



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en
la Empresa Minera Paltarumi SAC-2025**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autores

Shirley Chavez Lobato

Bryan Raul Cano Quineche

Asesor

Dr. Joaquín José Abarca Rodríguez

Huacho - Perú

2026



**JOAQUIN JOSE
ABARCA RODRIGUEZ
INGENIERO METALURGICO
Reg. CIP Nº 108833**



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL

JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Shirley Chavez Lobato	71874067	25 – 06 - 2026
Bryan Raul Cano Quineche	74395184	25 – 06 - 2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Joaquín José Abarca Rodríguez	15740291	https://orcid.org/0000-0003-1004-3824
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Alberto Irhaam Sánchez Guzman	15758117	https://orcid.org/0000-0003-1575-8466
Helen Analí Zapata Del Solar	44067559	https://orcid.org/0000-0002-5347-6155
José Alonso Toledo Sosa	80302533	https://orcid.org/0000-0002-8278-1538

2026 -015899 Cano Quineche 2026 - 015897 Chavez ...

Cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en la Empresa Minera Paltarumi SAC...

 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FIQyM - PREGRADO - 2026

 Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3549249571

Fecha de entrega

24 abr 2026, 12:42 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

24 abr 2026, 12:51 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_SHIRLEY_CHAVEZ_LOBATO_-_BRYAN_RAUL_CANO_QUINECHE.docx

Tamaño del archivo

25.6 MB

101 páginas

19.508 palabras

110.575 caracteres



Página 2 de 106 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3549249571

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

Dedicamos con mucho amor a nuestros padres que son los que nos respaldan, sostienen e hicieron posible este gran paso profesional, por confiar en nosotros en cada paso que damos e impulsarnos a ser mejores cada día, de igual manera a mi pareja por su apoyo incondicional y su compañía constante en cada uno de nuestros logros.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios, a nuestros padres y toda la familia por el apoyo incondicional en este logro y desarrollo profesional. A nuestro asesor por ser guía en todo el transcurso para el logro del título profesional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE TABLA	10
ÍNDICE DE FIGURA.....	11
ANEXO.....	13
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	17
1.2 Formulación del Problema.....	18
1.2.1 Problema General.....	18
1.2.2 Problemas Específicos.	18
1.3 Objetivos de la Investigación.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivo Especifico.....	19
1.4 Justificación de la Investigación	19
1.5 Delimitación del Estudio.....	21

CAPITULO II MARCO TEÓRICO	23
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	23
2.1.1. Investigación Internacional.....	23
2.1.2. Investigación Nacional.....	25
2.2. Bases Teóricas.	27
2.2.1. Cianuración de metales preciosos.....	27
2.2.2. Fundamentos fisicoquímicos de la cianuración	28
2.2.3. Reactivos y aditivos en cianuración.....	29
2.2.4. Inyección forzada de oxígeno en cianuración.....	31
2.2.5. Variables operativas críticas	33
2.2.6. Sistemas de adsorción por carbón en pulpa (CIL/CIP).....	35
2.2.7. Impacto ambiental y manejo de efluentes.....	37
2.3. Bases filosóficas.....	39
2.4. Definiciones conceptuales.	42
2.5. Hipótesis de la investigación.	44
2.5.1. Hipótesis general.....	44
2.5.2. Hipótesis específicas.....	44
2.6. Operacionalización de variables e indicadores.	45
CAPITULO III METODOLOGÍA	46
3.1. Diseño metodológico.	46

3.2.	Método de diseño del esquema de muestreo planta.....	47
3.3.	Población y muestra.....	49
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	50
3.5.	Técnicas para el procesamiento de la información.	50
CAPITULO IV RESULTADOS.....		51
4.1.	Analisis de Resultados	51
4.1.1.	Condiciones de investigación	51
4.1.2.	Resultados.....	56
4.2.	Contrastación de hipótesis	79
4.2.1.	Contrastación de hipótesis general.....	79
4.2.2.	Contrastación de hipótesis específico	80
CAPITULO V DISCUSIÓN.....		83
5.1.	Discusión de resultados.....	83
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		86
6.1.	Conclusiones	86
6.2.	Recomendaciones	87
CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88
7.1.	Referencias bibliográficas.....	88
Anexos		99

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Operacionalización de las variables e indicadores	45
Tabla 2 Instrumento de medición	48
Tabla 3 Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 1-26 sin forzado de oxígeno.....	52
Tabla 4 Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 27-51 sin forzado de oxígeno.....	53
Tabla 5 Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 1-26 inyección forzado de oxígeno	54
Tabla 6 Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 27-51 inyección forzado de oxígeno	55
Tabla 7 Porcentaje de extracción de oro en relación sin y con inyección forzada de oxígeno....	76
Tabla 8 Porcentaje de extracción de oro en relación sin y con inyección forzada de oxígeno.....	77
Tabla 9 Recuperación de oro y plata con inyección de oxígeno y sin inyección	78
Tabla 10 Cianuración convencional e inyección forzado de aire y la extracción de oro.....	79
Tabla 11 Contrastación de la hipótesis cianuración convencional y recuperación Au, Ag.....	80
Tabla 12 Contrastación de la recuperación de Au, Ag en relación a inyección de oxígeno forzado	81
Tabla 13 Contrastación de la diferencia entre convencional y forzada en la recuperación Au y Ag.....	82

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Diagrama de reacción anódica y catódica de oro(Yannopoulos, 2012)	31
Figura 2 Consumo de NaOH kg/t sin inyección forzada de oxígeno	56
Figura 3 Consumo de NaCN kg/t sin inyección forzada de oxígeno.....	57
Figura 4 Recuperación de oro sin inyección forzada de oxígeno	58
Figura 5 Recuperación de Au en relación de consumo de NaOH y NaCN (kg/t)	59
Figura 6 Recuperación de la plata en relación de NaCN y NAOH (kg/t).....	60
Figura 7 Consumo de NaOH kg/t con inyección forzada de oxígeno	61
Figura 8 Consumo de NaCN kg/t con inyección forzada de oxígeno.....	62
Figura 9 Concentración de oxígeno en ppm en la inyección	63
Figura 10 Caudal de inyección de oxígeno a los TK de cianuración.....	64
Figura 11 Recuperación de oro con inyección forzada de oxígeno	65
Figura 12 Recuperación de Au en relación del caudal de oxígeno (L/min) y NaCN (kg/t)	66
Figura 13 Recuperación del oro en relación de caudal (L/min) y NaOH (kg/t)	67
Figura 14 Recuperación de oro en relación del caudal (L/min) y concentración (ppm) de oxígeno	68
Figura 15 Porcentaje de extracción de oro en relación a la dosis de NaOH y NaCN (kg/t).....	69
Figura 16 Extracción de la plata concentración del oxígeno ppm y el caudal L/min.....	70
Figura 17 Extracción de la plata en relación de la concentración del oxígeno ppm y NaOH (kg/t)	71
Figura 18 Porcentaje de recuperación de Ag en relación a NaCN (kg/t) y concentración de oxígeno.....	72
Figura 19 Porcentaje de extracción de la plata en relación de NaOH y NaCN (kg/t)	73

Figura 20 Cura de la recuperación de oro con y sin inyección de oxígeno	74
Figura 21 Recuperación de la plata con inyección de oxígeno forzado y sin inyección	75

ANEXO

Anexo 1 localización.....	100
Anexo 2 Matriz de consistencia.....	101
Anexo 3 Campaña del proceso de cianuración de minerales.....	102
Anexo 4 Oro y plata en el carbón en los tanques.....	103
Anexo 5 Control de proceso de la cianuración de Au y Ag.....	104

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la cianuración convencional y la cianuración con inyección forzada de oxígeno para determinar su influencia en la eficiencia de extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC – 2025, desarrollada bajo un enfoque aplicado, no experimental, de tipo transversal y cuantitativo. El estudio se realizó a nivel planta, analizando los efectos de la oxigenación forzada en comparación con el sistema tradicional de cianuración. Se midieron variables operativas como el caudal de oxígeno (534–998 L/min), la concentración de oxígeno disuelto (1.47–40.60 ppm), el consumo de NaOH (2.5–5.5 kg/t) y NaCN (3.3–7.9 kg/t), manteniendo un pH entre 10.2 y 10.8 y una densidad de pulpa constante. La información fue recolectada mediante observación directa, reportes de control metalúrgico y registros de planta, analizándose mediante métodos estadísticos descriptivos y contrastación de hipótesis. Los resultados mostraron que la inyección forzada de oxígeno incrementó la recuperación promedio de oro de 88.88 % a 90.27 % y de plata de 62.99 % a 77.84 %, reflejando una mejora significativa en la cinética de disolución y en la estabilidad del proceso. El aporte de oxígeno adicional favoreció la formación de los complejos $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, optimizando la reacción de lixiviación y reduciendo la variabilidad operacional. En conclusión, la cianuración con oxigenación forzada resultó ser más eficiente que el método convencional, validando la hipótesis general y específicas al demostrar que la presencia controlada de oxígeno acelera la disolución de los metales preciosos, mejora la eficiencia metalúrgica y representa una alternativa técnica aplicada, viable y sostenible para la optimización de la recuperación de oro y plata en la empresa PALTARUMI SAC – 2025.

Palabra clave: Cianuración, oxigenación forzada, recuperación de oro, recuperación de plata.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate conventional cyanidation and cyanidation with forced oxygen injection to determine their influence on the efficiency of gold and silver extraction at the PALTARUMI SAC – 2025 mining company, developed under an applied, non-experimental, cross-sectional, and quantitative approach. The study was conducted at the plant level, analyzing the effects of forced oxygenation compared to the traditional cyanidation system. Operational variables such as oxygen flow rate (534–998 L/min), dissolved oxygen concentration (1.47–40.60 ppm), NaOH consumption (2.5–5.5 kg/t), and NaCN consumption (3.3–7.9 kg/t) were measured, maintaining a pH between 10.2 and 10.8 and a constant pulp density. The information was collected through direct observation, metallurgical control reports, and plant records, and analyzed using descriptive statistical methods and hypothesis testing. The results showed that forced oxygen injection increased the average recovery of gold from 88.88% to 90.27% and silver from 62.99% to 77.84%, reflecting a significant improvement in dissolution kinetics and process stability. The addition of oxygen favored the formation of $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ and $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, optimizing the leaching reaction and reducing operational variability. In conclusion, cyanidation with forced oxygenation proved to be more efficient than the conventional method, validating the general and specific hypotheses by demonstrating that the controlled presence of oxygen accelerates the dissolution of precious metals, improves metallurgical efficiency, and represents an applied, viable, and sustainable technical alternative for optimizing gold and silver recovery at PALTARUMI SAC – 2025.

Keyword: Cyanidation, forced oxygenation, gold recovery, silver recovery.

INTRODUCCIÓN

La cianuración es uno de los procesos hidrometalúrgicos más utilizados en la industria minera para la extracción de oro y plata debido a su alta eficiencia, simplicidad operativa y capacidad de recuperación incluso en minerales de baja ley. Sin embargo, su rendimiento depende directamente de factores como la concentración de oxígeno disuelto, el pH, la dosificación de reactivos y las condiciones de agitación, los cuales influyen en la cinética de disolución de los metales preciosos. En muchas operaciones, la falta de oxígeno adecuado en el medio de lixiviación genera una pasivación de la superficie metálica y una disminución en la velocidad de reacción, afectando la recuperación global. Frente a esta limitación, la inyección forzada de oxígeno surge como una alternativa tecnológica viable que incrementa la disponibilidad de oxígeno disuelto, favoreciendo la formación de los complejos aurocianurados ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$) y argentocianurados ($\text{Ag}(\text{CN})_2^-$), mejorando así la eficiencia del proceso.

En el contexto nacional, la empresa minera PALTARUMI SAC, dedicada al procesamiento de minerales auríferos y argentíferos, busca optimizar sus parámetros metalúrgicos mediante la aplicación de sistemas de cianuración con oxigenación forzada, evaluando sus efectos frente al método convencional. Este estudio se enmarca en la necesidad de incrementar la recuperación metalúrgica y reducir el consumo de reactivos, garantizando al mismo tiempo un proceso más estable y sostenible.

Por ello, la investigación tiene como propósito evaluar la cianuración convencional y la cianuración con inyección forzada de oxígeno para determinar su influencia en la eficiencia de extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC – 2025, proporcionando resultados que contribuyan al mejoramiento de la eficiencia operativa, la productividad metalúrgica y la sostenibilidad del proceso en la industria minera peruana.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática.

La cianuración de minerales auríferos es uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para la extracción de oro y plata, especialmente en América Latina, donde este proceso ha aumentado en respuesta al creciente precio del oro desde 2003 (Gutarra & Lovera, 2023). Sin embargo, la cianuración plantea problemas ambientales y de salud pública debido a la toxicidad del cianuro, lo que ha llevado a la investigación de alternativas más sostenibles y eficientes, como la inyección forzada de oxígeno (Valarezo et al., 2024). Las críticas a la minería tradicional también reflejan la necesidad de prácticas más responsables y sostenibles en la región, impulsadas por el agotamiento de minerales más fácilmente recuperables y la llegada de minerales refractarios (Gutarra & Lovera, 2023); (Escalante & Lovera, 2023).

A nivel regional, en Perú, la industria minera enfrenta retos significativos debido a la variabilidad de los recursos minerales y a la creciente complejidad de los depósitos de minerales auríferos. La caracterización mineralógica se ha vuelto crucial para la optimización de procesos como la cianuración y la flotación (Espinoza et al., 2021). La investigación sobre modelos geometalúrgicos y la integración de datos geológicos, mineralógicos y metalúrgicos es escasa, lo cual es un desafío que debe abordarse para mejorar la recuperación de oro (Ramos & Calderón, 2022).

Localmente, en el contexto de la empresa minera Paltarumi SAC, es necesario realizar estudios específicos sobre las características del mineral tratado, incluyendo su mineralogía y comportamiento durante la cianuración (Estela, 2023). La implementación de procesos como la inyección forzada de oxígeno ha mostrado mejorar la cinética de lixiviación, aumentando las

recuperaciones de metales preciosos, lo que es fundamental para garantizar la viabilidad económica de la operación minera(Valarezo et al., 2024).

Por lo que, es importante reforzar que las prácticas de minería responsables son esenciales no solo para maximizar la recuperación de recursos, sino también para mitigar los impactos ambientales y fomentar relaciones armoniosas con las comunidades locales. Esto implica la adopción de tecnologías más limpias, así como la implementación de políticas que aseguren que los beneficios económicos derivados de la minería se distribuyan equitativamente, contribuyendo así al desarrollo sostenible en la región de Paltarumi(Maldonado et al., 2024).

