investigación y el análisis de procesos. A continuación, se amplían las ventajas y desventajas mencionadas:

- **Ventajas:**
- Control y manipulación de variables: El diseño experimental permite al investigador controlar y manipular de manera sistemática las variables de interés, lo que facilita el estudio de su efecto sobre la variable respuesta o el proceso en cuestión.
- Identificación de interacciones: Mediante el diseño experimental, es posible detectar e investigar las interacciones entre los diferentes factores o variables involucradas en el proceso. Esto proporciona una comprensión más profunda de las relaciones complejas que pueden existir entre los factores.



- **Análisis e interpretación estadística:** Al utilizar métodos estadísticos apropiados, el diseño experimental permite analizar e interpretar los datos obtenidos de manera rigurosa, lo que conduce a conclusiones más sólidas y confiables.
- **Planificación sistemática:** El diseño experimental implica una planificación cuidadosa y sistemática de los experimentos, lo que asegura que se lleven a cabo de manera ordenada y eficiente, abordando todos los aspectos relevantes del estudio.
- **Estimación y cuantificación de la variabilidad:** Uno de los principales objetivos del diseño experimental es estimar y cuantificar las fuentes de variabilidad presentes en los resultados obtenidos, lo que permite tomar decisiones más informadas y mejorar la calidad del proceso.
- **Identificación de alternativas óptimas:** El análisis de los resultados experimentales puede revelar combinaciones óptimas de los factores o condiciones que maximizan o minimizan la variable respuesta, lo que permite identificar las mejores alternativas para el proceso en estudio.
- **Desventajas:**
 - **Complejidad técnica:** Algunos diseños experimentales y sus análisis correspondientes pueden involucrar conceptos y terminología estadística técnica, lo que puede dificultar su comprensión y aplicación para personas sin formación en estadística.



- Costo económico: Dependiendo de la complejidad del estudio y el número de experimentos requeridos, el diseño experimental puede ser costoso en términos de recursos materiales, humanos y de tiempo.
- Duración prolongada: En algunos casos, la ejecución completa de un diseño experimental puede llevar un tiempo considerable, especialmente cuando se requieren múltiples réplicas o cuando se estudian procesos lentos o de larga duración.
- Dificultad en la implementación: Ciertos diseños experimentales pueden ser complicados de implementar en entornos industriales o en situaciones donde existen restricciones prácticas o limitaciones de recursos.

Según (Fernández Bao, 2020), es crucial reconocer que, aunque existen ciertas desventajas, el diseño experimental continúa siendo una herramienta esencial y de gran valor en el campo de la investigación científica y en la optimización de procesos. A través de una planificación meticulosa, una formación exhaustiva y una distribución eficiente de los recursos, es posible reducir al mínimo las desventajas inherentes a este enfoque. Las ventajas que ofrece el diseño experimental, tales como la capacidad para establecer relaciones causales y la precisión en la medición de efectos, superan con creces las limitaciones que presenta. Esta metodología permite a los investigadores controlar de manera efectiva las variables y obtener resultados confiables y replicables, lo que constituye un pilar fundamental para el avance del conocimiento científico y la mejora continua de los procesos industriales y productivos.



2.3.3 Etapas del Diseño Experimental

Las etapas del Diseño Experimental son fundamentales para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos en cualquier investigación. Para preparar adecuadamente las condiciones de prueba y control, es imprescindible seguir un proceso sistemático que evite errores en los resultados, tal como señalan (Chok et al., 2005). Este proceso se compone de varias fases clave:

- **Establecimiento del problema:** Definir claramente el problema o la pregunta de investigación que se desea abordar.
- **Selección de la variable independiente:** Identificar la variable que será manipulada o controlada durante el experimento.
- **Determinación de factores y niveles:** Establecer los factores que podrían influir en los resultados y decidir los diferentes niveles en los que se probará cada factor.
- **Diseño de la ejecución del experimento:** Planificar cómo se llevará a cabo el experimento, incluyendo la selección de sujetos, la asignación de tratamientos y la definición de procedimientos.
- **Recolección de datos:** Implementar el experimento y recopilar los datos necesarios para el análisis.
- **Interpretación de los análisis estadísticos:** Analizar los datos recogidos utilizando métodos estadísticos para determinar si los resultados son significativos y qué implicaciones tienen para la hipótesis o problema planteado.



Montgomery & Verbeeck (2004) enfatizan la importancia de una ejecución meticulosa en cada una de estas etapas para asegurar la integridad del diseño experimental. Además, es esencial considerar aspectos como la replicabilidad del experimento y la posibilidad de generalizar los resultados a una población más amplia.

2.3.4 Diseño Factorial

El concepto de **Diseño Factorial** se refiere a un enfoque sistemático utilizado en investigaciones experimentales donde múltiples factores influyen en el resultado de interés. Este tipo de diseño es particularmente útil cuando los resultados no son el producto de una sola variable, sino de la interacción de varias, cada una con distintos niveles que pueden afectar el resultado final. Según (Chok et al., 2005), la implementación de un diseño factorial permite a los investigadores evaluar no solo el efecto individual de cada factor, sino también cómo estos interactúan entre sí, lo cual es crucial para comprender la complejidad de los fenómenos estudiados.

Una vez que se han identificado los factores relevantes y sus respectivos niveles, se procede a establecer una matriz de tratamientos. Esta matriz es esencial para planificar las pruebas experimentales de manera que se puedan observar las consecuencias de cada combinación de factores. El diseño factorial es altamente eficiente, ya que reduce el número de experimentos necesarios para examinar las posibles interacciones, en comparación con la realización de pruebas individuales para cada combinación posible, además, el diseño factorial es invaluable para optimizar procesos y productos, ya que permite a los investigadores identificar las condiciones bajo las cuales se obtienen los mejores resultados. Esto se traduce en

una toma de decisiones más informada y en la posibilidad de predecir el comportamiento de los sistemas bajo estudio con mayor precisión (Chok et al., 2005).

2.3.5 Diseño Factorial 2^k

El **Diseño Factorial 2^k** es un método de diseño experimental que se caracteriza por su simplicidad y eficacia. Se utiliza para examinar las interacciones entre **K** factores, cada uno a dos niveles (generalmente alto y bajo), lo que resulta en un total de 2^k posibles combinaciones experimentales. Este diseño es considerado de primer orden debido a que se centra en el efecto principal de los factores sin considerar interacciones de orden superior.

La fórmula para determinar el número de experimentos necesarios en un diseño factorial 2^k es la siguiente:

$$N = 2^K \quad (11)$$

Donde:

K representa el número de factores a estudiar.

N es el número total de experimentos a realizar.

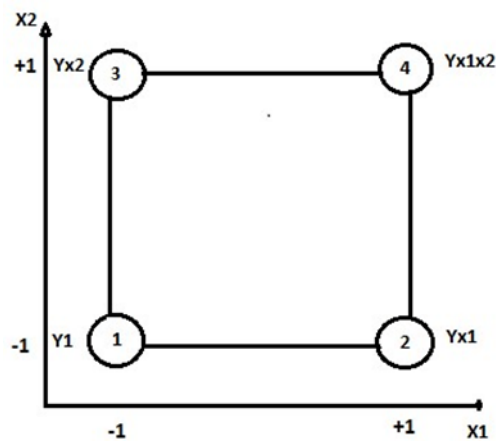
Esta fórmula asegura que se realice un número de ensayos que es exponencialmente proporcional al número de factores, lo cual es una característica distintiva de la eficiencia del diseño factorial 2^k . Por ejemplo, si se estudian tres factores (**K = 3**), se necesitarán ocho experimentos (**N = $2^3 = 8$**).

En la representación gráfica, como la mencionada Figura 5, los niveles de los factores en un diseño factorial 2^k se pueden visualizar en un sistema de

coordenadas bidimensional, donde cada eje representa un factor y los puntos en el espacio representan las combinaciones de niveles de los factores. Esto facilita la interpretación de los datos y ayuda a visualizar las relaciones entre los factores y sus efectos en los resultados experimentales.

Figura 5

Niveles: Diseño Factorial 2^k .



Fuente: (Montgomery & Verbeek, 2004)

Donde:

En el contexto del diseño experimental, $K=2$ indica que se están considerando dos factores o variables independientes. Las variables $X1$ y $X2$ representan estos factores, con $X1=1$ y $X2=2$ siendo sus valores codificados asignados. La variable Y es la variable de respuesta, la cual es el resultado que se desea predecir o analizar en función de los niveles de $X1$ y $X2$.

El nivel $+1$ se asigna al nivel superior de cada variable, lo que generalmente representa una condición más alta o un estado más deseable, dependiendo del contexto del experimento. Por otro lado, el nivel -1 se asigna al nivel inferior, indicando una condición más baja o menos deseable.

En la Tabla N° 1 se puede observar los valores de estas variables en una escala codificada. Esta codificación es una práctica común en el diseño experimental para simplificar el análisis estadístico, permitiendo una interpretación más clara y directa de los datos.

Tabla 1

Valores de las variables codificadas

N° DE PRUEBA	VALORES CODIFICADOS		RESPUESTA
1	-	-	Y1
2	+	-	Yx1
3	-	+	Yx2
4	+	+	Yx1x2

Fuente: (Fernández Bao, 2020)

En el ámbito del diseño experimental, **Yx1** se define como la variable de respuesta cuando la variable **X1** está en su nivel alto (+1) y **X2** en su nivel bajo (-1). Por otro lado, **Y1** se considera la variable de respuesta cuando ambas variables, **X1** y **X2**, están en su nivel más bajo (-1). De manera similar, **Yx1x2** se identifica como la variable de respuesta cuando tanto **X1** como **X2** se encuentran en su nivel superior (+1), según lo explica (Gutiérrez Pulido, 2012).

Esta nomenclatura es parte de un diseño factorial, donde **Y** representa la variable de respuesta que se desea investigar o predecir. Los subíndices **x1**, **x2**, y **x1x2** indican las condiciones bajo las cuales se mide la variable de respuesta. Por ejemplo, **Yx1** se refiere a la medición de **Y** cuando **X1** está en su nivel alto y **X2** en su nivel bajo, lo que permite a los investigadores entender el efecto de **X1** independientemente de **X2**. La notación **Y1** se utiliza para describir la variable de respuesta bajo la condición de que ambos factores están en su nivel más bajo, lo que podría representar el punto de referencia o control en el experimento. Finalmente, **Yx1x2** representa la variable de respuesta cuando ambos factores

están en su nivel más alto, lo que puede ser crucial para comprender el efecto combinado de **X1** y **X2** en **Y** (Gutiérrez Pulido, 2012).

Este sistema de codificación facilita la interpretación de los datos y ayuda a los investigadores a identificar cómo diferentes niveles de factores afectan la variable de respuesta. Además, permite una comparación sistemática entre los diferentes estados de los factores y sus interacciones, lo que es esencial para el análisis estadístico y la toma de decisiones basada en evidencia en la investigación científica y la mejora de procesos (Gutiérrez Pulido, 2012).

2.3.6 Diseño Factorial 2k con réplicas en el punto central del diseño

En el contexto de este diseño experimental, se propone incrementar el número de réplicas en el punto central más allá de una sola instancia. Este enfoque tiene como objetivo fortalecer la confiabilidad de los datos obtenidos de las pruebas experimentales. Al hacerlo, se facilita una evaluación más robusta del impacto que tiene la curvatura en los resultados. Según (Escalante et al., 2014), esta metodología es crucial para comprender mejor el fenómeno estudiado.

Para cuantificar el efecto de la curvatura, (Mina & Mercado, 1995) sugieren calcular la suma de cuadrados que mide la discrepancia entre los promedios obtenidos en los puntos factoriales y centrales. La fórmula para este cálculo es la siguiente:

$$SC_{curvatura} = \frac{n_F n_C (\hat{Y}_F - \hat{Y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (12)$$

Donde:

(\hat{Y}_C) es el promedio observado de la variable de respuesta en los puntos centrales.

(\hat{Y}_F) es el promedio observado de la variable de respuesta en los puntos factoriales.

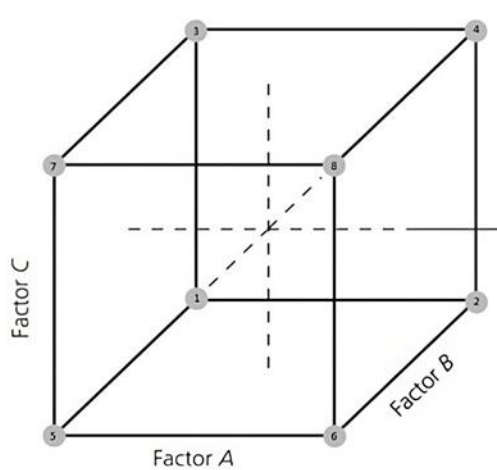
(n_C) y (n_F) representan la cantidad de puntos centrales y factoriales, respectivamente.

Si el valor de p resulta ser inferior a 0.05, se concluye que existe al menos un factor que muestra una relación no lineal significativa con la variable de respuesta, según lo indicado por (Escalante et al., 2014).

Finalmente, la determinación del número total de réplicas a realizar se basará en los recursos disponibles. Es importante tener en cuenta que las réplicas no son meras repeticiones, sino corridas experimentales distintas que se ejecutan bajo las mismas condiciones de factores y niveles, tal como lo explica (Gutiérrez Pulido, 2012). Esta práctica es esencial para garantizar la precisión y la reproducibilidad de los resultados experimentales.

Figura 6

Diseño factorial para $2k$ con tres factores y réplicas centrales.



Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.3.7 Cálculo de efectos

El análisis de cálculo de efectos es un proceso estadístico que permite evaluar cómo las variables independientes influyen cuantitativamente en el criterio de optimización de un proceso. La matriz de efectos es una representación esquemática que muestra los experimentos y los efectos estimados, los cuales se calculan a través de una ecuación matemática específica. Esta ecuación es fundamental para entender la relación entre las variables y el resultado del proceso.

La ecuación para el cálculo de efectos es la siguiente:

$$E = \frac{(\Sigma\gamma_+ - \Sigma\gamma_-)}{\binom{N}{2}r} \quad (13)$$

Donde:

$(\Sigma\gamma_+)$ es la sumatoria de las respuestas para el nivel superior del factor o variable en estudio.

$(\Sigma\gamma_-)$ es la sumatoria de las respuestas para el nivel inferior del factor o variable en estudio.

(N) es el número total de pruebas experimentales realizadas.

(r) es el número de réplicas en el diseño experimental.

En el caso de un diseño factorial (2^k) con réplicas en el punto central, el valor de (r) es igual a 1. Este diseño permite evaluar la presencia de efectos principales y de interacción entre las variables.



El valor de (E) representa la magnitud del efecto de las variables independientes sobre la respuesta del proceso. Un valor de (E) significativamente distinto de cero indica que la variable correspondiente tiene un efecto notable en el criterio de optimización. Este análisis es crucial para identificar qué variables requieren ajustes para mejorar el proceso y alcanzar los resultados deseados de manera más eficiente.

2.3.8 Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores

El **Análisis de Varianza (ANOVA)** es una herramienta estadística fundamental que se utiliza para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos independientes. Es especialmente útil en experimentos donde se comparan los resultados analíticos de muestras que han sido sometidas a distintos métodos o que provienen de diferentes lugares y han sido evaluadas por varios analistas. Según (Montgomery & Verbeeck, 2004), el ANOVA para un diseño factorial de dos factores es esencial para establecer la base de los análisis estadísticos, permitiendo a través de la teoría estadística, derivar procedimientos para la construcción y organización de pruebas basadas en el modelo de respuesta.

En un diseño factorial de dos factores, se evalúan simultáneamente los efectos principales de cada factor y la interacción entre ellos. Esto proporciona una comprensión más profunda de cómo las variables independientes afectan la variable dependiente, tanto individualmente como en combinación. Por ejemplo, en un estudio que examina los métodos de análisis y la ubicación geográfica, un diseño factorial podría revelar no solo el impacto de cada uno de estos factores

por separado, sino también cómo interactúan y si esa interacción es estadísticamente significativa.

La Tabla 2 que se menciona probablemente contenga fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F, que es una medida de cuánto varían los grupos entre sí en relación con la variabilidad dentro de los grupos. El cálculo del estadístico F se realiza a través de la siguiente fórmula general:

$$F_0 = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_{error}} \quad (14)$$

Donde ($MS_{tratamientos}$) es el cuadrado medio de los tratamientos y (MS_{error}) es el cuadrado medio del error. El valor-p asociado con el estadístico F nos indica la probabilidad de obtener un valor de F tan extremo o más, asumiendo que la hipótesis nula es verdadera. Un valor-p bajo sugiere que las diferencias observadas entre los grupos son poco probables que sean debido al azar, y por lo tanto, se consideran estadísticamente significativas.

Es importante destacar que el ANOVA es una técnica robusta que asume ciertas condiciones sobre los datos, como la normalidad, la homogeneidad de varianzas y la independencia de las observaciones. Si estas condiciones no se cumplen, los resultados del ANOVA podrían no ser válidos, y sería necesario considerar métodos alternativos o transformaciones de los datos.

Montgomery & Verbeeck (2004) enfatizan la importancia de comprender bien los principios del ANOVA y su aplicación correcta para obtener conclusiones válidas en el diseño factorial y en la investigación estadística en general.

Tabla 2

Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor-

p.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y^2}{N}$	(k - 1)	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P (F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	(N - k)	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{N}$	(N - 1)			

Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.3.8.1 Hipótesis

Las hipótesis en los diseños factoriales experimentales son declaraciones que se formulan para ser probadas estadísticamente, con el objetivo de determinar si los efectos observados en los datos son reales o si se deben al azar. En un diseño factorial de dos factores, estas hipótesis se centran en tres aspectos principales: el efecto del factor A, el efecto del factor B y el efecto de la interacción entre ambos factores.

La **hipótesis nula (H0)** establece que no hay diferencias significativas entre las medias de los grupos que se están comparando. Matemáticamente, se expresa como:

$$H0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (15)$$

Esto significa que cualquier variación observada en los resultados experimentales se atribuye a la variabilidad aleatoria inherente a los datos y no a los efectos de los tratamientos o factores estudiados.

Por otro lado, la **hipótesis alternativa (H1)** sugiere que al menos una de las medias de los grupos es diferente de las otras. Se formula como:

$$H1: \exists \mu_i \neq \mu_j \quad (16)$$

Donde $(\exists \mu_i)$ denota “existe al menos un”. Esta hipótesis implica que las diferencias observadas son lo suficientemente grandes como para no ser atribuidas al azar, indicando que uno o más tratamientos tienen un efecto real y significativo.

