

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

Optimización de reactivos en pruebas de cianuración de oro

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Metalurgista

Elaborado por

Angel Domas Rojas Soto

 [0009-0000-0257-011X](https://orcid.org/0009-0000-0257-011X)

Asesor

Dr. Alberto Landauro Abanto

 [0000-0003-3748-120X](https://orcid.org/0000-0003-3748-120X)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Rojas Soto [1]
Referencia/Reference	[1] A. Rojas Soto, " <i>Optimización de reactivos en pruebas de cianuración de oro</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rojas, 2024)
Referencia/Reference	Rojas, A. (2024). <i>Optimización de reactivos en pruebas de cianuración de oro</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

La presente tesis de pregrado lo dedico a mis padres por todo el apoyo y amor que me dan día a día. A mis hermanos como muestra de gratitud, por la ayuda incondicional en mi formación profesional y lograr mis metas y a Dios por que siempre cuida de mi.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Compañía, por darme la oportunidad y brindarme el apoyo necesario este trabajo. A todos los colaboradores y trabajadores que con su conocimiento me ayudaron a sacar adelante esta investigación.

Resumen

El presente trabajo de investigación se ha realizado en una Planta Concentradora de oro, el cual tiene por objetivo evaluar la cinética de disolución del oro a diferentes concentraciones de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto en mineral cabeza, para poder solucionar los problemas en la baja recuperación del oro.

Para tal efecto recurrimos al apoyo de diseño de experimentos (DOE) para evaluar y optimizar los parámetros significativos que influyen en la cinética de disolución del oro, se optó tomar el diseño Box-Behnken debido que estas pruebas trabajan con 3 variables y no toma puntos máximos y mínimos como lo hace un diseño central compuesto (DCC), debido que el diseño (DCC) toma puntos estrellas, tomando máximos y mínimos fuera del rango evaluado.

En esta evaluación, se realizan 13 pruebas, también se evalúa un mayor tiempo de residencia en la oxidación, debido a que en la difracción de rayos x figura no se logra formar goetita que es la forma oxidada de la pirita y finalmente una de las consecuencias que afecta en la cinética de disolución de oro es la cantidad de arcillas (15%), el cual tiene un efecto Pre Robbing, disminuyendo la eficiencia de recuperación del oro y plata, con estas pruebas se busca mejorar la cinética de disolución de oro con la optimización de reactivos.

Palabras clave — Optimización, lixiviación, recuperación, cinética y oxidación

Abstract

The present research work has been carried out at a gold concentrator plant, with the objective of evaluating the kinetics of gold dissolution at different cyanide concentrations, particle sizes, and dissolved oxygen in the head ore, in order to address the problems of low gold recovery.

To this end, we relied on the support of Design of Experiments (DOE) to evaluate and optimize the significant parameters that influence the kinetics of gold dissolution. The Box-Behnken design was chosen because these tests work with three variables and do not take maximum and minimum points, as a Central Composite Design (CCD) does. The CCD takes star points, using maximum and minimum values outside the evaluated range.

In this evaluation, 13 tests were carried out, and a longer residence time during oxidation was also assessed. As shown in X-ray diffraction (Figure No. 6), goethite, the oxidized form of pyrite, did not form. Finally, one of the factors that affects the kinetics of gold dissolution is the amount of clay (15%), which has a preg-robbing effect, reducing the efficiency of gold and silver recovery. These tests aim to improve the kinetics of gold dissolution through reagent optimization.

Keywords — Optimization, leaching, recovery y oxidation.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Acceso	1
1.2 Descripción de la problemática.....	1
1.3 Objetivo de estudio.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos Especifico	2
1.4 Antecedente investigativo.....	2
1.4.1 Antecedente referencial.....	2
1.5 Hipótesis	3
1.5.1 Hipótesis General.....	3
1.5.2 Hipótesis Específicas	3
1.6 Justificación de la investigación.....	3
1.6.1 Tipo de Investigación.....	3
1.6.2 Marco metodológico del diseño experimental	3
Capitulo II. Marco teórico y conceptual	5
2.1 Marco teórico.....	5
2.1.1 Chancado.....	5
2.1.2 Chancadora primario.....	5
2.1.3 Chancadora secundaria	7
2.1.4 Molienda.....	7
2.1.5 Cianuración	8
2.1.6 Lixiviación por agitación	8

2.1.7	Mecanismo de Cianuración	10
2.1.8	Decantación continua en contracorriente (CCD)	14
2.1.9	Procesamiento de minerales refractarios de oro.....	15
2.1.10	MERRILL – CROWE	17
2.2	Marco conceptual.....	18
2.2.1	Descripción del proceso.....	18
2.2.2	Diseño experimental.....	21
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		27
3.1	Equipos utilizados en laboratorio metalúrgico.....	27
3.2	Caracterización mineral cabeza.....	27
3.3	Cálculo de tiempo de molienda para un 80%, 90% y 100% -M200.....	28
3.4	Tiempo de la curva de molienda.....	30
3.5	Planteamiento de las variables controlables para la formulación del diseño del experimento (DOE).....	30
3.6	Consumo de reactivos en proceso de dosificación de reactivos a nivel de Laboratorio Metalúrgico.	31
3.7	Pruebas de cianuración a diferente concentración de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto.....	32
3.7.1	Prueba de Cianuración N°1	33
3.7.2	Prueba de Cianuración N°2	35
3.7.3	Prueba de Cianuración N°3.....	37
3.7.4	Prueba de Cianuración N°4.....	39
3.7.5	Prueba de Cianuración N°5.....	41
3.7.6	Prueba de Cianuración N°6.....	43
3.7.7	Prueba de Cianuración N°7	45
3.7.8	Prueba de Cianuración N°8.....	47
3.7.9	Prueba de Cianuración N°9.....	49
3.7.10	Prueba de Cianuración N°10	51

3.7.11 Prueba de Cianuración N°11	53
3.7.13 Prueba de Cianuración N°13	57
Capitulo IV Análisis y discusión de resultados	60
4.1 Diagrama de Pareto de efectos para el % recuperación (Au)	60
4.1.1 Análisis e interpretación de resultados	60
4.2 Grafica de efectos para el % Recuperación (Au)	60
4.2.1 Análisis e interpretación (parrafear)	61
4.3 Grafica de contorno de % Recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%); Fuerza CN a un Oxígeno disuelto de 6.5 mg/l.....	61
4.3.1 Análisis e interpretación	62
4.4 Grafica de superficie de % recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%) y Fuerza de Cianuro (ppm) a un oxígeno disuelto de 6.5 mg/l.	63
4.4.1 Análisis e interpretación	63
4.5 Optimización de las variables controlables.	64
4.5.1 Análisis e interpretación	64
4.6 Pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio metalúrgico con el diseño experimental Box-Behnken.	64
4.7 Diagnóstico de las pruebas de cianuración a diferentes concentraciones de cianuro granulometría y oxígeno disuelto.....	65
Conclusiones	66
Recomendaciones	67
Referencias bibliográficas	68
Anexos	69

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Factores de control que influyen en la recuperación de (Au)	26
Tabla 2 : Diseño matricial del diseño Box-Behnken	26
Tabla 3 : Tiempo de Moliendabilidad	30
Tabla 4 : Plantilla diseño experimental Box-Behnken.....	31
Tabla 5 : Condiciones iniciales de la Prueba N°1	33
Tabla 6 : Condiciones iniciales de la Prueba N°2.....	35
Tabla 7 : Condiciones iniciales de la Prueba N°3.....	37
Tabla 8 : Condiciones iniciales de la Prueba N°4.....	39
Tabla 9 : Condiciones iniciales de la Prueba N°5.....	41
Tabla 10: Condiciones iniciales de la Prueba N°6.....	43
Tabla 11: Condiciones iniciales de la Prueba N°7.....	45
Tabla 12: Condiciones iniciales de la Prueba N°8.....	47
Tabla 13: Condiciones iniciales de la Prueba N°9.....	49
Tabla 14: Condiciones iniciales de la Prueba N°10.....	51
Tabla 15: Condiciones iniciales de la Prueba N°11	53
Tabla 16: Condiciones iniciales de la Prueba N°12.....	55
Tabla 17: Condiciones iniciales de la Prueba N°13.....	57

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Plano de ubicación.....	1
Figura 2 : Trituradora de mandíbula.....	6
Figura 3 : Trituradora giratoria	6
Figura 4 : Trituradora cónica	7
Figura 5 : Tanque agitación	9
Figura 6 : Mecanismo de cianuración	10
Figura 7 : Disolución del oro en función del porcentaje de oxígeno.....	11
Figura 8 : Efecto de la temperatura en función en la disolución del oro	12
Figura 9 : Sistema Au-CN-H ₂ O Diagrama Eh – pH.....	14
Figura 10: Diagrama de Flujo de una planta de cianuración de oro - CCD.....	15
Figura 11: Proceso Merrill – Crowe.....	17
Figura 12: Área de stock pile	18
Figura 13: Chancado de minerales	19
Figura 14: Área de molienda de la planta concentradora	19
Figura 15: Hidrociclones 6'Øx6'L.....	20
Figura 16: Área de tanques CIP de la planta concentradora de oro	21
Figura 17: Difracción de rayos X en mineral cabeza	28
Figura 18: Muestreo de minerales del producto de chancado	28
Figura 19: Área de chancado.de laboratorio metalúrgico	29
Figura 20: Prueba de sedimentación	29
Figura 21: Curva de Moliendabilidad.....	30
Figura 22: Consumo de reactivos vs la recuperación (Au), según el diseño experimental (DOE).....	31
Figura 23: Consumo de NaCN (Kg/Tn) vs consumo de cal, según las pruebas experimentales	32
Figura 24: Recuperación óptima	32

Figura 25: Pruebas de cianuración	33
Figura 26: Balance de la prueba de Cianuración N°1	34
Figura 27: Prueba N°1 Cinética de disolución de oro	35
Figura 28: Balance de la prueba de Cianuración N°2	36
Figura 29: Prueba N°2 Cinética de disolución de oro	37
Figura 30: Balance de la prueba de Cianuración N°3	38
Figura 31: Prueba N°3 Cinética de disolución de oro	39
Figura 32: Balance de la prueba de Cianuración N°4	40
Figura 33: Prueba N°4 Cinética de disolución de oro	41
Figura 34: Balance de la prueba de Cianuración N°5	42
Figura 35: Prueba N°5 Cinética de disolución de oro	43
Figura 36: Balance de la prueba de Cianuración N°6	44
Figura 37: Prueba N°6 Cinética de disolución de oro	45
Figura 38: Balance de la prueba de Cianuración N°7	46
Figura 39: Prueba N°7 Cinética de disolución de oro	47
Figura 40: Balance de la prueba de Cianuración N°8	48
Figura 41: Prueba N°8 Cinética de disolución de oro	49
Figura 42: Balance de la prueba de Cianuración N°9	50
Figura 43: Prueba N°9 Cinética de disolución de oro	51
Figura 44: Balance de la prueba de Cianuración N°10.....	52
Figura 45: Prueba N°10 Cinética de disolución de oro	53
Figura 46: Balance de la prueba de Cianuración N°11.....	54
Figura 47: Prueba N°11 Cinética de disolución de oro	55
Figura 48: Balance de la prueba de Cianuración N°12.....	56
Figura 49: Prueba N°12 Cinética de disolución de oro	57
Figura 50: Balance de la prueba de Cianuración N°13.....	58
Figura 51: Prueba N°13 Cinética de disolución de oro	59
Figura 52: Diagrama de Pareto para la % recuperación (Au)	60

Figura 53: Grafica de los efectos principales para la % Recuperación (Au)	61
Figura 54: Grafica de contorno de % Recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%); Fuerza CN a un Oxígeno disuelto de 6.5 mg/l	62
Figura 55: Grafica de superficie de % recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%) y Fuerza de Cianuro (ppm) a un oxígeno disuelto de 6.5 mg/l	63
Figura 56: Ventana de las dosificaciones optimizadas	64
Figura 57: Resultados de las pruebas experimentales a nivel laboratorio con el modelo Box-Behnken.....	65

Introducción

Este proyecto trata de evaluar la optimización de reactivos, para obtener una mayor eficiencia de % recuperación de oro en mineral cabeza, el cual está constituido principalmente por (58.37%) Silicatos, (13.87%) micas, (12.80%) Silicatos – Arcillas, (6.60%) Sulfuros y (5.51%) carbonatos principalmente. La optimización en la metalurgia en la extracción de minerales está basada principalmente en el diseño de experimentos, el cual no es más que la planificación racional del número de pruebas con la experiencia que se obtiene, es decir saber las variables significativas que más interviene en el resultado (variables dependientes Y_i) como en este caso que es obtener una mayor eficiencia de % recuperación del oro y así poder optimizar el consumo de reactivos (variables controlables X_i).

Existen vario tipos de modelos de diseño de experimentos (DOE) como es el diseño hexagonal, central compuesto, Box-Behnken y otros. En este caso se optó por el diseño Box-Behnken, este método no toma puntos máximos ni mínimos, tampoco puntos estrellas, pero si se centra principalmente en trabajar con 3 variables, obteniendo un menor número cantidad de pruebas que un diseño central compuesto (DCC) siendo igual de eficiente.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades.

La Planta concentradora de oro se encuentra ubicada en la confluencia de los ríos Parcoy y Llacuabamba en el Anexo de Retamas, Distrito de Parcoy, Provincia de Pataz en el Departamento de La Libertad, (ver figura N° 1: “Plano de Ubicación”) a una altura promedio de 2,750 m.s.n.m y sus coordenadas geográficas son las siguientes: 72° 28’ 00” Longitud Oeste, 08° 01’ 00” Latitud Sur.

Figura 1

Plano de ubicación



Fuente: Google Earth

1.1.1 Acceso.

Por vía terrestre. el acceso por vía terrestre es de la siguiente manera:

Lima - Trujillo	560 km	9 horas
Trujillo Parcoy	440 km horas	9 horas
Parcoy Retamas	40 km	3 horas

Por vía aérea: por vía aérea es la de siguiente manera:

Lima - Trujillo	560 km
Trujillo Parcoy	440 km horas

1.2 Descripción de la problemática.

El siguiente trabajo investigación está centrada en evaluar el comportamiento metalúrgico del mineral de la Planta Concentradora de oro que presenta oro mayormente

en mineral de pirita y alrededor del 15% en arcillas, con los procesos convencionales de chancado, molienda, cianuración, Merrill Crowe, no se logra obtener un % de recuperación no mayor al 89 % debido que las arcillas actúan como Pre-Robbing haciendo que la cinética de disolución disminuya significativamente y el oro este con una mayor % en la pirita). Por tal motivo se realizó distintas pruebas de disolución de Au a diferentes concentraciones de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto para optimizar reactivos y obtener el mayor porcentaje de recuperación de oro.

Trabajar a distintos parámetros en la prueba cinética nos brinda una mayor cantidad de resultados reales y fiables, el cual optaríamos en elegir la prueba que mejor resultado nos muestras, tener en cuenta que la cabeza analizada es de 25.60 gr/Tn, el cual se realizó en una planta concentradora de oro de 200 TMS

1.3 Objetivo de estudio.

1.3.1 Objetivo general.

Evaluar la cinética de disolución del oro a diferentes concentraciones de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Relacionar la caracterización del mineral con los problemas que se presentan en las pruebas a nivel laboratorio metalúrgico.
- Lograr una mayor recuperación de oro posible y la optimización de reactivos en función a las variables.
- Analizar los resultados de la influencia de las variables (%NaCN, granulometría y oxígeno disuelto, mediante pruebas de laboratorio metalúrgico.

1.4 Antecedente investigativo

1.4.1 Antecedente referencial

En la actualidad la eficiencia de recuperación del mineral de la Planta concentradora de oro presenta problemas debido a la caracterización del mineral, lo cual implica que se tiene que optimizar los reactivos para obtener una mayor eficiencia de recuperación de oro posible, por ello el estudio de las pruebas en mineral de cabeza es de gran importancia

para determinar con que parámetro es el más significativo respecto a la cinética de disolución de oro.

1.5 Hipótesis.

1.5.1 Hipótesis general.

Sí optimizamos los parámetros que influyen en la recuperación del oro, mejoraremos la eficiencia de recuperación del oro.

1.5.2 Hipótesis específicas.

- Verificar la mayor recuperación de oro
- Optimizar en el consumo de reactivos tratados en la Planta concentradora de oro.
- Interpretar cual es la variable más significativa según el % recuperación de oro.

1.6 Justificación de la investigación

Este trabajo de investigación se realizó para solucionar problemas operativos mediante ellos mejorar la recuperación de oro de la planta concentradora. Esto puede deberse a muchos factores, como es la característica propia del mineral, por ello que se llevó a cabo distintas pruebas en donde los factores que varían son los insumos para la cinética de disolución de oro así también el oxígeno disuelto.

1.6.1 Tipo de Investigación

Este estudio es una investigación innovadora ya que se lleva de realizar en laboratorio para llevarlo a dimensiones mayores, como es el caso de una planta concentradora.

1.6.2 Marco metodológico del diseño experimental

1.6.2.1 Operación de las Variables. Para la etapa de descarte de datos se hará uso de la técnica del diseño Box-Behnken que trabaja con 3 variables.

En este análisis nos apoyaremos en la aplicación del software estadístico Minitab 8 con el objetivo de evaluación, interpretación y optimización de los factores que se estudiarán.

Con la finalidad de la realización de este estudio se analizarán los siguientes

- **Factores controlables (Xi)**

NaCN (kg/tn)

Oxígeno disuelto (mg/l)

Granulometría (%m-200).

- **Factor estudiado**

% Recuperación

- **Variables no controlables (Ui)**

Temperatura

Consumo de cal

Consumo de cianuro NaCN (kg/tn)

Evaporación del agua (Prueba de cianuración en vasos)

ORP

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Chancado

El chancado es una operación unitaria o grupo de operaciones unitarias en el procesamiento de minerales, cuya función es la reducción de grandes trozos de rocas a fragmentos pequeños.