En relación a lo expuesto y para mejorar la recuperación del oro y la plata es necesario realizar el estudio sobre la comparación a nivel planta de la cianuración de minerales por el método convencional y con la inyección forzada de oxígeno para ver cuál de los métodos es lo más conveniente.

1.2 Formulación del Problema.

1.2.1 Problema General.

¿En qué medida la cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno tendrá efecto en la extracción de oro y plata en la empresa minera Paltarumi SAC-2025?

1.2.2 Problemas Específicos.

- ¿Cómo la cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?
- ¿En qué medida la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración afecta en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?

- ¿En qué medida la cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado permitirá analizar la diferencia existente en la recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General.

Evaluar la cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno para ver la extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025

1.3.2 Objetivo Especifico

- Analizar en qué medida la cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- Evaluar en qué medida la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- Comparar la cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado para identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.

1.4 Justificación de la Investigación

Desde la perspectiva teórica, la cianuración es uno de los procesos más utilizados en la metalurgia extractiva para recuperar oro y plata, especialmente de minerales de baja ley. Sin embargo, su eficiencia depende de múltiples factores, entre ellos la disponibilidad de oxígeno disuelto. La teoría de la cinética de disolución del oro, basada en el modelo de Elsner, establece que el oxígeno es reactivo esencial en la formación de complejos de cianuro. La incorporación de oxígeno forzado permite acelerar la velocidad de reacción, optimizando así la recuperación

metálica. Este estudio permite contrastar la cianuración convencional frente a una técnica modificada con respaldo teórico en la termodinámica y cinética de lixiviación.

Desde un enfoque metodológico, esta investigación adopta un diseño experimental que permite el control y modificación de variables críticas como el flujo de oxígeno, tiempo de residencia y concentración de cianuro. Este diseño permite evaluar con precisión el impacto de la inyección de oxígeno en comparación con el método convencional. Además, se aplicarán análisis estadísticos rigurosos para validar los resultados, lo cual fortalece la validez interna y la replicabilidad del estudio en otros contextos mineros.

Técnicamente, la investigación busca demostrar mejoras operativas en el proceso de cianuración mediante el uso de tecnologías relativamente accesibles, como la inyección de oxígeno a presión controlada. Esta innovación puede representar una mejora significativa en la cinética de disolución de metales preciosos, reduciendo tiempos de lixiviación, consumo de reactivos y aumentando la eficiencia global del proceso, sin la necesidad de grandes inversiones estructurales.

En lo social, mejora en los procesos de recuperación de oro y plata contribuye directamente al aumento de la productividad y rentabilidad de la empresa minera, lo que puede traducirse en una mayor estabilidad laboral para los trabajadores y beneficios indirectos para la comunidad local. Además, la optimización tecnológica promueve una minería más responsable, que puede servir como modelo para otras unidades productivas en el país.

En el ambiental el proceso de cianuración es altamente sensible desde el punto de vista ambiental, especialmente por los riesgos asociados al uso del cianuro. Al mejorar la eficiencia del proceso mediante la inyección de oxígeno, es posible reducir el tiempo de exposición de los materiales al cianuro y minimizar la cantidad de reactivo utilizado. Esto contribuye a una menor

generación de efluentes contaminantes, menor riesgo de filtraciones y un manejo más sustentable de los residuos, alineándose con normativas ambientales nacionales (D.S. N.º 010-2010-MINAM) e internacionales.

Desde la perspectiva económica, una mayor recuperación de oro y plata implica un incremento en los ingresos por ventas, mejorando la rentabilidad del proceso extractivo. Además, al disminuir el consumo de cianuro y reducir el tiempo del proceso, se genera un ahorro operativo significativo. La inversión en un sistema de oxigenación forzada resulta rentable a mediano plazo por el incremento del retorno de inversión (ROI) y mejora de los márgenes de beneficio.

1.5 Delimitación del Estudio

La investigación se desarrollará en la planta de procesamiento de Paltarumi S.A.C. se encuentra en el distrito de Paramonga, provincia de Barranca, región Lima, Perú, cerca de la frontera con el departamento de Áncash. Esta ubicación estratégica en el desierto costero peruano le permite operar en una zona con condiciones climáticas favorables para la actividad minera.

Las coordenadas UTM de la planta son: Zona 18 Sur, Este (Easting) 187,973 metros, Norte (Northing) 8,821,887 metros, con una altitud aproximada de 15 metros sobre el nivel del mar. El clima en la región es semiárido, con temperaturas máximas promedio de 22 °C y mínimas de 15 °C durante el mes de mayo. La humedad relativa se mantiene elevada, alrededor del 81%. Estas condiciones climáticas, junto con la proximidad al océano Pacífico, favorecen las operaciones industriales y agrícolas en la zona.

La investigación titulada “Cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en la empresa minera Paltarumi SAC – 2025” se desarrollará en un

periodo comprendido entre marzo de 2025 y octubre de 2025. Este lapso de siete meses permitirá una planificación y ejecución detallada de las distintas fases del estudio, asegurando la obtención de resultados representativos y confiables.

Durante los primeros meses, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente y la recopilación de datos preliminares sobre los procesos actuales de cianuración en la planta de Paltarumi SAC. Posteriormente, se diseñarán y ejecutarán experimentos comparativos entre la cianuración convencional y la cianuración con inyección forzada de oxígeno, evaluando variables como la eficiencia de extracción, el consumo de reactivos y los tiempos de proceso. La fase final incluirá el análisis de los datos obtenidos, la elaboración de conclusiones y recomendaciones, y la redacción del informe de tesis.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Investigación Internacional.

Valarezo et al. (2024) en su publicación sobre los “Reactivos Usados para Mejorar la Lixiviación del Oro con Cianuro: Una Revisión”, se encuentra publicado en la revista ciencia latina, siendo un estudio bibliográfico orientado a optimizar la lixiviación de oro y plata con cianuro, se revisaron en buscadores académicos los efectos de añadir peróxido de hidrógeno (H_2O_2), nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$) y glicina durante el proceso hidrometalúrgico; tras triturar el mineral y lixiviarlo en pilas o tanques con solución alcalina de cianuro, se incorporaron dosis controladas de estos reactivos, logrando que H_2O_2 elevara la recuperación de oro hasta en un 12 %, $Pb(NO_3)_2$ evitara la pasivación de sulfuros con un incremento del 8 %, y la glicina redujera el consumo de cianuro en un 15% sin perder rendimiento; en consecuencia, su uso conjunto demuestra gran potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la cianuración, recomendándose validaciones piloto antes de su escala industrial.

Nicol et al. (2023) en su artículo “El papel de los oxidantes en la cianuración intensiva del oro”, encontrándose publicado en la revista de papers ssrn, es una investigación experimental de carácter electroquímico sobre la cianuración intensiva de concentrados de oro por gravedad se evaluó el comportamiento del m-nitrobencenosulfonato de sodio (NBS) como oxidante complementario al oxígeno disuelto; mediante técnicas de potencial mixto, polarización lineal calibrada y una titulación adaptada para determinar NBS, se midió la velocidad de disolución del oro puro en soluciones de cianuro, observando pasivación anódica por encima de $-0,35$ V, reducción de oxígeno en dos etapas con peróxido como intermedio y reducción catódica de NBS

en la misma región de potencial; los resultados revelaron que la reacción es de primer orden respecto a la concentración de NBS, prácticamente independiente del pH, con una estequiometría de seis moles de oro disueltos por mol de NBS (produciéndose amina como producto final) y que la velocidad de disolución aumenta linealmente con la concentración de NBS, siendo a 0,5 g/L comparable a la de soluciones oxigenadas; se concluye que el NBS actúa eficazmente como oxidante alternativo al oxígeno, que el modelo de potencial mixto describe acertadamente su mecanismo y que el método de titulación desarrollado permite un control sencillo de su concentración en procesos industriales.

Díaz et al. (2024) en su artículo denominado “Biooxidación indirecta: Tratamiento de sulfuros de oro y plata refractarios”, se encuentra publicado en la revista LACCEI, en una investigación experimental aplicada a nivel planta se evaluó la recuperación de oro y plata de un mineral sulfuro refractario de Gran Chimú (La Libertad, Perú) mediante un proceso de dos etapas: biooxidación indirecta con *Thiobacillus ferrooxidans* cultivado en agua ácida local y sales 9K para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+} , seguida de cianuración convencional con NaCN y cal viva durante 51 horas a $\text{pH} \approx 10,5$ y temperatura ambiente; se variaron la concentración de sal de plata (0, 0,75 y 1,5 mg/g), el tamaño de partícula (80 % <100, <200 y <325 mesh) y la temperatura de biooxidación (25, 45 y 65 °C), empleando ensayo de fuego para cuantificación seca; los ensayos de cianuración previa mostraron 44,61 % de extracción de Au y 48,98 % de Ag (80 % <325 mesh), mientras que la combinación de biooxidación y cianuración alcanzó un máximo de 61,44 % de Au (80 % <325 mesh, 65 °C, 0,0 mg/g) y 94,24 % de Ag (80 % <200 mesh, 65 °C, 0,75 mg/g), con mínimos de 35,98 % de Au y 41,44 % de Ag (80 % <100 mesh, 45 °C y 25 °C respectivamente); se concluye que el pretratamiento biológico es crucial para liberar los metales del mineral, mejorando significativamente la eficiencia de la cianuración.

El estudio es viable al fundamentarse en bibliografía diversa; requiere recursos para pruebas piloto, equipamiento electroquímico y cultivos microbianos, pero aprovecha reactivos accesibles y procesos estándar. La escalabilidad dependerá de optimizar condiciones operativas y control de costos ambientales adicionales adecuados.

2.1.2. Investigación Nacional.

Calderón & Fernández (2024) es su estudio realizada sobre la “Recuperación de oro y plata con cianuración de mineral sulfurado, con pretratamiento de diferentes concentraciones de H_2O_2 ”, publicado en la página de la prestigiosa Universidad Nacional de Trujillo, el estudio es de tipo de investigación experimental; se aplicó el proceso PERCIAN a un mineral sulfurado mediante homogenización a malla -10 (2 mm), tratamiento ácido con H_2O_2 al 40 %, 50 % y 60 % en volumen durante 10 días, seguido de lavado por 2 días, aglomerado con 0,03 g de cemento/kg, alcalinización con 5,2 g de cal/kg y lixiviación en columnas de poliestireno ($\varnothing$ 15,8 cm $\times$ 89 cm) con 1 000 ppm de cianuro a 10 L/h·m²; Resultados: la ley de cabeza fue 38,82 g Au/t y 692,33 g Ag/t, la muestra en blanco recuperó 31,15 % Au y 18,20 % Ag, mientras que los pretratamientos con H_2O_2 al 40 % alcanzaron 49,77 % Au y 27,31 % Ag, al 50 % 51,26 % Au y 32,47 % Ag, y al 60 % 56,44 % Au y 41,26 % Ag (análisis por absorción atómica, muestreos cada 10 días durante 60 días); Conclusiones: el pretratamiento con H_2O_2 al 60 % en volumen mejora significativamente la recuperación de oro y plata mediante cianuración.

Ordoñez & Alarcón (2024) en su tesis de investigación “Evaluación del proceso de cianuración de la extracción de oro a nivel de planta”, se encuentra publicado en la página de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, en una investigación no experimental, aplicada y cuantitativa realizada a nivel planta para evaluar el proceso de cianuración en la extracción de oro, se analizó el mineral con una ley de cabeza promedio de 19,71 g/t, densidad

de pulpa de 1 301,61 g/L y 85,637 % pasando –200 malla; tras la lixiviación se obtuvo en el efluente 0,04382 g/m³ de Au y en el relave 0,6882 g/t, con una recuperación global de 96,421 %; además, el monitoreo de los parámetros de control reveló oscilaciones de 2,15 % en ley de cabeza, 6,45 % en densidad de pulpa, 3,23 % en granulometría y 2,15 % en recuperación; de ello se concluye que la ley de cabeza y el porcentaje de pasa malla –200 son variables que influyen significativamente en la eficiencia de recuperación de oro, mientras que la densidad de pulpa no muestra un impacto apreciable y que las variables de control requieren mayor estabilización operativa.

Gonzales & Bravo (2021) en su trabajo sobre “Influencia del oxígeno en la cianuración de minerales auríferos con carbón en pulpa para la extracción de oro”, se encuentra en la página institucional de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, es una investigación experimental aplicada a nivel industrial sobre la “Influencia del oxígeno en la cianuración de minerales auríferos con carbón en pulpa para la extracción de oro”, se trabajó con densidad de pulpa de 1,35 t/m³ y 300 ppm de cianuro de sodio, realizando molienda para determinar la distribución del oro por malla e inyectando oxígeno en los tanques de CIL para evaluar su efecto; los resultados mostraron que al 82,71 % pasante a malla 400 se concentró el 83,59 % del oro (ley de cabeza 4,1 g/t) y en 30 min al 97,67 % pasante a malla 325 el 97,22 % del oro, mientras que sin oxígeno la recuperación máxima fue 83,71 % (ley 2,7 g/t; 2,21 g/m³ de Au en solución), y con inyección de aire a 6,68 mg/L se alcanzó 97,80 % y con 7,30 mg/L de oxígeno 99,10 %; los análisis estadísticos revelaron que el oxígeno y la ley de cabeza influyen significativamente en la concentración y recuperación de oro (p calculada $< 0,05$ y Pareto $A > 2,14$), mientras que la liberación no mostró efecto significativo ($p > 0,05$), concluyéndose que la inyección de oxígeno mejora de manera notable la eficiencia del proceso.

El estudio es viable al combinar técnicas probadas y reactivos accesibles, aprovechando infraestructuras existentes y metodologías estándar; sin embargo, demanda equipamiento especializado, control riguroso de parámetros operativos y evaluación de escalado piloto para garantizar replicabilidad y sostenibilidad ambiental y económica.

2.2. Bases Teóricas.

2.2.1. Cianuración de metales preciosos.

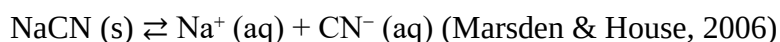
La cianuración Desde el descubrimiento por MacArthur y Forrest en 1887 de la capacidad del cianuro de sodio para disolver el oro de sus minerales, la cianuración ha evolucionado desde lixiviaciones en pilas simples hasta complejos circuitos en tanques con sistemas de adsorción por carbón (CIL/CIP) y CIPRIN (precipitación reversible). Durante el siglo XX, se optimizó el control de pH, la dosificación de reactivos y el diseño de equipos, como difusores de oxígeno y columnas de carbón, mejorando rendimientos y reduciendo costos (Habashi, 2017; Marsden & House, 2006). La cianuración es responsable de más del 90 % de la producción mundial de oro y plata, procesando minerales de baja y alta ley con flexibilidad operativa. Actualmente, se incorporan inyección forzada de oxígeno para acelerar la cinética, recuperación por carbón activado para maximizar extracción y circuitos de reciclaje de cianuro para mitigar impactos ambientales. Estas prácticas cumplen con normativas como ISO 14001 y el Convenio de Minamata sobre mercurio (Wills et al., 2006). Importancia y aplicaciones actuales en la industria minera La cianuración sigue siendo el método más empleado para la extracción de oro y plata, representando más del 90 % de la producción mundial de oro. Su versatilidad permite procesar desde minerales de baja ley hasta concentrados de alta pureza. En la actualidad, se aplican sistemas de inyección forzada de oxígeno y recuperación por carbón activado para maximizar la disolución metálica, además de rigurosos controles ambientales y

circuitos de reciclaje de cianuro que cumplen normativas internacionales, garantizando eficiencia y sostenibilidad.