En el contexto de un diseño factorial, la hipótesis de interacción es particularmente importante, ya que examina si el efecto de un factor depende del nivel del otro factor. Por ejemplo, podría ser que el factor A solo tenga un efecto significativo en presencia de un cierto nivel del factor B, y viceversa. Esto se denomina efecto de interacción y se formula como:

$$H1_{interacción}: \mu_{A_i B_j} \neq \mu_{A_i} + \mu_{B_j} - \mu_{general} \quad (17)$$

Donde $(\mu_{A_i B_j})$ representa la media del grupo bajo la combinación del nivel (i) del factor A y el nivel (j) del factor B, (μ_{A_i}) y (μ_{B_j}) son las medias de los niveles individuales de cada factor, y $(\mu_{general})$ es la media general de todos los grupos.

Estas hipótesis son fundamentales en el análisis estadístico y guían la interpretación de los resultados de ANOVA en los diseños factoriales. La confirmación o refutación de estas hipótesis permite a los investigadores entender mejor la dinámica de los factores en estudio y sus posibles interacciones.

2.3.9 Formulación del modelo matemático

La formulación de un modelo matemático en el contexto de un diseño factorial a dos niveles implica identificar los efectos que son significativos para la investigación. Este proceso es crucial para desarrollar un modelo que refleje adecuadamente la realidad del fenómeno estudiado. La ecuación lineal general para un modelo factorial a dos niveles se puede expresar como:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{u=j}^k b_{uj} X_u X_j \quad (18)$$

Donde:

(\hat{Y}) es la respuesta predicha por el modelo.

(b_0) es el término independiente o intercepto.

(b_j) son los coeficientes que representan el efecto principal de cada factor.

(b_{uj}) son los coeficientes de interacción entre los factores.

Para estimar los coeficientes (b_0) , (b_j) , y (b_{uj}) , se utiliza una fórmula matricial basada en el método de mínimos cuadrados, que se representa como:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (19)$$

Esta ecuación matricial permite calcular los valores de los coeficientes que minimizan la suma de los cuadrados de los residuos, proporcionando así la mejor aproximación lineal a los datos observados.

Una vez que se ha obtenido el modelo matemático, es esencial decodificarlo para interpretar los resultados en el contexto del estudio. Las fórmulas para la decodificación de los términos del modelo son:

Término independiente:

$$a_0 = b_0 - \sum_{j=1}^k b_j \epsilon_j + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} \epsilon_{ij} (i \neq j) \quad (20)$$

Término lineal:

$$a_j Z_j = \Delta b Z_j \sum_{i=1}^k \Delta b_{ij} Z_{ij} (i \neq j) \quad (21)$$

Término de interacción:

$$a_{ij} Z_j Z_i = \left(\frac{b_{ij}}{\Delta Z_j \Delta Z_i} \right) \quad (22)$$

Estas ecuaciones permiten transformar los coeficientes del modelo matemático a una forma que es más interpretable y aplicable a la realidad del fenómeno bajo estudio. Es importante recordar que la precisión del modelo depende de la calidad de los datos y de la correcta especificación de los efectos significativos. Además, la interpretación de los coeficientes debe hacerse con cuidado, considerando el contexto y las limitaciones del diseño experimental.

2.3.10 Análisis de residuales

El análisis de residuales es un componente esencial en la evaluación de modelos estadísticos, ya que proporciona información sobre la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Los residuales, representados por (ϵ_i) , se calculan como la diferencia entre el valor observado (Y) y el valor predicho (\hat{Y}), según la ecuación:

$$\epsilon_i = Y - \hat{Y} \quad (23)$$

El valor predicho (\hat{Y}), también conocido como (Y) o Y estimada, se obtiene a través de la relación entre la matriz de diseño (X) y el vector de coeficientes (B), que se estima mediante la ecuación:



$$\hat{Y} = XB \quad (24)$$

El análisis de residuales no solo mide la distancia entre las predicciones y los valores reales, sino que también ayuda a verificar la adecuación del modelo. Un buen modelo tendrá residuales pequeños y distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, lo que indica que el modelo se ajusta bien a los datos. Por otro lado, si los residuales muestran patrones sistemáticos o tendencias, esto puede ser una señal de que el modelo no captura completamente la estructura subyacente de los datos o que hay variables importantes que no se han incluido.

Además, el análisis de residuales puede revelar la presencia de puntos atípicos o datos influyentes que podrían afectar la precisión del modelo. Estos puntos son aquellos cuyos residuales son inusualmente grandes en magnitud y pueden indicar errores de medición, errores de entrada de datos o condiciones experimentales anómalas.

2.3.10.1 Técnicas gráficas para análisis de residuos

Las **técnicas gráficas para el análisis de residuos** son herramientas esenciales en la estadística para verificar los supuestos subyacentes en modelos de regresión. A continuación, se presenta una versión ampliada y reescrita del texto proporcionado:

Gráfica de Probabilidad para la Normalidad de Residuos La gráfica de probabilidad es una herramienta gráfica fundamental para la evaluación del supuesto de normalidad en los residuos de un modelo estadístico. Esta técnica permite inspeccionar si los residuos se distribuyen de manera que se ajusten a una línea recta, lo cual indicaría una distribución normal. Es importante notar que, aunque se espera un ajuste

general a la línea, no es necesario que sea perfecto. En la práctica, debido a la naturaleza del análisis de varianza, es común observar desviaciones leves y moderadas que no comprometen la validez del modelo (Antony, 2003).

Gráfica de Dispersión para la Homocedasticidad Para verificar la homocedasticidad, o varianza constante de los residuos, se utiliza una gráfica de dispersión donde se comparan los valores ajustados (\hat{Y}_{ij}) con los residuos (ε_i). La expectativa es que los puntos se dispersen aleatoriamente y de manera uniforme a lo largo de un eje horizontal, sin mostrar tendencias o patrones discernibles. Esta distribución aleatoria es indicativa de que la varianza de los residuos es constante a través de las diferentes predicciones del modelo (Gutiérrez Pulido, 2012).

Gráfica de Residuos para la Independencia El supuesto de independencia se puede explorar mediante una gráfica que relaciona el orden de recolección de los datos con los residuos correspondientes. Para confirmar la independencia, los puntos deben aparecer distribuidos de forma aleatoria dentro de una banda horizontal. La ausencia de patrones o correlaciones en esta distribución sugiere que los residuos son independientes entre sí, lo cual es crucial para la fiabilidad de las inferencias estadísticas.

Estas técnicas gráficas son parte integral del diagnóstico de modelos estadísticos y son fundamentales para asegurar la precisión y la validez de los resultados obtenidos en la investigación.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

3.1.1 Ubicación y acceso

3.1.1.1 Ubicación política

El acceso a “EMMS – SOL DE ORO S.R.L.” desde Lima es posible tanto por vía aérea como terrestre, y el viaje por carretera desde Arequipa. Desde esta última puede llegarse a la mina siguiendo la carretera panamericana Arequipa - Chala – “EMMS – SOL DE ORO” con un recorrido de 655.5 km. La distancia y el periodo de viaje son:

Tabla 3

Ubicación política

DESDE	HACIA	KILOMETRO S	CARRETER A	TIEMP O
PUNO	JULIACA	42	asfaltada	45 min
JULIACA	AREQUIPA	269	asfaltada	270 min
AREQUIPA	CHALA	397	asfaltada	390 min
A	“EMMS – SOL DE ORO”	16	asfaltada	15 min
CHALA				
TOTAL		722		12 horas

Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024.

3.1.1.2 Ubicación geológica

“EMMS – SOL DE ORO S.R.L.” se ubica en un lugar estratégico llamado cerro angostura a 16 Km del distrito de Chala camino al centro poblado de Achanizo, situado en el distrito de Chaparra, dentro de la pintoresca Provincia de Caraveli, en el departamento de Arequipa. La

empresa se encuentra en una región geográfica de gran relevancia debido a su abundante presencia de recursos minerales, particularmente en lo que respecta a la extracción de oro, sus coordenadas geográficas y la elevación son:

Tabla 4

Coordenada WGS84 de la Planta Concentradora.

COORDENADAS UTM WGS84 (expresado en miles)		
VERTICE	NORTE	ESTE
1	8 245	597
2	8 244	597
3	8 244	596
4	8 245	596

Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024.

Figura 7

Ubicación de la Planta Concentradora.



Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024

3.2 PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio se inició en el año 2023 y se concluyó en el año 2024.



3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.3.1 Población

Para fines de análisis y evaluación, se definirá como "población" al conjunto del mineral que ha sido procesado en la Planta de Beneficio. Este mineral, que actualmente se encuentra acumulado en las instalaciones, ha sido objeto de un proceso de extracción meticuloso. De esta población, se seleccionó una muestra representativa de **50 kilogramos**. Esta muestra fue sometida a un riguroso procedimiento de homogeneización y separación, asegurando así que cada fracción sea uniforme y esté adecuadamente diferenciada para los análisis subsiguientes.

Este proceso es esencial para garantizar la integridad y la precisión de los datos que se obtendrán. La homogeneización permite que las características del mineral sean consistentes en toda la muestra, mientras que la separación adecuada es crucial para identificar y categorizar las distintas calidades o tipos de mineral presentes. Estos pasos son fundamentales para la evaluación correcta del mineral y para la toma de decisiones basada en información confiable y detallada sobre su composición y calidad.

3.3.2 Muestra

Tras implementar un procedimiento de separación meticulosamente calibrado, se logró obtener una muestra precisa de **1 kilogramo** para cada uno de los experimentos planificados. Esta cantidad específica fue determinada considerando las limitaciones y la capacidad operativa del equipo de agitación disponible en nuestro laboratorio. Este paso es crucial para asegurar que las condiciones de cada experimento se mantengan consistentes y controladas.

Además, con el mismo cuidado y precisión, se extrajo una muestra adicional destinada exclusivamente para análisis detallados. Este proceso garantiza que los resultados obtenidos sean representativos y fiables, reflejando con exactitud las características y comportamientos del material bajo estudio. La selección de la muestra es un componente fundamental en la investigación científica, ya que de ella depende la validez de los datos y, por ende, la credibilidad de las conclusiones finales.

3.4 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA MUESTRA

Se tomó una muestra representativa para el análisis mineralógico, luego de realizado el ensayo respectivo se pudo obtener los siguientes resultados.

Tabla 5

Caracterización Mineralógica de la muestra.

Composición	Oro (g/t)	Plata (g/t)	Cobre (g/t)
Contenido	13.94	221.07	46

Fuente: Elaboración Propia (Análisis por gravimetría y volumetría).

3.5 DISEÑO ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados se realizó con la ayuda del Software estadístico Minitab 19 y hojas de cálculo Excel.

3.6 PROCEDIMIENTO

3.6.1 Metodología

En el presente trabajo de investigación desarrollado con la finalidad de encontrar las condiciones favorables del estudio, se utilizó una investigación experimental y descriptiva. Teniendo en cuenta que antes de realizar este trabajo



de investigación el porcentaje de recuperación en planta fue de 84.225% y al finalizar la investigación tuvo un incremento a un 92.301%.

- **Tipo de investigación**

En el campo de la metalurgia del oro, la evaluación de la eficiencia en la extracción del metal precioso es fundamental. Para ello, se llevó a cabo un estudio de **investigación experimental**, centrado en la tasa de extracción de oro durante el proceso de lixiviación por agitación utilizando **Cianuro de Sodio (NaCN)**. Este tipo de investigación es crucial, ya que permite la manipulación precisa de variables en un entorno controlado para observar su influencia directa en los resultados obtenidos.

La metodología experimental se caracteriza por su rigor y estructura, donde cada variable es cuidadosamente alterada y monitoreada para determinar su impacto en la lixiviación del oro. Se reproducen fenómenos específicos bajo condiciones estandarizadas, lo que permite una observación detallada y sistemática del comportamiento de las variables y su relación con la tasa de extracción.

En este estudio, se establecieron parámetros controlados para la concentración de cianuro, el tiempo de contacto entre el mineral y el reactivo, y la intensidad de agitación. Estos factores son esenciales, ya que una variación en cualquiera de ellos puede alterar significativamente la eficiencia del proceso de extracción. La observación de estas variables y su interacción proporciona una comprensión más profunda de los mecanismos que rigen la lixiviación por agitación y permite optimizar el proceso para maximizar la recuperación del oro.



El análisis de los datos recopilados revela la relación entre la concentración de cianuro y la tasa de disolución del oro, así como la importancia de un equilibrio adecuado entre la intensidad de agitación y el tiempo de exposición al reactivo. Con estos hallazgos, se busca mejorar las prácticas de extracción de oro, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la rentabilidad de la operación minera.

Este enfoque experimental es un pilar en la investigación metalúrgica, ya que proporciona la base científica para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en la industria del oro.

VI:(Causa) “X”

VD (Efecto) “Y”

- **Nivel de investigación**

Para desarrollar el presente trabajo de investigación se utilizó el nivel de investigación descriptivo-explicativo por las siguientes razones.

- **Descriptivo:** porque intenta o pretende identificar las principales características de uno o más fenómenos objeto de análisis y representar con precisión sus dimensiones.
- **Explicativo:** Busca o intentar determinar las causas de un evento o fenómeno que es objeto de análisis de investigación.

- **Diseño de la investigación**

Se utilizó el diseño descriptivo experimental porque permite determinar la causalidad de manera más confiable. Este estudio se llevó a cabo en tres etapas:

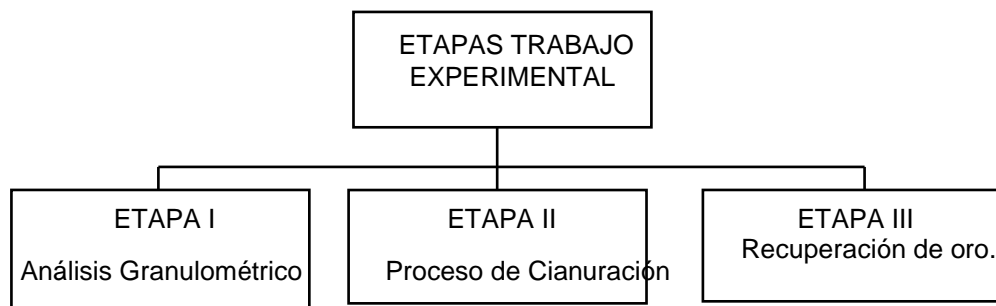
- **Etapa I:** Análisis granulométrico.

- **Etapa II:** Proceso de Cianuración.
- **Etapa III:** Recuperación de oro.

La actividad de investigación se propuso y diseñó para alcanzar los objetivos descritos en la siguiente figura:

Figura 8

Etapas del trabajo experimental.



Fuente: Elaboración Propia.

3.6.2 Desarrollo del procedimiento de investigación

Durante la fase actual del proyecto, se ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva de los parámetros críticos en el proceso de cianuración de minerales de oro. El objetivo principal de esta etapa ha sido el de incrementar significativamente el porcentaje de recuperación del oro a nivel de laboratorio, lo que podría tener implicaciones positivas para la eficiencia y rentabilidad en la escala de producción.

Para lograr este fin, se han establecido condiciones experimentales óptimas que permiten una valoración precisa del proceso de recuperación de oro utilizando **Cianuro de Sodio (NaCN)**. Estas condiciones se han definido meticulosamente y se presentarán en la sección de resultados. En esta parte del



estudio, se ha dado prioridad al tratamiento que demostró ser el más efectivo entre todos los ensayos realizados, con el fin de alcanzar la máxima extracción posible del precioso metal.

El proceso de cianuración se ha optimizado mediante la variación controlada de variables como la concentración de NaCN, el pH de la solución, la temperatura, el tiempo de lixiviación, la granulometría del mineral, la densidad de pulpa y el peso de carbón activado de tipo Calgon. Se ha prestado especial atención a la selección del tratamiento que maximiza la recuperación de oro, minimizando al mismo tiempo el consumo de reactivos y el impacto ambiental.

Los resultados obtenidos de esta investigación proporcionarán una guía valiosa para la implementación de las mejores prácticas en la industria minera. Además, los hallazgos podrían contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías y métodos que mejoren la eficacia de la cianuración, asegurando una recuperación de oro más sostenible y económicamente viable a largo plazo.

Este enfoque metódico y detallado en la evaluación de parámetros es un paso crucial hacia la mejora continua en la metalurgia del oro, y se espera que los resultados de esta etapa sean un referente en la investigación y práctica de la cianuración de minerales de oro.

3.7 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERIMENTOS

En la fase de planificación de nuestro estudio experimental, se ha adoptado un enfoque sistemático para determinar el número óptimo de experimentos. Se seleccionó el **diseño factorial 2^k** por su capacidad para evaluar múltiples variables y sus interacciones de manera eficiente. Este diseño es particularmente valioso cuando se trabaja con un



número limitado de factores, permitiendo una comprensión profunda de su impacto en el sistema estudiado.

La fórmula utilizada para calcular el número de experimentos necesarios es la siguiente:

$$N = 2^k \quad (25)$$

Donde:

2: representa los niveles de prueba para cada factor, indicando la presencia o ausencia de cada uno.

k: es el número de factores o variables independientes consideradas en el estudio, que en este caso son tres.

N: es el número total de experimentos a realizar.

Al aplicar la fórmula con **k = 3**, obtenemos:

$$N = 2^3 = 8$$

Esto indica que, bajo un diseño factorial simple, se requieren **ocho experimentos**. Sin embargo, para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados, y para proporcionar una estimación del efecto de curvatura, se añadieron tres réplicas en el punto central del diseño. Esto eleva el número total de pruebas a **once**.

El desglose es el siguiente:

Número de experimentos factoriales: 8

Número de pruebas centrales: 3

Número total de pruebas: 11



Estas pruebas adicionales en el punto central sirven para aumentar la robustez del diseño experimental y para asegurar que los resultados sean representativos y replicables. En la Tabla 6, se ilustran los niveles de las variables para cada uno de los ocho experimentos del diseño factorial. La Tabla 7 detalla las condiciones específicas de las tres réplicas centrales.

Este enfoque meticuloso en la determinación del número de experimentos es esencial para garantizar la integridad y la calidad de los datos obtenidos, lo que a su vez, facilita la toma de decisiones basadas en evidencia en el campo de estudio correspondiente.