La chancadora es la primera etapa de la reducción de tamaños, generalmente trabaja en seco y se realiza en dos o tres etapas que son: chancadora primaria, secundaria y ocasionalmente terciaria, con el fin de lograr:

- Liberación del mineral valioso de la ganga antes de las operaciones de concentración.
- Incrementar la superficie específica de las partículas, por ejemplo, para acelerar la velocidad de reacción en los procesos de lixiviación, flotación, etc.
- Producir partículas de mineral o cualquier otro material de tamaño y forma definidos.

Industrialmente se utilizan diferentes tipos de máquinas de trituración, que suelen clasificarse para la etapa en que se utilizan y el tamaño de material tratado.

2.1.2 Chancadora primario

Chancan y rompen las rocas hasta un tamaño de producto de aproximadamente 6" a 8" según se observa en la Fig.2

Figura 2

Trituradora de mandíbula



Fuente: 911 Metallurgist

Figura 3

Trituradora giratoria.



Fuente: 911 Metallurgist

2.1.3 Chancadora secundaria

Fragmentan el producto de la trituración primaria hasta tamaños de 3" a 2", entre estas máquinas tenemos:

- Trituradoras giratorias.
- Trituradoras cónicas

Figura 4

Trituradora cónica.



Fuente: 911 Metallurgist

2.1.4 Molienda

Es la siguiente etapa mecánica del proceso de conminución después del chancado, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría 70- 180 micrones entre la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de metálicos en forma de partículas individuales recuperables por flotación o por otro proceso de concentración.

Este proceso se realiza utilizando grandes equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica que existen y se disponen en tres esquemas diferentes de molienda: molienda convencional, molienda unitaria. En esta etapa, al material mineralizado se le agregan agua

en cantidades suficientes para formar un fluido y los reactivos necesarios para poder lixiviar o flotar.

2.1.5 Cianuración

La lixiviación con cianuro es el método preferido para la recuperación de la mayor parte de la producción mundial de oro. Sin embargo, existen muchos otros procesos de lixiviación química que han sido utilizados histórica o esporádicamente. En la mayoría de los casos, la cianuración proporciona un método tecnológicamente más eficiente, eficaz y rentable. Lixiviantes alternativos incluyen:

La razón fue estrictamente económica, cuando las plantas de amalgamación podrían aproximadamente recuperar solo el 60% del oro presente, el cianuro puede recuperar alrededor del 90%.

Debido a las mejores recuperaciones, muchos de los relaves de residuos mineros antiguos de otros procesos han sido económicamente reprocesados por cianuración. El cianuro es lo más cercano a un "solvente universal" que se ha desarrollado para el oro. Otros reactivos de lixiviación sólo funcionan en tipos muy específicos de mineral. El proceso estándar de lixiviación con cianuro consiste en moler el mineral a $\approx 80\%$ - 200 malla, mezclando la suspensión de mineral / agua con aproximadamente 2 libras por tonelada cianuro de sodio y suficiente cal viva para mantener el pH de la solución a ≈ 11.0 . A una concentración de suspensión de sólidos de 50%, la suspensión pasa a través de una serie de tanques agitados con un tiempo de residencia de 24 horas. El líquido que contiene oro se separa de los sólidos lixiviados en tanques espesadores o filtros de vacío, y los residuos se lavan para remover el cianuro de oro, antes de su disposición. La separación y lavado tienen lugar en una serie de unidades por un proceso conocido como decantación en contracorriente (CCD). El oro se recupera de la solución concentrada por precipitación con zinc y la solución se recicla para su reutilización en la lixiviación y la molienda.

2.1.6 Lixiviación por agitación

Lixiviación de mineral molido en tanques agitados, donde el mineral está en suspensión. Usado en minerales de relativa alta ley para compensar los costos de molienda

y agitación. También para lixiviar subproductos (precipitados) de alta ley. Hay cuatro tipos de lixiviación por agitación:

Tanques.

La agitación es proporcionada por la inyección de aire a presión en el fondo de los tanques. Los tanques tienen fondo cónico para canalizar la solución de sólidos hacia la entrada de aire. A menudo funcionan en serie para alcanzar el requisito de tiempo de residencia. No muy populares porque los sólidos sedimentan si se va la energía.

Agitadores de Baja Velocidad.

Apropiado cuando la tasa de reacción no mejora por el mezclado intenso. Paletas o rastrillos de gran diámetro mantienen la suspensión fuera de la parte inferior del tanque.

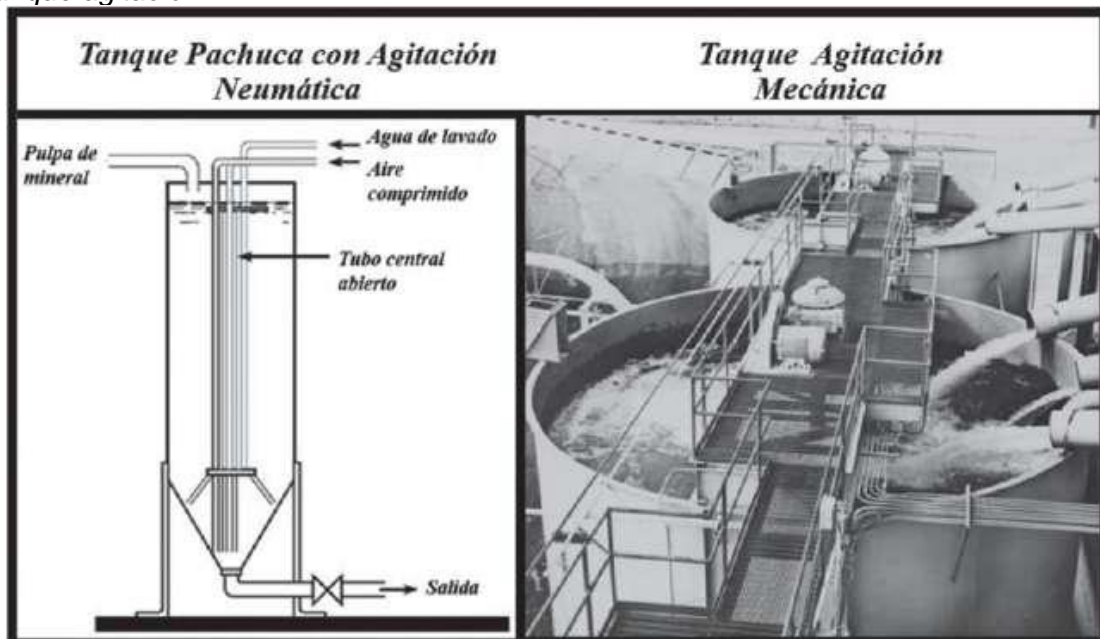
Agitadores de Alta Velocidad

Se utiliza cuando la tasa de lixiviación está limitada por difusión de los reactivos a la superficie del mineral (típico). Diseñado para bombear la pulpa alrededor rápidamente

Los tanques tienen generalmente paletas en la pared para aumentar la turbulencia y mejorar la mezcla.

Figura 5

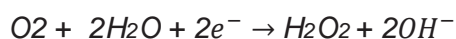
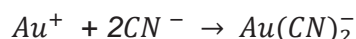
Tanque agitación.



Fuente: Uceda Herrera, D. Marzo (2016). Hidrometalurgia Química e Ingeniería. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

2.1.7 Mecanismo de Cianuración

La reacción de disolución es un proceso de corrosión (electroquímico) en el cual el oxígeno capta electrones de una parte de la superficie metálica (zona catódica) mientras que el metal entrega en la otra (zona anódica); se llevan a cabo dos reacciones simultáneas:



El oxígeno atmosférico, es esencial para la disolución de oro en soluciones de cianuro, atribuyéndosele la siguiente reacción. Elsner (1846)



Representación esquemática de la disolución de oro en una solución de cianuro (F. Habashi, 1966):

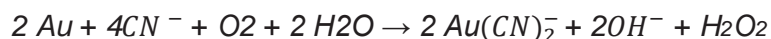
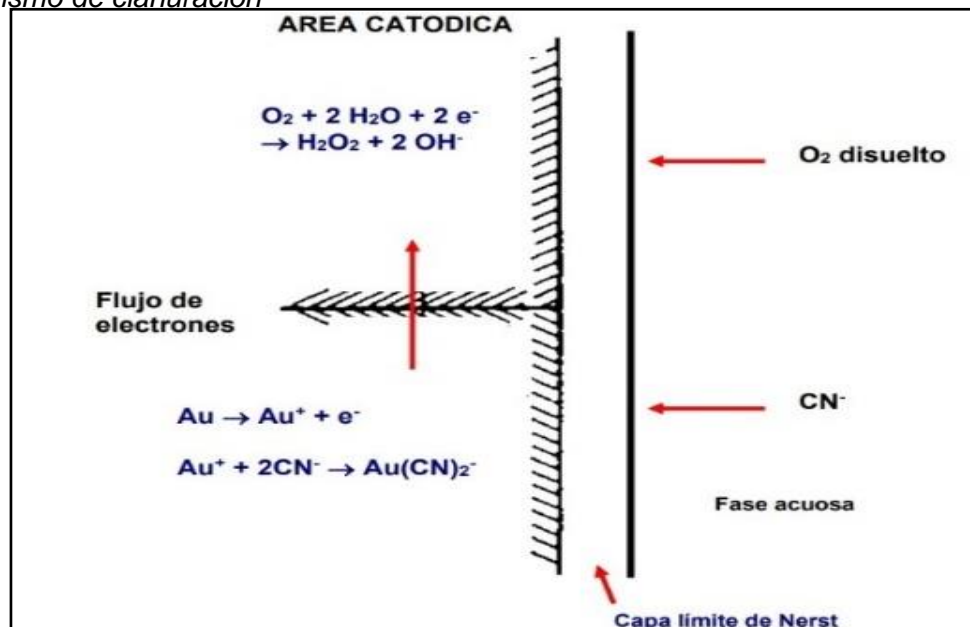


Figura 6

Mecanismo de cianuración



Fuente: Uceda Herrera, D. Marzo (2016). Hidrometalurgia Química e Ingeniería. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

2.1.7.1 Efecto de la concentración de cianuro en el porcentaje de disolución. La tasa de disolución del oro en soluciones de cianuro alcanza un máximo al

pasar de soluciones concentradas a soluciones diluidas. En la práctica la mayoría de las plantas de cianuración de minerales de oro emplean soluciones que contienen menos de 0.05% de NaCN, el promedio general es de 0.02 a 0.035%.

2.1.7.2 Efecto de la alcalinidad. Es esencial que la solución de cianuro deba ser mantenida alcalina por las siguientes razones.

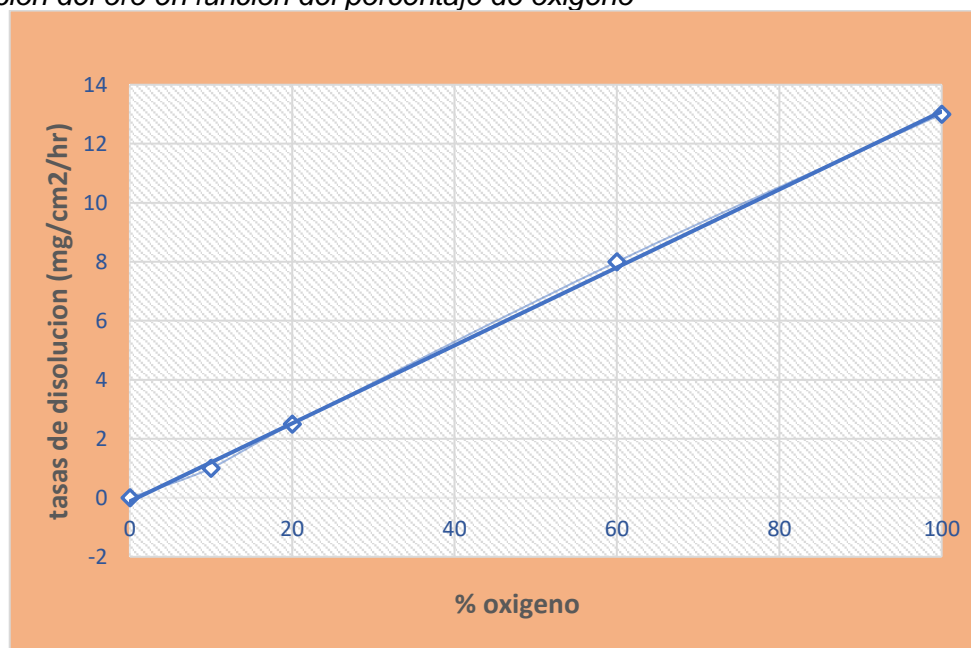
Para prevenir la hidrólisis del ion cianuro



2.1.7.3 Efecto del oxígeno en la disolución del oro. El uso de oxígeno o de un agente oxidante es esencial para su disolución bajo las normas comunes del proceso de cianuración.

Figura 7

Disolución del oro en función del porcentaje de oxígeno

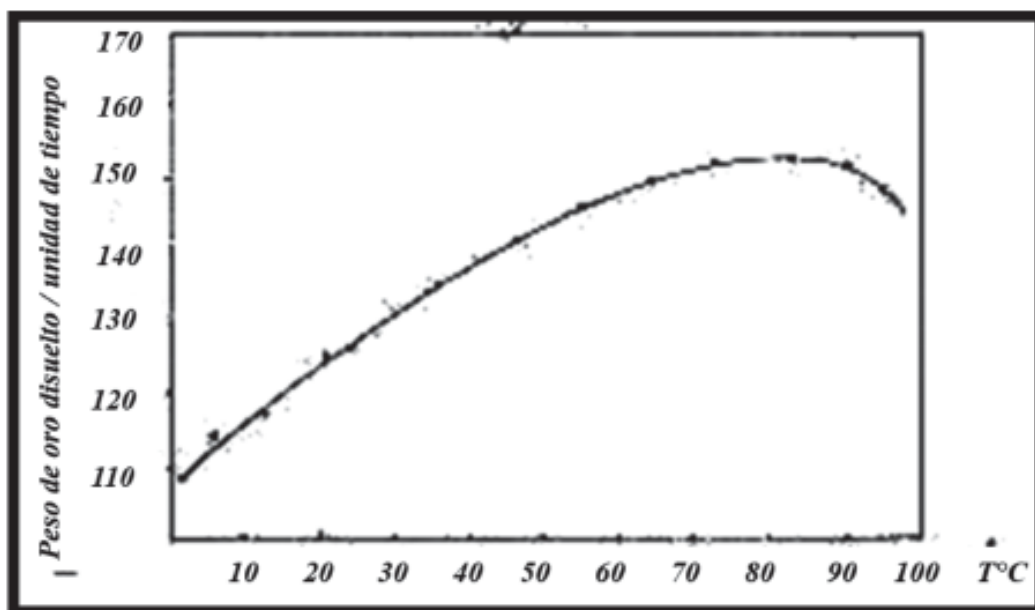


Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.4 Efecto de la temperatura. Aumentando la temperatura se espera que aumente la velocidad de disolución, pero existe una reducción del contenido de oxígeno disuelto. Sobre los 110°C la descomposición del cianuro es apreciable.

Figura 8

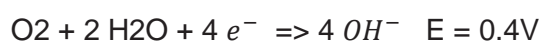
Efecto de la temperatura en función en la disolución del oro.



Fuente: Uceda Herrera, D. Marzo (2016). Hidrometalurgia Química e Ingeniería. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

Potencial de las Reacciones Parciales de Disolución de Au

Cátodo:



$$E = 0.4 + \frac{0.06}{4} \log \frac{P_{O_2}}{[OH^-]^4}$$

Ánodo:



$$E = 0.6 + 0.06 \log \frac{[Au(CN)_2^-]}{[CN^-]^2}$$

Es necesario que: $E_{red} > E_{ox}$

Pero en condiciones industriales de cianuración:

- Presión parcial de oxígeno constante (0.21 atm),
- Concentración baja de cianuro, y
- pH elevado.

Las dos últimas para evitar hidrólisis de CN y volatilización.

2.1.7.5 Termodinámica de la cianuración. De acuerdo con el diagrama de Pourbaix se aprecia que las formas oxidadas del oro existen solo a potenciales mayores

que la línea superior del campo de estabilidad del agua. De allí hacia arriba el agua no es estable ya que se oxida a oxígeno, y pasa a reducir cada una de las formas oxidadas de oro a oro metálico. Se concluye que el oro no es oxidado por el oxígeno disuelto en agua, aunque esté en presencia ya sea de ácidos o álcalis fuertes, ya que su poder oxidante no es suficiente para ello.

Tal como lo demuestra el diagrama de equilibrio Eh – pH del sistema Au-CN-H₂O, Figura 14-11, el oro es un metal muy noble, es decir, difícilmente oxidable porque su dominio de estabilidad recubre todo el dominio de estabilidad del agua. El ion oro-cianuro es extremadamente estable, mostrando así la fuerte afinidad de acomplejamiento del oro por el ion cianuro.

Del diagrama Eh-pH para el oro y el oro-cianuro se concluye:

- Todo proceso de cianuración requiere de condiciones de operación oxidantes.
- Todo proceso de cianuración en la práctica se realiza a un pH de 10 - 11.5.

2.1.7.6 Cinética

Efecto del área superficial

- La velocidad de disolución es proporcional a la distribución del tamaño de partícula.
- La velocidad de disolución es proporcional a la liberación.
- A malla 150 una partícula de oro (149 μm) necesita en teoría 44 h.
- Sobre cierta liberación, la velocidad de disolución disminuye por las reacciones parásitas.