2.2.2. Fundamentos fisicoquímicos de la cianuración

2.2.2.1. Propiedades del cianuro de sodio y su disociación

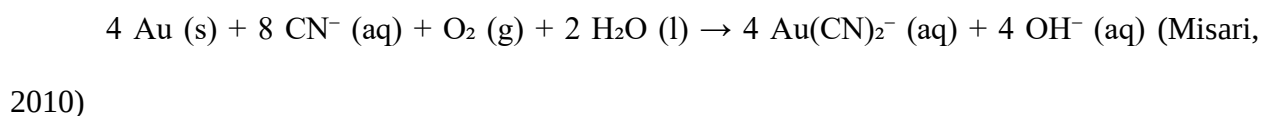
El cianuro de sodio (NaCN) es el reactivo más utilizado en la lixiviación de oro y plata debido a su alta solubilidad en agua (48 g/100 mL a 25 °C) y su contenido de cianuro disponible (53,1 %) (Marsden & House, 2006). Al disolverse, NaCN se ioniza completamente según la ecuación:



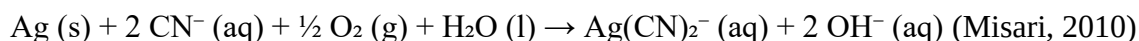
En solución acuosa a pH alcalino (generalmente > 10,5), el ión CN^- es estable y evita la formación de HCN gaseoso, cuyo pK_a es 9,21 ($\text{HCN} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CN}^-$). Mantener pH > 10,5 con hidróxido de calcio o sodio es esencial para minimizar pérdidas de cianuro por volatilización y para optimizar la reacción de lixiviación.

2.2.2.2. Formación de complejos cianurados de Au y Ag

El mecanismo básico de disolución del oro en solución de cianuro y oxígeno se describe mediante la ecuación de Elsner (1846):



El producto soluble principal es el complejo dicianuro de oro(I), $[\text{Au (CN)}_2]^-$, estabilizado en medio alcalino. De forma análoga, la plata se disuelve conforme a:



Estos complejos son muy estables y su formación depende directamente de la concentración de CN^- y de la disponibilidad de oxígeno disuelto en la pulpa (Yannopoulos, 2012).

2.2.2.3. Mecanismos de disolución y pasivación

La velocidad de disolución del oro en soluciones cianuradas es controlada principalmente por la reacción de superficie entre el metal, el cianuro y el oxígeno, con un orden de reacción aproximado de 2,7 respecto al CN^- a bajas concentraciones; a concentraciones elevadas, la velocidad alcanza un límite independiente de la agitación (Baharun et al., 2020). El modelo de reacción de superficie considera la formación intermedia de complejos Au(I)-OH-CN en la interfase sólidos/líquido (Baharun et al., 2020).

La pasivación puede ocurrir cuando minerales sulfurados acompañantes, como pirita o estibnita, liberan iones S^{2-} que interactúan con la superficie del oro para formar películas de sulfuro que obstaculizan la adsorción de CN^- y O_2 , reduciendo la eficiencia de lixiviación (Guo et al., 2005). La adición de oxidantes (por ejemplo, peróxido de hidrógeno) o de iones plomo (II) puede mitigar este efecto al mantener limpia la superficie metálica.

2.2.3. Reactivos y aditivos en cianuración.

2.2.3.1. Agentes oxidantes

El oxígeno disuelto es el oxidante primario en la cianuración de oro y plata, pues impulsa la reacción de Elsner y permite la formación de complejos solubles de Au(I) y Ag(I) . Sin embargo, en pulpas de alta densidad o en minerales refractarios, la aportación de oxígeno puede quedar limitada, por lo que se emplean peróxidos (H_2O_2) como fuente suplementaria de oxígeno reactivo sin descomponer el cianuro (Locosch & Knorre, 1988). Asimismo, el nitrobenzenosulfonato sódico (NBS) actúa como oxidante secundario, manteniendo el potencial

redox óptimo y mejorando la cinética de disolución en concentrados de gravedad sciencedirect.com.

2.2.3.2. Modificadores y estabilizadores de sulfuros

En minerales polimetálicos, los sulfuros acompañantes (p. ej., pirita, estibnita) pueden pasivar la superficie del oro mediante la formación de películas de sulfuro. La adición de nitrato de plomo(II) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ promueve la formación de óxidos de plomo en la interfase sólido-líquido, que compiten con el sulfuro y liberan la superficie metálica para la adsorción de CN^- y O_2 (Oraby et al., 2019). Por su parte, la glicina actúa como ligando secundario y agente amortiguador, estabilizando los complejos cianurados y reduciendo la degradación del CN^- en medio alcalino, lo que incrementa la recuperación de Au y Ag en minerales oxidativos y mixtos (Oraby et al., 2020)

2.2.3.3. Espumantes y agentes de absorción en carbón en pulpa

En los circuitos de Carbón en Pulpa (CIP), tras la disolución de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, el carbón activado adsorbe los complejos metálicos por difusión y unión física en sus poros, logrando concentraciones $> 90\%$ en una sola etapa de contacto (Staunton, 2016). En la etapa de flotación previa (cuando se implementa un proceso combinado de lixiviación-flotación), se emplean espumantes como aceites de pino (pine oil) y MIBC (methyl isobutyl carbinol) para generar burbujas estables de tamaño uniforme, que mejoran la separación de partículas hidrofóbicas y favorecen la recuperación de sulfuros antes del cianurado (Khoshdast & Sam, 2011).

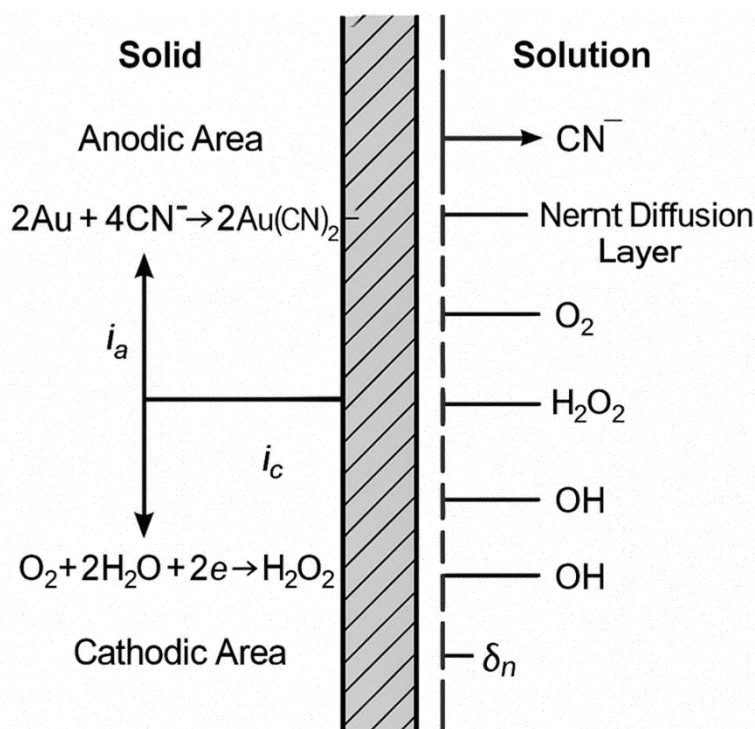
2.2.4. Inyección forzada de oxígeno en cianuración

2.2.4.1. Rol del oxígeno en la cinética de disolución

El oxígeno disuelto es el agente oxidante clave que impulsa la reacción de Elsner, y determina la velocidad de disolución de Au y Ag en medio cianurado. A elevadas concentraciones de O_2 disuelto, la cinética alcanza tasas máximas, mientras que con deficiencias de oxígeno la velocidad decae drásticamente. Los estudios demuestran que la velocidad de disolución presenta un orden de reacción cercano a 1 respecto al O_2 y que duplicar la concentración disuelta puede reducir el tiempo de lixiviación en un 50 % (Kondos et al., 1996; Marsden, 1987).

Figura 1

Diagrama de reacción anódica y catódica de oro (Yannopoulos, 2012)



2.2.4.2. Métodos de inyección.

Los sistemas de inyección se realizan por burbujeo, difusores, inyección a presión que consiste en el burbujeo simple: cañerías perforadas que liberan gas a presión baja, formando

burbujas de 2–5 mm. Difusores de disco o anillo: generan burbujas más finas (0,5–2 mm), incrementando la superficie de contacto y la transferencia de masa. La inyección a presión (Venturi o spargers de alta velocidad): emplean inyectoros Venturi para aspirar oxígeno puro y atomizarlo en microburbujas, lo que permite alcanzar mayores coeficientes k_La sin que aumente significativamente el consumo de energía (Eriez, 2020; Ozone Solutions, 2021).

2.2.4.3. Transferencia de masa y eficiencia de oxigenación

La transferencia de masa de oxígeno en la cianuración forzada se cuantifica mediante el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (kLa), definido por la ecuación diferencial:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C)$$

Donde C^* es la concentración de saturación del oxígeno en la solución y C la concentración real disuelta. El valor de kLa depende de factores operativos críticos como la velocidad de agitación, el caudal de gas, la profundidad de inyección y el tamaño de las burbujas generadas por los difusores. En sistemas de inyección a presión, la reducción del diámetro de las boquillas y el aumento de la presión de alimentación incrementan la superficie específica de contacto gas-líquido, mejorando el kLa y acelerando la cinética de disolución del oxígeno (Wills et al., 2006).

La eficiencia de oxigenación se evalúa mediante el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, k_La (h^{-1}). Valores típicos en tanques CIP oscilan entre 20 y 40 h^{-1} , dependiendo de la configuración del sparger, densidad de pulpa y uso de espumantes que estabilizan las burbujas. La optimización de k_La reduce tiempos de residencia y consumo de reactivos, mejorando la recuperación metalúrgica (Arshad, 2024; McLaughlin et al., 1993).

2.2.5. Variables operativas críticas

2.2.5.1. pH y potencial redox (Eh)

El pH y el potencial redox (Eh) son factores clave en procesos de flotación y lixiviación, ya que influyen en las reacciones químicas en la superficie de los minerales. Por ejemplo, el control del potencial redox (Eh) es crítico durante la flotación de minerales sulfurados, ya que afecta las reacciones en la superficie de los minerales (Chimonyo et al., 2015). Además, el potencial redox de la pulpa es un parámetro electroquímico importante que puede correlacionarse con la estabilidad de compuestos metálicos, como se analiza en diagramas de Eh-pH (diagramas de Pourbaix) (Fierro et al., 2022). El pH y el Eh también controlan la flotación y depresión de minerales como la arsenopirita, donde su interacción determina la eficiencia del proceso (Lopez-Valdivieso et al., 2006).

El pH mide la concentración de iones H^+ en la pulpa, determinando la acidez o alcalinidad del medio; influye en la especiación del cianuro, la formación de complejos $Au(CN)_2^-$ y en la estabilidad de los aditivos, optimizándose habitualmente entre 10,0 y 11,5 en cianuración (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Potencial redox (Eh), cuantifica el estado de oxidación-reducción de la pulpa, reflejando la capacidad del medio para aceptar o donar electrones; controla la presencia de cianuro libre y complejos cianurados, debiéndose mantener típicamente entre +550 y +700 mV para maximizar la disolución de metales preciosos (Marsden & House, 2006).

2.2.5.2. Densidad de pulpa y relación sólido-líquido

La densidad de pulpa (relación sólido-líquido) es un parámetro fundamental en procesos como la bioleaching, donde el equilibrio entre la solución y los sólidos afecta la recuperación de metales. Por ejemplo, estudios han mostrado que una relación sólido-líquido del 5% (5% de

sólido/liquido) maximiza la recuperación de metales como níquel (Ni) y aluminio (Al)(Petrus et al., 2018). La densidad de pulpa también influye en la cinética de las reacciones, ya que una mayor concentración de sólidos puede limitar la difusión de reactivos o la transferencia de masa(Gu et al., 2018). En los tanques agitados de cianuración, la densidad de pulpa óptima se sitúa entre el 25 % y el 35 % de sólidos en peso, lo que asegura una suspensión adecuada de las partículas y una buena transferencia de masa sin incrementar en exceso la viscosidad, mientras que la relación sólido-líquido recomendada es de 1:2 a 1:4 (t/m³), equilibrio que maximiza la eficiencia de extracción y controla el consumo de reactivos(Batista & Agapito, 2023).

2.2.5.3. *Tamaño de partícula y tiempo de residencia*

El tamaño de partícula es un factor predeterminante en el proceso de lixiviación y flotación, ya que afecta la superficie de reacción y la accesibilidad de los reactivos. Por otro lado, el tiempo de residencia (tiempo que las partículas permanecen en el sistema) influye en la completitud de las reacciones, pero no se encuentra información específica en los documentos revisados. El tamaño de partícula en la cianuración se suele controlar moliendo el mineral hasta un pasa-malla de 75–106 μm (80 % < 75 μm) para maximizar la superficie de reacción y la eficiencia de disolución del oro y la plata, mientras que el tiempo de residencia en los tanques de cianuración varía típicamente entre 24 y 72 horas, ajustándose según la ley del mineral, su mineralogía y la cinética de extracción deseada(Marsden & House, 2006; Misari, 2010).

2.2.5.4. *Temperatura y agitación*

Los recursos consultados no abordan directamente la temperatura o la agitación como variables operativas críticas. Sin embargo, en contextos industriales, la temperatura afecta la cinética de las reacciones químicas, mientras que la agitación garantiza una mezcla homogénea y

mejora la transferencia de masa. Estos factores requieren investigación adicional para su validación en los procesos descritos.

La temperatura del pulpa en cianuración suele mantenerse entre 25 °C y 45 °C para optimizar la cinética de disolución del oro y plata, mejorar la solubilidad del oxígeno disuelto y estabilizar los complejos cianurados, sin favorecer la volatilización del cianuro libre (Marsden & House, 2006) (Marsden & House, 2006).