- **VARIABLES del proceso**

- Variables Independientes
- Granulometría (% -200)
- Densidad de pulpa (g/L)
- Concentración de NaCN (%)

- **Variable Dependiente**

- Porcentaje de Recuperación de Au.

Los parámetros de las pruebas experimentales serán los siguientes:

Tabla 6

Niveles de las variables de estudio.

VARIABLES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
Granulometría (% -200)	80	90
Densidad de pulpa (g/L)	1250	1350
Concentración de NaCN (%)	0.10	0.20

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7

Valores para realizar las réplicas centrales.

Granulometría (% -200)	Densidad de pulpa (g/L)	Concentración de NaCN (%)
85	1300	0.15

Fuente: Elaboración Propia.

En el contexto de las pruebas de Carbón en Pulpa (CIP) realizadas a nivel de laboratorio, se evaluaron diferentes condiciones operativas utilizando carbón activado. Estas pruebas tienen como objetivo optimizar el proceso de extracción de oro (Au) a partir de soluciones cianuradas, se muestran los valores empleados en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores en las pruebas de Carbón en Pulpa (CIP).

Prueba (N)	VARIABLES		
	Granulometría (% -200)	Densidad de pulpa (g/L)	Concentración de NaCN (%)
1	80	1250	0.10
2	90	1250	0.10
3	80	1350	0.10
4	90	1350	0.10
5	80	1250	0.20
6	90	1250	0.20
7	80	1350	0.20
8	90	1350	0.20
9	85	1300	0.15
10	85	1300	0.15
11	85	1300	0.15

Fuente: Elaboración Propia.

3.8 MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO

3.8.1 Materiales

- Manta de Cuarteo
- Bolsas de plásticos
- Baldes de plástico
- Pala metálica



- Plumones indelebles, lápices y lapiceros
- Calculadora
- Cronómetro
- Cuaderno
- Probeta de 1 litro
- Pizeta de 500 ml
- Brocha
- Jeringa de 10 ml (10)
- Vaso de precipitados
- Papel filtro
- Pissetas
- Bandejas
- Espátula
- Botellas de plástico
- Luna reloj (vidrio)
- Embudos

3.8.2 Equipos

- Balanza de kilogramos
- Balanza de precisión
- Equipos de agitación
- Papel panpeha
- Balanza analítica
- Balanza Marcy o Bascula Marcy
- Reloj Cronómetro



3.8.3 Reactivos

- Cal (CaO)
- Cianuro de Sodio (NaCN)
- Agua del proceso
- Agua destilada
- Carbón activado tipo Calgon

3.8.4 Equipos de Protección

- Mameluco
- Tapón de oídos
- Mascarilla de silicona
- Guantes de jebe
- Gafas de seguridad
- Calzado de seguridad

3.9 PRUEBAS EXPERIMENTALES CIP

El propósito central de las pruebas experimentales CIP (Carbón en Pulpa) es profundizar en el entendimiento de cómo diversos factores afectan la eficacia en la extracción de oro. Uno de los aspectos clave bajo estudio es la influencia del **tipo de carbón activado** utilizado en el proceso. Diferentes calidades y orígenes del carbón activado pueden tener un impacto significativo en la adsorción del oro, y es esencial identificar el más adecuado para optimizar el rendimiento.

Además, se evaluará la **densidad de la pulpa**, un parámetro crítico que puede alterar la dinámica del proceso CIP y, por ende, la recuperación del oro. Un equilibrio óptimo entre la densidad de la pulpa y la capacidad de adsorción del carbón es vital para maximizar la eficiencia.



Otro factor determinante es el **pH de la solución**, que debe ser controlado cuidadosamente para favorecer la lixiviación del oro. Un pH adecuado es crucial para mantener la estabilidad del complejo oro-cianuro y para la efectividad del carbón activado en la captura del metal.

Las pruebas se llevarán a cabo en un laboratorio especializado, situado en la **Planta de Beneficio EMMS – SOL DE ORO S.R.L.** de centro poblado de “**Achanizo**”. Este laboratorio está equipado con la tecnología y los instrumentos necesarios para simular y monitorear las condiciones del proceso CIP a escala de laboratorio, lo que permite una evaluación precisa y detallada de los resultados.

La realización de estas pruebas en un entorno controlado y especializado es fundamental para asegurar la validez y la reproducibilidad de los datos. Los resultados obtenidos contribuirán significativamente al conocimiento científico y técnico necesario para mejorar las prácticas de extracción de oro, haciendo el proceso más eficiente y sostenible desde un punto de vista ambiental y económico.

Con estas pruebas, se espera no solo comprender mejor la interacción entre el carbón activado, la densidad de la pulpa y el pH, sino también establecer protocolos de operación que resulten en una recuperación de oro más efectiva y rentable en la industria minera.

3.10 PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS CIP A NIVEL DE LABORATORIO

En las instalaciones del laboratorio de la Planta de Beneficio, localizada en centro poblado de “**Achanizo**”, se han llevado a cabo pruebas críticas de CIP (Carbón en Pulpa). Estas pruebas son esenciales para optimizar la recuperación de oro y para evaluar la eficacia del carbón activado tipo Calgon en el proceso. La preparación meticulosa para estas pruebas experimentales incluyó varias etapas clave:



Selección y Preparación de la Muestra: Se inició con la cuidadosa separación de muestras de **1 Kg de mineral aurífero**. Este paso es crucial para garantizar que las pruebas reflejen condiciones reales y proporcionen datos fiables. La selección de muestras representa la diversidad mineralógica del yacimiento, asegurando que los resultados sean aplicables a una amplia gama de escenarios de la planta.

Montaje del Equipo de Agitación: Posteriormente, se procedió con el ensamblaje del equipo de agitación necesario para las pruebas CIP. Este equipo es fundamental para simular las condiciones dinámicas dentro de los tanques de lixiviación y para garantizar una interacción efectiva entre el mineral y la solución lixivante.

Acondicionamiento del Mineral: Luego, se acondicionó el mineral según los parámetros estimados para el carbón activado tipo Calgon. El acondicionamiento adecuado del mineral es vital para asegurar que la superficie del mineral esté preparada para una interacción óptima con la solución de cianuro, lo que afecta directamente la eficiencia de la extracción de oro.

Condiciones Experimentales: Las condiciones experimentales se establecieron con precisión para evaluar la capacidad de adsorción del carbón tipo Calgon bajo diferentes escenarios. Estas condiciones incluyeron variables como la concentración de cianuro, el tiempo de contacto entre el carbón y la solución, y la temperatura de operación. Se diseñaron para replicar lo más fielmente posible las condiciones de la planta a escala de laboratorio, permitiendo así una extrapolación precisa de los resultados a la operación real.

Estos procedimientos preliminares son fundamentales para el éxito de las pruebas CIP y para obtener resultados que puedan influir significativamente en la mejora de los procesos de recuperación de oro en la planta. Con una planificación y ejecución



cuidadosas, las pruebas CIP proporcionan información valiosa que puede llevar a una mayor eficiencia y rentabilidad en la extracción de oro.

Tabla 9

Prueba N° 01

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	80% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.807	3.615	42.184
Solución 12 h	2.00	2.446	4.892	57.087
Solución 24 h	2.00	3.023	6.046	70.555
Solución 30 h	2.00	3.222	6.444	75.198
Solución 36 h	2.00	3.389	6.778	79.099
Relave	1	1.791	1.791	20.901
Cabeza calc.	1	8.569	8.569	100.000
% Recuperación Ensayada	74.657			
% Recuperación Calculada	79.099			

Figura 9
Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN)

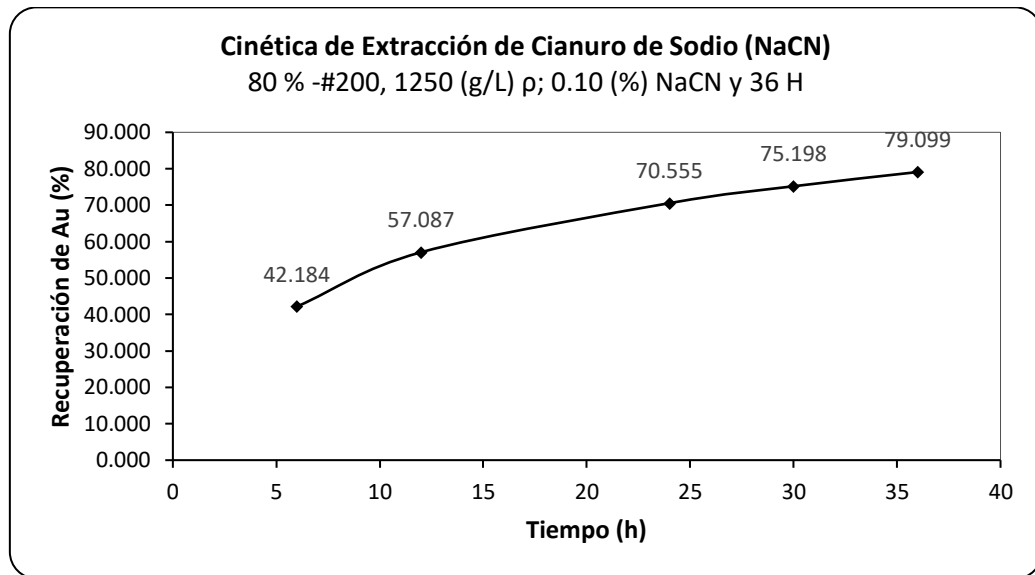


Tabla 10
Prueba N° 02

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	90% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.809	3.618	47.795
Solución 12 h	2.00	2.372	4.743	62.656
Solución 24 h	2.00	2.996	5.992	79.151
Solución 30 h	2.00	3.187	6.374	84.202
Solución 36 h	2.00	3.373	6.745	89.102
Relave	1	0.825	0.825	10.898
Cabeza calc.	1	7.570	7.570	100.000
% Recuperación Ensayada	88.326			
% Recuperación Calculada	89.102			

Figura 10
Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN)

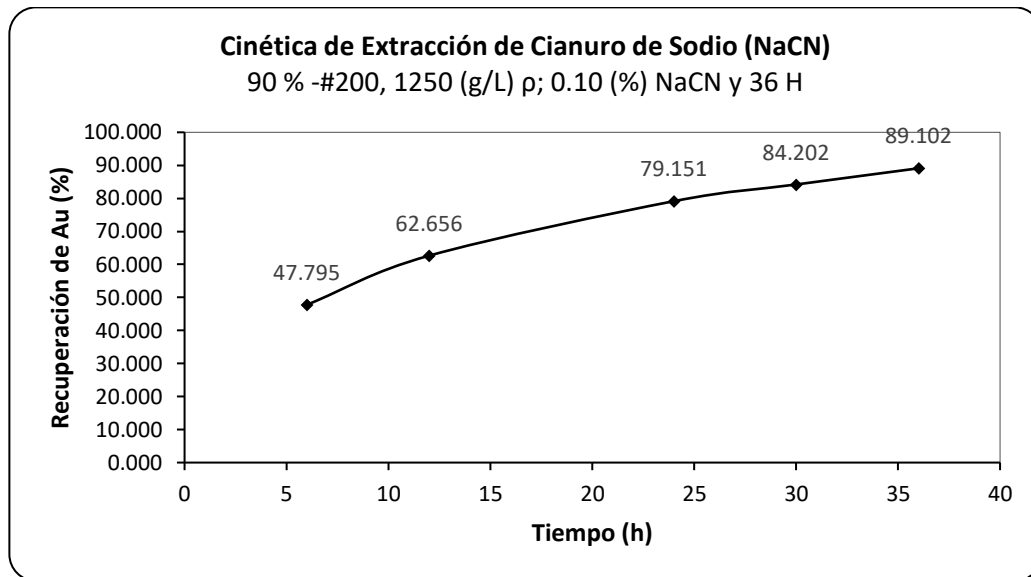


Tabla 11
Prueba N° 03

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	80% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.082	4.164	45.924
Solución 12 h	2.00	2.837	5.675	62.588
Solución 24 h	2.00	3.081	6.162	67.958
Solución 30 h	2.00	3.223	6.445	71.084
Solución 36 h	2.00	3.396	6.791	74.903
Relave	1	2.276	2.276	25.097
Cabeza calc.	1	9.067	9.067	100.000
% Recuperación Ensayada	67.801			
% Recuperación Calculada	74.903			

Figura 11

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1350 (g/L) ρ ; 0.10 (%) NaCN y 36 H

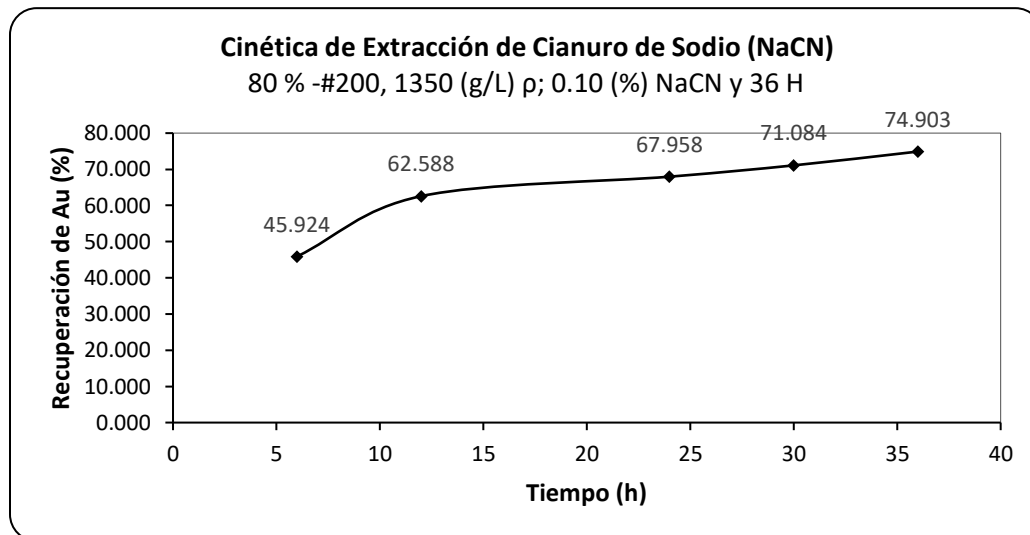


Tabla 12

Prueba N° 04

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	90% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.233	4.466	52.341
Solución 12 h	2.00	2.513	5.026	58.900
Solución 24 h	2.00	2.972	5.943	69.650
Solución 30 h	2.00	3.333	6.666	78.114
Solución 36 h	2.00	3.435	6.869	80.500
Relave	1	1.664	1.664	19.500
Cabeza calc.	1	8.533	8.533	100.000
% Recuperación Ensayada	76.454			
% Recuperación Calculada	80.500			

Figura 12

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200; 1350 (g/L) ρ ; 0.10 (%) NaCN y 36 H

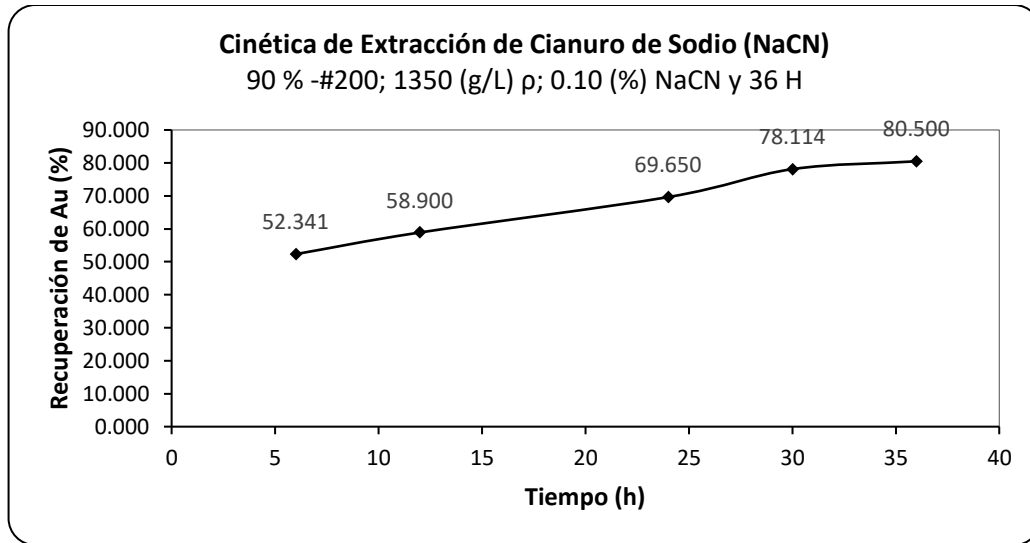


Tabla 13

Prueba N° 05

PARAMETROS DE PRUEBA:

Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	80% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	2000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.082	4.164	51.884
Solución 12 h	2.00	2.837	5.675	70.711
Solución 24 h	2.00	3.081	6.162	76.778
Solución 30 h	2.00	3.223	6.445	80.310
Solución 36 h	2.00	3.403	6.806	84.801
Relave	1	1.220	1.220	15.199
Cabeza calc.	1	8.025	8.025	100.000
% Recuperación Ensayada	82.739			
% Recuperación Calculada	84.801			

Figura 13

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1250 (g/L) ρ ; 0.20 (%) NaCN y 36 H