Efecto de la concentración de cianuro:

- La velocidad de disolución es proporcional a [CN].
- La velocidad de disolución es controlada por el transporte de masa, $E_a = j/\text{mol}$.
- Las reacciones relacionadas al consume de cianuro:

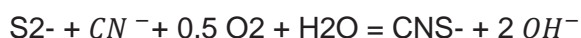
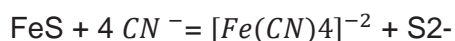
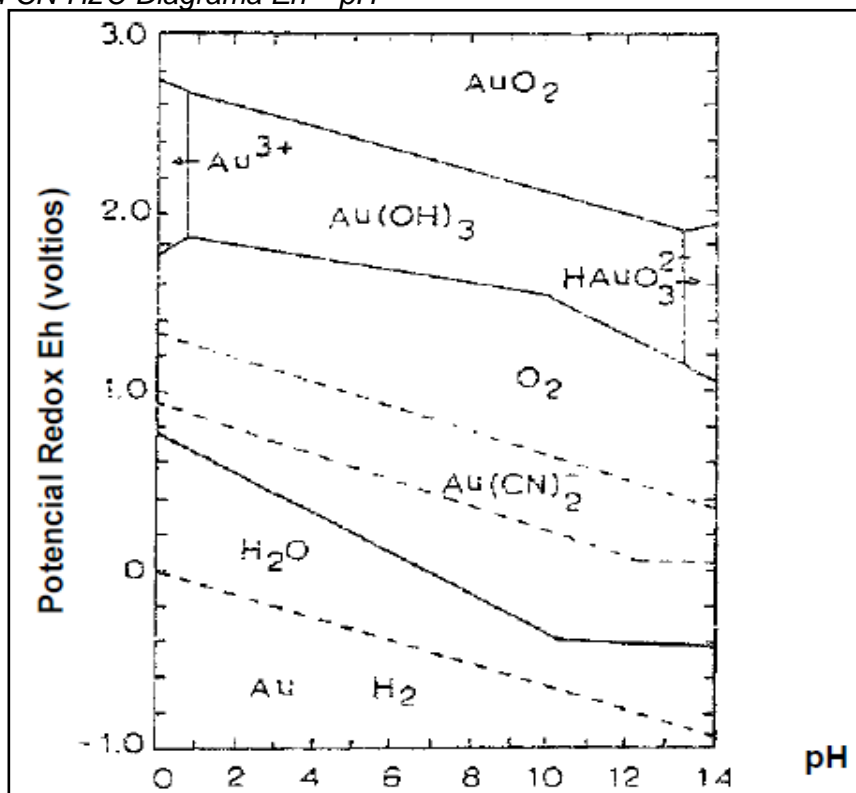


Figura 9

Sistema Au-CN-H₂O Diagrama Eh – pH



Fuente: Uceda Herrera, D. Marzo (2016). Hidrometalurgia Química e Ingeniería. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

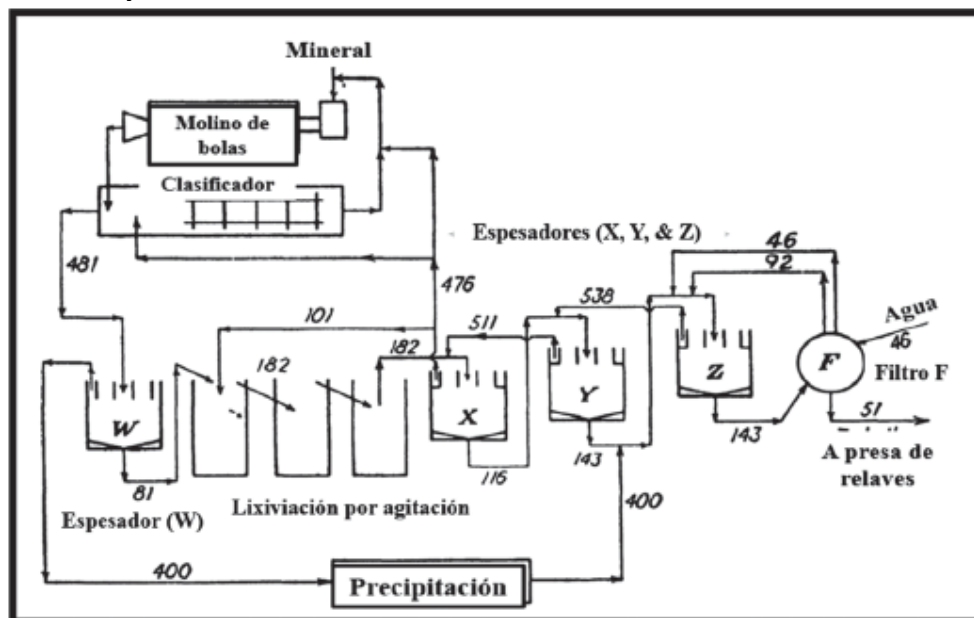
2.1.8 Decantación continua en contracorriente (CCD)

La decantación continua en contracorriente (CCD, por sus siglas en inglés) es aplicada ampliamente en cianuración. Esta tecnología, fue factible por la invención del espesador Dorr. El siguiente diagrama de flujo nos da a conocer el funcionamiento de una planta de cianuración de oro el mineral y la solución de cianuro se alimentan juntos a través del circuito de molienda y son procesados luego a través de una serie de espesadores y tanques con agitación. La disolución del oro (o plata) se realiza en diversas partes del circuito, pero principalmente durante la molienda y la agitación en los tanques. Una gran parte de la solución se retira del primer espesador (W) para precipitación, después de la precipitación la solución estéril es devuelta al circuito en uno de los espesadores posteriores. Se puede variar el diagrama de flujo se puede variar por el punto de retorno, la concentración de la solución, la cantidad de solución que va a la precipitación, la relación de solución a los sólidos en las descargas de los espesadores, etc.

Todos ellos se ajustan para un mineral en particular con el fin de obtener la máxima extracción con menor pérdida de metal y cianuro

Figura 10

Diagrama de Flujo de Una Planta de Cianuración de Oro - CCD



Fuente: Uceda Herrera, D. Marzo (2016). Hidrometalurgia Química e Ingeniería. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

2.1.9 Procesamiento de minerales refractarios de oro

Minerales de oro "refractario", se refiere a aquellos minerales que no permiten la recuperación de oro por concentración por gravedad estándar o lixiviación directa con cianuro. Una categoría importante de minerales refractarios son aquellos con valores de oro contenidos dentro de la estructura cristalina de los minerales de sulfuro tales como pirita y arsenopirita. Para lixiviar oro con cianuro la solución debe entrar en contacto directo con las partículas de oro.

Con muchos minerales de sulfuros, el mineral prácticamente no puede ser molido lo suficientemente fino para exponer las partículas de oro, por lo que se requiere un pretratamiento cuyo objetivo es eliminar el sulfuro de modo que al menos una pequeña parte de todas las partículas de oro están directamente expuestas a los elementos recuperadores de oro

La naturaleza refractaria de los minerales de oro puede ser muy variada y es consecuencia de diversas causas entre las que pueden citarse las siguientes:

- **Encapsulamiento físico:**

Oclusión de partículas submicroscópicas de oro en la matriz de sulfuros, lo que impide el contacto entre el cianuro y el oro. Este tipo de encapsulamiento es común en menas portadoras de sulfuros tales como pirita y arsenopirita.

- **Consumo excesivo de cianuro:**

La presencia de sulfuros y compuestos cianicidas afecta el potencial redox (reducción/oxidación) de las soluciones y propicia la pasivación del oro durante la cianuración, consumiendo excesivo cianuro y oxígeno.

- **Limitación de oxígeno:**

Ciertos iones entre los que se encuentran el ion ferroso, el ion sulfuro, ion sulfato, etc., tienden a consumir el oxígeno cuando están disueltos, lo que limita la cantidad de este elemento, fundamental para el proceso de cianuración.

- **Presencia de materiales carbonáceos en el mineral:**

Residuos de hidrocarburos pesados, carbón lignítico, carbón grafitico o amorfo, etc., tienen la capacidad de absorber los complejos solubles de oro perjudicando así la recuperación del metal.

- **Revestimiento de la superficie de las partículas de oro:**

Debido a la formación de capas de diversos compuestos, principalmente óxidos de hierro, antimonio o plomo, lo que impide la disolución del metal.

Métodos de pretratamiento: Los métodos de procesamiento de minerales refractarios casi siempre solo sirven para el propósito de tratar minerales que no se van a liberar de sus valores por lixiviación convencional con cianuro.

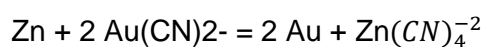
Los métodos de pretratamiento de minerales refractarios incluyen:

- Biolixiviación.
- Autoclave (oxidación a presión).
- Tostación.
- Clorinación
- Pre-oxidación, y

- Cal / Pre-tratamiento cáustico.

2.1.10 MERRILL – CROWE

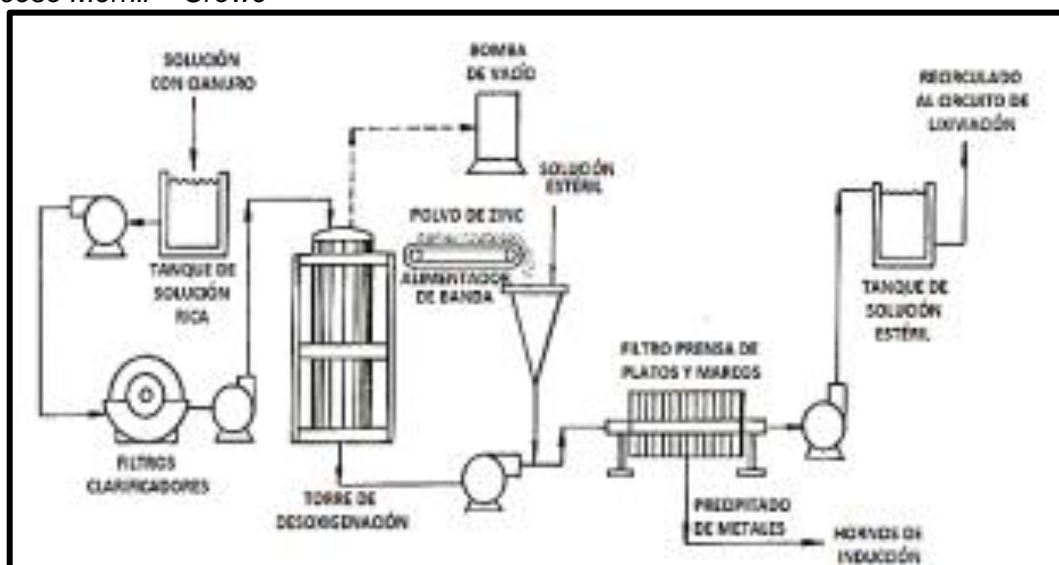
El método tradicional para la recuperación de Au de soluciones de cianuro era con precipitación de zinc. Originalmente, las soluciones se pasaban a través de cajas que contenían virutas de Zn metálico. El Au y la Ag se precipitaban de la solución por un procedimiento de reacción simple de remplazo (cementación). Alrededor de los años 1906, la precipitación con virutas de Zn se sustituyó por el método Merrill Crowe de precipitación con Zn en polvo.



El proceso Merrill-Crowe comienza con la filtración de la solución concentrada (PLS) en los filtros. Los tipos de filtros utilizados son filtros leaf, filtros prensa y filtros de vacío de hojas.⁷

Figura 11

Proceso Merrill – Crowe



Fuente: Parga, Wan, and Miller 1986). Revista de ciencias ambientales y naturales

Generalmente, una pre-capa de tierras diatomeas se utiliza para producir una solución transparente clara. La solución clarificada se pasa entonces a través de una torre de des-aireación al vacío donde se elimina el oxígeno de la solución. El Zn en polvo se añade entonces a la solución con un alimentador de polvo químico seco y un cono de

emulsificación de Zn. La reacción del polvo fino de Zn con la solución es casi instantánea. El precipitado de Au luego se recupera en los marcos de los filtros prensa.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Descripción del proceso

La Planta concentradora de oro cuenta con una planta de 200 TMS, del cual inicia con el proceso de chancado, la tolva de gruesos alimenta al Grizzly mediante un Apron Feeder, el Grizzly clasifica los que son mayores a 1" sería el alimento de la chancadora de quijadas y los que son menos a 1" son clasificadas mediante zarandas vibratoria 4x8, el mineral que tiene un tamaño entre -1" y +3/8" son de nuevo clasificadas en una chancadora cónica Symons y los que son -3/8" se depositaran en la tolva de finos de capacidad de 50 Tn.

Figura 12

Área de stock pile



Fuente: Elaboración propia

El producto de la chancadora de quijadas con un P80 de 1" es clasificado mediante zarandas vibratoria del cual los que tienen tamaño -3/8" son transportadas a las tolvas de finos y los que tienen tamaño entre -1" y +3/8" será el alimento de la chancadora cónica

Symons del cual su producto tiene un P80 de 3/8", este producto se clasifica mediante una zaranda vibratoria 4x8 en +3/8" y -3/8" cerrando el proceso de chancado.

Figura 13

Chancado de minerales



Fuente: Elaboración propia.

La tolva de finos alimenta a los Molino 6'x6'L N°1 y Molino 6'x6'N°2 del cual este último su descarga es el alimento de los hidrociclones (1) y Underflow retorna al Molino 6'Øx6'L N°2, formando un circuito cerrado.

Figura 14

Área de molienda de la planta Concentradora



Fuente: Elaboración propia

El Overflow del hidrociclón (1) pasa a un cajón y se junta con la descarga del Molino 6'Øx6'L N°1, dicho cajón alimenta al hidrociclón (2), el underflow de este último retorna al Molino 6'Øx6'L N°1, formando un circuito cerrado, el Overflow del hidrociclón (2) pasa a un cajón y se junta con la descarga del Molino 5'Øx6'L en un cajón, dicho cajón alimenta al hidrociclón (3), del cual el underflow retorna al Molino 5'Øx6'L formando un circuito cerrado y el overflow de dicho hidrociclón (3) pasa a un cajón y se junta con la descarga del Molino 4'Øx6'L. Este producto será el nuevo alimento del hidrociclón (4), del cual el underflow retornaría al Molino 4'Øx6'L formando un circuito cerrado y el overflow pasa por un DSM del cual consiste en eliminar las impurezas (basura) para tener una pulpa más limpia.

Figura 15

Hidrociclones 6'Øx6'L



Fuente: Elaboración propia

La pulpa pasa por un hidrociclón (5), el overflow de este último pasa a los espesadores (1) y (2), el rebose pasa a un tanque de solución rica y finalmente al proceso de Merrill Crowe. El underflow del hidrociclón (5) pasa a un Tanque 19'x19' del cual es lixiviado y dicho producto es bombeado a los espesadores (3), (4), (5) y (6) haciendo un lavado contracorriente (CCD).

Figura 16

Área de tanques CIP de la planta Concentradora de oro



Fuente: Elaboración propia

El rebose pasa de nuevo a los Espesadores (1) y (2) cerrando el circuito y la descarga del Espesador (5) y (6) van a los CIP (1) y CIP (2) del cual se recuperan 8kg por tonelada de carbón y la pulpa es bombeado a los filtros terminando el circuito.

2.2.2 Diseño experimental

2.2.2.1 Teoría del diseño experimental. El diseño experimental es la aplicación del método científico con el fin de tener el conocimiento de un proceso a parto de la aplicación de experimentos debidamente diseñados. Este diseño experimental se incorpora con un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería con el objetivo de entender las situaciones complejas o difíciles.

La finalidad del diseño experimental es el estudio de los efectos de las variables controlables sobre las variables de respuesta.

Existen dos formas de factores controlables, el primero es cualitativo (equipos, tipos de material, trabajadores, formas de contorno, depreciación de equipos, etc.), y el segundo que es cuantitativo (pH, temperaturas, consumo de reactivos, tiempo de secado, variación de presiones, porcentaje de sólidos, etc.) con el fin de estudiar en que forma influyen cada variable controlable sobre las variables de respuesta.

2.2.2.2 Experimento . Un experimento se define como un cambio o variación en las condiciones operativas de un sistema o proceso para medir el efecto del cambio en una o más características clave de un producto o resultado. Por tanto, los experimentos nos permiten mejorar nuestra comprensión de un sistema o proceso. Un ejemplo es que un proceso químico puede probarse a temperaturas y presiones múltiples o diferentes y medirse los cambios observados en el rendimiento o la eficiencia del proceso. El análisis de los efectos o datos conducirá a una mejor comprensión del proceso químico, lo que conducirá a una mejor ejecución del proceso (Ayala Mina Jorge, 1995).

2.2.2.3 Unidad experimental. La definición de unidades experimentales es que son piezas o muestras utilizadas para obtener los valores que mejor representen los resultados de un experimento o prueba. En cualquier aplicación del diseño experimental, es importante entender cuidadosamente la definición de unidad experimental, ya que es una pieza o muestra de una sustancia, o un conjunto de piezas producidas que dependerán del proceso que se lleve a cabo él estudió. Un ejemplo sería si se quisiera explorar algunas alternativas para reducir el porcentaje de piezas defectuosas, al producir una gran cantidad de piezas en poco tiempo, sería obvio que el dispositivo experimental no sería confiable. Al estar formado por una sola pieza, los defectos se observan en una sola condición experimental. Una unidad experimental es un cierto número de piezas producidas en las mismas condiciones experimentales. El objetivo del dispositivo es analizar cuántos están dañados o necesitan ser reemplazados y cuántos están en buena condición.

2.2.2.4 Etapas en el diseño de experimentos. Una de las características fundamentales de la planificación experimental es recomendar qué pruebas experimentales se deben realizar y cuántas pruebas experimentales se deben repetir para obtener la mayor información posible al menor costo. Un diseño creado a través de varios procesos teniendo en cuenta la repetición posterior se denomina matriz de diseño o simplemente diseño.

Cabe señalar que, para llevar a cabo un estudio experimental exitoso, es necesario realizar varios experimentos en determinadas etapas. En resumen, se puede decir que la

etapa más importante y que requiere más tiempo es la planificación. Las diferentes fases del desarrollo experimental se detallarán continuamente de forma resumida para crear una perspectiva global resultante de su completo desarrollo y aplicación (Gutiérrez Pulido Humberto, 2008).