La agitación en los tanques de cianuración se realiza típicamente a velocidades de 60–200 rpm, con una relación diámetro de impulsor/diámetro de tanque de 0,3–0,5, lo que produce una potencia específica de 0,5–1,5 kW/m³ y una velocidad de punta de impulsor de 2–4 m/s, garantizando una turbulencia adecuada para la dispersión de burbujas y la transferencia de masa sin dañar las partículas; el tiempo de residencia agitado suele oscilar entre 24 y 72 horas según la liberación y la ley del mineral (Habashi, 2017; Marsden & House, 2006).

2.2.6. Sistemas de adsorción por carbón en pulpa (CIL/CIP)

Los sistemas de adsorción por carbón en pulpa, conocidos como Carbon-in-Leach (CIL) y Carbon-in-Pulp (CIP), son técnicas fundamentales en el procesamiento de minerales para la recuperación de metales preciosos como oro (Au) y plata (Ag). Estos métodos implican la adsorción de metales en una pulpa de mineral que contiene carbón activado, logrando la captura eficiente de estos elementos en soluciones diluidas. La adición de carbón activado al proceso de lixiviación permite que los metales disueltos sean recuperados eficientemente a través de interacciones fisicoquímicas (Villalobos et al., 2023).

2.2.6.1. Principios de adsorción y desorción de Au y Ag

La adsorción se define como el proceso mediante el cual las moléculas de un sólido (adsorbato) se adhieren a la superficie de un sólido (adsorbente) (Arias et al., 2009). En el caso

de Au y Ag, esta interacción es particularmente fuerte, siendo promovida por las características específicas del carbón activado, como su alta área superficial y la porosidad, que facilitan la intrusión de los iones metálicos en su estructura(Pérez et al., 2021). Se ha demostrado que el pH de la solución, la temperatura y la concentración inicial de los metales juegan un papel crucial en la eficacia de la adsorción(Jiménez et al., 2017). Por ejemplo, el estudio de Jiménez et al. revela que condiciones óptimas de pH y temperatura pueden aumentar significativamente la capacidad de adsorción, lo que resulta en altos porcentajes de recuperación (Arias et al., 2009).

Una fase crítica del proceso es la desorción, que permite la recuperación del metal adsorbido para su posterior refinamiento y purificación. Este proceso debe manejarse cuidadosamente, ya que el equilibrio entre adsorción y desorción afecta directamente la eficiencia del sistema (Sá & Sadoyama, 2023); y puede estar influenciado por la naturaleza química del carbón activado y los metales en cuestión(Villalobos et al., 2023). La desorción efectiva implica el uso de soluciones eluyentes adecuadas que faciliten la liberación de metales sin comprometer la integridad del adsorbente.

2.2.6.2. Diseño de celdas y columnas de carbón en pulpa

El diseño de los sistemas CIL y CIP requiere consideraciones meticulosas en términos de flujo de materiales, diseño de columnas, y la disposición del medio de adsorción (Suárez & Ubillus, 2022). En un sistema CIL, el mineral es tratado en un único circuito donde la lixiviación y la adsorción ocurren simultáneamente. Este enfoque tiene la ventaja de mejorar la extracción global de metales preciosos al mantener los sólidos en contacto continuo con el carbón activado.

Por otro lado, el diseño de columnas de lecho fijo es fundamental para maximizar la eficiencia de adsorción. En este tipo de sistema, las partículas de carbón activado se disponen en una columna vertical a través de la que circula la pulpa mineral. La optimización del flujo de

pulpa, el tamaño de las partículas de carbón y la altura de la columna son factores críticos que determinan la eficiencia de captura de los metales (Ruiz-Paternina et al., 2019; Sá & Sadoyama, 2023). Las investigaciones recientes muestran que un diseño adecuado puede aumentar la capacidad de adsorción y disminuir notablemente el tiempo de residencia (Pérez et al., 2021).

Además, se ha indicado que el uso de carbón activado derivado de fuentes agrícolas, como cáscaras o residuos lignocelulósicos, no solo puede ser beneficioso desde una perspectiva económica, sino que también contribuye a la sostenibilidad del proceso al utilizar materiales que, de otro modo, serían desechados (Tejada et al., 2016). Esto abre una vara de posibilidades en la recuperación y tratamiento de metales, fortaleciendo la relevancia ambiental y práctica de los sistemas CIL y CIP en la minería moderna.

Los sistemas de adsorción por carbón en pulpa, particularmente en la recuperación de Au y Ag, combinan principios fisicoquímicos complejos que requieren un diseño ingenioso y una comprensión profunda de los fenómenos de adsorción y desorción. Con avances en la mejora de adsorbentes y en técnicas de optimización de procesos, estos sistemas tienen el potencial no solo de aumentar la eficiencia de extracción de metales preciosos, sino también de transformar la manera en que se gestionan los recursos en la minería contemporánea.

2.2.7. Impacto ambiental y manejo de efluentes

El impacto ambiental producido por la minería, especialmente en relación con el manejo de efluentes contaminados con cianuro, presenta desafíos significativos para la sostenibilidad ecológica. La toxicidad del cianuro, un compuesto comúnmente utilizado en la extracción de metales preciosos es una preocupación crítica. Este compuesto se clasifica como extremadamente tóxico, con niveles permitidos en el agua que no deben exceder 0.022 mg/L según la normativa de la EPA de EE. UU. sobre efluentes (Sosa & Argota, 2017) (Vilca & Pérez,

2017). Diferentes estudios han evidenciado que la exposición a cianuro tiene efectos letales en organismos acuáticos, como se observó en pruebas de toxicidad letal media utilizando el modelo *Brachydanio rerio* (Argota et al., 2017)(Pérez et al., 2015). Además, el uso de sistemas de control de toxicidad, como los métodos WETs (Whole Effluent Toxicity), es esencial para regular y gestionar adecuadamente los vertidos industriales(Argota et al., 2017) (Pérez et al., 2015).

2.2.7.1.Toxicidad y normativas sobre cianuro

Los efluentes de procesos mineros, particularmente aquellos que contienen cianuro, han sido objeto de intenso estudio debido a su capacidad de causar daño ambiental. Por ejemplo, se ha documentado que la extracción de oro mediante procesos de cianuración puede generar efluentes que superan los límites permitidos de cianuro en el agua (Sosa & Argota, 2017)(Vilca & Pérez, 2017). Es fundamental implementar tratamientos efectivos, ya que el cianuro no solo es perjudicial para los organismos acuáticos, sino que también puede afectar la salud humana a través de la contaminación del agua potable(Lopez-Jimenez et al., 2019) (Lopez-Jimenez et al., 2019).

2.2.7.2.Tratamientos de residuos y reinyección de soluciones

El manejo de efluentes y tratamientos de residuos ha evolucionado para incluir métodos innovadores de biorremediación. Este enfoque utiliza microorganismos específicos, como *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, para degradar cianuro en efluentes mineros, destacándose como una opción ambientalmente amigable y económica(Apaza et al., 2021; Arias-Arce et al., 2023) (Aquino et al., 2021; Arce et al., 2023). Además, estrategias como el uso de permanganato de potasio han mostrado eficacia en la degradación química de cianuros en aguas residuales (Fernández et al., 2021; Sancho et al., 2011)(Fernández et al., 2021; Sancho et al., 2011), contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental generado por la minería.

Otra estrategia a considerar incluye la reinyección de soluciones tratadas, que implica el uso de tecnologías para recuperar o reutilizar el cianuro, minimizando así la generación de residuos y mejorando la eficiencia de la extracción de metales (Poma & Guevara, 2024). La implementación de estos tratamientos no solo reduce la toxicidad de los efluentes, sino que también se alinea con las tendencias hacia prácticas de minería más sostenibles y responsables (Poma & Guevara, 2024). A medida que estas tecnologías avanzan, se espera que su aplicación se generalice en operaciones mineras en todo el mundo, lo que podría tener efectos positivos significativos en la salud del ecosistema y en la salud humana.

El manejo adecuado de efluentes contaminados con cianuro es esencial para reducir el impacto ambiental negativo de la minería. La combinación de normativas estrictas, innovaciones en tratamientos de residuos y prácticas sostenibles en el uso de sustancias tóxicas como el cianuro puede proporcionar un camino hacia un futuro más sostenible en la minería.

2.3. Bases filosóficas

La investigación sobre la cianuración convencional y la inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en la empresa minera Paltarumi SAC durante 2025 requiere un enfoque que no solo contemple los aspectos técnicos, sino también las bases filosóficas y éticas que subyacen a estas tecnologías extractivas. La cianuración ha sido históricamente el método predominante en la extracción de metales preciosos, pero su toxicidad y los impactos ambientales asociados han generado una creciente búsqueda de alternativas más sostenibles y menos contaminantes (Huazo et al., 2024; Valarezo et al., 2024).

Desde una perspectiva técnica, la cianuración convencional se basa en la disolución del oro y la plata a partir de minerales mediante el uso de cianuro. Este proceso se complementa a menudo con la inyección de oxígeno, lo que potencia la oxidación de los metales y mejora la

eficiencia de extracción(Cos & Fuentes, 2023; Huazo et al., 2024). La inyección de oxígeno tiene un impacto significativo en las reacciones químicas, aunque también plantea consideraciones acerca de la gestión de residuos y la seguridad ambiental, que deben ser analizadas en el marco del desarrollo sostenible(Huazo et al., 2024) (Barreto et al., 2023).

La literatura destaca que la cianuración convencional, aunque efectiva, enfrenta retos éticos y ambientales. Existe un cuestionamiento acerca de su sostenibilidad, ya que el cianuro es un compuesto altamente tóxico que puede causar daños a la biodiversidad y la salud humana (Ruiz-Sánchez & Juárez-Tapia, 2022; Valarezo et al., 2024). Por este motivo, se ha explorado el uso de agentes lixiviantes alternativos y tecnologías menos nocivas. Por ejemplo, se ha investigado el uso de tiosulfato y otros compuestos que no presentan los mismos riesgos ambientales(Cos & Fuentes, 2023; Huazo et al., 2024), exhibiendo una tendencia hacia procesos que minimizan el uso de sustancias peligrosas.

Filosóficamente, el debate sobre la cianuración convencional y la inyección de oxígeno también se conecta con conceptos de responsabilidad social corporativa y el extractivismo responsable, donde las empresas deben considerar no solo la rentabilidad económica, sino también el impacto social y ambiental de sus operaciones(Estupiñan et al., 2021). Esta visión crítica es esencial para construir nuevas estrategias en el sector minero, promoviendo un equilibrio entre desarrollo económico y cuidado del medio ambiente.

Además, es crucial la transparencia en los procesos de toma de decisiones y el involucramiento de las comunidades locales, que suelen ser las más afectadas por la actividad minera. La conversación sobre temas de justicia social se entrelaza con las prácticas extractivas y puede dar lugar a una reevaluación de las prácticas actuales, fomentando una minería más ética,

alineada con el bienestar de las comunidades y la restauración ambiental(Estupiñan et al., 2021; Flores et al., 2024).

La investigación sobre la cianuración y la inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en la empresa minera Paltarumi SAC debe abordar tanto los aspectos técnicos de estos métodos como las implicaciones filosóficas y éticas. Esto permite desarrollar un enfoque integral que contemple no solo la eficiencia en la extracción de metales, sino también la responsabilidad social y el compromiso con la sostenibilidad ambiental.

2.4. Definiciones conceptuales.

- a) **Cianuración:** Proceso hidrometalúrgico utilizado para extraer oro y plata de minerales, donde la solución de cianuro disuelve los metales preciosos. Su alta eficiencia ha hecho que sea el método predominante en la industria minera (Valarezo et al., 2024).
- b) **Inyección de Oxígeno:** Técnica que mejora la eficiencia del proceso de cianuración mediante la inyección de oxígeno en la solución de lixiviación. Esto favorece la oxidación de minerales complejos, aumentando la recuperación de metales preciosos (Terán-Bojórquez, 2021).
- c) **Mineralogía del Mineral:** Estudio y análisis de las características minerales de un yacimiento específico. Es crucial para determinar la viabilidad del proceso de cianuración y optimizar la recuperación de oro y plata (Estela, 2023).
- d) **Lixiviación:** Método que implica la disolución selectiva de minerales en una solución, permitiendo la recuperación de metales valiosos. Es fundamental en la metalurgia para el tratamiento de minerales auríferos (Valarezo et al., 2024).
- e) **Reacciones de Oxidación:** Proceso químico en el que una sustancia pierde electrones, esencial en la cianuración para asegurar que metales como el oro sean liberados de su matriz mineral (Terán-Bojórquez, 2021).
- f) **Reactivación de Mineral:** Proceso utilizado para preparar el mineral antes de la lixiviación, que puede incluir tratamientos térmicos o químicos para mejorar su reactividad (Valarezo et al., 2024).
- g) **Cianuro:** Ion tóxico utilizado como agente lixivante. Su manejo seguro es crítico debido a sus impactos ambientales y de salud asociados en procesos de extracción metalúrgica (Valarezo et al., 2024).

- h) **Rendimiento de Lixiviación:** Porcentaje de metales extraídos en relación al total presente en el mineral. Es un indicador clave de la eficiencia del proceso de cianuración(Valarezo et al., 2024).
- i) **Minerales Refractarios:** Minerales que presentan resistencia a la lixiviación con cianuro y requieren métodos de pretratamiento. Su presencia en un yacimiento puede complicar el proceso de extracción(Terán-Bojórquez, 2021).
- j) **Recuperación de Metales Preciosos:** Proporción de metales como oro y plata que son efectivamente extraídos durante el proceso minero. Es un indicador directo de la eficacia de la cianuración y de las condiciones del proceso(Valarezo et al., 2024).
- k) **Efluentes Mineros:** Aguas residuales y otros residuos generados por la actividad minera. Su tratamiento es fundamental para minimizar el impacto ambiental(J. Bernal et al., 2024).
- l) **Impacto Ambiental de la Minería:** Efectos negativos causados por la actividad minera, que pueden incluir la contaminación del agua y del suelo, además de la destrucción de hábitats naturales(Albarracín et al., 2023).
- m) **Normativa Ambiental:** Conjunto de regulaciones diseñadas para proteger el medio ambiente de los efectos adversos de las actividades mineras. Importante para asegurar la sostenibilidad en prácticas extractivas(Arce-Villalobos et al., 2021).
- n) **Seguridad en la Minería:** Conjunto de prácticas y protocolos destinados a garantizar la seguridad de los trabajadores y minimizar los riesgos asociados a la minería, especialmente en la manipulación de sustancias tóxicas como el cianuro(Ugarte & Robles, 2023).
- o) **Análisis Económico de la Minería:** Evaluación que considera costos y beneficios de las actividades mineras, fundamental para determinar la viabilidad financiera de proyectos como el de Paltarumi SAC(J. Bernal et al., 2024) (Bernal et al., 2024)

2.5. Hipótesis de la investigación.

2.5.1. Hipótesis general.

La cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno permite una extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025

2.5.2. Hipótesis específicas.

- La cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- La inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- La cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado permite identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.