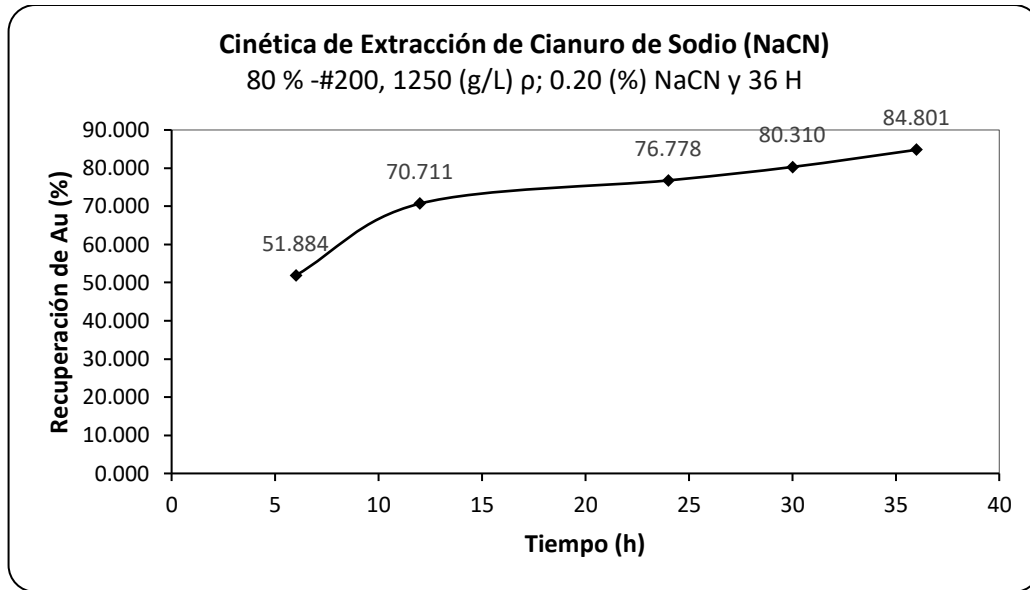


Tabla 14

Prueba N° 06

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	90% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	2000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.877	3.754	51.233
Solución 12 h	2.00	2.419	4.837	66.019
Solución 24 h	2.00	3.012	6.025	82.222
Solución 30 h	2.00	3.203	6.406	87.431
Solución 36 h	2.00	3.382	6.763	92.301
Relave	1	0.564	0.564	7.699
Cabeza calc.	1	7.327	7.327	100.000
% Recuperación Ensayada	92.018			
% Recuperación Calculada	92.301			

Figura 14

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200, 1250 (g/L) ρ ; 0.20 (%) NaCN y 36 H

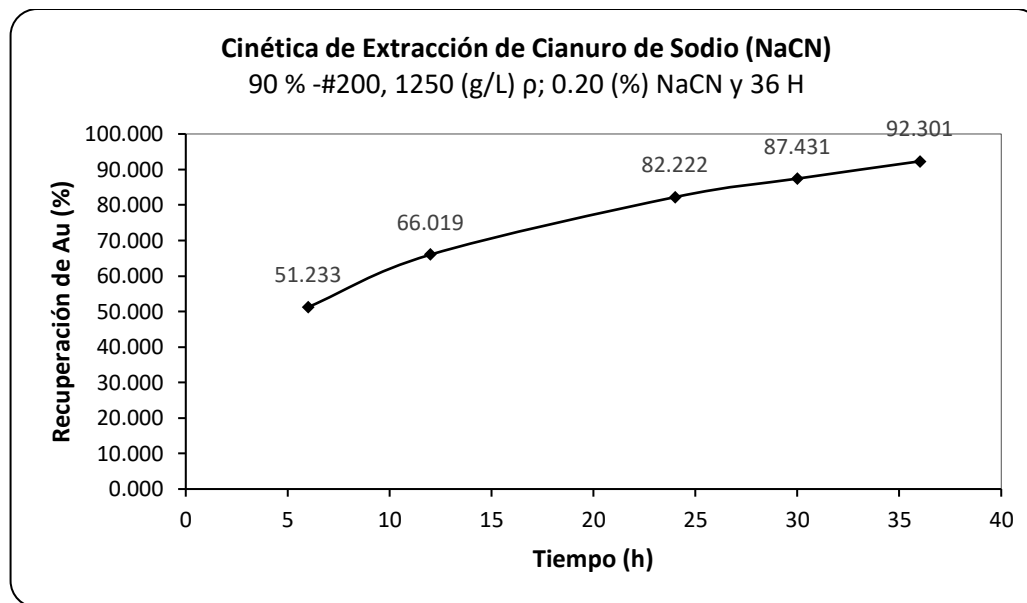


Tabla 15

Prueba N° 07

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	80% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	2000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.955	3.909	45.908
Solución 12 h	2.00	2.348	4.696	55.144
Solución 24 h	2.00	2.871	5.742	67.426
Solución 30 h	2.00	3.165	6.329	74.322
Solución 36 h	2.00	3.385	6.770	79.501
Relave	1	1.746	1.746	20.499
Cabeza calc.	1	8.516	8.516	100.000
% Recuperación Ensayada	75.298			
% Recuperación Calculada	79.501			

Figura 15

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 80 % -#200, 1350 (g/L) ρ ; 0.20 (%) NaCN y 36 H

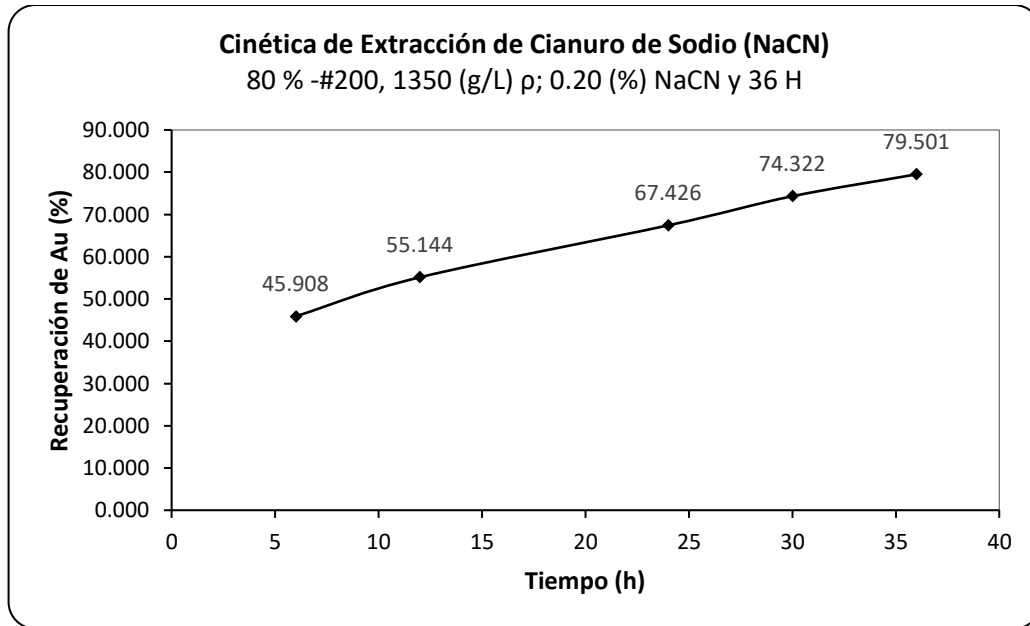


Tabla 16

Prueba N° 08

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	90% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	2000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.096	4.192	54.584
Solución 12 h	2.00	2.419	4.837	62.985
Solución 24 h	2.00	2.836	5.671	73.843
Solución 30 h	2.00	3.132	6.265	81.572
Solución 36 h	2.00	3.406	6.813	88.703
Relave	1	0.868	0.868	11.297
Cabeza calc.	1	7.680	7.680	100.000
% Recuperación Ensayada	87.723			
% Recuperación Calculada	88.703			

Figura 16

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 90 % -#200, 1350 (g/L) ρ ; 0.20 (%) NaCN y 36 H

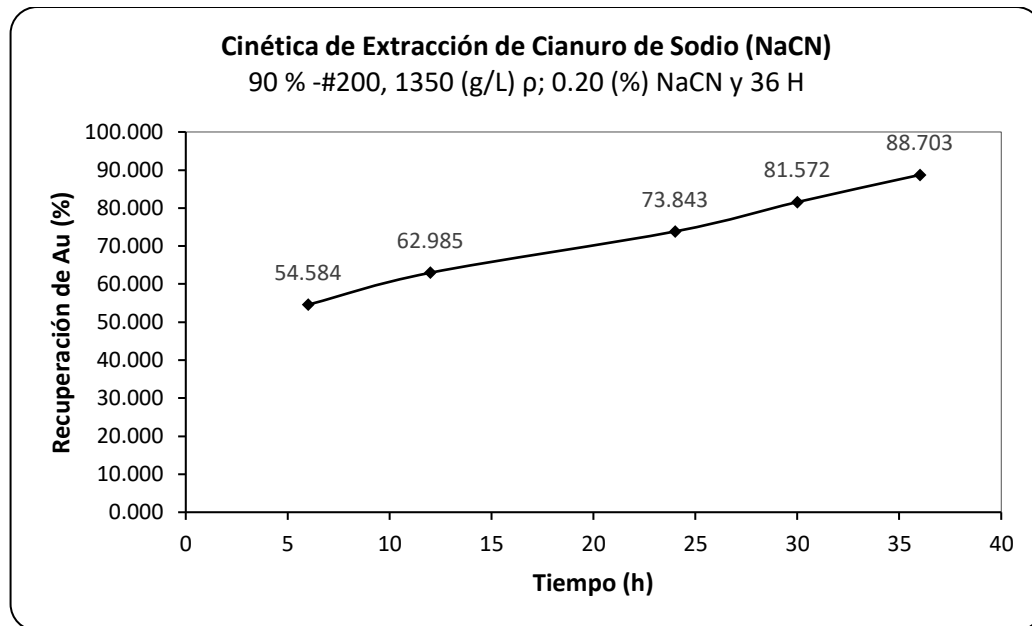


Tabla 17

Prueba N° 09

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1500
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.203	4.407	56.859
Solución 12 h	2.00	2.457	4.914	63.406
Solución 24 h	2.00	2.910	5.820	75.095
Solución 30 h	2.00	3.165	6.329	81.660
Solución 36 h	2.00	3.381	6.762	87.249
Relave	1	0.988	0.988	12.751
Cabeza calc.	1	7.751	7.751	100.000
% Recuperación Ensayada	86.015			
% Recuperación Calculada	87.249			

Figura 17

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ ; 0.15 (%) NaCN y 36 H

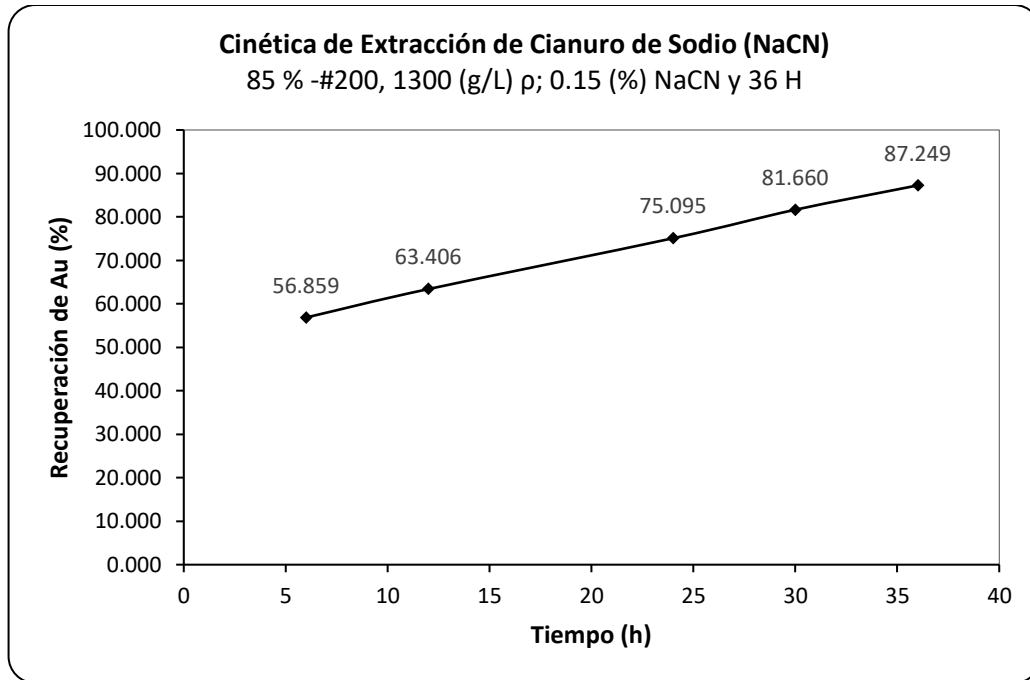


Tabla 18

Prueba N° 10

PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1500
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.850	3.700	48.424
Solución 12 h	2.00	2.422	4.844	63.387
Solución 24 h	2.00	2.946	5.891	77.093
Solución 30 h	2.00	3.200	6.400	83.752
Solución 36 h	2.00	3.374	6.748	88.302
Relave	1	0.894	0.894	11.698
Cabeza calc.	1	7.641	7.641	100.000
% Recuperación Ensayada	87.351			
% Recuperación Calculada	88.302			

Figura 18

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) - 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ ; 0.15 (%) NaCN y 36 H

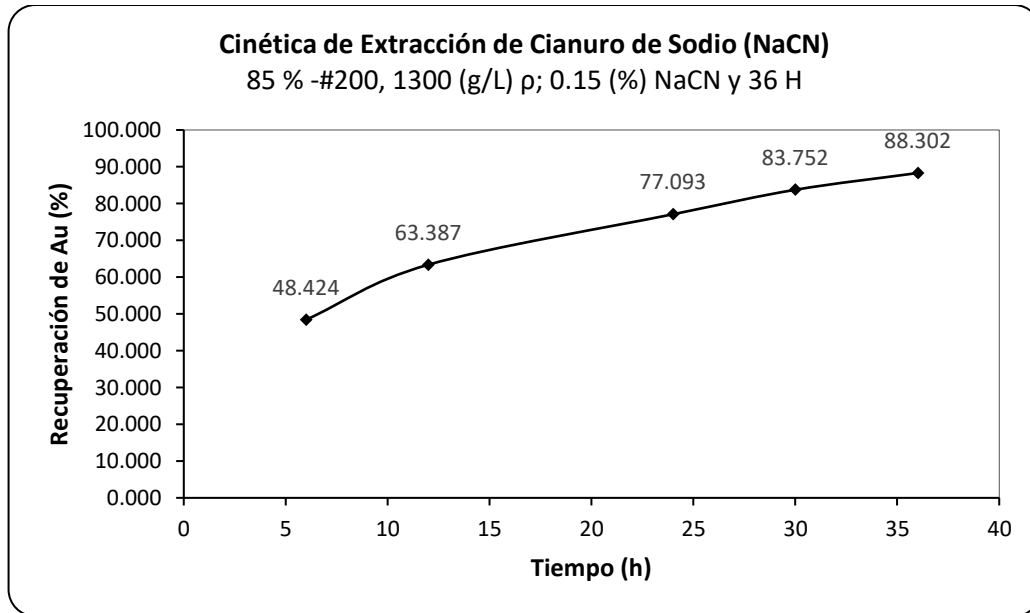


Tabla 19

Prueba N° 11

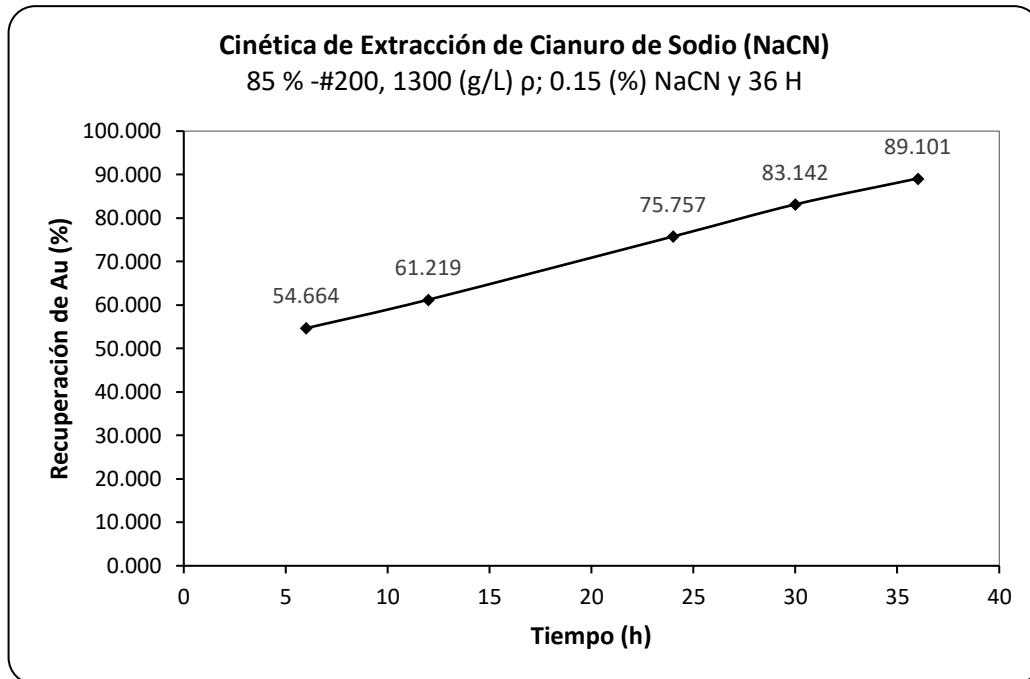
PARAMETROS DE PRUEBA:	
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1500
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2023
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (g)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.071	4.143	54.664
Solución 12 h	2.00	2.320	4.639	61.219
Solución 24 h	2.00	2.871	5.741	75.757
Solución 30 h	2.00	3.150	6.301	83.142
Solución 36 h	2.00	3.376	6.753	89.101
Relave	1	0.826	0.826	10.899
Cabeza calc.	1	7.578	7.578	100.000
% Recuperación Ensayada	88.312			
% Recuperación Calculada	89.101			

Figura 19

Cinética de Extracción de Cianuro de Sodio (NaCN) 85 % -#200, 1300 (g/L) ρ ; 0.15 (%) NaCN y 36 H



Análisis de la Cinética de Extracción:

- **Efectividad en el Tiempo:** Los datos recopilados a lo largo de las 36 horas de prueba demuestran una mejora constante en la recuperación del oro utilizando cianuro de sodio (NaCN). Esta tendencia ascendente es claramente visible en la línea negra que une los puntos de datos en cada gráfico, culminando cerca del término del experimento. La progresión indica una cinética de extracción altamente favorable, lo que sugiere que las condiciones experimentales están bien optimizadas para la recuperación del Au.
- **Convergencia de Curvas de Lixiviación:** A medida que el proceso de lixiviación avanza, se observa una notable convergencia de las curvas. Esto implica que, independientemente de las variaciones iniciales, las tasas de extracción tienden a uniformarse, aproximándose a un punto de extracción final donde los porcentajes de recuperación son comparables entre las diferentes muestras.



- **Relación Concentración-Velocidad:** Un patrón interesante emerge al analizar las curvas de extracción del oro; se hace evidente que un incremento en la concentración de NaCN correlaciona con una aceleración en la velocidad de extracción. Este fenómeno resalta la importancia de la concentración de cianuro como un factor crítico en la eficiencia del proceso.