2.2.2.5 Planteamiento y realización.

Comprender y definir cuál es la pregunta de investigación.

Durante la etapa de planificación o diseño, se debe realizar un estudio de viabilidad para comprender y definir el problema de investigación, por qué es importante comprenderlo y, si es un problema, determinaremos la gravedad o severidad del problema.

Seleccionar las variables de respuesta a analizar en cada punto del diseño experimental para verificar que su determinación sea precisa y confiable.

La elección de estas variables es crucial porque representan los resultados de las pruebas realizadas, por lo que es necesario elegir aquellas variables que mejor representen el problema o sean muy específicas del objeto de estudio. También debemos asegurarnos de que las mediciones de las variables resultantes sean altamente confiables. Es decir, debemos garantizar que el método de medición utilizado dé buenos resultados de medición y debe tener ciertos porcentajes de exactitud y precisión en las pruebas realizada

Decida qué factores o variables probar en función de su importancia para la variable de respuesta.

Esto no significa que el experimentador necesite saber de antemano qué factores afectan las variables de respuesta, ya que ese es el motivo del experimento, pero debe considerar utilizar toda la información necesaria para incluir las variables más importantes consideradas.

Elija los niveles de cada factor y el diseño experimental que mejor se adapte a esos factores y al propósito del experimento.

En este punto, es importante saber cuántas réplicas de cada experimento se ejecutarán, teniendo en cuenta el costo, el tiempo de finalización y la precisión del experimento.

Planificar y organizar el trabajo piloto.

En este paso, una vez que tenga una base previamente desarrollada para elegir un diseño, planifique y organice todos los detalles del experimento, como la cantidad de personas involucradas, cómo se llevará a cabo el trabajo experimental, etc.

Realizar trabajos piloto.

En este paso, siga el plan descrito en el paso anterior y, si descubre un nuevo incidente, revise a quién desea informar y qué hacer en función del nuevo incidente (Ayala Mina Jorge, 1995).

Análisis.

Lo más importante que hay que recordar en esta etapa es que los resultados de un experimento son una interpretación de una muestra, no de una población. Por lo tanto, necesitamos utilizar métodos estadísticos inferenciales para probar si estas diferencias son lo suficientemente grandes como para confirmar una diferencia general. El principal método estadístico en el que se basa el análisis experimental es el llamado análisis de varianza, o más comúnmente conocido como análisis de varianza (ANOVA), que es su abreviatura en inglés (Ayala Mina Jorge, 1995).

Interpretación.

En esta etapa, basándose en un análisis estadístico formal, se debe investigar con más detalle lo que sucedió en el experimento, desde probar las conjeturas iniciales con resultados experimentales hasta probar y observar nuevos estudios. Los resultados obtenidos durante el proceso verifican los nuevos conocimientos adquiridos en el proceso, confirman las hipótesis y seleccionan el mejor método o tratamiento, siempre apoyado en pruebas estadísticas (Ayala Mina Jorge, 1995).

Control y conclusiones.

Al resumir nuestro estudio experimental, es aconsejable sugerir qué medidas se tomarán para garantizar los resultados del estudio y preservar los mejores datos obtenidos (Gutiérrez Pulido Humberto, 2008).

2.2.2.6 Clasificación y selección de los diseños experimentales.

Actualmente existen variedad de diseños experimentales para profundizar en la solución óptima de variedades de problemas o situaciones que suceden en la vida práctica. Se puede decir que de esta gran cantidad de diseños experimentales nos lleva a poder seleccionar de manera crítica cual es el más idóneo y correcto para una determinada situación e involucra saber la clasificación de acuerdo con el propósito que queremos, y el alcance que debemos de llegar.

Existen cinco diferentes puntos que influyen para la selección de un determinado diseño experimental, los cuales son:

- Conocer la finalidad, objetivo o propósito del experimento.
- Plantear el número total de factores que se estudiarán.
- Conocer el número de niveles que se experimentarán para cada factor.
- Las consecuencias que nos importa estudiar o investigar.
- Saber el costo de cada experimento, el tiempo para su realización y la precisión que deseamos lograr.

Estos cinco puntos están relacionados de alguna manera entre sí, pero es primordial nombrarlos por separado, ya que si se llegara a cambiar cualquiera de ellos cambiara el diseño experimental que se utilizara. De acuerdo con su finalidad, los diseños experimentales se pueden clasificar en:

- Los diseños experimentales para contrastar dos o más tratamientos.
- Los diseños experimentales para estudiar los efectos de varios factores sobre las variables de respuesta.
- Los diseños experimentales con la finalidad de encontrar el punto óptimo para la operación del proceso.
- Los diseños experimentales para optimizar una mezcla.
- Los diseños experimentales para que los factores no controlables sean indiferentes para el proceso.

Para tal efecto recurrimos al apoyo de diseño de experimentos (DOE) para evaluar y optimizar los parámetros significativos que influyen en la cinética de disolución del oro, se optó tomar el diseño Box-Behnken debido que estas pruebas trabajan con 3 variables y no toma puntos máximos y mínimos como lo hace un diseño central compuesto (DCC), debido que este diseño (DCC) toma puntos estrellas, tomando máximos y mínimos fuera del rango evaluado.

Tabla 1

Factores de control que influyen en la recuperación de (Au)

FACTORES DE CONTROL	FACTORES ESTUDIADOS
A: NaCN (ppm)	% Recuperacion Au
B: Granulometria (-M200%)	
C: Oxigeno disuelto (m g/l)	
FACTORES NO CONTROLABLES	
D: Temperatura (°C)	
E: Consumo cal (Kg/tn)	
F:: Consumo NaCN (Kg/Tn)	
G: Evaporacion del agua (Pruebas de cianuración en vasos)	
H: ORP	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Diseño matricial del diseño Box-Behnken

NUMERO DE PRUEBAS	X1	X2	X3
1	-1	-1	0
2	1	.1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	.1	-1
10	0	1	.1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Equipos utilizados en laboratorio metalúrgico

- Secador de muestra
- Rodillos
- Pulverizador hechizo de olla con dos anillos
- Picetas
- Matraz
- Lona para homogenizar muestras
- Jeringa y vasos
- Filtros
- Extractor de gases
- Espátulas
- Divisor en cruz
- Cucharones
- Chancadora de quijadas
- Bureta
- Brochas
- Balanza
- Agitadores

3.2 Caracterización mineral cabeza

Para poder interpretar con más exactitud la baja recuperación en mineral de la planta concentradora de oro, se realizó la difracción de rayos X en el producto de chancado de la Planta Concentradora de oro, el cual está constituido principalmente con 58.37% silicatos, 13.87% mica, 12.80% silicatos – arcillas, 6.60% sulfuros, 5.51% carbonatos principalmente, como se puede apreciar en la siguiente Figura:

Figura 17

Difracción de rayos X en mineral cabeza.

Clase/Grupo	Mineral	Formula General	Cant. %
Silicatos	Cuarzo	SiO ₂	55.40%
Mica	Muscovita 2M1	K(AlFe)(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	14.16%
Silicatos-arcilla	Clorita-Clinocloro	(MgFe ₂) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	10.74%
	Clorita-Chamosita	(MgFe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	0.00%
	Mica-Illite	Al ₂ H ₂ KO ₁₂ Si ₄	4.34%
Sulfuros	Pirita	FeS ₂	2.93%
	Arsenopirita	AsFeS	1.23%
	Esfalerita	ZnS	0.67%
	Galena	PbS	0.46%
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃	5.68%
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	0.44%
Plagioclasas	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	1.88%
	Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0.00%
	Microcline	KAlSi ₃ O ₈	0.00%
	Anortoclase	(NaK)AlSi ₃ O ₈	0.00%
	Ortoclase	KAlSi ₃ O ₈	0.00%
	Oligoclase	(NaCa)(SiAl) ₄ O ₈	0.00%
Sulfato	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	0.00%
Anfibol	Actinolita	Ca ₂ (MgFe ₂) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	1.22%
	Rutilo	TiO ₂	0.85%
Total			100%

Fuente: Elaboración propia

3.3 Cálculo de tiempo de molienda para un 80%, 90% y 100% -M200

Para hallar el tiempo de molienda del mineral cabeza, primeramente, se realizó un muestreo, aproximadamente una semana, el cual se obtuvo una muestra de 30 kilos de mineral cabeza.

Figura 18

Muestreo de minerales del producto de chancado



Fuente: Elaboración propia

El mineral se trituro en una chancadora de quijadas a 100% -M10, se homogenizo por el método de coneo y se separó 600 gramos para pulverizarlos y leyes, el cual se obtuvieron 3 bolsas de 100 gramos para llevarlo al laboratorio químico y así poder obtener la ley de cabeza de Au.

Figura 19

Área de chancado.de laboratorio metalúrgico



Fuente: Elaboración propia

La muestra restante de 300gr se realizaron pruebas, para obtener la gravedad específica del mineral.

Figura 20

Prueba de sedimentación

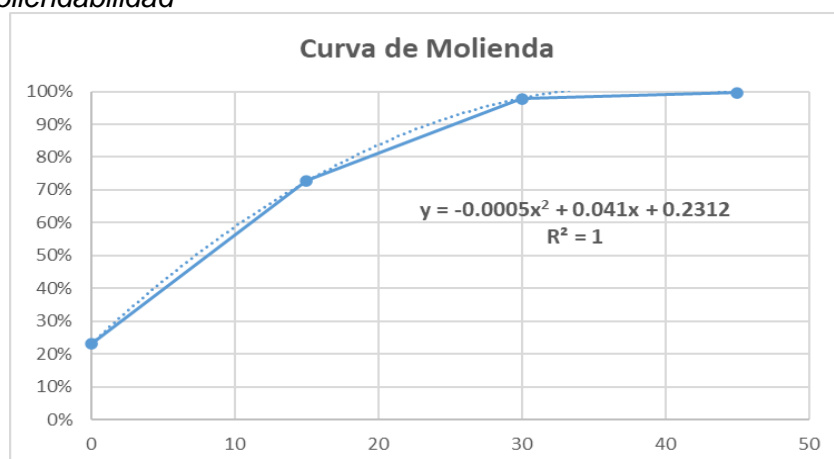


Fuente: Elaboración propia

Posteriormente los 29.4 kg restantes se homogenizaron y se obtuvieron 36 bolsas de 800 gramos todas al 100% -M10, se usaron 4 bolsas de 800 gramos para obtener la curva de molienda a diferentes tiempos, los cuales son a 0, 15, 30 y 45 minutos.

Figura 21

Curva de Moliendabilidad



Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida la curva de moliendabilidad como se muestra en la figura X nos proporciona la ecuación de la curva con su respectivo R^2 .

3.4 Tiempo de la curva de molienda

Finalmente, para hallar el tiempo que deseamos con un 80%, 90% y 100% -M200, nos apoyaremos del comando solver del Excel, para así poder obtener el siguiente resultado que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Tiempo de Moliendabilidad

MALLA – 200%	TIEMPO (min)	TIEMPO (seg)
80%	17	42
90 %	22	36
100 %	50	12

Fuente: Elaboración propia

3.5 Planteamiento de las variables controlables para la formulación del diseño de experimento (DOE)

La siguiente Tabla 4, muestra el rango de las variables en términos o unidades reales, se tiene en consideración, la amplitud del rango es equidistante al punto central representando valores máximos y mínimos posibles de aplicar y necesarios de estudiar.

Tabla 4

Plantilla diseño experimental Box-Behnken

Numero de pruebas	X1	X2	X3	5 NANC	Granulometria (-M200%)	Oxigeno Disuelto (MG/L)
1	-1	-1	0	0.25	80%	6.5
2	1	.1	0	0.5	80%	6.5
3	-1	1	0	0.25	100%	6.5
4	1	1	0	0.5	100%	6.5
5	-1	0	-1	0.25	90%	3
6	1	0	-1	0.5	90%	3
7	-1	0	1	0.25	90%	10
8	1	0	1	0	90%	10
9	0	-1	-1	0.375	80%	3
10	0	1	-1	0.375	100%	3
11	0	-1	1	0.375	80%	10
12	0	1	1	0.375	100%	10
13	0	0	0	0.375	90%	6.5

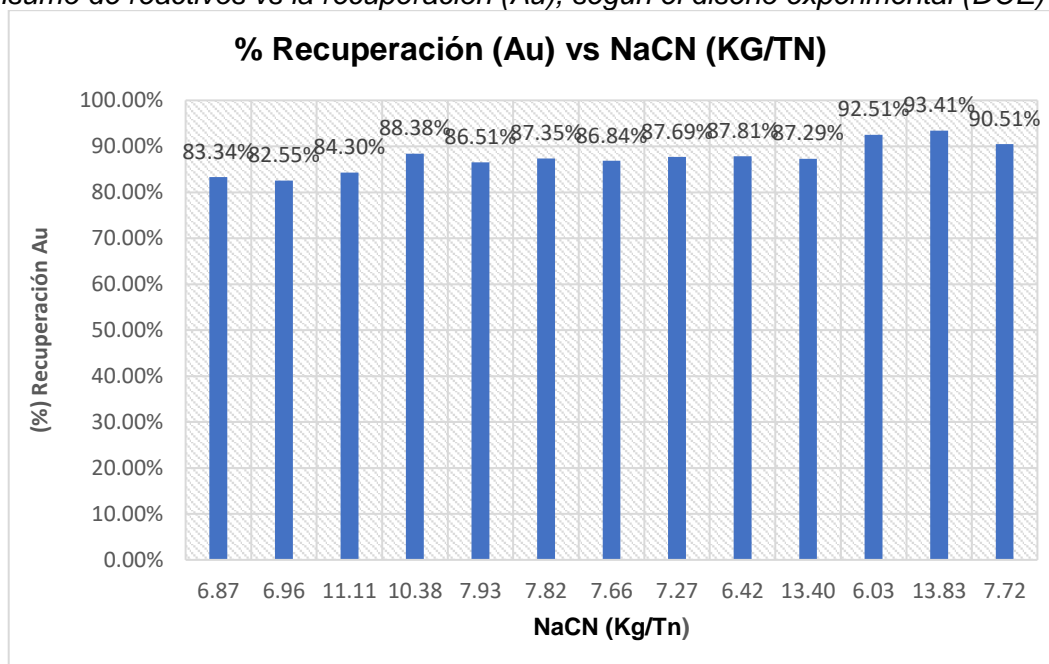
Fuente: Elaboración propia

3.6 Consumo de reactivos en proceso de dosificación de reactivos a nivel de Laboratorio Metalúrgico.

En base al consumo de reactivos (gr/Tn) se determinó un estándar mediante un diseño de experimentos (DOE) y así poder determinar las respectivas dosificaciones a nivel Laboratorio Metalúrgico, tomando una muestra de 1.6 kg.

Figura 22

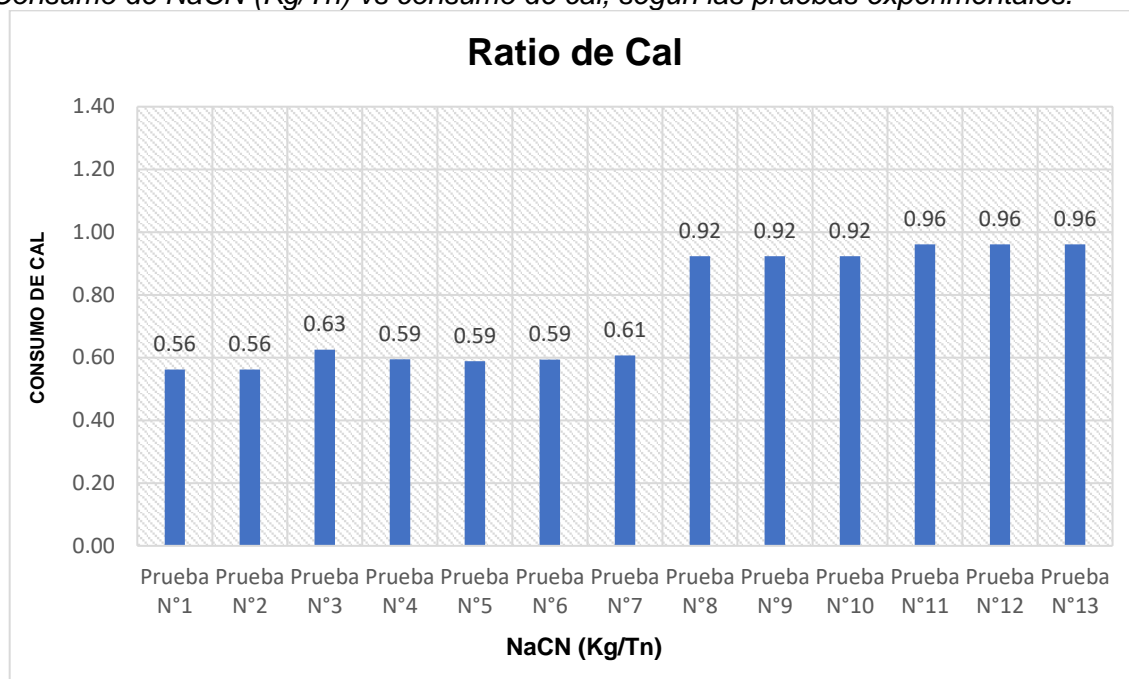
Consumo de reactivos vs la recuperación (Au), según el diseño experimental (DOE)



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

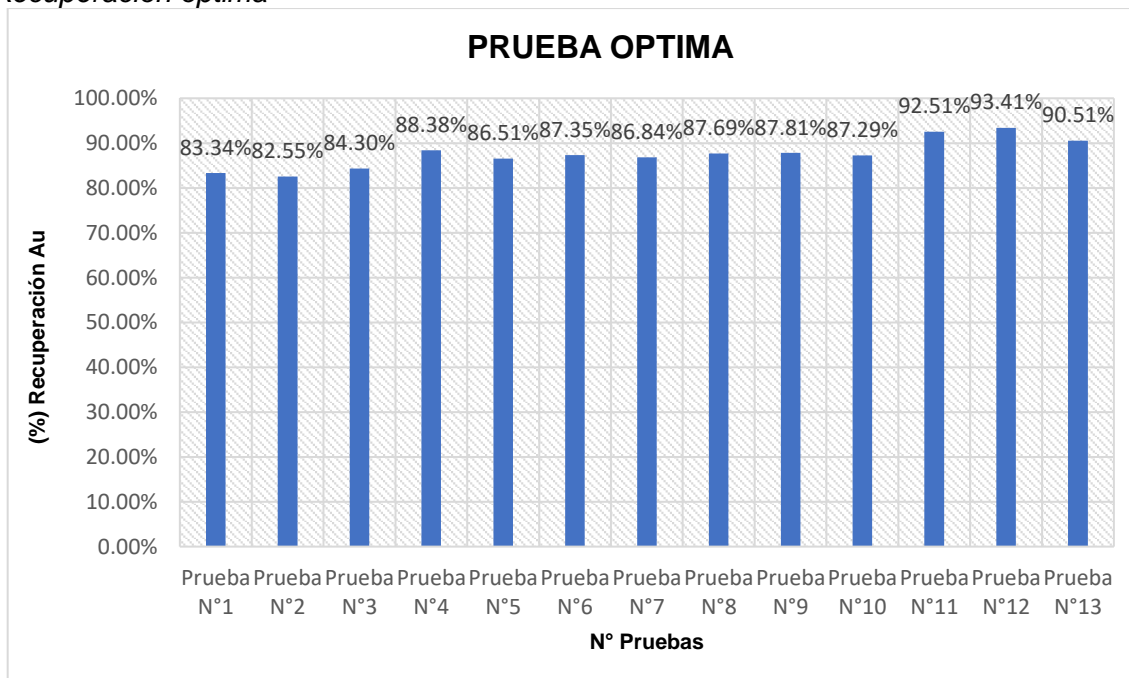
Consumo de NaCN (Kg/Tn) vs consumo de cal, según las pruebas experimentales.



Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Recuperación optima



Fuente: Elaboración propia

3.7 Pruebas de cianuración a diferente concentración de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto.

Figura 25

Pruebas de cianuración.



Fuente: Elaboración propia

En total se realizaron 13 pruebas se realizó un pretratamiento de oxidación de 12 horas, luego se procedió hacer las pruebas de cianuración convencional.

3.7.1 Prueba de Cianuración N°1

Tabla 5

Condiciones iniciales de la Prueba N°1

Peso muestra	kg	1.600
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	80%
NaCN	%	0.25
pH inicial		8.97
Peso inicial NaCN	g	5.14
pH desp de NaCN		11.45
Oxigeno disuelto	mg/l	6.5
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacio	Kg	0.4741
Peso vaso + pulpa	Kg	4.1283
G.E.		2.8780

Fuente: Elaboración propia

Figura 26

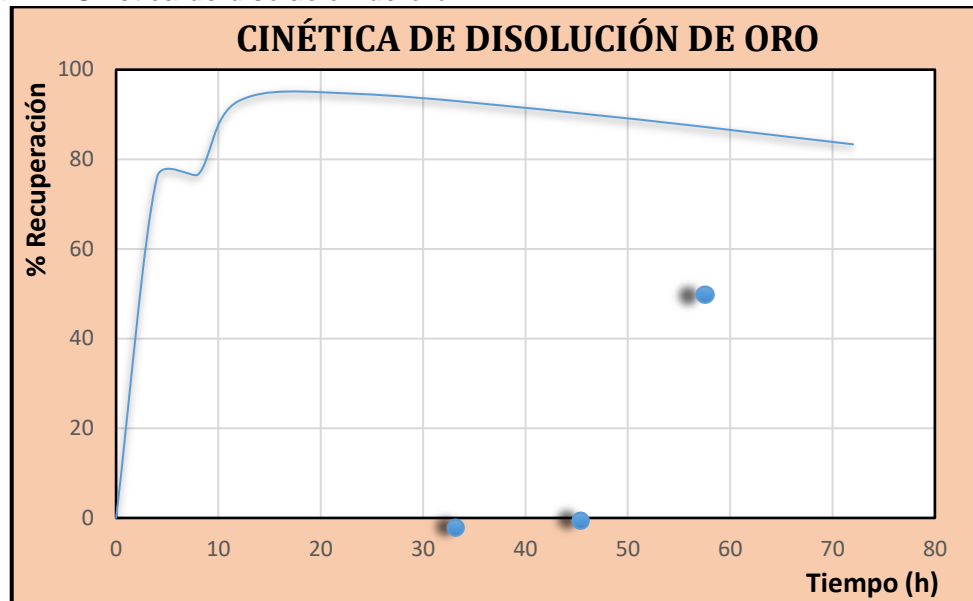
Balance de la prueba de Cianuración N°1

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1283	2.054	0.00	0.00	0.250	11.45	5.14	0.80	6.56		0.00000	0.00000	0.0000	20.11	0
4	4.0914	2.017	0.02	0.00	0.225	11.20	0.51	0.00	6.74	12.00	0.02421	0.000240	0.0244	4.83	75.97
8	4.0545	1.980	0.02	0.00	0.200	11.17	1.03	0.00	6.73	12.20	0.02416	0.000244	0.0246	4.71	76.59
12	4.0176	1.943	0.02	0.00	0.190	11.12	1.23	0.00	7.56	15.00	0.02915	0.000300	0.0299	1.40	93.03
24	3.9068	1.833	0.02	0.00	0.180	11.10	1.44	0.00	7.19	16.00	0.02932	0.000320	0.0304	1.09	94.56
48	3.6853	1.611	0.02	0.00	0.170	10.82	1.64	0.10	7.55	17.00	0.02739	0.000340	0.0288	2.09	89.61
72	3.4638	1.390	0.02	0.00	0.170	11.19	0.00	0.00	7.10	18.00	0.02501	0.000360	0.0268	3.35	83.34

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Prueba N°1 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Prueba de Cianuración N°2

Tabla 6

Condiciones iniciales de la Prueba N°2

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	- 200 M	100%
NaCN	%	0.25
pH inicial		9.08
Peso inicial NaCN	g	5.14
pH desp de NaCN		11.2
Oxigeno disuelto	mg/l	6.5
Peso cal	g	0.5
Peso vaso vacio	Kg	0.4747
Peso vaso + pulpa	Kg	4.129
G.E.		2.8780

Fuente: Elaboración propia

Figura 28

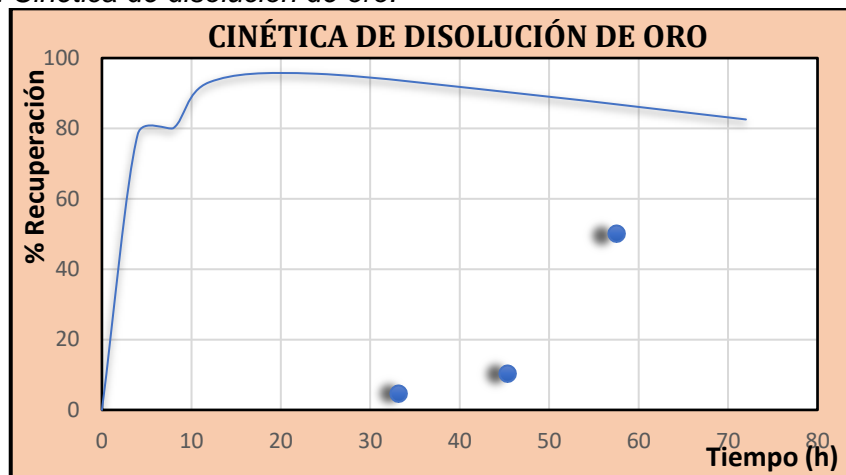
Balance de la prueba de Cianuración N°2

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1289	2.054	0.00	0.00	0.250	11.45	5.14	0.80	6.50		0.00000	0.00000	0.0000	19.48	0
4	4.0891	2.014	0.02	0.00	0.228	11.30	0.45	0.00	7.35	12.00	0.02417	0.000240	0.0244	4.22	78.32
8	4.0493	1.975	0.02	0.00	0.200	11.28	1.03	0.00	7.47	12.40	0.02448	0.000248	0.0250	3.87	80.11
12	4.0095	1.935	0.02	0.00	0.190	11.24	1.23	0.00	7.29	14.60	0.02825	0.000292	0.0290	1.34	93.12
24	3.8900	1.815	0.02	0.00	0.180	11.20	1.44	0.00	6.97	15.80	0.02868	0.000316	0.0298	0.87	95.53
48	3.6511	1.576	0.02	0.00	0.160	10.44	1.85	0.10	7.40	16.80	0.02648	0.000336	0.0279	2.03	89.56
72	3.4122	1.337	0.02	0.00	0.170	11.36	0.00	0.00	6.70	17.90	0.02394	0.000358	0.0257	3.40	82.55

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Prueba N°2 Cinética de disolución de oro.



Fuente: Elaboración propia

3.7.3 Prueba de Cianuración N°3

Tabla 7

Condiciones iniciales de la Prueba N°3

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometría	-200 M	80%
NaCN	%	0.5
pH inicial		8.9
Peso inicial NaCN	g	10.271
pH desp de NaCN		11.32
Oxígeno disuelto	mg/l	6.5
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacío	Kg	0.4742
Peso vaso + pulpa	Kg	4.128
G.E.		2.8780

Fuente: Elaboración propia

Figura 30

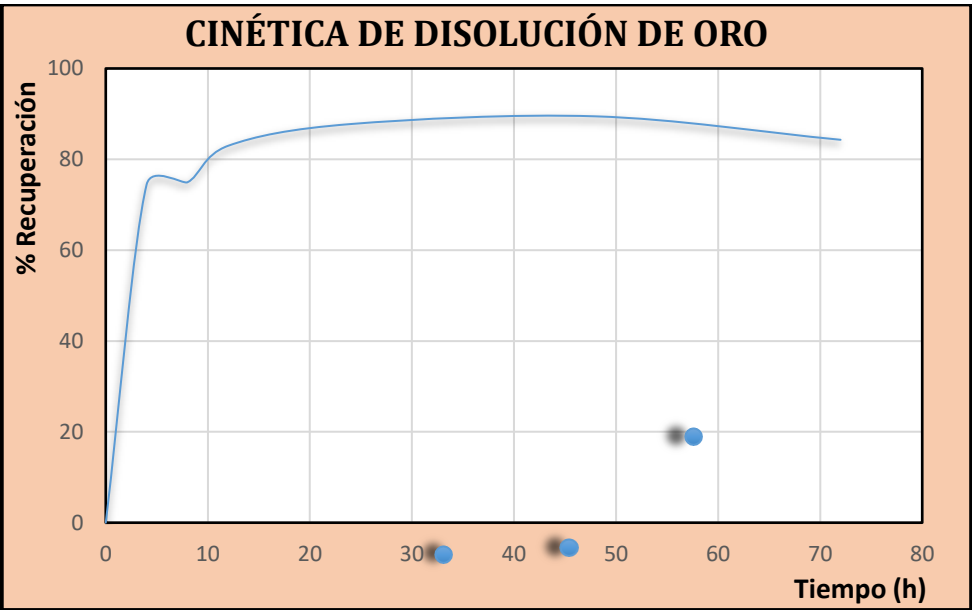
Balance de la prueba de Cianuración N°3

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1284	2.054	0.00	0.00	0.500	11.32	10.27	0.80	6.50		0.00000	0.00000	0.0000	21.02	0
4	4.0898	2.016	0.02	0.00	0.450	10.95	1.03	0.00	6.43	12.30	0.02479	0.000246	0.0250	5.37	74.44
8	4.0513	1.977	0.02	0.00	0.420	10.93	1.64	0.00	7.05	12.50	0.02471	0.000250	0.0252	5.27	74.94
12	4.0127	1.939	0.02	0.00	0.390	10.90	2.26	0.10	6.81	14.00	0.02714	0.000280	0.0279	3.58	82.99
24	3.8970	1.823	0.02	0.00	0.440	11.15	1.23	0.00	6.57	15.60	0.02844	0.000312	0.0295	2.57	87.77
48	3.6656	1.591	0.02	0.00	0.435	11.05	1.34	0.10	6.50	18.00	0.02865	0.000360	0.0301	2.22	89.46
72	3.4342	1.360	0.02	0.00	0.424	11.20	0.00	0.00	6.64	19.50	0.02652	0.000390	0.0284	3.30	84.30

Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Prueba N°3 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.4 Prueba de Cianuración N°4

Tabla 8

Condiciones iniciales de la Prueba N°4

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	100%
NaCN	%	0.5
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	10.27
pH desp de NaCN		11.45
Oxigeno disuelto	mg/l	6.5
Peso cal	g	0.9
Peso vaso vacio	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	4.128
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 32

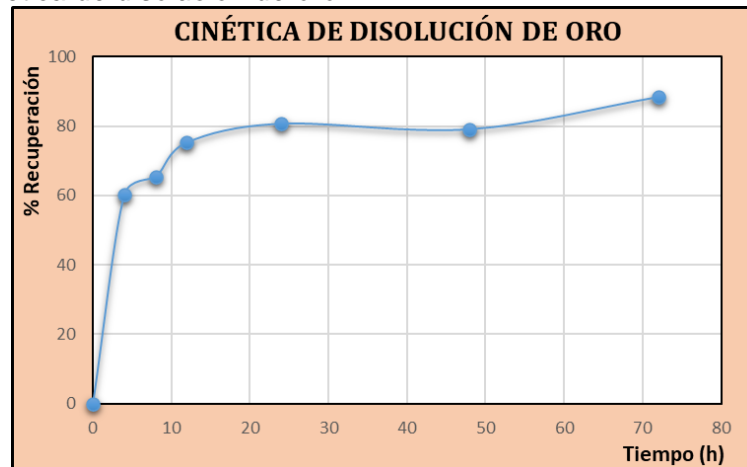
Balance de la prueba de Cianuración N°4

	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1282	2.054	0.00	0.00	0.500	11.45	10.27	0.90	6.50		0.00000	0.00000	0.0000	27.54	0
4	4.0940	2.020	0.02	0.034	0.450	11.34	1.20	0.00	6.40	13.00	0.02626	0.000260	0.0265	10.97	60.18
8	4.0940	2.020	0.02	0.034	0.480	11.30	0.41	0.00	6.70	14.00	0.02828	0.000280	0.0288	9.53	65.40
12	4.0940	2.020	0.02	0.034	0.390	11.25	2.26	0.00	5.25	16.00	0.03232	0.000320	0.0332	6.80	75.29
24	4.0255	1.951	0.02	0.103	0.440	11.20	1.23	0.01	5.87	17.60	0.03435	0.000352	0.0356	5.32	80.69
48	3.9227	1.849	0.02	0.206	0.440	11.15	1.23	0.03	6.95	18.00	0.03328	0.000360	0.0348	5.76	79.08
72	3.9227	1.849	0.02	0.000	0.424	11.00	0.00	0.00	6.85	20.00	0.03697	0.000400	0.0389	3.20	88.38

Fuente: Elaboración propia

Figura 33

Prueba N°4 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.5 Prueba de Cianuración N°5

Tabla 9

Condiciones iniciales de la Prueba N°5

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	80%
NaCN	%	0.375
pH inicial		8.9
Peso inicial NaCN	g	7.703
pH desp de NaCN		11.57
Oxigeno disuelto	mg/l	3
Peso cal	g	0.9
Peso vaso vacio	Kg	0.4549
Peso vaso + pulpa	Kg	4.109
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 34

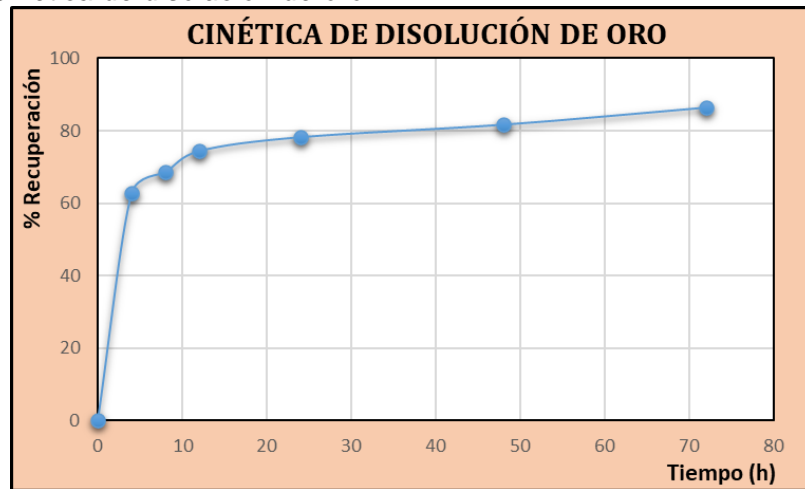
Balance de la prueba de Cianuración N°5

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1091	2.054	0.00	0.00	0.375	11.57	7.70	0.90	3.00		0.00000	0.00000	0.0000	24.46	0
4	4.0816	2.027	0.02	0.027	0.320	11.45	1.13	0.00	4.56	12.00	0.02432	0.000240	0.0246	9.11	62.75
8	4.0816	2.027	0.02	0.027	0.310	11.31	1.34	0.00	5.40	13.00	0.02635	0.000260	0.0268	7.68	68.59
12	4.0816	2.027	0.02	0.027	0.312	11.23	1.29	0.00	6.13	14.00	0.02837	0.000280	0.0292	6.24	74.48
24	4.0267	1.972	0.02	0.082	0.340	11.14	0.72	0.01	6.39	15.00	0.02958	0.000300	0.0307	5.30	78.32
48	3.9442	1.889	0.02	0.165	0.350	11.00	0.51	0.02	6.20	16.20	0.03061	0.000324	0.0320	4.46	81.78
72	3.9442	1.889	0.02	0.000	0.350	10.98	0.00	0.00	6.10	17.00	0.03212	0.000340	0.0339	3.30	86.51

Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Prueba N°5 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.6 Prueba de Cianuración N°6

Tabla 10

Condiciones iniciales de la Prueba N°6

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometría	-200 M	100%
NaCN	%	0.375
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	7.70
pH desp de NaCN		11.45
Oxígeno disuelto	mg/l	3
Peso cal	g	0.9
Peso vaso vacío	Kg	0.4739
Peso vaso + pulpa	Kg	4.128
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 36

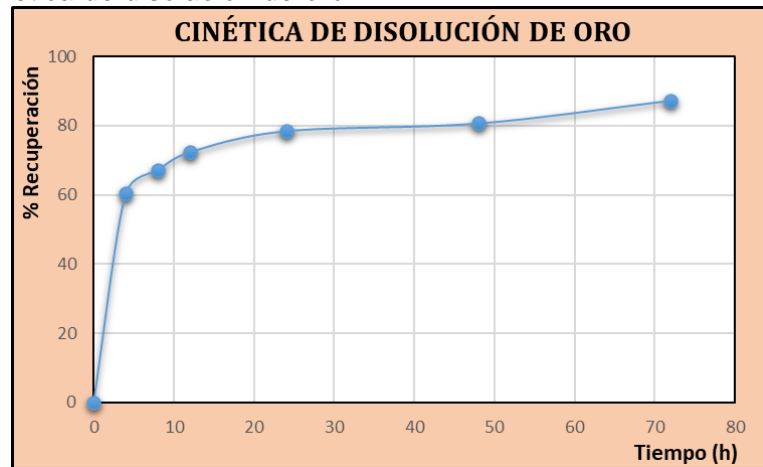
Balance de la prueba de Cianuración N°6

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1281	2.054	0.00	0.00	0.375	11.54	7.70	0.90	3.00		0.00000	0.00000	0.0000	24.51	0
4	4.0954	2.021	0.02	0.033	0.320	11.50	1.13	0.00	3.70	11.60	0.02345	0.000232	0.0237	9.71	60.39
8	4.0954	2.021	0.02	0.033	0.313	11.47	1.27	0.00	4.60	12.80	0.02587	0.000256	0.0264	8.03	67.23
12	4.0954	2.021	0.02	0.033	0.312	11.45	1.29	0.00	5.34	13.67	0.02763	0.000273	0.0284	6.76	72.41
24	4.0299	1.956	0.02	0.098	0.350	11.40	0.51	0.01	5.40	15.20	0.02973	0.000304	0.0308	5.26	78.54
48	3.9317	1.858	0.02	0.196	0.346	11.20	0.60	0.02	5.20	16.30	0.03028	0.000326	0.0317	4.71	80.77
72	3.9317	1.858	0.02	0.000	0.340	11.15	0.00	0.00	5.25	17.50	0.03251	0.000350	0.0343	3.10	87.35

Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Prueba N°6 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.7 Prueba de Cianuración N°7

Tabla 11

Condiciones iniciales de la Prueba N°7

Peso muestra	kg	1.6
Peso agua	Kg	2.054
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	80%
NaCN	%	0.375
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	7.70
pH desp de NaCN		11.47
Oxigeno disuelto	mg/l	10
Peso cal	g	0.9
Peso vaso vacio	Kg	0.460
Peso vaso + pulpa	Kg	4.114
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 38

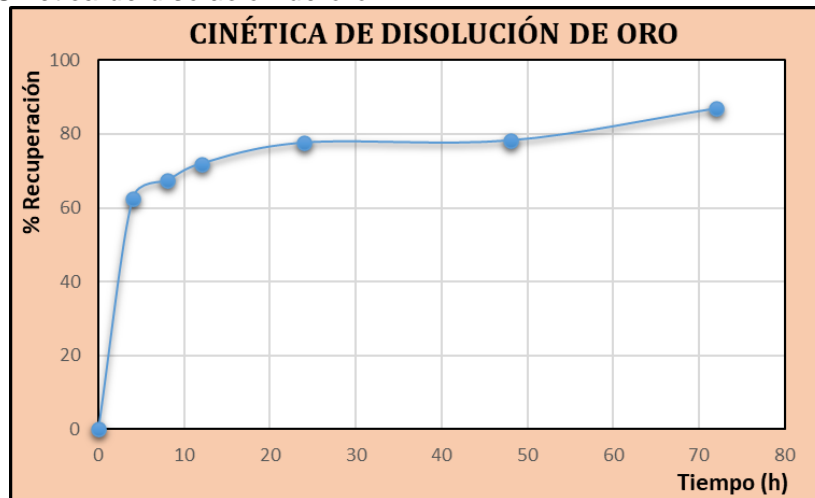
Balance de la prueba de Cianuración N°7

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	4.1139	2.054	0.00	0.00	0.375	11.47	7.70	0.90	8.58		0.00000	0.00000	0.0000	24.31	0
4	4.0664	2.007	0.02	0.048	0.324	11.23	1.05	0.01	7.58	12.00	0.02408	0.000240	0.0243	9.11	62.52
8	4.0664	2.007	0.02	0.048	0.310	11.20	1.34	0.01	7.50	12.80	0.02569	0.000256	0.0262	7.95	67.31
12	4.0664	2.007	0.02	0.048	0.324	11.14	1.05	0.01	6.55	13.56	0.02721	0.000271	0.0280	6.83	71.92
24	3.9713	1.912	0.02	0.143	0.351	11.10	0.49	0.02	6.74	15.23	0.02911	0.000305	0.0302	5.45	77.60
48	3.8286	1.769	0.02	0.285	0.344	11.07	0.64	0.04	7.59	16.40	0.02901	0.000328	0.0304	5.31	78.18
72	3.8286	1.769	0.02	0.000	0.340	11.00	0.00	0.00	7.16	18.10	0.03202	0.000362	0.0338	3.20	86.84

Fuente: Elaboración propia

Figura 39

Prueba N°7 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.8 Prueba de Cianuración N°8

Tabla 12

Condiciones iniciales de la Prueba N°8

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	100%
NaCN	%	0.375
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	6.26
pH desp de NaCN		11.01
Oxigeno disuelto	mg/l	10
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacio	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	3.443
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 40

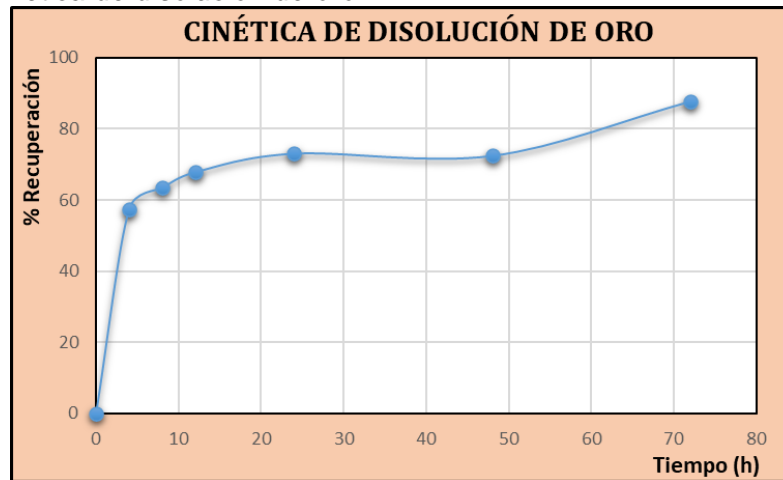
Balance de la prueba de Cianuración N°8

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4428	1.669	0.00	0.00	0.375	11.01	6.26	0.80	8.39		0.00000	0.00000	0.0000	26.07	0
4	3.3608	1.587	0.02	0.082	0.320	10.92	0.92	0.00	6.08	12.10	0.01920	0.000242	0.0194	11.11	57.38
8	3.4005	1.627	0.02	0.042	0.324	10.90	0.85	0.00	6.12	12.90	0.02098	0.000258	0.0215	9.54	63.40
12	3.4066	1.633	0.02	0.036	0.340	10.89	0.58	0.20	6.24	13.60	0.02221	0.000272	0.0230	8.39	67.81
24	3.3272	1.553	0.02	0.116	0.360	10.98	0.25	0.10	6.10	15.24	0.02367	0.000305	0.0248	7.03	73.04
48	3.1758	1.402	0.02	0.267	0.340	10.87	0.58	0.10	5.59	16.50	0.02313	0.000330	0.0245	7.19	72.41
72	3.2258	1.452	0.1	0.217	0.345	10.92	0.00	0.00	6.76	18.24	0.02648	0.001824	0.0297	3.21	87.69

Fuente: Elaboración propia

Figura 41

Prueba N°8 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.9 Prueba de Cianuración N°9

Tabla 13

Condiciones iniciales de la Prueba N°9

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometría	-200 M	90%
NaCN	%	0.25
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	4.17
pH desp de NaCN		10.99
Oxígeno disuelto	mg/l	3
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacío	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	3.443
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 42

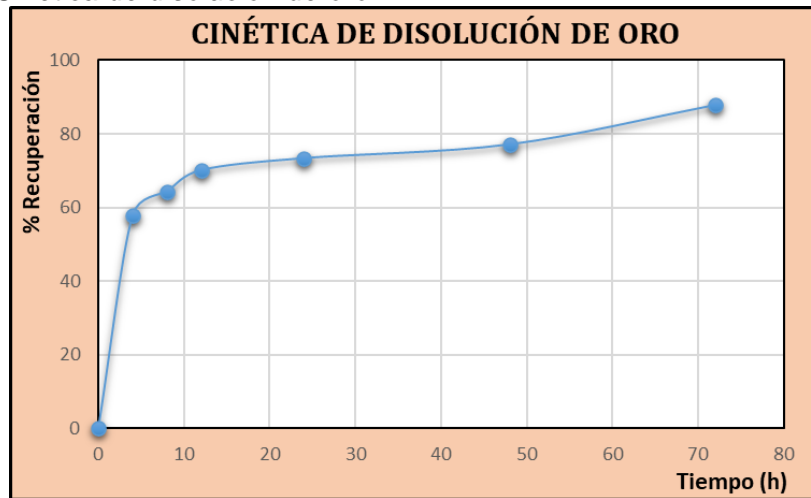
Balance de la prueba de Cianuración N°9

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4430	1.669	0.00	0.00	0.250	10.99	4.17	0.80	3.89		0.00000	0.00000	0.0000	26.00	0
4	3.3714	1.597	0.02	0.072	0.230	10.89	0.33	0.00	4.56	12.10	0.01933	0.000242	0.0196	10.94	57.90
8	3.4223	1.648	0.02	0.021	0.220	10.85	0.50	0.00	5.48	12.89	0.02125	0.000258	0.0217	9.27	64.34
12	3.4111	1.637	0.02	0.032	0.200	10.67	0.83	0.20	6.27	14.00	0.02292	0.000280	0.0237	7.77	70.12
24	3.3292	1.555	0.02	0.114	0.190	10.94	1.00	0.10	6.50	15.25	0.02372	0.000305	0.0248	6.92	73.38
48	3.2498	1.476	0.02	0.193	0.160	10.82	1.50	0.10	6.80	16.70	0.02465	0.000334	0.0261	5.95	77.12
72	3.2098	1.436	0.1	0.233	0.170	10.77	0.00	0.00	5.67	18.40	0.02642	0.001840	0.0297	3.17	87.81

Fuente: Elaboración propia

Figura 43

Prueba N°9 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.10 Prueba de Cianuración N°10

Tabla 14

Condiciones iniciales de la Prueba N°10

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	90%
NaCN	%	0.5
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	8.35
pH desp de NaCN		11.03
Oxigeno disuelto	mg/l	3
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacio	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	3.443
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 44

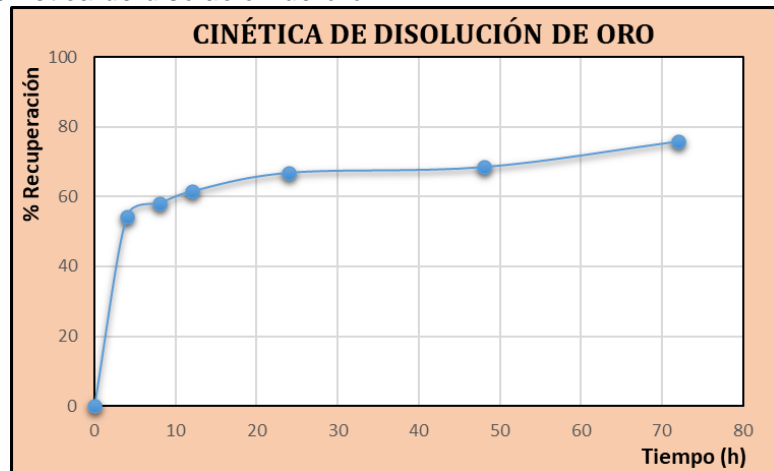
Balance de la prueba de Cianuración N°10

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4428	1.669	0.00	0.00	0.500	11.03	8.35	0.80	3.90		0.00000	0.00000	0.0000	25.57	0
4	3.4404	1.667	0.02	0.002	0.470	10.90	0.50	0.00	4.30	12.00	0.02000	0.000240	0.0202	11.66	54.39
8	3.4217	1.648	0.02	0.021	0.422	10.88	1.30	0.00	4.25	12.90	0.02126	0.000258	0.0218	10.71	58.09
12	3.4077	1.634	0.02	0.035	0.390	10.84	1.84	0.20	5.45	13.70	0.02238	0.000274	0.0232	9.84	61.52
24	3.3287	1.555	0.02	0.114	0.400	10.69	1.67	0.10	6.86	15.60	0.02426	0.000312	0.0253	8.47	66.86
48	3.2203	1.447	0.02	0.223	0.350	10.83	2.50	0.10	6.80	17.00	0.02459	0.000340	0.0260	8.05	68.50
72	3.1651	1.391	0.1	0.278	0.424	10.80	1.27	0.00	5.34	18.50	0.02574	0.001850	0.0290	6.18	75.83

Fuente: Elaboración propia

Figura 45

Prueba N°10 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.11 Prueba de Cianuración N°11

Tabla 15

Condiciones iniciales de la Prueba N°11

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometría	-200 M	90%
NaCN	%	0.25
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	4.17
pH desp de NaCN		10.94
Oxígeno disuelto	mg/l	10
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacío	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	3.443
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 46

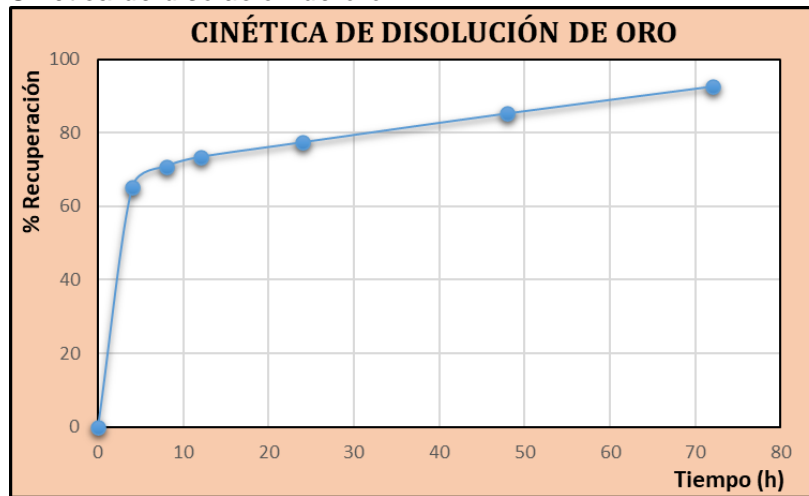
Balance de la prueba de Cianuración N°11

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4428	1.669	0.00	0.00	0.250	10.94	4.17	0.80	8.58		0.00000	0.00000	0.0000	26.71	0
4	3.3700	1.596	0.02	0.073	0.240	10.90	0.17	0.00	6.06	14.00	0.02235	0.000280	0.0226	9.31	65.16
8	3.4200	1.646	0.02	0.023	0.230	10.84	0.33	0.00	6.49	14.60	0.02403	0.000292	0.0246	7.78	70.86
12	3.4150	1.641	0.02	0.028	0.220	10.80	0.50	0.15	6.47	15.00	0.02462	0.000300	0.0255	7.10	73.41
24	3.3300	1.556	0.02	0.113	0.210	10.71	0.67	0.10	6.27	16.50	0.02568	0.000330	0.0269	6.03	77.41
48	3.2250	1.451	0.02	0.218	0.200	10.60	0.83	0.20	6.50	19.30	0.02801	0.000386	0.0296	3.94	85.23
72	3.1506	1.377	0.15	0.292	0.180	10.87	1.17	0.00	6.61	20.00	0.02754	0.003000	0.0321	2.00	92.51

Fuente: Elaboración propia

Figura 47

Prueba N°11 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.12 Prueba de Cianuración N°12

Tabla 16

Condiciones iniciales de la Prueba N°12

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometría	-200 M	90%
NaCN	%	0.5
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	8.35
pH desp de NaCN		10.82
Oxígeno disuelto	mg/l	10
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacío	Kg	0.474
Peso vaso + pulpa	Kg	3.443
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 48

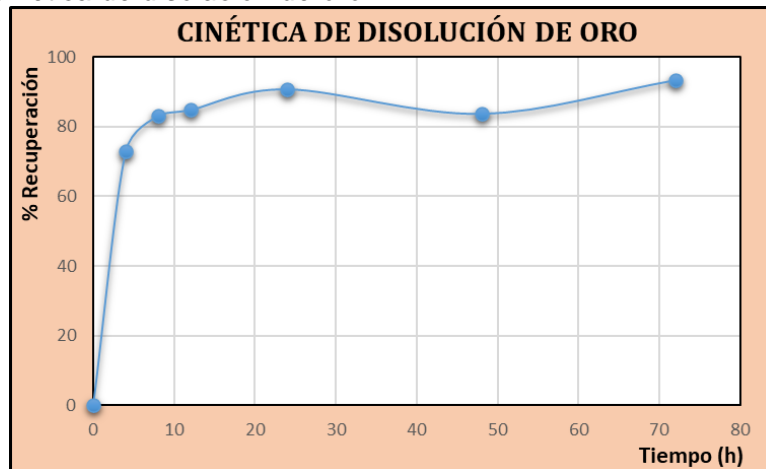
Balance de la prueba de Cianuración N°12