2.6. Operacionalización de variables e indicadores.

La operación de estudio sobre “Cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata en la Empresa Minera Paltarumi SAC-2025”, se describe en la tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de las variables e indicadores

Variable	Concepto	Dimensiones	Indicador
Independiente			
Inyección de oxígeno	Proceso de introducir oxígeno a presión en la pulpa de cianuración, para mejorar la formación de complejos cianurados y la extracción de oro plata(Marsden & House, 2006).	- Flujo	- Forzada - Natural
Dependiente			
Extracción de oro y plata	Proceso controlado de lixiviación donde el cianuro disuelve el oro formando complejo $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$, seguido de adsorción y recuperación metálica final(Gupta & Mukherjee, 1990).	- Eficiencia	- Recuperación
Intervinientes			
Condiciones de proceso	La cianuración emplea CN^- en medio alcalino, con agitación y aporte de oxígeno para disolver el oro, seguido de recuperación metálica controlada(Habashi, 2017).	- Físicos - Químicos	- Granulometría - Fuerza de cianuro - pH - Tiempo - Agitación - Mineralogía

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico.

3.1.1. Tipo de investigación.

La investigación se enmarca en investigación aplicada, orientada a resolver problemas prácticos mediante la optimización de procesos metalúrgicos. Se enfoca en comparar la cianuración convencional con la inyección forzada de oxígeno para mejorar la recuperación de oro y plata en Minera Paltarumi SAC. Este enfoque utiliza conocimientos previos (como métodos de cianuración y estudios de interfase) para aplicarlos directamente en un contexto industrial, cumpliendo con los objetivos de eficiencia y sostenibilidad(Castro et al., 2023). La metodología incluye pruebas experimentales y análisis de variables operativas, similar a estudios previos sobre implementación de plantas y mecanismos de cianuración(Alzina, 2004; Botero, 2021).

3.1.2. Nivel de investigación.

Se empleara la investigación explicativa ya que tiene por objetivo responder al porqué de los fenómenos, es decir, busca establecer relaciones causa-efecto(Bernal, 2006). En una investigación sobre la metalurgia extractiva, este nivel metodológico explica las causas de los resultados experimentales y profundiza en cómo las variables del proceso afectan la extracción de oro y plata.

3.1.3. Diseño de la investigación.

La investigación sigue un diseño no experimental longitudinal. A lo largo del año 2025 se observan los efectos de la cianuración convencional frente a la cianuración con inyección forzada de oxígeno en la extracción de oro y plata, evaluando variables como eficiencia de

extracción, tiempo de lixiviación y recuperación de metales, sin manipulación directa de variables(Hernandez, 2018).

3.1.4. Enfoque de la investigación.

En investigación se emplea el enfoque mixto ya que integra métodos cuantitativos y cualitativos en dos fases complementarias: primero, se recopilan y analizan datos numéricos de recuperaciones metalúrgicas y variables operativas; luego, se exploran percepciones de operadores mediante entrevistas. Esta triangulación permite comprender resultados técnicos y contextuales, enriqueciendo la interpretación y validación de hallazgos en cianuración e inyección forzada de oxígeno(Paitán et al., 2014).

3.2. Método de diseño del esquema de muestreo planta

a) Ubicación de puntos de muestreo

- Seleccionar al menos 4 a 6 puntos clave: alimentación del primer tanque, intermedio, salida del último tanque convencional, y puntos equivalentes en el circuito con inyección de oxígeno.
- Incluir también muestreo en la descarga de espesador/tanque de recuperación (carbon-in-pulp o clarificación).

b) Frecuencia de muestreo

- Tomar muestras cada **2–4 horas** durante un ciclo completo, idealmente en dos campañas (convencional vs oxígeno forzado).
- Aprovechar ventanas de operación estándar (24–48 h) para capturar variabilidad operativa.

c) Instrumentación y mediciones

Tabla 2
Instrumento de medición

Variable	Instrumento / método
Oxígeno disuelto (O₂)	Sensor DO permanente en cada tanque
pH	Electrodo de pH continuo
Temperatura	Termómetros/RTD en línea
Concentración de cianuro	Muestreo manual + titulación o analizador continuo
Pulpa (% sólidos)	Medidor en línea de densidad o muestras man.

d) Muestreo de laboratorio para análisis cuantitativos

- Oro y plata disueltos
 - ✓ Analizar con AAS o ICP para cada muestra de pulpa clarificada.
- Cianuro libre/WAD
 - ✓ Método de titulación (ISO o estándar EPA).
- Oxígeno disuelto (verifica sensores con método Winkler).
- % sólidos y temperatura: medidos en cada toma.

e) Registro y validación de datos

- Diseñar una base de datos o planilla con campos: fecha-hora, punto de muestreo, tratamiento, variables medidas, recuperación acumulada.
- Incluir control de duplicados, blancos y estándar para validación.

f) Cálculos e indicadores planta

- Determinar recuperación instantánea y acumulada de Au/Ag.
- Evaluar consumo específico de CN⁻ y O₂ por gramo de metal recuperado.

- Graficar perfiles de DO, CN^- y recuperación a lo largo del circuito

g) Comparativa entre circuitos

- Comparar: tiempos para alcanzar X % recuperación, consumo específico, perfiles DO-CN.
- Aplicar análisis estadístico (ANOVA, t-test) para evaluar diferencias significativas.

3.3. Población y muestra.

3.3.1. Población de la investigación.

La población de estudio está constituida por el mineral que ingresa al circuito de procesamiento de Minera Paltarumi SAC, abarcando todas las partículas fragmentadas según su granulometría, composición química (contenido de oro y plata, y impurezas), heterogeneidad mineralógica y textural, características fisicoquímicas (densidad de pulpa, humedad, pH), y parámetros operativos asociados (volumen de alimentación, régimen de flujo). También se incluye la variabilidad estacional del mineral extraído y su respuesta a los reactivos utilizados.

3.3.2. Muestra de la investigación.

La muestra está formada por el registro de la inyección de oxígeno en el proceso cada dos horas, el mineral que ingresa en el proceso, la pulpa de la descarga del hidrociclón, la pulpa del relave y el carbón activado de los tanques, que luego se lleva al laboratorio para realizar una reducción de muestras y al laboratorio químico para el análisis. Se extrae aproximadamente medio litro de pulpa cada dos horas y, en el caso del carbón activado, aproximadamente 50 gramos, que se acumulan durante las 12 horas. En total, se obtienen 6 litros de pulpa y 600 gramos de carbón, de los cuales se obtendrán 100 gramos de muestra de mineral sólido y 50

gramos de carbón para realizar un análisis de 50 mL cada dos horas durante la investigación, antes y después del cambio.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.4.1. Técnicas empleadas en la investigación.

La técnica de observación directa estructurada se empleará para registrar, de forma sistemática, los cambios en las variables operativas durante el proceso de cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno. Esta técnica permite identificar comportamientos, variaciones y resultados en tiempo real dentro del entorno de planta, aportando datos precisos sobre la eficiencia en la extracción de oro y plata (Ñaupas et al., 2019).

3.4.2. Descripción los instrumentos para la toma de datos

Se emplearán instrumentos como fichas de observación estructurada, balanzas electrónicas de alta precisión, medidores de pH, oxímetros industriales, conductímetros, cronómetros digitales y hojas de registro técnico. Estos permitirán recolectar datos sobre concentración de reactivos, tiempo de lixiviación, recuperación metálica y condiciones fisicoquímicas del proceso, asegurando precisión y confiabilidad en el análisis metalúrgico de cianuración con oxígeno forzado (Medina et al., 2023).

3.5. Técnicas para el procesamiento de la información.

Las técnicas de procesamiento de la información incluyen: validación y limpieza de datos cuantitativos mediante software estadístico (Minitab, SPSS), análisis de tendencias y comparaciones (ANOVA, regresión); codificación y categorización de respuestas cualitativas usando NVivo; integración de resultados numéricos y textuales mediante triangulación; y visualización de hallazgos con gráficos y mapas de calor para facilitar interpretación (Alea et al., 2001; Ñaupas Paitán et al., 2019).

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Analisis de Resultados

4.1.1. Condiciones de investigación

La toma de datos se llevó a cabo directamente en la planta de cianuración de la empresa minera PALTARUMI SAC, durante 2 meses en el 2025, bajo condiciones normales de operación y control metalúrgico. El trabajo contempló dos condiciones comparativas: cianuración convencional (sin oxígeno forzado) y cianuración con inyección forzada de oxígeno, desarrolladas en tanques de lixiviación tipo CSTR con agitación mecánica y monitoreo continuo de las variables del proceso.

Durante la operación, se registraron los principales parámetros metalúrgicos como el caudal de oxígeno, la concentración de oxígeno disuelto, el consumo de reactivos (NaOH y NaCN), el pH y la densidad de pulpa. Los valores fueron medidos con instrumentos calibrados (oxímetros, flujómetros, medidores de pH y balanzas industriales) y anotados en las hojas de control de la planta, asegurando la precisión y trazabilidad de los datos recolectados.

Las muestras de mineral cabeza, relave y solución rica fueron recolectadas de manera representativa en diferentes intervalos del proceso, utilizando frascos plásticos rotulados y herméticamente sellados. Posteriormente, estas muestras fueron enviadas al laboratorio metalúrgico para su respectivo análisis químico de oro (Au) y plata (Ag), siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D-6357-11 mediante la técnica de absorción atómica.

Tabla 3
Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 1-26 sin forzado de oxígeno

Nº	NaOH (kg/t)	NaCN (kg/t)	% Recup Au	% Recup Ag
1	4.53	4.40	90.21	35.62
2	2.66	3.32	88.91	84.68
3	2.50	3.57	88.87	60.15
4	2.57	3.63	89.12	81.13
5	2.78	3.55	89.02	80.84
6	2.79	3.83	91.18	80.99
7	3.49	3.94	91.71	87.68
8	4.00	4.21	89.34	52.46
9	3.34	4.12	88.98	54.10
10	4.59	4.37	87.46	60.77
11	3.65	4.10	89.76	62.67
12	4.02	3.93	90.46	22.47
13	3.61	4.48	88.55	44.12
14	4.30	4.40	90.54	31.35
15	2.75	4.64	88.91	37.74
16	4.21	4.65	89.37	55.25
17	3.16	3.99	90.36	86.02
18	6.95	5.27	89.22	95.67
19	3.46	4.55	91.77	90.84
20	4.12	4.51	89.75	54.52
21	5.21	4.22	88.75	34.75
22	4.33	5.49	90.88	32.48
23	5.27	5.44	88.33	57.21
24	4.80	5.32	87.67	57.11
25	4.95	5.12	88.86	43.52
26	3.90	3.83	90.50	49.16

Tabla 4*Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 27-51 sin forzado de oxígeno*

N°	NaOH (kg/t)	NaCN (kg/t)	% Recup Au	% Recup Ag
27	2.80	4.34	87.48	46.34
28	2.70	4.45	88.80	47.75
29	3.25	4.14	88.80	77.09
30	4.99	6.34	88.43	16.88
31	3.42	4.31	89.55	96.96
32	4.37	4.31	86.80	26.05
33	2.80	4.20	92.16	61.50
34	3.90	4.66	89.24	35.31
35	2.94	6.07	90.40	48.41
36	4.63	4.52	89.92	35.15
37	2.96	3.87	91.49	41.78
38	2.55	4.77	88.10	72.34
39	3.11	4.43	89.69	66.33
40	3.63	4.21	91.75	36.53
41	4.42	6.15	89.71	70.94
42	3.20	5.45	85.83	82.59
43	3.91	5.46	87.97	66.73
44	3.44	4.42	89.48	62.55
45	3.57	4.12	86.65	58.63
46	2.69	4.99	89.93	60.59
47	3.76	4.83	89.81	67.29
48	3.36	4.54	89.08	69.43
49	4.04	4.51	88.63	35.50
50	3.30	5.35	89.56	47.15
51	3.63	4.97	89.24	42.41

Los datos de proceso de cianuración en planta en la tabla 3 y 4 se describen el consumo

de los insumos y la recuperación de oro sin inyección de oxígeno.

Tabla 5*Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 1-26 inyección forzado de oxígeno*

Nº	TK ₁ (O ₂ , ppm)	TK ₄ (O ₂ , ppm)	TK ₇ (O ₂ , ppm)	NaOH (kg/t)	NaCN (kg/t)	% Recup Au	% Recup Ag
1	19.91	6.30	7.30	4.69	4.58	89.86	65.06
2	5.56	15.78	18.28	3.90	3.77	92.09	82.60
3	8.04	16.03	15.95	2.94	4.14	91.19	64.25
4	8.96	12.52	14.14	2.52	6.45	91.46	84.41
5	11.39	14.76	14.46	2.51	4.87	91.26	96.71
6	11.64	13.87	15.06	3.31	4.87	89.46	84.08
7	8.49	13.00	12.85	4.46	4.18	91.29	77.31
8	9.24	5.70	7.83	3.16	4.30	90.70	68.51
9	12.72	10.58	4.31	4.93	4.48	90.72	92.79
10	7.00	7.71	9.46	4.09	4.30	90.49	88.80
11	0.80	14.39	11.29	3.86	4.76	89.47	73.08
12	1.16	0.19	0.12	4.80	4.63	91.74	38.60
13	6.20	14.58	13.18	4.07	4.38	90.57	92.99
14	6.74	12.27	16.70	4.28	4.66	90.93	83.59
15	4.56	12.99	13.94	3.69	4.79	90.15	80.91
16	6.12	8.16	10.04	2.60	3.98	90.64	92.39
17	7.98	9.28	12.22	3.57	4.76	91.10	59.18
18	7.18	10.82	13.95	3.28	6.94	89.71	96.28
19	4.81	9.36	15.40	3.29	4.85	90.58	88.14
20	4.43	13.08	16.46	3.56	5.29	89.45	77.75
21	4.68	10.07	11.67	2.78	5.35	91.16	80.07
22	4.49	10.78	14.23	3.71	6.88	89.38	75.37
23	6.83	13.43	12.91	4.01	4.69	91.83	95.45
24	6.71	13.92	13.42	3.48	5.57	90.27	89.59
25	6.94	13.35	8.07	5.04	4.87	90.92	75.91
26	6.69	12.52	6.71	3.72	4.38	87.36	61.03

Tabla 6*Consumo de NaOH, NaCN kg/t y Recuperación Au 27-51 inyección forzado de oxígeno*