Post-Proceso Experimental:

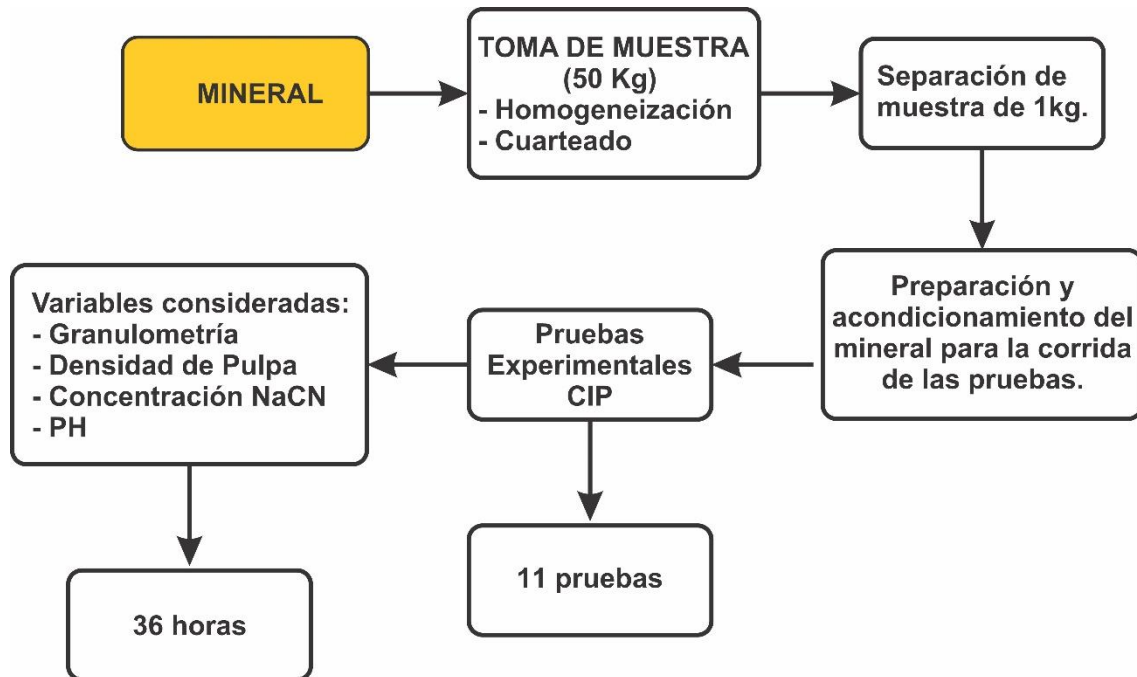
- **Preparación de Muestras:** Tras concluir las pruebas experimentales de Carbono en Pulpa (CIP) planificadas, se procedió a la preparación meticulosa de todas las muestras para su análisis detallado.

Análisis Estadístico: Con la totalidad de los datos en mano, se llevó a cabo un análisis estadístico exhaustivo. Utilizando un diseño experimental factorial completo 2^k , se analizaron los resultados para identificar posibles factores significativos y sus interacciones que podrían influir en la recuperación del oro.

Este análisis detallado no solo confirma la efectividad del NaCN en la recuperación del Au a lo largo del tiempo, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones y optimizaciones del proceso de lixiviación.

Figura 20

Diagrama del procedimiento experimental.



Fuente: Elaboración Propia.

3.11 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA

Las pruebas de molienda son una parte integral del proceso de preparación de la muestra. Estas pruebas se utilizan para determinar las curvas de cinética de moliendabilidad, que son esenciales para entender cómo se comporta el mineral durante el proceso de molienda. Para obtener estos datos, se llevaron a cabo diversas pruebas de molienda, cada una diseñada para proporcionar información valiosa sobre las propiedades de moliendabilidad del mineral.

La determinación de las curvas de molienda es un proceso que permite estimar los tiempos que deben pasar las partículas dentro del molino para alcanzar la granulometría requerida. La granulometría, o el tamaño de las partículas del mineral, es un factor crítico que puede afectar la eficacia de las pruebas de cianuración. Por lo tanto, es crucial

asegurarse de que las partículas del mineral sean del tamaño correcto antes de realizar estas pruebas.

Para llevar a cabo las pruebas de molienda, se utilizó un molino estándar de laboratorio experimental. Este molino, que tiene un diámetro de 22 cm y una longitud de 27 cm, es ideal para este tipo de pruebas debido a su tamaño y capacidad.

Figura 21

Molino de laboratorio experimental.



Fuente: (Farfan Chicca & Huaracallo Choque, 2019)

3.12 CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO

Tabla 20

Características del molino de bolas de laboratorio.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLINO DE BOLAS		
Dimensiones	0.7 ϕ x 0.9 pies	
Diámetro	20 cm	0.66 pies
Largo	26 cm	0.85 pies

Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024.



3.12.1 Carga de bolas

Para calcular la carga de bolas en un molino, utilizamos una expresión matemática específica. Esta expresión nos permite determinar la cantidad y el tamaño de las bolas que se deben utilizar en el molino para lograr una molienda eficiente.

La distribución de tamaños de las bolas es un aspecto crucial en este proceso. Para determinar esta distribución, recurrimos al método de Taggart, un enfoque ampliamente reconocido en el campo de la ingeniería metalúrgica.

El método de Taggart considera varios factores, incluyendo el tamaño del mineral, la dureza del mineral, y las características específicas del molino. Al tener en cuenta estos factores, el método de Taggart nos permite seleccionar una distribución de tamaños de bolas que maximiza la eficiencia de la molienda.

El cálculo de la carga de bolas y la determinación de la distribución de tamaños de bolas son pasos esenciales en el proceso de molienda. Estos pasos nos permiten optimizar el proceso de molienda y mejorar la recuperación de minerales valiosos. A continuación, se detalla la expresión matemática utilizada para estos cálculos.

$$W = 80 \times D^2 \times L \quad (26)$$

Cuando introducimos los datos correspondientes a las dimensiones del molino en la ecuación 29, obtenemos un resultado específico. Este resultado es el producto de un cálculo matemático que toma en cuenta las dimensiones particulares del molino que estamos utilizando. Es importante recordar que cualquier cambio en estas dimensiones podría alterar el resultado, lo que a su vez podría tener un impacto en nuestras conclusiones o decisiones posteriores. Por lo

tanto, es crucial asegurarse de que los datos de las dimensiones del molino se midan y se registren con precisión antes de realizar este cálculo. A continuación, presentamos el resultado obtenido al reemplazar los datos de las dimensiones del molino en la ecuación 29.

$$W = 80 \times [0.656168]^2 \times 0.853018$$

$$W = 29.381792 \text{ lbs}$$

$$W = 13.34 \text{ Kg}$$

Tabla 21

Características del molino de bolas de laboratorio.

Diámetro de bola (cm)	% Distribución	Peso Kg	Peso de cada bola	N° de bolas
3.81	54.25	7.27	0.32	23.00
2.54	31.72	4.25	0.25	17.00
1.91	14.03	1.88	0.19	10.00
	100.00	13.40		

Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024.

3.12.2 Volumen del molino

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L \quad (27)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 30 se obtiene el siguiente resultado:

$$V = \pi * (10)^2 * 25$$

$$V = 8168.134 \text{ cm}^3$$

3.12.3 Velocidad crítica del molino

$$Vc = \frac{76.8}{\sqrt{D}} \quad (28)$$



Reemplazando los datos en la ecuación 31 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_c = \frac{76.8}{\sqrt{20}}$$

$$V_c = 94.81 \text{ RPM}$$

3.12.4 Velocidad de operación del molino

$$V_o = 0.8 * V_c \quad (29)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 18 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_o = 0.80 * 94.81$$

$$V_o = 75.85 \text{ RPM}$$

Procedimiento

- 1) **Preparación de las muestras:** Para cada una de las pruebas que se van a realizar, se debe pesar 1 Kg de mineral. En total, se realizarán 8 pruebas, por lo que necesitarás 8 Kg de mineral.
- 2) **Preparación del molino:** Una vez pesado, el mineral se vierte en el molino. A continuación, se añaden 750 ml de agua para facilitar el proceso de molienda. También se deben añadir los reactivos necesarios para el tipo de mineral que se está moliendo. Una vez añadidos el agua y los reactivos, se tapa el molino para evitar la pérdida de material durante la molienda.
- 3) **Molienda:** El proceso de molienda se realiza a diferentes tiempos para observar cómo afecta el tiempo de molienda al tamaño de las partículas del mineral. En este caso, se realizarán moliendas de 6, 7, 8 y 10 minutos.



- 4) **Tamizado:** Después de cada molienda, se pesan 100 gramos del mineral molido y se tamizan utilizando una malla # - 200. Este proceso permite separar las partículas según su tamaño y obtener una distribución de tamaños de partículas para cada tiempo de molienda.
- 5) **Análisis de los resultados:** Por último, se grafican los resultados obtenidos. En el eje Y se coloca el porcentaje de material que pasa a través de la malla # -200, y en el eje X se coloca el tiempo de molienda. De esta manera, se obtiene una curva que muestra cómo varía la distribución de tamaños de partículas con el tiempo de molienda para cada una de las 8 pruebas realizadas.

Este procedimiento detallado y cuidadoso asegura que se obtengan resultados precisos y reproducibles, lo que es fundamental para entender el comportamiento del mineral durante la molienda y optimizar el proceso de cianuración.

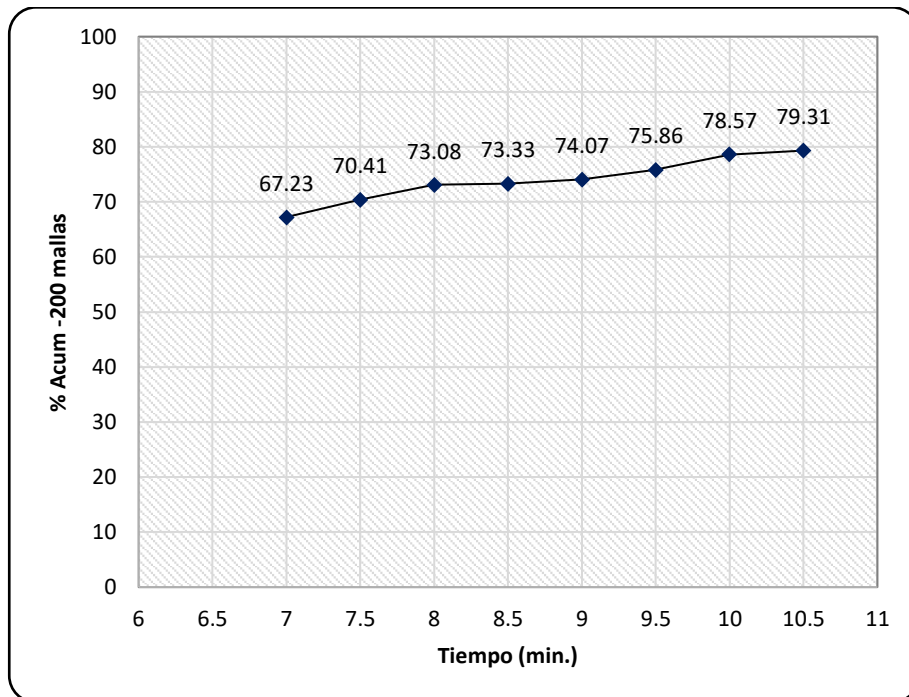
Tabla 22

Características del molino de bolas de laboratorio.

Tiempo (min.)	% -200 mallas
7	67.23
7.5	70.41
8	73.08
8.5	73.33
9	74.07
9.5	75.86
10	78.57
10.5	79.31

Fuente: Empresa “EMMS – SOL DE ORO”, abril del 2024.

Figura 22
% Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 VARIABLES DEL PROCESO

A continuación, se muestran los factores o variables que se consideró en las pruebas de cianuración.

4.1.1 Variable Independiente

- Granulometría (% -200)
- Densidad de pulpa (g/L)
- Concentración de NaCN (%)

4.1.2 Variable Dependiente

- Porcentaje de extracción de Au.

Tabla 23

Niveles de las variables independientes.

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Granulometría (% -200)	80	85	90
Densidad de pulpa (g/L)	1250	1300	1350
Concentración de NaCN (%)	0.1	0.15	0.2

Fuente: Elaboración Propia.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL 2^k, CON RÉPLICA CENTRAL

Los resultados obtenidos de estas pruebas son de gran valor, ya que ofrecen una perspectiva detallada sobre la eficacia del proceso CIP bajo diferentes condiciones operativas. Estos hallazgos están meticulosamente documentados en la **Tabla 13**, donde

se presentan los datos de manera clara y concisa, permitiendo una interpretación y análisis fácil de los mismos.

Este enfoque sistemático no solo asegura la precisión en la recopilación de datos sino que también facilita la optimización del proceso de recuperación de oro, asegurando que se logren los mejores resultados posibles con el carbón tipo Calgon.

Tabla 24

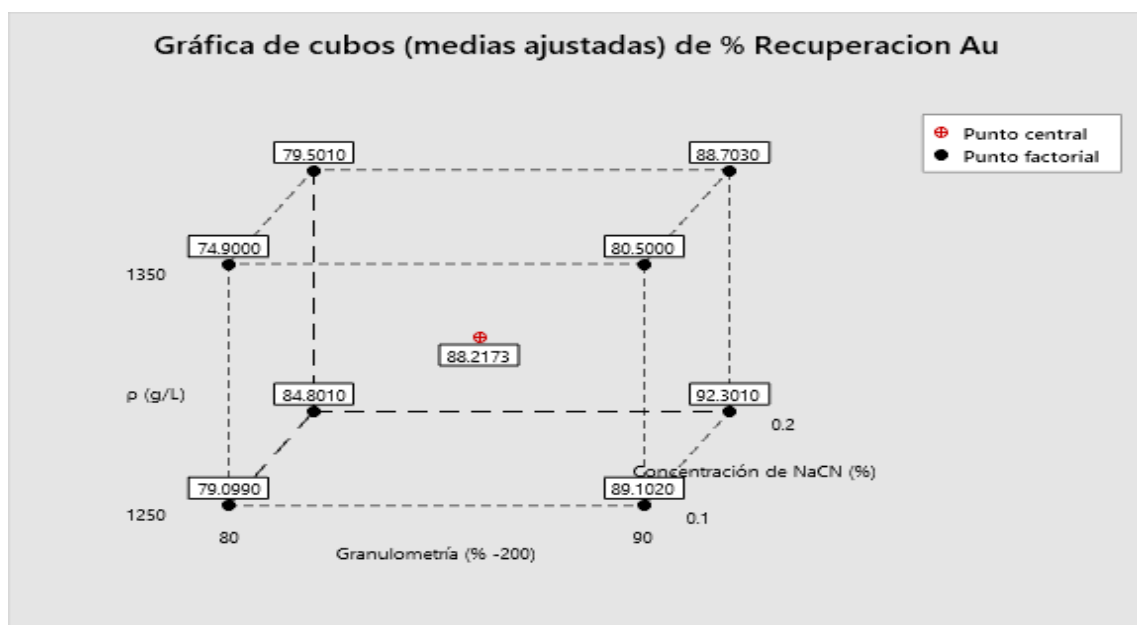
Matriz del diseño factorial para el proceso de Carbón en Pulpa.

N	Escala codificada			Escala natural			Y respuesta
	X ₁	X ₂	X ₃	Granulometría (% - 200)	Densidad de pulpa (g/L)	Concentración de NaCN (%)	
				Z ₁	Z ₂	Z ₃	
1	-1	-1	-1	80	1250	0.10	79.099
2	1	-1	-1	90	1250	0.10	89.102
3	-1	1	-1	80	1350	0.10	74.903
4	1	1	-1	90	1350	0.10	80.500
5	-1	-1	1	80	1250	0.20	84.801
6	1	-1	1	90	1250	0.20	92.301
7	-1	1	1	80	1350	0.20	79.501
8	1	1	1	90	1350	0.20	88.703
9	0	0	0	85	1300	0.15	87.249
10	0	0	0	85	1300	0.15	88.302
11	0	0	0	85	1300	0.15	89.101

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 23

Representación Geométrica de 2³ (medias de los datos).



Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Cálculo de los efectos de las variables

El análisis de los efectos de las variables es un componente crítico en el diseño experimental, permitiendo a los investigadores entender cómo diferentes factores influyen en una respuesta de interés.

Análisis de Efectos Principales e Interacciones En el contexto de un diseño experimental, es posible examinar tres efectos principales, denotados como **X1**, **X2**, y **X3**. Además, se consideran tres interacciones dobles: **X1X2**, **X1X3**, y **X2X3**, así como una interacción triple **X1X2X3**. Estas interacciones son fundamentales para comprender cómo la combinación de variables puede afectar la respuesta de manera que no es evidente al observar solo los efectos principales.

$$EX = \frac{\Sigma Y^+ - \Sigma Y^-}{\binom{N}{2} \cdot r} \quad (30)$$

La **Tabla 14** ilustra esta matriz de diseño factorial, proporcionando una visión clara de cómo se organizan los experimentos y los efectos correspondientes. En esta tabla, se pueden observar los diferentes niveles de las variables independientes y cómo estos se combinan en cada experimento para evaluar su impacto en la respuesta medida.

La **matriz de diseño factorial** es una herramienta poderosa que permite a los investigadores y científicos descubrir relaciones complejas entre múltiples factores y sus efectos en los resultados experimentales. Al analizar los datos recopilados y presentados en la Tabla 14, se pueden identificar patrones, tendencias y posibles interacciones que son esenciales para optimizar procesos y mejorar la toma de decisiones basada en evidencia.

Tabla 25

Matriz del diseño factorial y respuestas experimentales (codificada), para el proceso de Carbón en Pulpa.

N	X_0	Efectos principales			Efecto de las interacciones dobles			Efecto de las interacciones triples	Vector respuesta
		X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	79.099
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	89.102
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	74.903
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	80.500
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	84.801
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	92.301
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	79.501
8	1	1	1	1	1	1	1	1	88.703
9	1	0	0	0	0	0	0	0	87.249
10	1	0	0	0	0	0	0	0	88.302
11	1	0	0	0	0	0	0	0	89.101

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla en cuestión está diseñada para establecer la matriz de variables independientes, la cual es fundamental en el análisis de diseño factorial. Dentro de esta matriz, se destaca la inclusión del vector (X_0), que se compone exclusivamente de términos con signo positivo. Este vector es esencial, ya que facilita la determinación del promedio de las respuestas obtenidas de todos los puntos experimentales. Este promedio no solo es indicativo del comportamiento general del sistema bajo estudio sino que también es crucial para evaluar el efecto de la curvatura en la superficie de respuesta.