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4428	1.669	0.00	0.00	0.500	11.24	8.35	0.80	8.58		0.00000	0.00000	0.0000	27.30	0
4	3.3690	1.595	0.02	0.074	0.450	11.03	0.83	0.00	5.51	16.00	0.02552	0.000320	0.0258	7.42	72.81
8	3.4200	1.646	0.02	0.023	0.423	10.90	1.29	0.00	5.60	17.50	0.02881	0.000350	0.0295	4.63	83.05
12	3.3990	1.625	0.02	0.044	0.400	10.84	1.67	0.15	5.78	17.90	0.02909	0.000358	0.0301	4.14	84.85
24	3.4402	1.666	0.02	0.003	0.380	10.88	2.00	0.10	5.48	18.50	0.03083	0.000370	0.0322	2.51	90.79
48	3.2292	1.455	0.02	0.214	0.340	10.69	2.67	0.20	6.40	19.20	0.02794	0.000384	0.0297	4.44	83.75
72	3.1936	1.420	0.02	0.249	0.430	10.83	1.17	0.00	6.86	21.79	0.03094	0.000436	0.0332	1.80	93.41

Fuente: Elaboración propia

Figura 49

Prueba N°12 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

3.7.13 Prueba de Cianuración N°13

Tabla 17

Condiciones iniciales de la Prueba N°13

Peso muestra	kg	1.3
Peso agua	Kg	1.669
% Sólidos	%	43.8
Densidad	Kg/m ³	1400
Granulometria	-200 M	90%
NaCN	%	0.375
pH inicial		8.94
Peso inicial NaCN	g	6.26
pH desp de NaCN		10.96
Oxigeno disuelto	mg/l	10
Peso cal	g	0.8
Peso vaso vacio	Kg	0.460
Peso vaso + pulpa	Kg	3.429
G.E.		2.878

Fuente: Elaboración propia

Figura 50

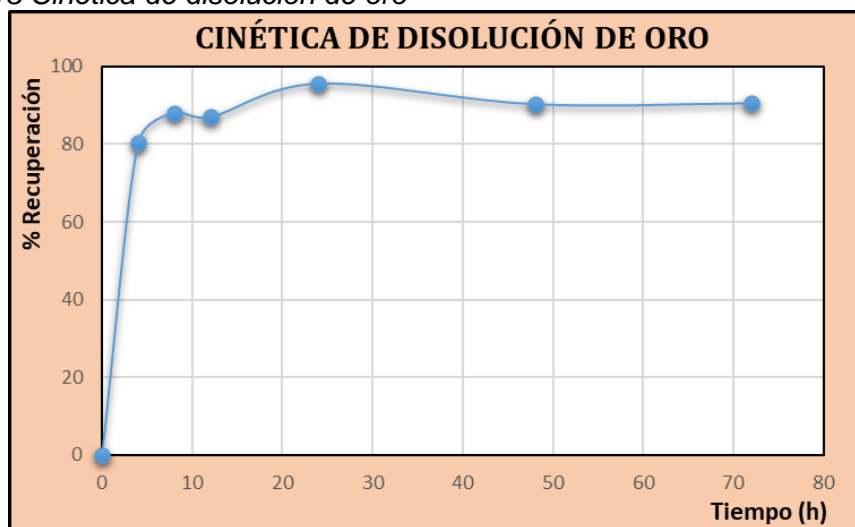
Balance de la prueba de Cianuración N°13

Tiempo. Ac	P. vaso, kg	P. Agua	Gasto, l	Agua agregada	% NaCN	pH	g NaCN	g Cal	O2 mg/l	g Au/m3	g Au A	g Au B	g Au total	Au g/t RVE	% Extrac.
0	3.4290	1.669	0.00	0.00	0.375	10.96	6.26	0.80	8.58		0.00000	0.00000	0.0000	25.62	0
4	3.3600	1.600	0.02	0.069	0.340	10.88	0.58	0.00	6.08	16.50	0.02640	0.000330	0.0267	5.06	80.27
8	3.3980	1.638	0.02	0.031	0.310	10.80	1.08	0.00	6.12	17.50	0.02867	0.000350	0.0293	3.04	88.12
12	3.3290	1.569	0.02	0.100	0.342	10.78	0.55	0.20	6.24	17.80	0.02793	0.000356	0.0290	3.34	86.97
24	3.4508	1.691	0.02	-0.022	0.350	11.01	0.42	0.10	6.12	18.00	0.03043	0.000360	0.0318	1.13	95.58
48	3.2488	1.489	0.02	0.180	0.342	10.87	0.55	0.15	5.59	19.00	0.02829	0.000380	0.0301	2.49	90.28
72	3.0908	1.331	0.02	0.338	0.340	10.80	0.58	0.00	6.76	21.00	0.02795	0.000420	0.0301	2.43	90.51

Fuente: Elaboración propia

Figura 51

Prueba N°13 Cinética de disolución de oro



Fuente: Elaboración propia

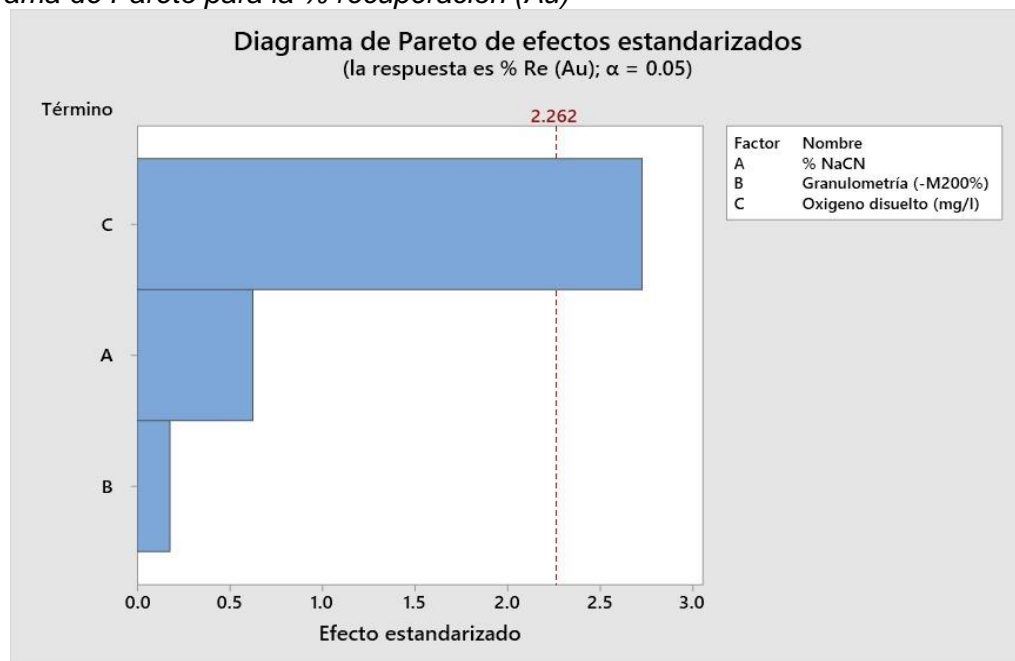
Capítulo IV Análisis y discusión de resultados

Analizaremos cada cuadro estadístico que nos proporciona el programa Minitab e interpretaremos los resultados.

4.1 Diagrama de Pareto de efectos para el % recuperación (Au)

Figura 52

Diagrama de Pareto para la % recuperación (Au)



Fuente: Elaboración propia

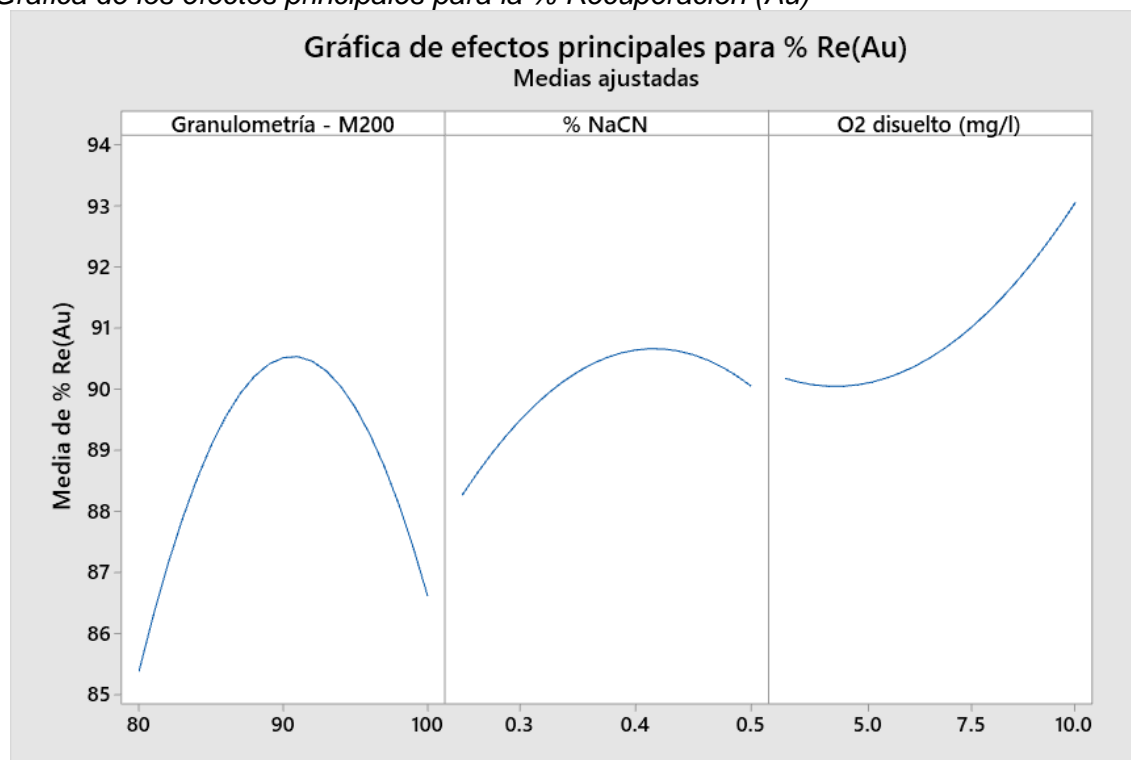
4.1.1 Análisis e interpretación de resultados

Esta grafica de Pareto es muy importante para ver la significancia, como se puede visualizar el oxígeno disuelto será la variable más significativa al respecto de la granulometría (-M200%) y el % NaCN.

4.2 Grafica de efectos para el % Recuperación (Au)

Figura 53

Grafica de los efectos principales para la % Recuperación (Au)



Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Análisis e interpretación (parrafear)

Observamos que el %NaCN que tiene un comportamiento parabólico, donde llega a su máxima recuperación a los 0.4, por tanto podemos decir que si el %NaCN aumenta afectaría significativamente en la disolución del oro.

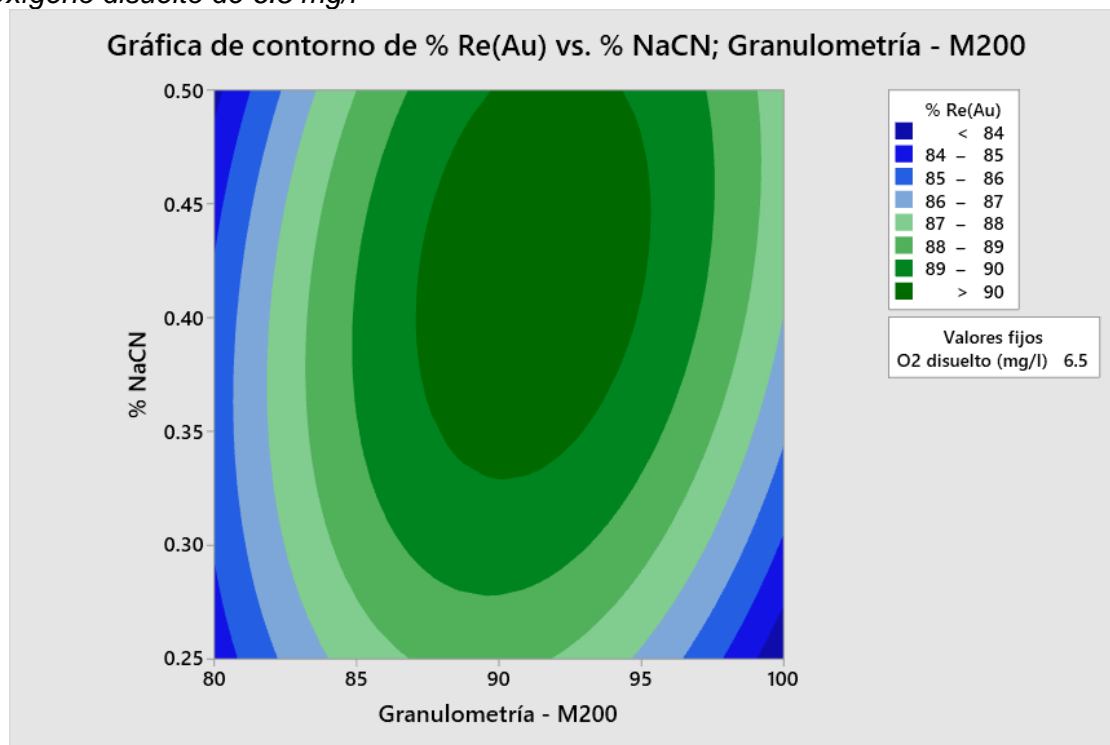
Se observa que tiene un comportamiento parabólico a una granulometría (-%M200), y se puede ver una máxima recuperación aproximadamente a 90% -M200, podemos decir si se muele más fino esto afectaría en la recuperación del oro.

En el caso del Oxígeno disuelto (mg/l) la tendencia casi lineal, se observa que al aumentar el oxígeno disuelto la recuperación del oro también tiende a aumentar siendo directamente proporcional.

4.3 Grafica de contorno de % Recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%); Fuerza CN a un Oxígeno disuelto de 6.5 mg/l

Figura 54

Grafica de contorno de % Recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%); Fuerza CN a un Oxígeno disuelto de 6.5 mg/l



Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Análisis e interpretación

Esta gráfica está dividida por zonas de color verde de mayor a menor intensidad y zonas de color azul de menor a mayor intensidad. En los ejes se ubican las variables significativas para el % de recuperación (Au). En la parte derecha podemos observar el % de recuperación (Au) de acuerdo con las intensidades de las zonas que indican el rango de los valores.

Esta grafica se analiza de la siguiente manera.

En la zona de color verde de mayor intensidad se logra ver un % recuperación de oro mayor al 90% para cierta dosificación de consumo de las variables controlables, conforme a medida que la zona verde es menos intensa puede llegar a un % recuperación mínima de oro al 87%.

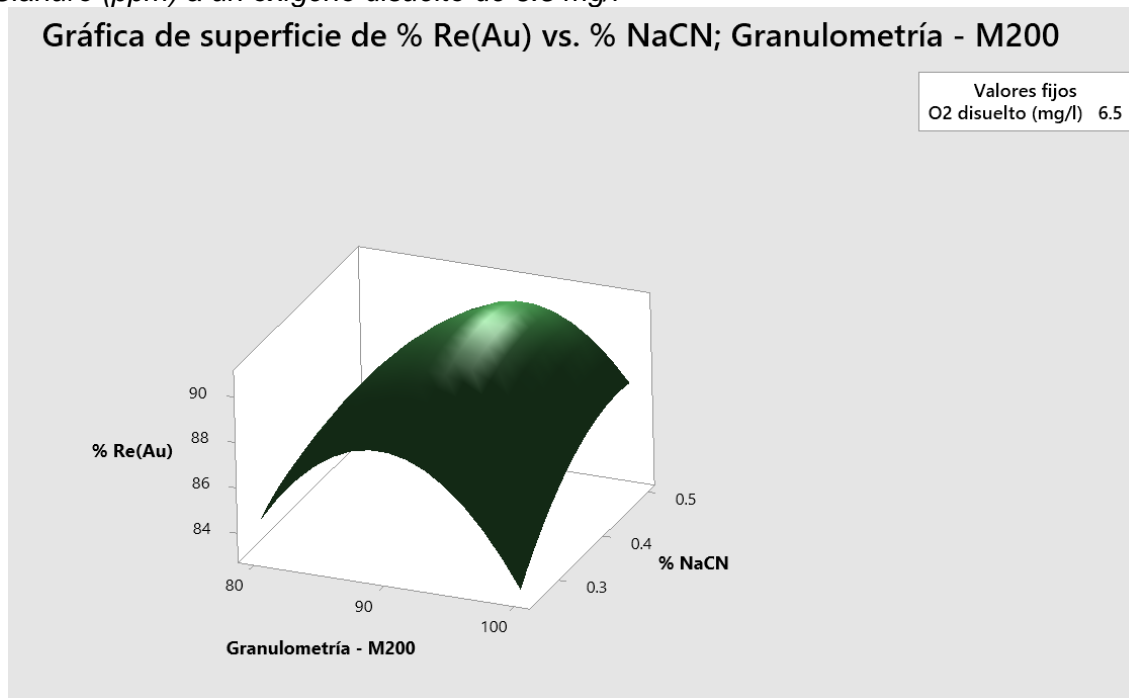
En las zonas de color azul de menor intensidad representan que hay un % recuperación de oro entre un 84% a un 87% para cierta dosificación de consumo de las

variables controlables, y la zona de color azul de mayor intensidad representa que hay un % recuperación de oro menor al 84%.