Nº	TK ₁ (O ₂ , ppm)	TK ₄ (O ₂ , ppm)	TK ₇ (O ₂ , ppm)	NaOH (kg/t)	NaCN (kg/t)	% Recup Au	% Recup Ag
27	0.80	14.39	11.29	3.00	5.29	94.90	69.09
28	3.06	13.72	9.65	2.73	4.02	90.22	38.02
29	1.29	17.92	11.23	2.55	3.68	89.29	95.28
30	3.79	14.27	12.77	3.49	4.52	88.96	70.86
31	3.69	12.49	11.01	2.94	5.65	87.88	76.24
32	4.08	14.56	16.20	3.71	6.25	86.05	80.45
33	4.78	15.24	14.86	4.16	6.11	87.58	32.09
34	2.97	13.21	14.58	2.50	4.87	85.92	92.97
35	4.11	11.73	6.31	3.46	5.92	91.79	76.66
36	5.36	14.74	9.97	3.40	6.86	89.08	84.76
37	12.53	15.18	11.75	3.95	6.32	88.45	31.04
38	6.09	14.30	12.55	2.50	3.98	90.43	90.98
39	5.86	11.33	11.37	3.65	6.45	87.59	66.15
40	5.02	14.31	15.43	2.87	5.81	89.68	74.71
41	5.49	14.82	14.53	4.55	4.12	90.55	86.79
42	5.98	15.83	16.64	4.02	4.39	90.13	86.92
43	2.96	13.37	11.85	4.53	5.17	89.83	68.62
44	3.80	15.47	15.25	4.13	4.00	89.88	85.53
45	7.62	14.05	14.71	5.46	6.77	90.55	49.90
46	7.94	15.38	14.07	5.10	4.71	90.00	41.24
47	5.45	11.94	6.76	3.54	6.52	90.00	97.22
48	7.52	13.94	9.15	3.93	4.51	91.04	63.66
49	6.55	14.31	9.74	4.52	5.33	90.00	53.87
50	13.75	14.55	7.83	5.14	7.91	90.20	48.63
51	12.15	14.51	6.53	3.18	4.81	90.00	49.30

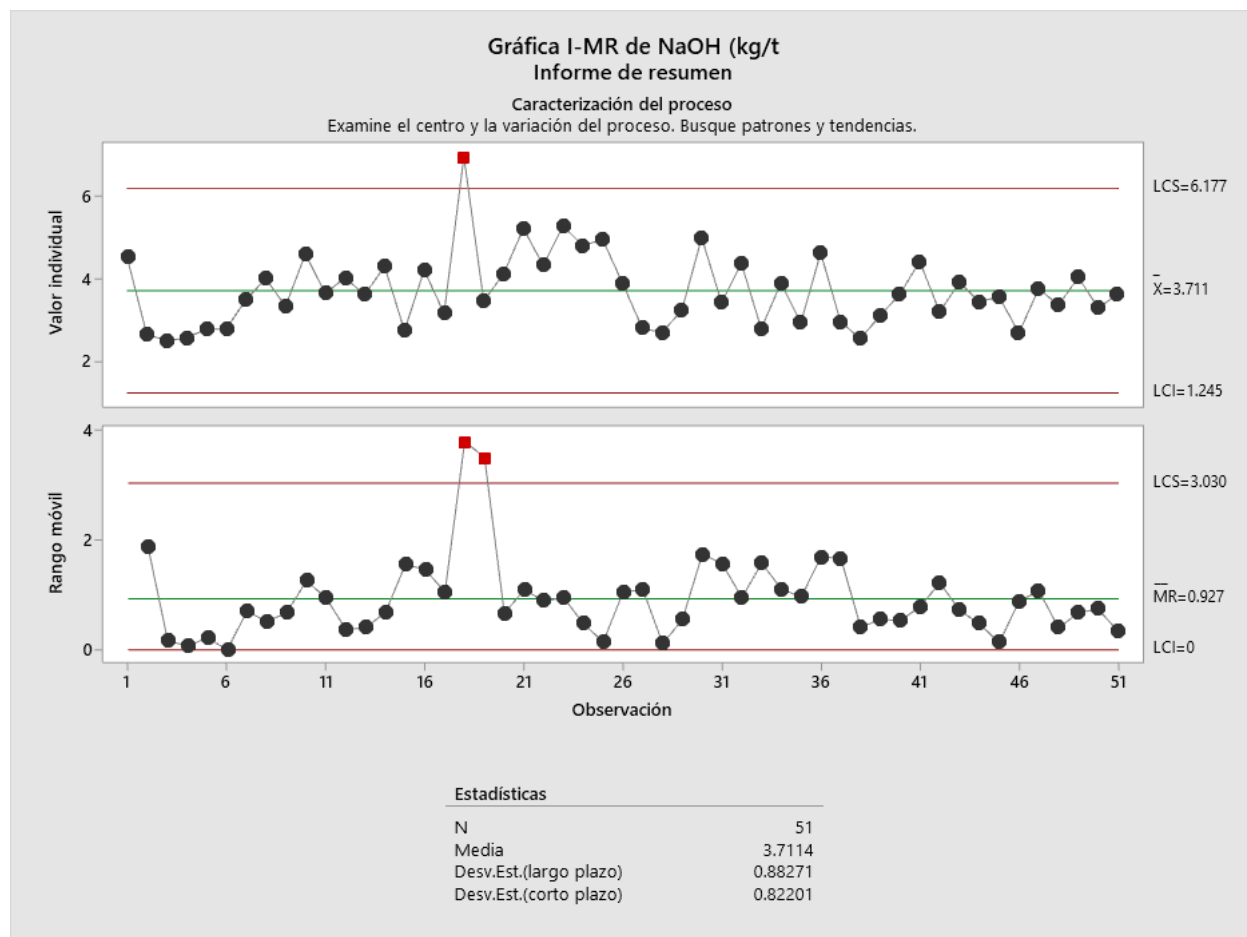
El consumo de los insumos y la recuperación de oro en la tabla 5 y 6 se describe del proceso en planta con oxígeno insuflado.

4.1.2. Resultados.

4.1.2.1. Parámetros de control de la cianuración convencional

Figura 2

Consumo de NaOH kg/t sin inyección forzada de oxígeno

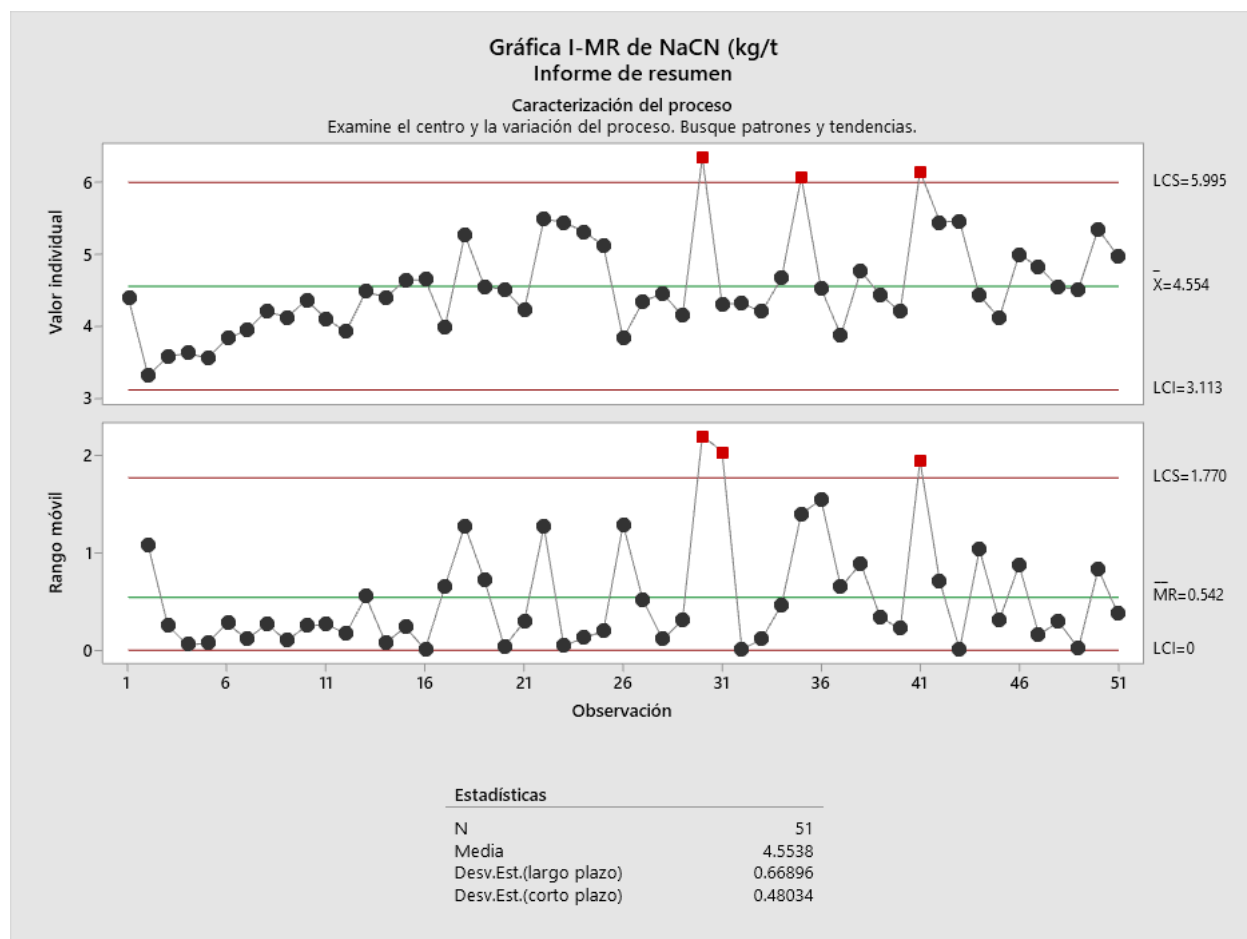


El control de hidróxido de sodio, en la Figura 3 muestra la gráfica de control I-MR para el consumo de NaOH (kg/t) sin inyección forzada de oxígeno en 51 observaciones. La media es de 3.71 kg/t, con límites de control individuales entre 1.245 y 6.177. Se evidencia un punto fuera de control en la observación 17, tanto en la gráfica de valores individuales como en el rango móvil, lo que indica una variación anómala puntual. Las desviaciones estándar de largo y corto

plazo (0.88 y 0.82) son bajas y similares, sugiriendo estabilidad general en el consumo, salvo por esa excepción aislada.

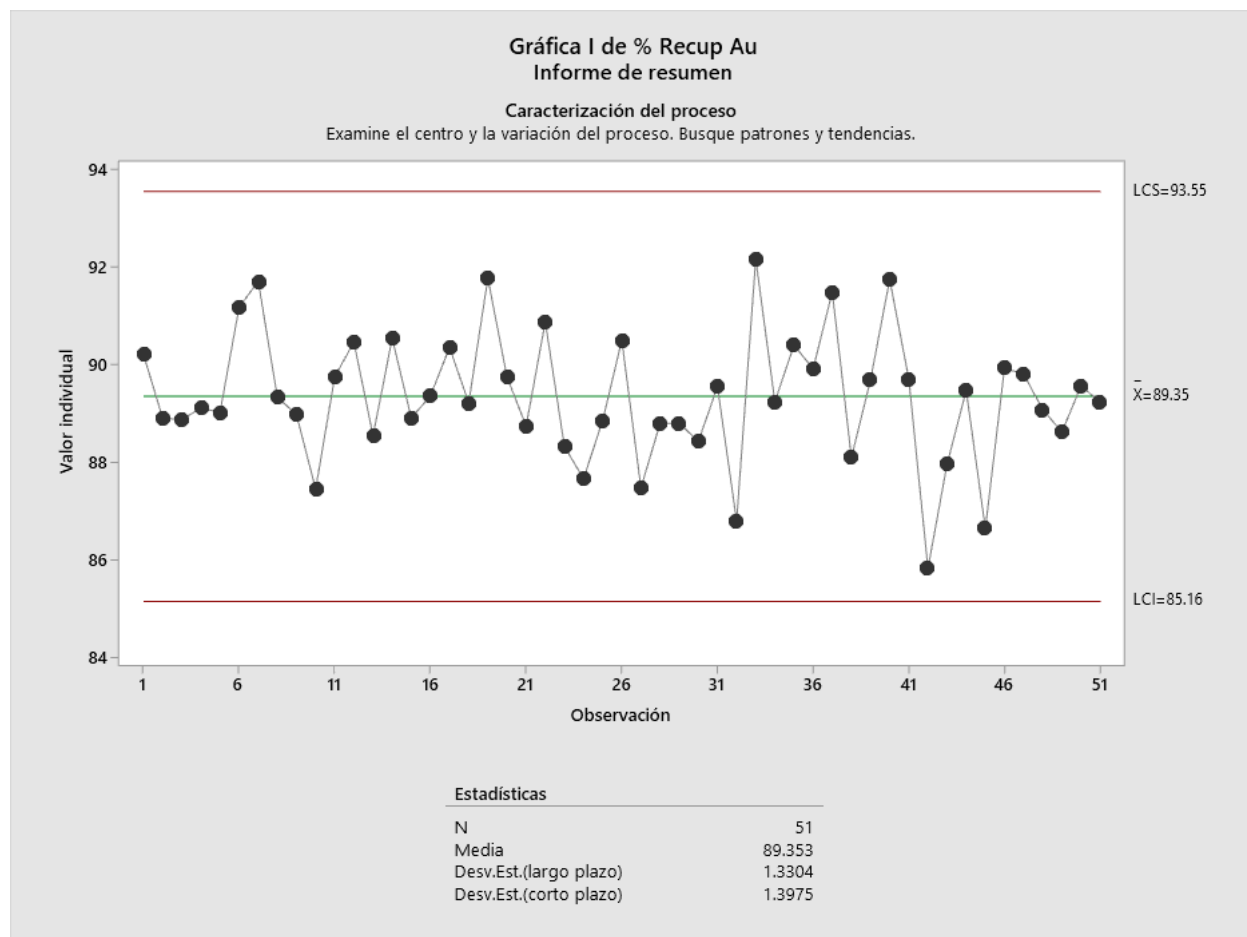
Figura 3

Consumo de NaCN kg/t sin inyección forzada de oxígeno



Parámetros de control de cianuro de sodio en el proceso, en la Figura 3 muestra la gráfica I-MR del consumo de NaCN (kg/t) sin inyección forzada de oxígeno en 51 observaciones. La media del proceso es 4.55 kg/t, con límites de control entre 3.11 y 5.99. Se observan cuatro puntos fuera de control en los valores individuales y tres en el rango móvil, indicando variabilidad anómala puntual. A pesar de que las desviaciones estándar son bajas (0.66 a largo plazo y 0.48 a corto), estos eventos revelan que el proceso presenta momentos de inestabilidad, lo que sugiere necesidad de monitoreo y ajustes en dosificación.