Además, la matriz incorpora vectores que representan las interacciones entre las variables. Estas interacciones son vitales para comprender cómo la combinación de diferentes niveles de variables puede influir en el resultado del experimento.

Para ampliar la información sobre EX_0 , que es el promedio de las respuestas de los puntos experimentales (excluyendo los puntos centrales), se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$EX_0 = \frac{\sum Y}{N} \quad (31)$$

Cálculo para el proceso de Carbón en Pulpa

$$EX_0 = \frac{668.911}{8} = 83.6138$$

Después de aplicar la **ecuación 31**, se inicia el proceso de cálculo de los efectos principales de las variables y sus interacciones. Es importante destacar que, para este cálculo, se excluyen los puntos replicados, ya que no contribuyen a la determinación de los efectos. La metodología empleada para calcular los efectos se basó en el uso de **Microsoft Excel**, lo que permitió una manipulación eficiente y precisa de los datos. Los resultados obtenidos se presentan de manera detallada en la **Tabla 15**, donde se puede apreciar la magnitud e importancia de cada efecto en el modelo estudiado. Este análisis es crucial para entender cómo cada variable y combinación de variables afecta el resultado final, permitiendo así optimizar el diseño experimental.

$$EX_1 = \frac{(15.600 + 16.703)}{\frac{8}{2} * 1} = 8.0759$$

$$EX_2 = \frac{((-8.898) + (-12.798))}{\frac{8}{2} * 1} = -5.4240$$

$$EX_3 = \frac{(345.306 - 323.605)}{\frac{8}{2} * 1} = 5.4254$$

Tabla 26

Efectos de las variables e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.

Variabes e Interacciones	Efectos
EX ₀	83.6138
EX ₁	8.0759
EX ₂	-5.4240
EX ₃	5.4254
EX ₁ X ₂	-0.6761
EX ₁ X ₃	0.2758
EX ₂ X ₃	0.9751
EX ₁ X ₂ X ₃	1.5272

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 Interpretación de los efectos

La **interpretación de los efectos** en un contexto experimental implica comprender el impacto físico que tiene el cambio de una variable desde su nivel más bajo hasta su nivel más alto. Este análisis es fundamental para identificar cómo las modificaciones en las condiciones experimentales afectan la variable de respuesta. Al ajustar una variable y observar la variación resultante, se puede determinar la relación causal y la intensidad de la influencia de dicha variable en el sistema estudiado. Este proceso no solo revela la sensibilidad de la respuesta ante cambios en las variables, sino que también proporciona información valiosa para la optimización de procesos y la mejora de la calidad de los resultados. La interpretación correcta de estos efectos es crucial para la toma de decisiones informadas y el diseño eficiente de futuros experimentos.



4.2.2.1 Interpretación de los efectos para el proceso de Carbón en Pulpa

4.2.2.1.1 Efectos principales

- Granulometría (% -200) (EX_1): Al aumentar de 80 a 90% -#200, aumenta la recuperación de oro en 8.0759.
- Densidad de pulpa (g/L) (EX_2): Al aumentar de 1250 a 1350 g/L, disminuye la recuperación de oro en -5.4240.
- Concentración de NaCN (%) (EX_3): Al aumentar de 0.10% a 0.20%, aumenta la recuperación de oro en 5.4254.

4.2.2.1.2 Efectos de las interacciones

Los efectos de las interacciones X_1X_2 , X_1X_3 y X_2X_3 determinan el grado de influencia que tiene una combinación de factores sobre la variable respuesta.

- Interacción de la cantidad de Granulometría (% -200) y Densidad de pulpa (g/L) (EX_1X_2): El efecto de la interacción es -0.6761, el signo negativo nos indica que no existe interacción entre ellos.
- Interacción de la cantidad de Granulometría (% -200) y Concentración de NaCN (%) (EX_1X_3): El efecto de la interacción es 0.2758, el signo positivo nos indica que si existe interacción entre ellos.
- Interacción de la cantidad de densidad de pulpa (g/L) y Concentración de NaCN (%) (EX_2X_3): El efecto de la interacción



es 0.9751, el signo positivo nos indica que si existe interacción entre ellos.

- Interacción de la cantidad de granulometría (% -200), densidad de pulpa (g/L) y concentración de NaCN (%) (EX1X2X3): El efecto de la interacción es 1.5272, el signo positivo nos indica que si existe interacción entre ellos.

En la Figura 13, que muestra los efectos principales, se pueden identificar los efectos individuales de cada uno de los tres factores, así como las interacciones entre ellos. Esta figura es una herramienta poderosa para visualizar y entender cómo cada factor y sus interacciones contribuyen al resultado final.

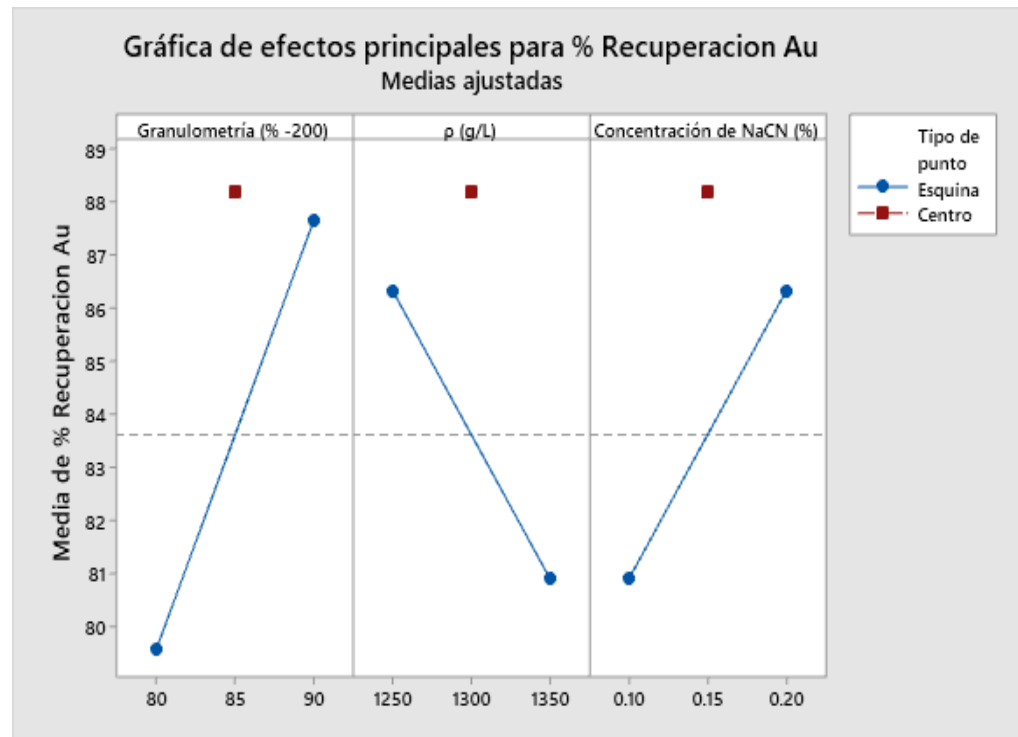
Tabla 27

Resultado del cálculo de efectos.

Término	Efecto	Coef	EE del coef.
Constante		83.613	0.328
Granulometría (% -200)	8.076	4.038	0.328
ρ (g/L)	-5.425	-2.712	0.328
Concentración de NaCN (%)	5.426	2.713	0.328
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)	-0.675	-0.338	0.328
Granulometría (% -200)*Concentración de NaCN (%)	0.275	0.137	0.328
ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	0.976	0.488	0.328
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	1.526	0.763	0.328
Pt Ctral		4.604	0.629

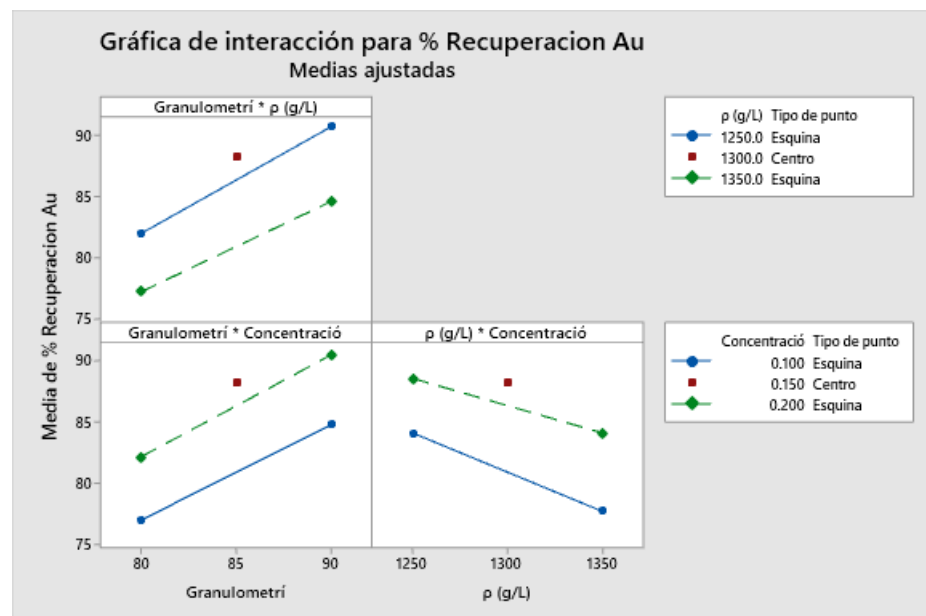
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24
Grafica de Efectos principales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25
Grafica de Interacción.



Fuente: Elaboración propia.



- **Granulometría (% -#200):** Este factor juega un papel crucial en la variable de respuesta, que es el porcentaje de recuperación de oro (% de recuperación Au). Se ha observado que cuando el % #-200 aumenta desde su nivel más bajo (80% #-200) hasta su nivel más alto (90 % #-200), tiene un impacto positivo en la recuperación de oro. Este aumento de % pasante de malla -200 se traduce en un incremento significativo del 8.076% en la recuperación de oro.
- **Densidad de pulpa (g/L):** El pH es otro factor que tiene un efecto significativo en la variable de respuesta (% de recuperación Au). Se ha encontrado que cuando la densidad de pulpa aumenta desde su nivel más bajo (1250 g/L) hasta el más alto (1350 g/L), se observa un impacto negativo en la recuperación de oro. Este cambio en la densidad de pulpa resulta en una reducción del -5.4240% en la recuperación de oro.
- **Concentración de NaCN (%):** En contraste, la densidad de Pulpa tiene un efecto menos pronunciado en la variable de respuesta (% de recuperación Au). Un cambio en la concentración de NaCN, desde el nivel más bajo hasta el más alto, tiene una influencia relativamente leve en la recuperación del oro, que se traduce en un aumento del 5.4254% en la recuperación.

4.2.3 Análisis de la varianza del diseño factorial

El análisis de varianza, conocido comúnmente por su acrónimo ANOVA, es una técnica estadística fundamental que permite evaluar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos independientes. Esta herramienta es de gran valor en la inferencia estadística, ya que facilita la



comparación de múltiples grupos simultáneamente para determinar si al menos uno de ellos difiere de los demás.

En el contexto del diseño experimental, el ANOVA es aplicado para probar la significancia de los efectos que las variables independientes pueden tener sobre una variable dependiente. Por ejemplo, en un experimento que busca optimizar la recuperación de oro (Au), se podrían considerar variables como la granulometría (% -200), la densidad de pulpa (g/L) y la concentración de NaCN (%). El ANOVA permitiría a los investigadores determinar cuál de estas variables, dentro del rango investigado, tiene un impacto real y estadísticamente significativo en el porcentaje de recuperación de Au.

El análisis de varianza implica el cálculo de:

$$SS_{TOTAL} = SS_{EFECTOS} + SS_{ERROR} + SS_{CURVATURA} \quad (32)$$

Donde:

SS_{TOTAL}: Suma total de cuadrados.

SS_{EFECTOS}: Suma de cuadrados debida a los efectos o tratamientos.

SS_{ERROR}: Suma de cuadrados debida al error.

SS_{CURVATURA}: Suma de cuadrados para la curvatura.

4.2.3.1 Suma de cuadrados de los efectos e interacciones.

La suma de cuadrados de los efectos e interacciones, está definida por la ecuación 9:

$$SS_{EFECTOS} = \frac{(\Sigma Y^+ - \Sigma Y^-)^2}{(N) \cdot r} \quad (33)$$

Siendo $r = 1$ para el diseño factorial 2K con replicas en el punto central del diseño, y $N = 8$.

El cálculo de la suma de cuadrados de los efectos se realizó con la ayuda Microsoft Excel.

$$SS_{EFECTOS_{Granulometría (\% -200)}} = \frac{(15.600 + 16.703)^2}{8 \cdot 1} = 130.441$$

$$SS_{EFECTOS_{Densidad de pulpa (g/L)}} = \frac{((-8.898) + (-12.798))^2}{8 \cdot 1} = 58.840$$

$$SS_{EFECTOS_{Concentración de NaCN (\%)}} = \frac{(345.306 - 323.605)^2}{8 \cdot 1} = 58.869$$

Tabla 28

Suma de cuadrados de efectos e interacciones.

Función de variación	SSEFFECTOS
SS _{X1}	130.441
SS _{X2}	58.840
SS _{X3}	58.869
SS _{X1X2}	0.914
SS _{X1X3}	0.152
SS _{X2X3}	1.902
SS _{X1X2X3}	4.664

Fuente: Elaboración Propia.

$$SS_{EFECTOS} = 255.7818$$

4.2.3.1.1 Suma de cuadrados del error

La **suma de cuadrados del error** (SS_{ERROR}) es un concepto estadístico que se utiliza para medir la variabilidad dentro de un conjunto de datos respecto a un modelo estadístico. La ecuación para calcular este valor es la siguiente:

$$SS_{ERROR} = \sum_{i=1}^n (Y_i^0 - Y^0)^2 \quad (34)$$



Donde:

(SS_{ERROR}) representa la suma de cuadrados del error.

$(\sum_{i=1}^n)$ denota la sumatoria desde $(i = 1)$ hasta (n) , donde (n) es el número total de observaciones.

(Y_i^0) es el valor observado de la variable dependiente para la (i) -ésima observación.

(Y^0) es el valor predicho por el modelo para la (i) -ésima observación.

La suma de cuadrados del error proporciona una medida cuantitativa de la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Un valor más bajo de (SS_{ERROR}) indica un mejor ajuste del modelo a los datos. Este cálculo es fundamental en el análisis de regresión y otros métodos estadísticos para evaluar la precisión de un modelo.

Cálculo de la suma de cuadrados del error

$$Y^0 = \frac{(87.249 + 88.302 + 89.101)}{3} = 88.217$$

$$SS_{ERROR} = (87.249 - 88.217)^2 + (88.302 - 88.217)^2 + (89.101 - 88.217)^2$$

$$SS_{ERROR} = 1.726$$

4.2.3.1.2 Suma de cuadrados para la curvatura.

La **suma de cuadrados para la curvatura** es una medida estadística que se utiliza para evaluar la presencia de curvatura en un diseño experimental. La ecuación para calcular esta suma de cuadrados es la siguiente:

$$SS_{\text{CURVATURA}} = \frac{N \cdot n_1 \cdot (\bar{Y} - Y_0)^2}{N + n_1} \quad (35)$$

En esta fórmula:

$(SS_{\text{CURVATURA}})$ representa la suma de cuadrados debido a la curvatura.

(N) es el número total de puntos en el diseño.

(n_1) es el número de puntos en el centro del diseño.

(\bar{Y}) es la media de las respuestas en los puntos extremos del diseño.

(Y_0) es la media de las respuestas en el punto central del diseño.

Esta suma de cuadrados se utiliza para determinar si existe una diferencia significativa entre la respuesta en los puntos extremos y en el centro del diseño, lo cual indicaría la presencia de curvatura en la superficie de respuesta. Un valor alto de $(SS_{\text{CURVATURA}})$ sugiere que la curvatura es un factor importante en el modelo y no debe ignorarse.

Cálculo de la suma de cuadrados de la curvatura para el carbón tipo Calgon

$$\bar{Y} = \frac{668.911}{8} = 83.614$$



$$SS_{CURVATURA} = \frac{8 * 3 * (83.614 - 88.217)^2}{(8 + 3)}$$

$$SS_{CURVATURA} = \frac{508.503}{(11)}$$

$$SS_{CURVATURA} = 46.228$$

La suma total de cuadrados es:

$$SS_{TOTAL} = SS_{EFECTOS} + SS_{ERROR} + SS_{CURVATURA}$$

$$SS_{TOTAL} = 255.7818 + 1.726 + 46.228 = 303.736$$

4.2.4 Aplicación del Teorema de Cochran

Según este teorema, Una variable, interacción o la curvatura es significativa si se cumple la siguiente condición:

$$F_0 > F(\alpha, f_1, f_2) \quad (35)$$

Donde:

α : Grado de confiabilidad (0.05).

f_1 : Grado de libertad de efectos e interacciones, es igual a 1 en diseños factoriales a dos niveles ($2-1=1$).

f_2 : Grado de libertad del error es igual al número de réplicas en el centro del diseño menos 1, ($3-1=2$)

Para el nivel de confianza de 95%, F de tabla (ver Anexo 1), para uno y dos grados de libertad, respectivamente es:

$$F(\alpha, f_1, f_2) = F(0.05, 1, 2) = 18.513$$

4.2.4.1 Media de cuadrados

La media de cuadrados, está definida por las ecuaciones 36 y 37:

$$MS_{EFECTOS} = \frac{SS_{EFECTOS}}{f_1} \quad (36)$$

$$MS_{ERROR} = \frac{SS_{ERROR}}{f_2} \quad (37)$$

Siendo $f_1 = 1$ y $f_2 = 2$.