4.4 Gráfica de superficie de % recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%) y Fuerza de Cianuro (ppm) a un oxígeno disuelto de 6.5 mg/l.

Figura 55

Gráfica de superficie de % recuperación (Au) vs Granulometría (-M200%) y Fuerza de Cianuro (ppm) a un oxígeno disuelto de 6.5 mg/l



Fuente: Elaboración propia

4.4.1 *Análisis e interpretación*

Este gráfico de superficie nos da información completa en tres dimensiones: recuperación (Au), % de NaCN y tamaño de partícula (-M200%). A medida que aumenta el % NaCN, el % de recuperación (Au) disminuye debido a su tendencia parabólica y a medida que aumenta el tamaño de partícula (-M200%), el % de recuperación (Au) también disminuye. Este gráfico de superficie confirma la interpretación obtenida en el gráfico del efecto principal de recuperación (Au). Todas estas tablas y gráficos que vimos anteriormente son muy importantes porque están relacionados y confirman de manera óptima que las variables de control “%NaCN” y “Granularidad (-M200%)” son las que deben

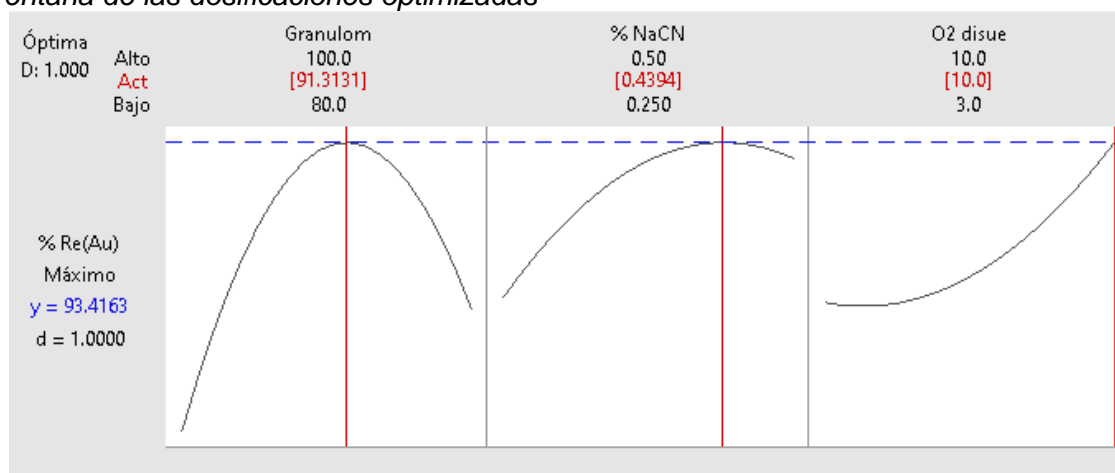
ser según The Box-Behnken. Diseño. Mayor correlación con el grado de recuperación (Au) de 6,5 mg/l de O₂ disuelto.

4.5 Optimización de las variables controlables.

A continuación, obtendremos una gráfica donde podemos observar el consumo óptimo de %NaCN, la granulometría (-M200%) y el oxígeno disuelto (mg/l), para obtener el mayor % recuperación (Au) posible.

Figura 56

Ventana de las dosificaciones optimizadas



Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Análisis e interpretación

En esta figura, lograremos una recuperación óptima (Au) de 93,4163% según el modelo de diseño experimental Box-Behnken, que muestra que cuando %NaCN es 0,4394, 91,3131% - tamaño de partícula M200 y oxígeno disuelto es 10 mg/l. durante la tasa de recuperación de oro fue del 93,4163%.

4.6 Pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio metalúrgico con el diseño experimental Box-Behnken.

A continuación, se mostrará las pruebas a nivel laboratorio metalúrgico con las variables controlables que se tuvieron en cuenta y el consumo de reactivos de las variables no controlables.

Figura 57

Resultados de las pruebas experimentales a nivel laboratorio con el modelo Box-Behnken

Granulometría			Reactivos			Leyes de Au, ppm			% Re (Au)
N° Prueba	-M200	O2 (mg/l)	Cal Kg/Tn	NaCN Kg/Tn	%NaCN	Analizada	Calculada	Relave	
1	80%	6.5	0.56	6.87	0.25	20.50	20.11	3.35	83.34
2	100%	6.5	0.56	6.96	0.25	20.50	19.48	3.40	82.55
3	80%	6.5	0.63	11.11	0.5	25.60	21.02	3.30	84.30
4	100%	6.5	0.59	10.38	0.5	25.60	27.54	3.20	88.38
5	80%	3	0.59	7.93	0.375	25.60	24.46	3.30	86.51
6	100%	3	0.59	7.82	0.375	25.60	24.51	3.10	87.35
7	80%	10	0.61	7.66	0.375	25.60	24.31	3.20	86.84
8	100%	10	0.92	7.27	0.375	20.50	26.07	3.21	87.69
9	90%	3	0.92	6.42	0.25	20.50	26.00	3.17	87.81
10	90%	3	0.92	13.40	0.5	20.50	25.57	3.25	87.29
11	90%	10	0.96	6.03	0.25	20.50	26.71	2.00	92.51
12	90%	10	0.96	13.83	0.5	20.50	27.30	1.80	93.41
13	90%	6.5	0.96	7.72	0.375	20.50	25.62	2.43	90.51

Fuente: Elaboración propia

4.7 Diagnóstico de las pruebas de cianuración a diferentes concentraciones de cianuro, granulometría y oxígeno disuelto

Durante el desarrollo de las pruebas de cianuración de acuerdo al diseño Box-Behnken que se realizó en el laboratorio metalúrgico en mineral cabeza de la planta concentradora de oro, se obtuvo diferentes dosificaciones de cianuro, granulometría (-M200%) y oxígeno disuelto, para lo cual se llegó a tener como resultados una variedad de % recuperación (Au), del cual posteriormente se analizó para determinar la significancia de estas variables controlables y así poder encontrar el óptimo deseable con la finalidad de lograr un mayor % recuperación (Au).

Se recomienda realizar pruebas de difracción de rayos x en los relaves para determinar si se puede apreciar la formación de goetita que es la forma oxidada de la pirita.

Al realizar un pretratamiento se estimó en laboratorio el tiempo de 12 horas debido que a ese tiempo llega oxigenar correctamente en las diferentes pruebas como se puede apreciar en la Figura 57

Conclusiones

Estas pruebas consideraron 3 parámetros operativos para optimizar los reactivos y lograr la mayor recuperación posible.

Basado en el diseño experimental, de las 3 variables controlables en el estudio, solo el oxígeno disuelto es proporcional a la recuperación (Au), mientras que las otras dos variables (fuerza del cianuro y tamaño de partícula) están en el punto más alto de la línea. se puede observar en la Figura 39.

Utilizando un diseño Box-Behnken, se realizaron una serie de pruebas metalúrgicas para encontrar la optimización de las variables controladas para lograr un % NaCN de 0.5, un tamaño de partícula de 100% -M200 y un contenido de oxígeno disuelto de 10 mg/L.. El % de recuperación (Au) es del 93,41%, los resultados se pueden observar en la tabla No.32.

La prueba de cianuración en tanque dio los resultados esperados cuando se realizó un pretratamiento gravimétrico y se logró una mayor recuperación de oro y se simuló el proceso de oxidación posterior con un tiempo de residencia mayor a 12 horas.

El consumo medio de cal en las 7 primeras pruebas fue de 9,31 kg/Tn, pero en las últimas 6 pruebas el consumo medio de cal fue de 9,91 kg/Tn, lo que fue 0,59 kg/Tn superior. Esto se debe a que el agua se cambió a agua alcalina para las primeras 7 pruebas y a agua no alcalina para las últimas 6 pruebas. Teniendo en cuenta que se tuvo que cambiar el agua debido a su mayor volatilidad en la prueba, los resultados del consumo de cal se muestran en la Tabla 32, y también se realizó un balance de agua alcalina.

Recuperación (Au) 93,4163%, NaCN 0,43, -M200 91,31%, oxígeno disuelto 10 mg/l
Estos datos se obtienen en base a la optimización del consumo de reactivos en el programa Minitab

Recomendaciones

Para pruebas metalúrgicas, se recomienda utilizar buenos instrumentos adecuados como molinos, agitadores en óptimo estado, medidores de flujo, bandejas limpias para recibir el relave e insumos para la lixiviación.

Se recomienda el análisis químico del mineral si en caso tienen cianicidas como el cobre, arsénico, hierro, etc. ya que estos son los minerales contaminantes que perjudican la recuperación del oro, consumiendo el cianuro.

Se recomienda tomar el control en las horas establecidas, ya que estas podrían influenciar en las lecturas de las leyes de solución, por tanto, influenciar en la interpretación de las gráficas de lixiviación.

Se recomienda realizar una difracción de rayos x a los relaves para ver si el mineral está llegando a oxidar y también realizar pruebas de malla valoradas para en que malla está la ley de oro más alto.

Se recomienda este tipo de diseño Box-Behnken, ya que solo trabaja con 3 variables y no requiere de muchas pruebas, siendo igual de eficiente que otros diseños.

Referencias bibliográficas

- Ayala Mina Jorge y Pardo Mercado Richard (1995). *Optimización por diseños experimentales con aplicaciones en ingeniería*. Lima Pe
- Cerro Joo, Juan Carlos (2014). *Implementación del concentrador gravimétrico-centrífugo "icon" a planta de cianuración aurífera*. Informe de suficiencia Ingeniería Metalurgia, FIGMM. UNI, Lima Peru, pp. 45-46.
- Gold Processing Short Course, COM 2012 Niagara Falls, Sep 30 to Oct 3, 2012.
- Gutiérrez Pulido Humberto y Román de la Vara Salazar (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. 2da edic. México, D.F
- John Marsden and C. Lain House (SME), *The Chemistry of Gold Extraction*, 2nd Edicion 2006.
- Parga, Wan rú., and Miller 1986). *Revista de ciencias ambientales y naturales*.
- QUIROZ NÚÑEZ IVÁN, "*Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales*", UNI, Lima Perú.
- Uceda Herrera, D. Marzo (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*. 1ra edic., Edit Graficas EIRL.

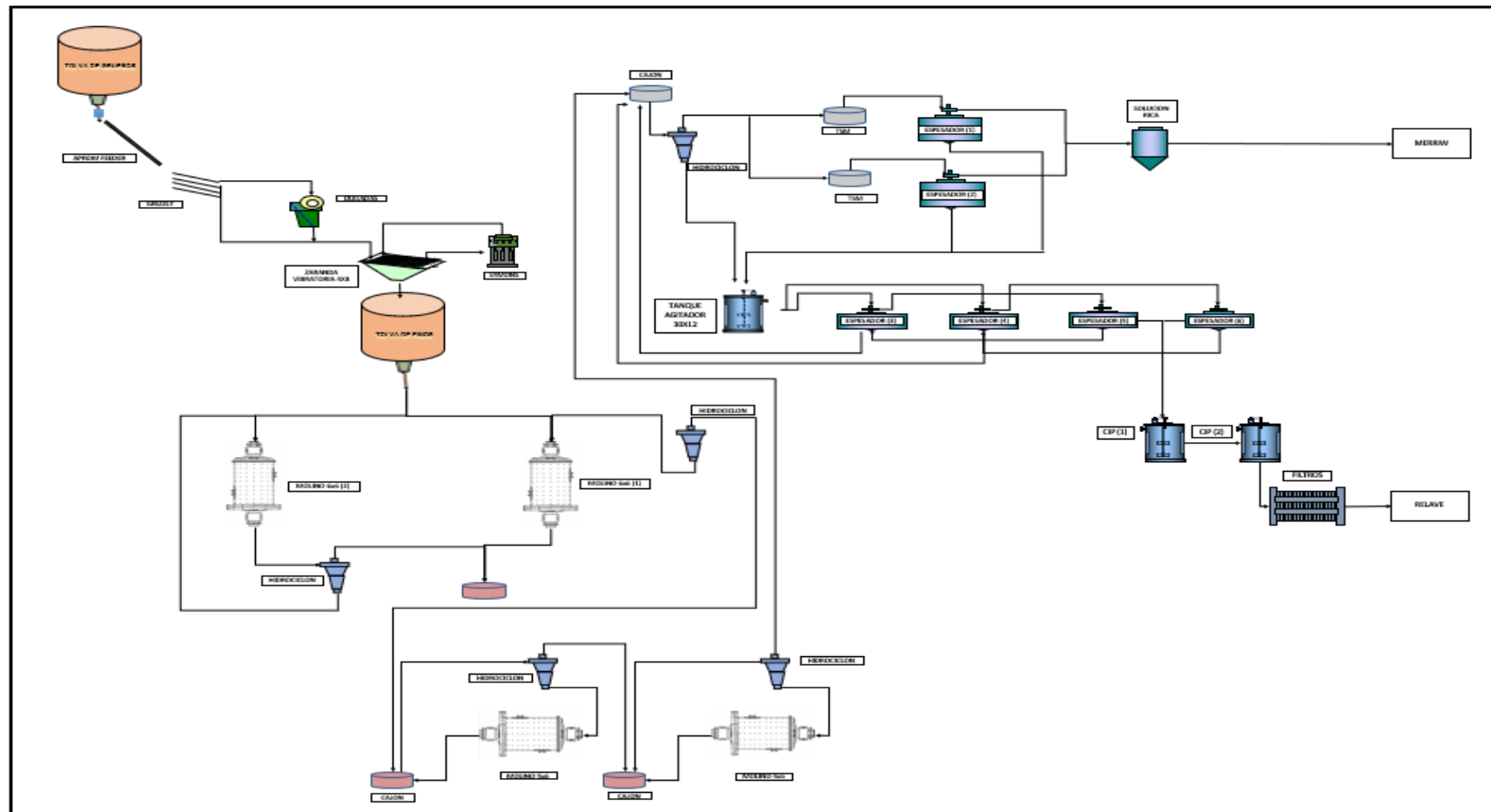
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Cronograma de trabajo.	1
Anexo 2: Flow sheet Planta concentradora de oro	2
Anexo 3: Diagrama de superficie de %Re (Au) vs %NaCN; O ₂ disuelto	3

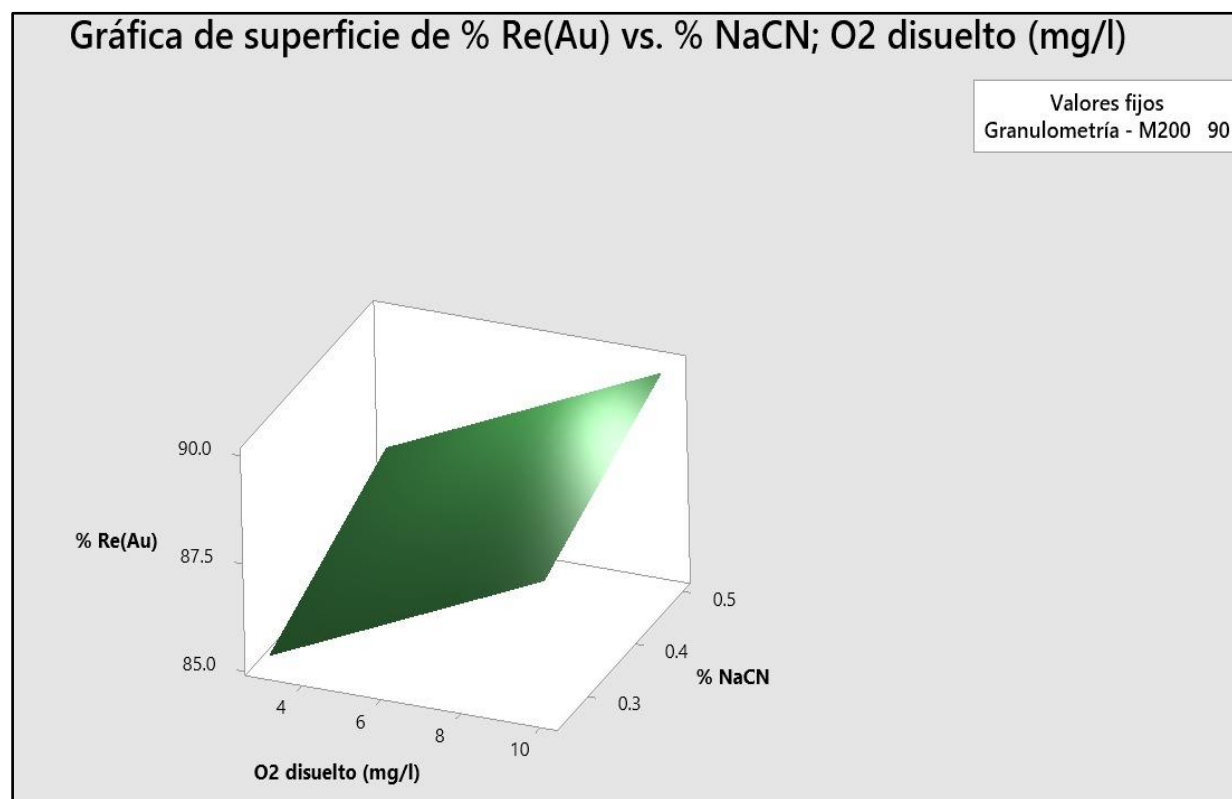
Anexo 1: Cronograma de trabajo.

Objetivos	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Recopilación de antecedente y artículos relacionados al tema.							
Pruebas de laboratorio							
Obtención de resultados y procesamiento de los datos							
Conclusiones del análisis de los datos							
Redacción del informe							

Anexo 2: Flow sheet Planta concentradora de oro



Anexo 3: Diagrama de superficie de %Re (Au) vs %NaCN; O2 disuelto



Este gráfico de superficie nos da información completa en tres dimensiones: recuperación (Au), % de NaCN y oxígeno disuelto (mg/l). A medida que aumenta el % NaCN, el % de recuperación (Au) aumenta debido a su tendencia lineal y a medida que aumenta el oxígeno disuelto (mg/l), el % de recuperación (Au) también aumenta.