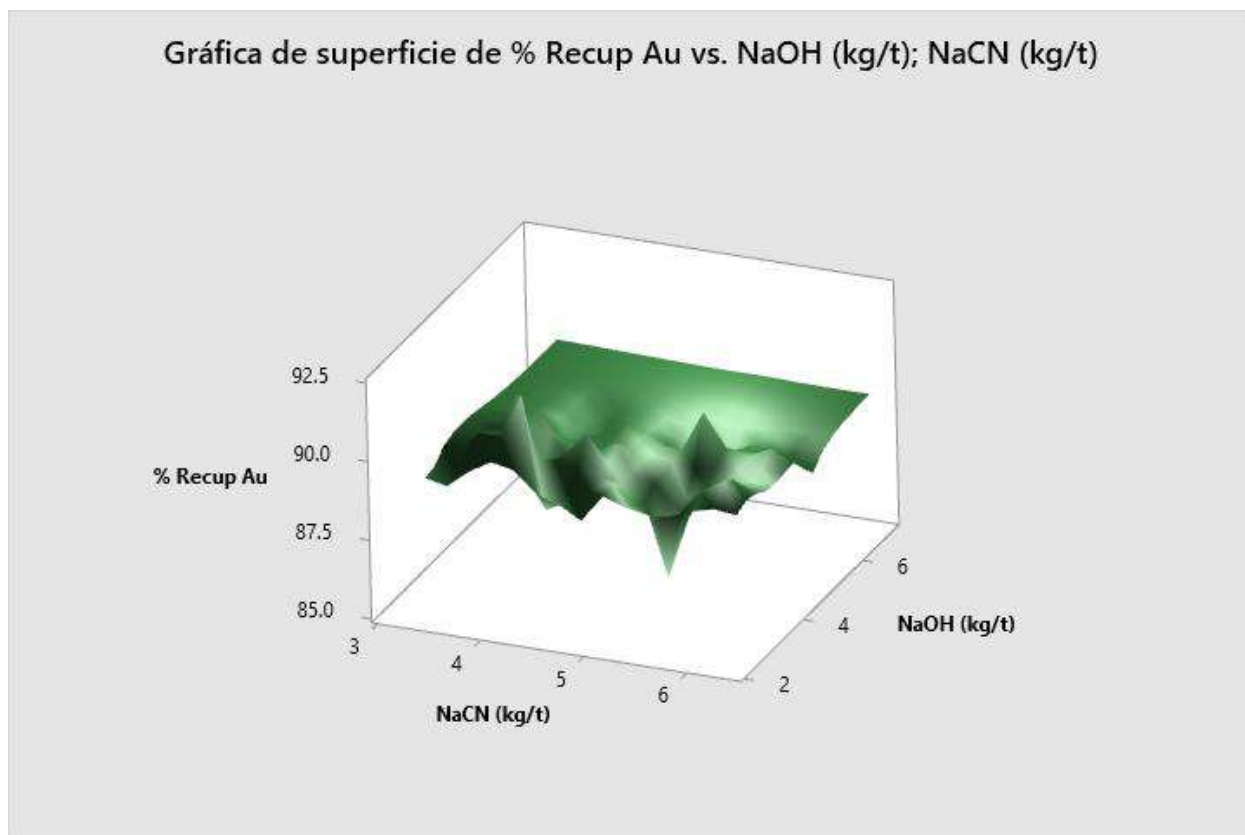
Figura 4
Recuperación de oro sin inyección forzada de oxígeno



Los límites de control de la recuperación de oro, en la Figura 4 muestra la recuperación de oro sin inyección forzada de oxígeno mediante una gráfica de control I. Con una media de 89.35% y límites de control entre 85.16% y 93.55%, todas las observaciones están dentro del rango esperado, indicando un proceso estadísticamente controlado. Las desviaciones estándar a largo y corto plazo (1.33 y 1.39) son similares, reflejando estabilidad en el tiempo. No se evidencian tendencias ni puntos anómalos. El proceso es confiable y estable, aunque con una recuperación ligeramente inferior al proceso con oxígeno.

Figura 5

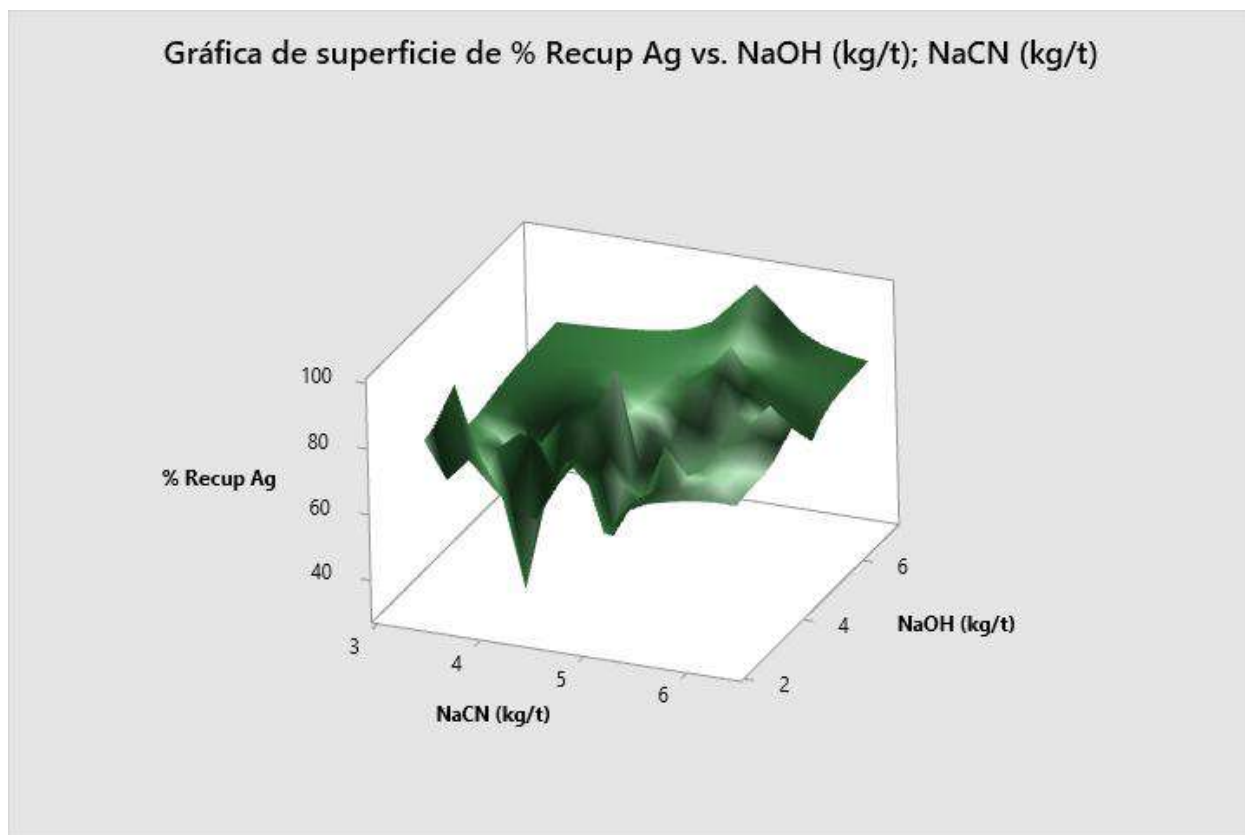
Recuperación de Au en relación de consumo de NaOH y NaCN (kg/t)



La Figura 5 muestra la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de oro (%Recup Au) en función del consumo de NaOH y NaCN (kg/t). Se observa que las mayores recuperaciones, superiores al 92%, se alcanzan con consumos moderados de ambos reactivos. A bajos niveles de NaCN o NaOH, la recuperación disminuye por ineficiencia en la disolución del oro. La interacción entre ambos reactivos es determinante: un equilibrio adecuado optimiza la cianuración, evitando excesos que incrementan el costo operativo sin mejorar significativamente la recuperación metalúrgica.

Figura 6

Recuperación de la plata en relación de NaCN y NaOH (kg/t)

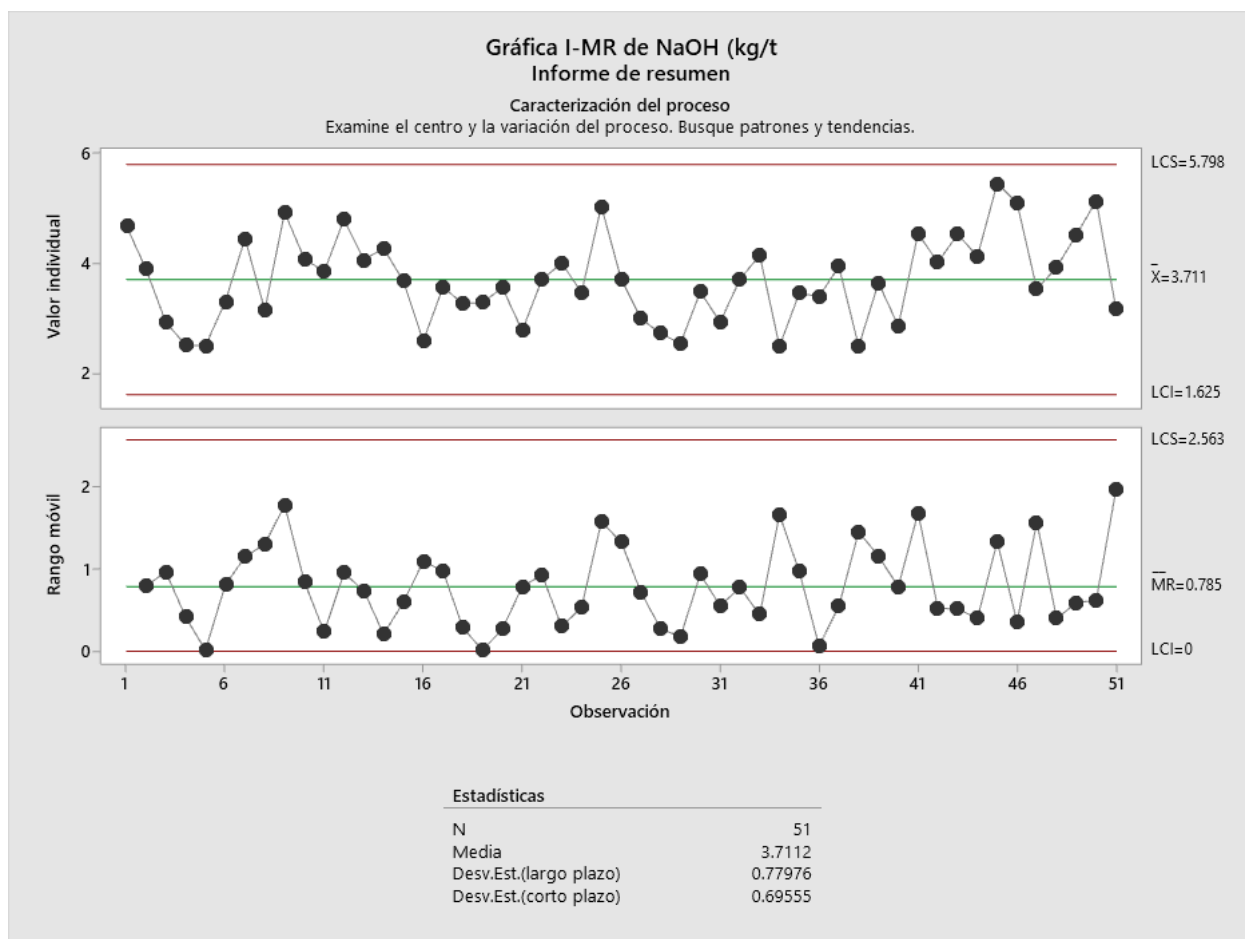


Respecto la figura 6 muestra la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de plata (%Recup Ag) en función de la dosis de NaOH y NaCN (kg/t). Se observa que las mayores recuperaciones, cercanas al 100%, se alcanzan con consumos moderados de NaOH (3.5–5 kg/t) y NaCN (4.5–6 kg/t), donde la alcalinidad favorece la formación estable del complejo argentocianuro. A bajas concentraciones de reactivos, la recuperación disminuye por limitaciones de disolución. En cambio, dosis excesivas provocan ineficiencia y aumento de consumo químico sin mejorar la extracción, destacando la importancia de mantener un equilibrio óptimo operativo.

4.1.2.2. Parámetros de control de la cianuración con inyección forzada de oxígeno

Figura 7

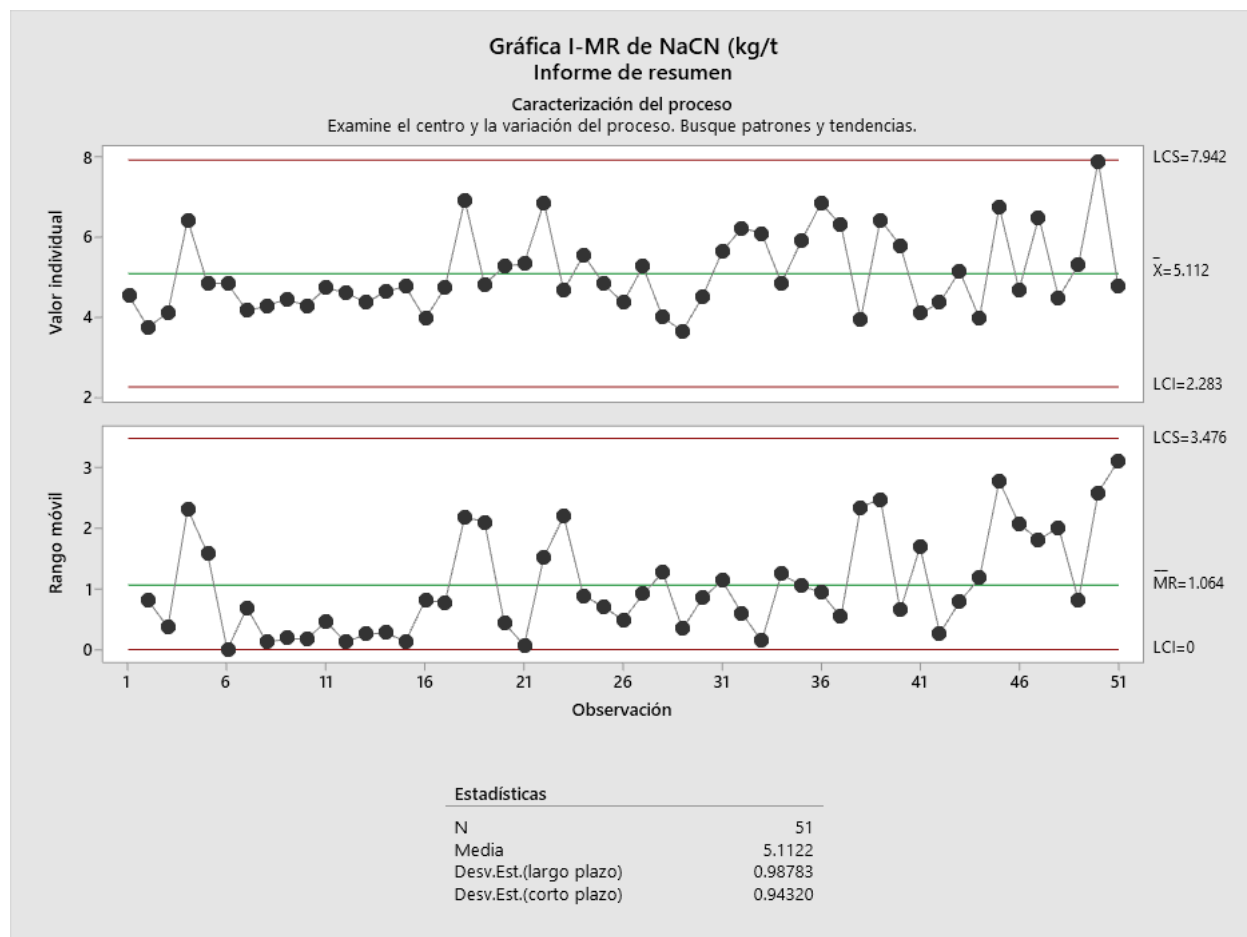
Consumo de NaOH kg/t con inyección forzada de oxígeno



La Figura 7 muestra la gráfica I-MR del consumo de NaOH (kg/t) con inyección forzada de oxígeno en 51 observaciones. La media es 3.71 kg/t, con límites de control entre 1.62 y 5.79, sin puntos fuera de control, lo que indica un proceso estable y consistente. Las desviaciones estándar a largo y corto plazo (0.78 y 0.69) son bajas, evidenciando baja variabilidad y buen control operacional. La tendencia se mantiene cercana a la media, sin fluctuaciones abruptas. En general, el consumo de NaOH con oxígeno forzado muestra mejor uniformidad y control estadístico respecto al proceso sin oxigenación.