Función de variación	SSEFECTOS
SS _{X1}	130.441
SS _{X2}	58.840
SS _{X3}	58.869
SS _{X1X2}	0.914
SS _{X1X3}	0.152
SS _{X2X3}	1.902
SS _{X1X2X3}	4.664

$$MS_{EFECTOS} = \frac{130.441}{1} = 130.441$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{58.840}{1} = 58.840$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{58.869}{1} = 58.869$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{0.914}{1} = 0.914$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{0.152}{1} = 0.152$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{1.902}{1} = 1.902$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{4.664}{1} = 4.664$$

Tabla 29*Análisis de varianza del diseño factorial.*

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad	Media de cuadrados (MS)	F_0	$F(\alpha, f1, f2)$	Significativo
				$\frac{MS_{EFECTOS}}{MS_{ERROR}}$	$F(0.05, 1, 2)$	
X ₁	130.452	1	130.452	151.19	18.513	SI
X ₂	58.856	1	58.856	68.21	18.513	SI
X ₃	58.888	1	58.888	68.25	18.513	SI
X ₁ X ₂	0.912	1	0.912	1.06	18.513	NO
X ₁ X ₃	0.151	1	0.151	0.17	18.513	NO
X ₂ X ₃	1.904	1	1.904	2.21	18.513	NO
X ₁ X ₂ X ₃	4.659	1	4.659	5.40	18.513	NO
Curvatura	46.247	1	46.247	53.60	18.513	SI
Error	1.726	2	0.863			
TOTAL	303.794	10				

Fuente: Elaboración Propia.

Del valor obtenido de tabla F (18.513) y el valor calculado F_0 , se deduce que las variables más significativas son las que cumplen $F_0 > F$.

- X₁ (Granulometría (% -200)) ya que: $151.19 > 18.513$
- X₂ (Densidad de pulpa (g/L)) ya que: $68.21 > 18.513$
- X₃ (Concentración de NaCN (%)) ya que: $68.25 > 18.513$
- También se observa que el efecto de la curvatura es muy significativo, ya que $53.60 > 18.513$.

La Figura 15 nos ofrece una visión jerárquica de cómo los distintos factores afectan a la variable de respuesta, que en este contexto es el porcentaje de recuperación de oro. Esta representación jerárquica nos permite identificar de manera clara y ordenada los factores que ejercen un mayor impacto en la variable de respuesta.

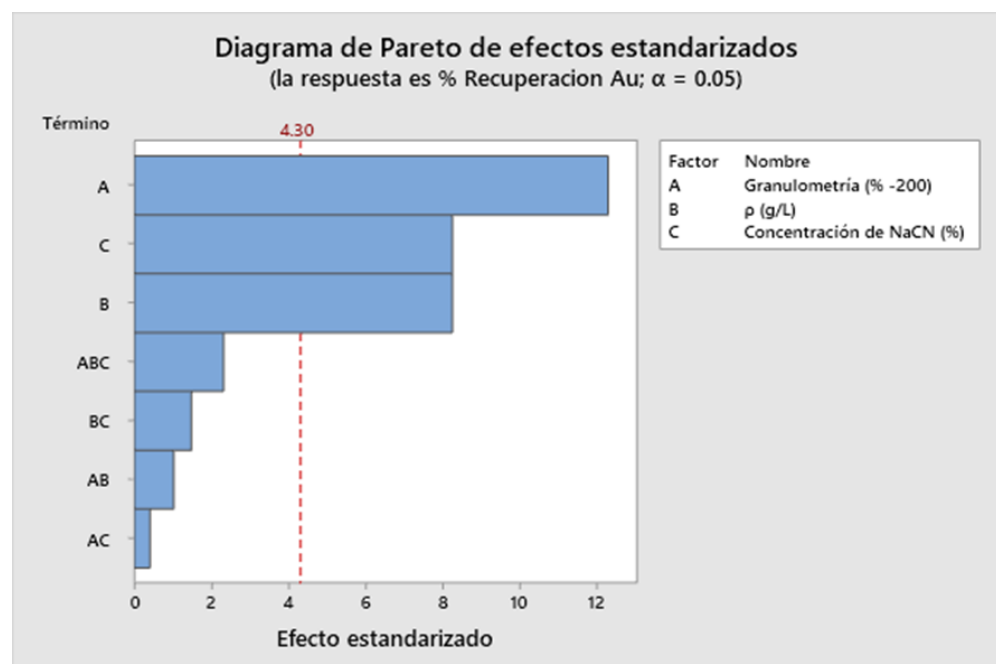
En el proceso de cianuración, las variables que resultan ser significativas son: la granulometría (% -200), la densidad de pulpa (g/L) y la concentración de NaCN (%). Estos factores son los que más influyen en el porcentaje de recuperación de oro. Esto implica que estas variables son

cruciales en la optimización del proceso de cianuración de oro. Por lo tanto, cualquier cambio en estos factores puede tener un efecto considerable en la recuperación de oro.

Para corroborar estas observaciones, se puede hacer referencia al valor de probabilidad que se encuentra en la Tabla 19 del Análisis de Varianza (ANOVA). Este análisis proporciona información adicional sobre la relevancia estadística de estos factores. El análisis de ANOVA es una herramienta útil que ayuda a confirmar la importancia de estos factores en el proceso y respalda la conclusión de que las interacciones mencionadas tienen un impacto significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos factores al buscar optimizar el proceso de cianuración.

Figura 26

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30*Análisis de varianza (ANOVA).*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	302.069	37.759	43.76	0.023
Lineal	3	248.196	82.732	95.88	0.010
Granulometría (% -200)	1	130.452	130.452	151.19	0.007
ρ (g/L)	1	58.856	58.856	68.21	0.014
Concentración de NaCN (%)	1	58.888	58.888	68.25	0.014
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)	1	0.912	0.912	1.06	0.412
Granulometría (% -200)*Concentración de NaCN (%)	1	0.151	0.151	0.17	0.716
ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	1	1.904	1.904	2.21	0.276
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	1	4.659	4.659	5.40	0.146
Curvatura	1	46.247	46.247	53.60	0.018
Error	2	1.726	0.863		
Total	10	303.794			

Fuente: Elaboración propia

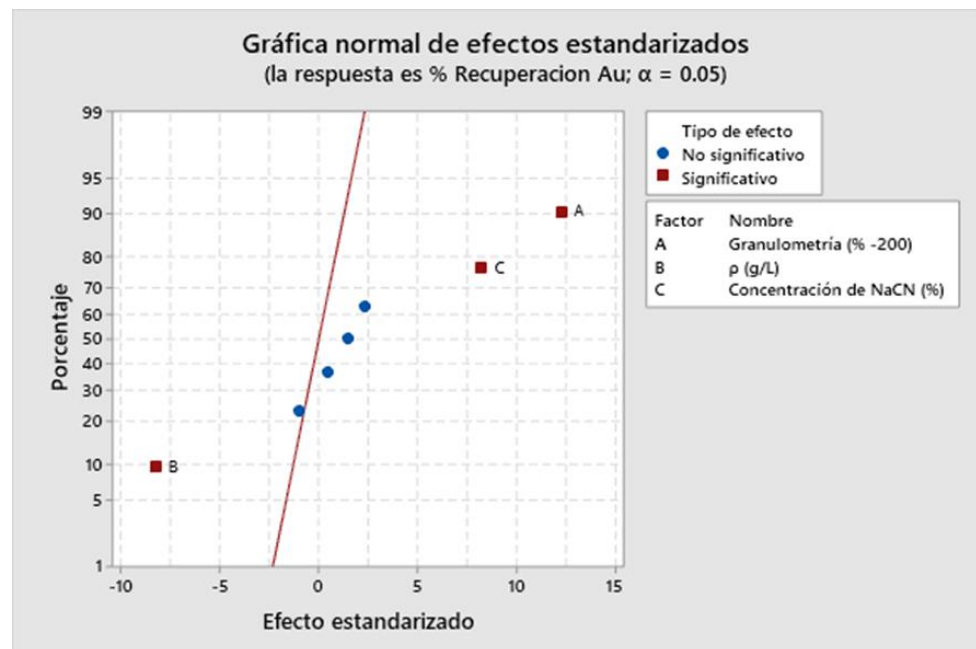
El diseño factorial 2k con réplicas centrales, que se utiliza en este estudio, no cumple con la suposición de linealidad. Esto significa que el comportamiento del proceso de cianuración no sigue una relación lineal con los cambios en los factores. Esta observación se confirma mediante una prueba de curvatura, cuyos resultados se pueden encontrar en la Tabla 19 del análisis de varianza (ANOVA). Es importante destacar que el valor de probabilidad asociado al efecto de curvatura es de 0.020, lo cual es significativamente inferior al límite de valor de significancia estándar de 0.05. Esto proporciona una evidencia estadística sólida de que la suposición de linealidad no se cumple en el proceso de cianuración estudiado.

Estos hallazgos indican que el proceso de cianuración estudiado es no lineal y que todos los factores específicos son críticos para determinar la recuperación de oro. Por lo tanto, es esencial considerar estas no linealidades y factores significativos al optimizar y controlar el proceso de

cianuración para lograr una recuperación de oro óptima. Estos resultados subrayan la importancia de un enfoque más complejo y matizado en la optimización del proceso de cianuración, que tenga en cuenta tanto los factores individuales como sus interacciones.

Figura 27

Normalidad de efectos estandarizados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31

Análisis de T-Student.

Término	Valor T	Valor p	FIV
Constante	254.60	0.000	
Granulometría (% -200)	12.30	0.007	1.00
ρ (g/L)	-8.26	0.014	1.00
Concentración de NaCN (%)	8.26	0.014	1.00
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)	-1.03	0.412	1.00
Granulometría (% -200)*Concentración de NaCN (%)	0.42	0.716	1.00
ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	1.49	0.276	1.00
Granulometría (% -200)* ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)	2.32	0.146	1.00
Pt Ctral	7.32	0.018	1.00

Fuente: Elaboración propia



La Tabla 32 presenta el valor de T, que es un indicador de la significancia de los factores en el proceso de cianuración. Este valor nos permite entender la importancia de cada factor y su influencia positiva en la respuesta del proceso.

La tabla de Análisis de T-Student que has proporcionado muestra varios términos con sus respectivos valores T, valores p y el Factor de Inflación de la Varianza (FIV). Aquí tienes una interpretación de los resultados:

- **Constante:** Con un valor T de **254.60** y un valor p de **0.000**, esto indica que la constante es estadísticamente significativa y tiene un fuerte efecto en el modelo.
- **Granulometría (% -200):** Con un valor T de **12.30** y un valor p de **0.007**, sugiere que la granulometría tiene una influencia significativa en el modelo y es estadísticamente significativa.
- **ρ (g/L):** Con un valor T de **-8.26** y un valor p de **0.014**, indica que la densidad (ρ) tiene un efecto negativo significativo en el modelo.
- **Concentración de NaCN (%):** Similar a la densidad, con un valor T de **8.26** y un valor p de **0.014**, la concentración de NaCN también es significativa en el modelo.

Interacciones:

- **Granulometría (% -200)* ρ (g/L):** Con un valor T de **-1.03** y un valor p de **0.412**, esta interacción no es estadísticamente significativa.



- **Granulometría (% -200)*Concentración de NaCN (%)**: Con un valor T de **0.42** y un valor p de **0.716**, tampoco es significativa.
- **ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)**: Con un valor T de **1.49** y un valor p de **0.276**, esta interacción tampoco resulta ser significativa.
- **Granulometría (% -200)* ρ (g/L)*Concentración de NaCN (%)**: Con un valor T de **2.32** y un valor p de **0.146**, esta interacción triple tampoco es significativa, aunque se acerca más a serlo que las anteriores.
- **Pt Ctrial**: Con un valor T de **7.32** y un valor p de **0.018**, es significativo y parece tener un efecto importante en el modelo.

Todos los términos tienen un FIV de **1.00**, lo que indica que no hay colinealidad entre los predictores, y cada uno aporta información única al modelo.

En resumen, la constante, la granulometría, la densidad y la concentración de NaCN son significativas individualmente, pero sus interacciones no parecen serlo, con la posible excepción de la interacción triple que se acerca a la significancia estadística. Esto sugiere que estos factores tienen efectos independientes en el modelo sin influenciarse significativamente entre sí.



V. CONCLUSIONES

- Las pruebas de cianuración permitieron determinar que la granulometría (% -200) tiene un impacto del 8.076% en la recuperación de oro, según las técnicas estadísticas, este efecto se observa cuando el % #-200 cambia desde su nivel más bajo (80% #-200) hasta su nivel más alto (90 % #-200), esto establece que la densidad de pulpa, que es aproximadamente 90 % - #200, es necesario para lograr una recuperación del 92.301%.
- Los experimentos para la evaluación de parámetros en cianuración de minerales de oro realizados a nivel laboratorio, cuando se trabajó con la concentración de NaCN se logró obtener una recuperación máxima de 92.301 % de Au. Esto se logra cuando se trabaja con la concentración de NaCN óptima que fue de 0.20 %, con una densidad de pulpa de 1250 g/L y una granulometría de 90 % #-200 y un tiempo de agitación de 36 horas, es decir, para el tipo de mineral tratado, a mayor % #-200 nos permite incrementar la recuperación Au en el proceso de carbón en pulpa.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar bajo estos parámetros y realizar más pruebas para determinar el rango óptimo de granulometría que maximice la recuperación de oro, especialmente alrededor del 90% -#200, donde se observó una recuperación del 92.301%., optimizando así el rendimiento del proceso de carbón en pulpa.
- Se recomienda llevar a cabo estudios experimentales que abarquen un espectro más amplio de variables operacionales. Se debe investigar la influencia de la temperatura, la adición de cal para ajustar el pH y el uso de peróxido de hidrógeno como agente oxidante. Estos estudios permitirán afinar las condiciones del proceso para incrementar significativamente la recuperación del oro.
- Se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo de las máquinas operativas de la planta. Un programa de mantenimiento regular puede prevenir paradas no planificadas y extender la vida útil de los equipos, asegurando una operación continua y eficiente.
- Se recomienda una capacitación continua de los trabajadores ya que es fundamental para mantener un alto nivel de competencia en todas las áreas del proceso. Los programas de capacitación deben ser integrales, cubriendo desde conocimientos técnicos hasta prácticas de seguridad y operación, para fomentar un entorno laboral seguro y eficaz.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antony, J. (2003). Fundamentals of design of experiments. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, 6–16.
- Apfata Taipe, W. (2017). *Optimización de la recuperación de Au en la planta de beneficio de la Compañía Refinadora del Pacífico SAC.*
- Apolinario Santos, M. Y., & Ibarra Ceras, J. R. (2023). *Revisión de métodos para la recuperación de oro a partir de un mineral refractario.*
- Asalde Horna, R. M. (2010). *Optimización de un Proceso de Recuperación de Oro mediante carbón activado.*
- Bonilla Cabello, L. J., & Mendoza Rojas, D. G. (2022). *Estudio de minerales auríferos por flotación y cianuración para la recuperación de oro y plata de la Minera Tres Valles Sac.*
- Cacha, M. S. (2018). *Evaluación del proceso productivo de oro por cianuración y lixiviación en la planta piloto Tulin, Nazca, 2017.*
<http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/2436>
- Chok, J. T., Harper, J. M., & Luiselli, J. K. (2005). *Introduction to functional analysis.*
- Cornelio La Rosa, A. J. (2017). Diagnóstico del circuito de molienda y cianuración, para fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.
Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
<https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/2141>
- Crittenden, J. C. (2005). *Water Treatment Principles and Design Hoboken John Wiley Sons.*



- Egan, J., Bazin, C., & Hodouin, D. (2016). Effect of particle size and grinding time on gold dissolution in cyanide solution. *Minerals*, 6(3), 68.
- Escalante, V., Domínguez, J. D., López, J. A. D., Botero, G. J., Paenza, A., Botero, G. J., Solomons, G., Anton, H., Rorres, C., & Anton, H. (2014). Diseño y análisis de experimentos. *Editorial Limusa*.
- Farfan Chicca, N. P., & Huaracallo Choque, C. S. (2019). *Optimización del proceso de concentración por flotación de sulfuros de plomo con presencia de óxidos de plomo, utilizando la sulfurización en la concentradora de la minera bateas*.
- Fernández, A., Castillo, C., Muñiz, R., & García, I. (2006). Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. *Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba*.
- Fernandez Astete, A. L., & Caso Collachagua, E. S. (2022). *Estudio de parámetros óptimos para mejorar la recuperación de oro en el proceso de cianuración de la planta nueva bonanza*.
- Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial*.
- Figuerola, H., & Flórez, S. (2010). *Aplicación de carbón activado a la recuperación de oro en la mina la providencia*.
- Gutiérrez Pulido, H. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*.
- Huaricapcha, C., & Yonel, Y. (2019). *Evaluación metalúrgica a los minerales auríferos para la obtención del oro en la Compañía Minera Arias SA–Huasahuasi, Tarma-2018*. <http://45.177.23.200/handle/undac/1598>



- Huerta Solano, C. R. (2019). *Evaluación del cianuro de sodio para la optimización del proceso metalúrgico de la planta de beneficio SantaFilomena II de la empresa Sotrami SA.*
- Ibragimova, R. I., Mil'chenko, A. I., & Vorob'ev-Desyatovskii, N. V. (2007). Criteria for choice of a brand of activated carbon for hydrometallurgical recovery of gold from ore pulps in carbon-in-leaching and carbon-in-pulp processes. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80, 891–903.
- Jeffrey, M. I., & Ritchie, I. M. (2000). The leaching of gold in cyanide solutions in the presence of impurities II. The effect of silver. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(9), 3272.
- Jeffrey, M. I., & Ritchie, I. M. (2001). The leaching and electrochemistry of gold in high purity cyanide solutions. *Journal of the Electrochemical Society*, 148(4), D29.
- Kondos, P. D., Deschênes, G., & Morrison, R. M. (1995). Process optimization studies in gold cyanidation. *Hydrometallurgy*, 39(1–3), 235–250.
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(95\)00032-C](https://doi.org/10.1016/0304-386X(95)00032-C)
- Medina, D., & Anderson, C. G. (2020). A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates. *Metals 2020, Vol. 10, Page 897, 10(7)*, 897.
<https://doi.org/10.3390/MET10070897>
- Mina, J. A., & Mercado, R. P. (1995). Optimización por Diseños Experimentales. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC, Impreso En Lima-Perú.*
- Misari Chuquipoma, F. S. (2010). Metalurgia del oro. *Lima: San Marcos EIRL.*



- Misari, F. S. (1993). *Metalurgia del oro* (Vol. 1). Centro de Estudios y Promoción en Ciencias de la Tierra.
- Montgomery, D. C., & Verbeek, D. V. (2004). *Control estadístico de la calidad* (Issue 658.562 M66 2004.). Limusa Wiley.
- Muñoz, M., & Alvarado, 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*. <https://sired.udenar.edu.co/5632/>
- Navarro, P., Vargas, C., Reveco, V., & Orellana, J. (2006). Recuperación de oro desde un medio amoniaco-tiosulfato con resina de intercambio iónico Amberlite IRA-410. *Revista de Metalurgia*, 42(5), 354–366.
- Ruiz-Córdoba, J. A., Lopez-Cañas, C. A., Carmona-Arango, M. E., & Bolívar-García, W. H. (2019). Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 33–51. <https://doi.org/10.19053/01211129.V28.N53.2019.9745>
- Trujillo Fajardo, L. A. (2008). *Diseño de la unidad de desorción de carbón activado cargado con oro*.
- Valverde, M. P. (2023). *Evaluación del consumo de cianuro en el tratamiento del mineral aurífero para la recuperación de oro en la Corporación Minera Chancadora Centauro SAC–Pasco*. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3148>
- Varela, P. D. M., & Reyes, A. M. L. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados. *Scientia et Technica*, 1(47), 101–106.
- Vargas, J. (1990). *Metalurgia del oro y la plata*. San Marcos, 2.



- Vilca, Y., & Carlos, J. (2000). *Optimización del proceso de cianuración de oro en la planta de la Joya Mining.*
- Villca Aro, N. (2023). *Estudio experimental de pretratamiento de un mineral aurífero refractario para la recuperación de oro en la Empresa Minera Goldmins SRL.*
- Villegas Quispe, A. F. R. (2015). *Optimización del tratamiento de minerales auríferos por el método de carbón en pulpa (CIP) en la planta de beneficio doble "D" minera COLIBRI.*
- Vizcarra Medina, W. A. (2014). *Evaluación de la recuperación de Oro en la planta de cianuración de Minería y transformaciones Santa Teresa SRL.*
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The extractive metallurgy of gold. Edition.* Van Nostrand Reinhold. New York. Pesada del oro. Anexo.



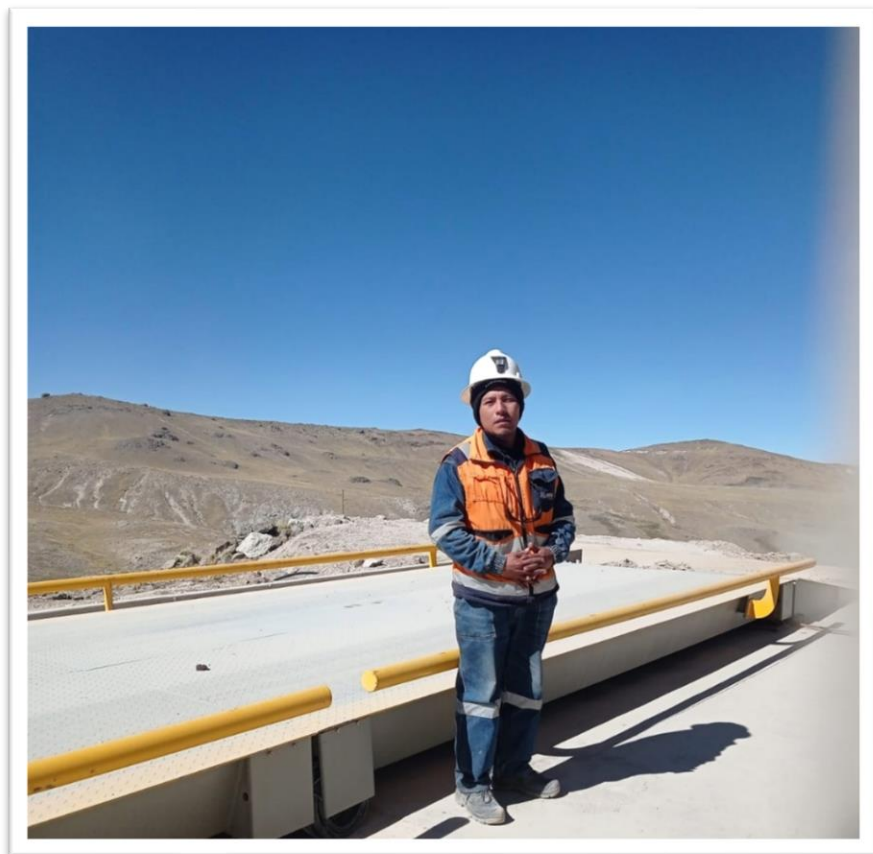
ANEXOS



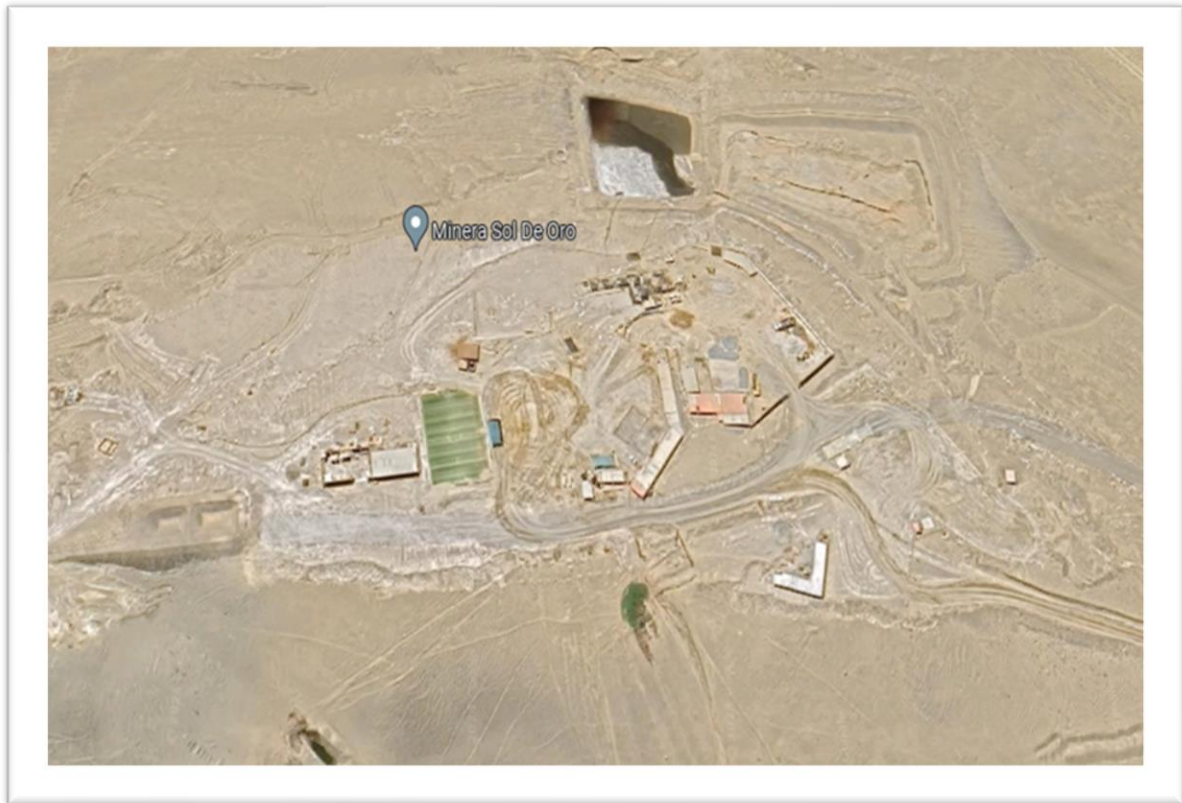
Anexo 1: Laboratorio metalúrgico



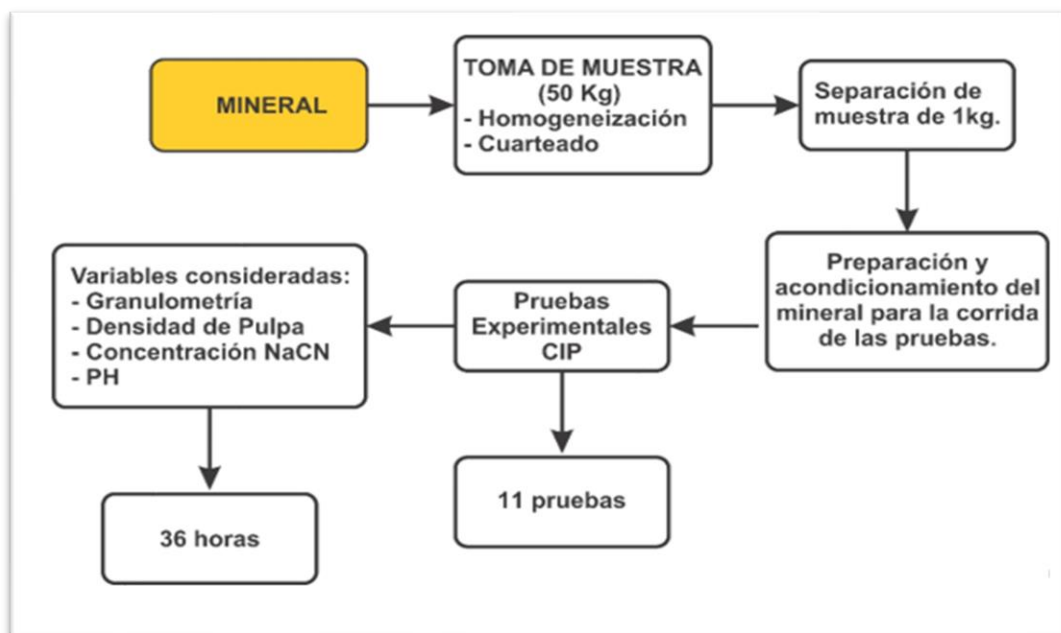
Anexo 2: Pesaje (balanza con camión minero)



Anexo 3: Planta Metalúrgica “MINERA SOL DE ORO” S.R.L



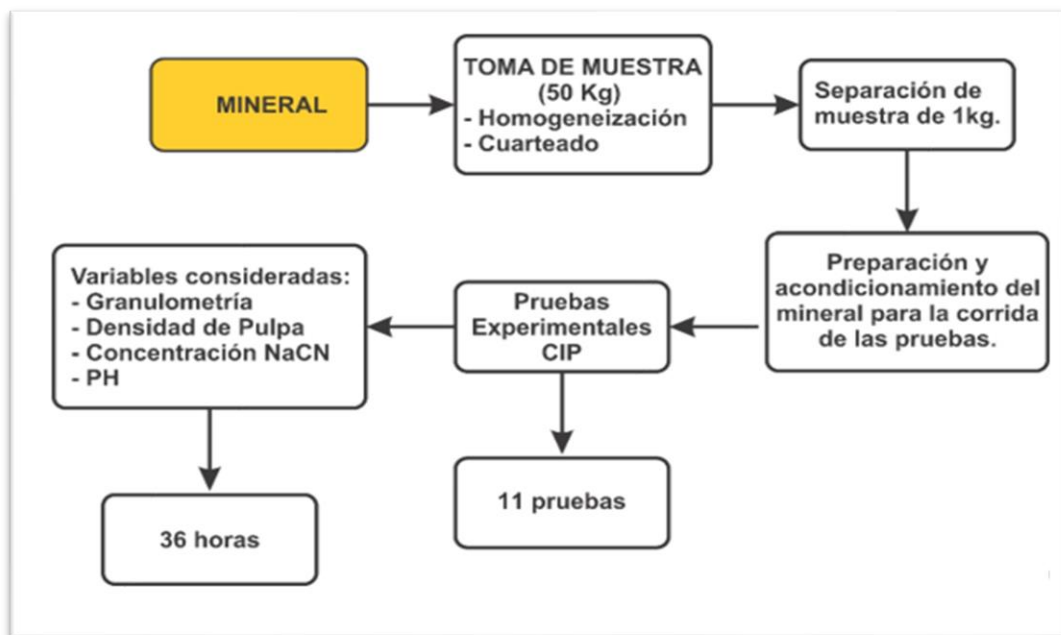
Anexo 4: Procedimiento experimental



Anexo 5: Planta Metalúrgica “MINERA SOL DE ORO” S.R.L



Anexo 6: Procedimiento experimental



Anexo 7: Balance Metalúrgico

TRATAMIENTO										CABEZA					RELAVE					PRODUCTO					OPERACIÓN					CONSUMO DE CIANURO DE SODIO				
Día	TMH acum.	% H2O	% H2O prom.	TMS acum.	TMS	TMS acum.	g/tms	g/TM prom.	g Au acum.	g Au	g Au acum.	g Au día	g Au acum.	% R día	% R Acum.	Hr día	Hr acum.	Hr	Hr acum.	Consumo de CN	Ratio de consumo CN	Ratio Promedio consumo	Consumo de CN Acum.											
10-Mar	8.5	56.5	10.0	10.0	7.7	50.9	41.0	15.2	313.7	773.5	0.2	0.5	1.5	99.5	96.5	6.0	54.0	6.0	54.0	50.0	5.9	5.3	299.0											
12-Mar	8.0	64.5	10.0	10.0	7.2	58.1	41.0	18.4	295.2	1068.7	0.2	0.5	1.4	99.5	97.3	5.0	59.0	5.0	59.0	50.0	6.3	5.4	349.0											
13-Mar	9.0	73.5	10.0	10.0	8.1	66.2	41.0	21.2	332.1	1400.8	0.2	0.5	1.6	99.5	97.8	6.0	65.0	6.0	65.0	50.0	5.6	5.4	399.0											
14-Mar	8.0	81.5	10.0	10.0	7.2	73.4	41.0	23.1	295.2	1696.0	0.2	0.4	1.4	99.5	98.1	5.0	70.0	5.0	70.0	50.0	6.3	5.5	449.0											
15-Mar	11.0	92.5	10.0	10.0	9.9	83.3	41.0	25.2	405.9	2101.9	0.2	0.4	2.0	99.5	98.4	9.5	79.5	9.5	79.5	62.5	5.7	5.5	511.5											
16-Mar	11.0	103.5	10.0	10.0	9.9	93.2	41.0	26.9	405.9	2507.8	0.2	0.4	2.0	99.5	98.6	9.5	89.0	9.5	89.0	62.5	5.7	5.5	574.0											
17-Mar	10.0	113.5	10.0	10.0	9.0	102.2	9.3	25.4	84.0	2591.8	0.8	0.4	7.2	91.4	98.3	7.0	96.0	7.0	96.0	50.0	5.0	5.5	624.0											
18-Mar	10.0	123.5	10.0	10.0	9.0	111.2	9.3	24.1	84.0	2675.8	0.8	0.5	7.2	91.4	98.1	8.0	104.0	8.0	104.0	50.0	5.0	5.5	674.0											
19-Mar	11.5	135.0	10.0	10.0	10.4	121.5	9.3	22.8	96.6	2772.4	0.8	0.5	8.3	91.4	97.9	10.0	114.0	10.0	114.0	62.0	5.4	5.5	736.0											
20-Mar	12.0	147.0	10.0	10.0	10.8	132.3	9.3	21.7	100.8	2873.2	0.8	0.5	8.6	91.4	97.7	11.0	125.0	11.0	125.0	62.0	5.2	5.4	798.0											
21-Mar	12.0	159.0	10.0	10.0	10.8	143.1	9.3	20.8	100.8	2974.0	0.8	0.5	8.6	91.4	97.4	11.0	136.0	11.0	136.0	62.0	5.2	5.4	860.0											
22-Mar	12.0	171.0	10.0	10.0	10.8	153.9	9.3	20.0	100.8	3074.8	0.8	0.5	8.6	91.4	97.3	11.0	147.0	11.0	147.0	62.0	5.2	5.4	922.0											
23-Mar	5.5	176.5	10.0	10.0	5.0	158.9	7.2	19.6	35.6	3110.4	0.4	0.5	2.0	94.4	97.2	3.0	150.0	3.0	150.0	30.0	5.5	5.4	952.0											
24-Mar	9.0	185.5	10.0	10.0	8.1	167.0	7.2	19.0	58.3	3168.7	0.4	0.5	3.2	94.4	97.2	7.0	157.0	7.0	157.0	50.0	5.6	5.4	1002.0											
25-Mar	12.0	197.5	10.0	10.0	10.8	177.8	9.4	18.4	101.5	3270.2	0.8	0.6	8.1	92.0	97.0	11.0	168.0	11.0	168.0	62.0	5.2	5.4	1064.0											
26-Mar	12.0	209.5	10.0	10.0	10.8	188.6	9.4	17.9	101.5	3371.8	0.8	0.6	8.1	92.0	96.9	11.0	179.0	11.0	179.0	62.0	5.2	5.4	1126.0											
27-Mar	12.0	221.5	10.0	10.0	10.8	199.4	9.4	17.4	101.5	3473.3	0.8	0.6	8.1	92.0	96.7	11.0	190.0	11.0	190.0	62.0	5.2	5.4	1188.0											
28-Mar	11.0	232.5	10.0	10.0	9.9	209.3	9.4	17.0	93.1	3566.3	0.8	0.6	7.4	92.0	96.6	10.0	200.0	10.0	200.0	62.0	5.6	5.4	1250.0											
29-Mar	10.5	243.0	10.0	10.0	9.5	218.7	6.8	16.6	63.8	3630.1	0.8	0.6	7.1	88.9	96.5	9.5	209.5	9.5	209.5	62.5	6.0	5.4	1312.5											
30-Mar	11.0	254.0	10.0	10.0	9.9	228.6	6.8	16.2	66.8	3696.9	0.8	0.6	7.4	88.9	96.3	10.0	219.5	10.0	219.5	62.5	5.7	5.4	1375.0											



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo QUISPE APAZA GUIDO MARCELINO
identificado con DNI 73077818 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA METALÚRGICA

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"EVALUACIÓN DE PARAMETROS EN CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO PARA
MEJORAR EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN EN LA EMPRESA MINERA S.L. DE ORO SRI. UYANA - AREQUIPA"

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 08 de JULIO del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo QUISPE APAZA GUIDO MARCELINO
identificado con DNI 73077818 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA METALURGICA
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EN CIATURACIÓN DE MINERALES DE ORO PARA MEJORAR
EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN EN LA EMPRESA MINERA SO2 DE ORO S.R.L. UNALA NBEQUIPA
" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 08 de JULIO del 2024



FIRMA (obligatoria)



Huella