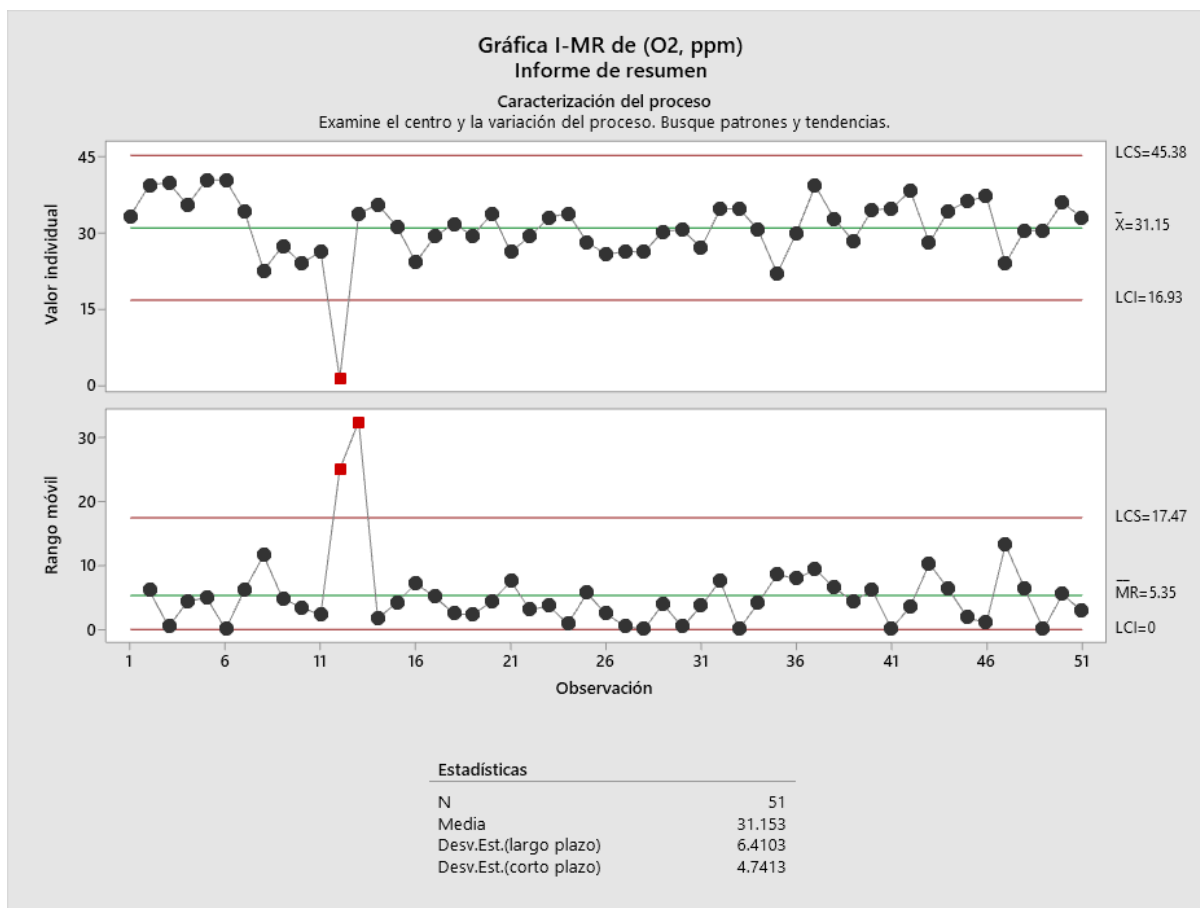
Figura 8

Consumo de NaCN kg/t con inyección forzada de oxígeno



La Figura 8 muestra la gráfica I-MR del consumo de NaCN (kg/t) con inyección forzada de oxígeno en 51 observaciones. La media es 5.11 kg/t, con límites de control entre 2.28 y 7.94, sin puntos fuera de control, lo que indica un proceso estable y bajo control estadístico. Las desviaciones estándar de largo y corto plazo (0.98 y 0.94) son similares, evidenciando baja variabilidad y buena consistencia. El comportamiento se mantiene cercano a la media, con ligeras oscilaciones normales. En general, el consumo de NaCN con oxígeno presenta mayor uniformidad y control operacional.

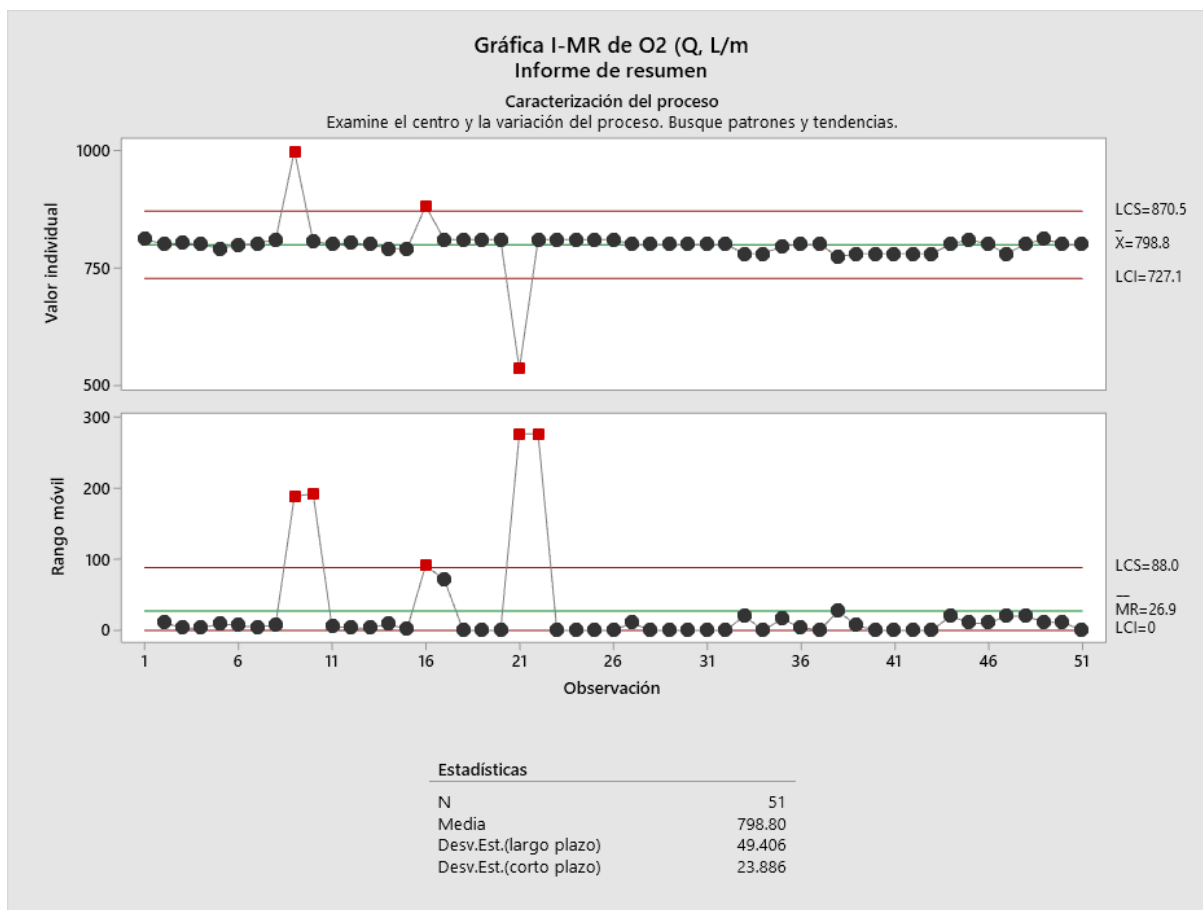
Figura 9
Concentración de oxígeno en ppm en la inyección



La Figura 9 muestra la gráfica I-MR de la concentración de oxígeno (ppm) durante la inyección. La media es 31.15 ppm, con límites de control entre 16.93 y 45.38, observándose una anomalía puntual en la observación 13 con caída extrema. Las desviaciones estándar (6.41 largo plazo y 4.74 corto plazo) indican moderada variabilidad. Exceptuando el valor atípico, el proceso se mantiene estable y dentro de control, mostrando una distribución homogénea y adecuada regulación del flujo de oxígeno, esencial para mantener la eficiencia en la recuperación metalúrgica.

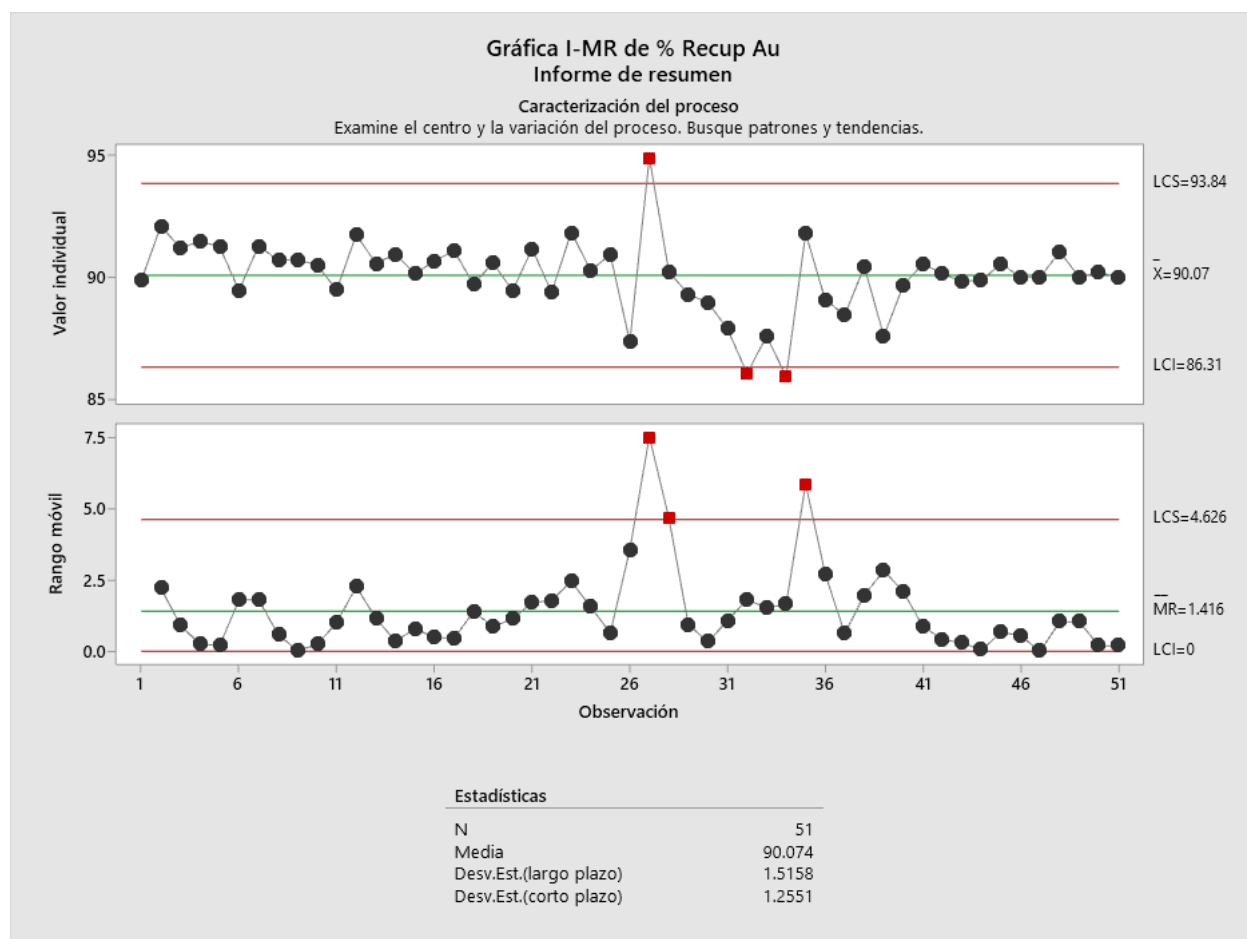
Figura 10

Caudal de inyección de oxígeno a los TK de cianuración



La Figura 10 presenta la gráfica I-MR del caudal de inyección de oxígeno (L/min) hacia los tanques de cianuración. La media del proceso es 798.8 L/min, con límites de control entre 727.1 y 870.5, observándose algunos puntos fuera de control, especialmente en las observaciones 10, 12 y 22, donde el flujo supera el límite superior. Las desviaciones estándar a largo y corto plazo (49.4 y 23.9) reflejan variabilidad moderada, atribuida a fluctuaciones en el sistema de inyección. En general, el proceso mantiene estabilidad, aunque requiere ajuste en la regulación del flujo para evitar sobrepresiones y pérdidas de eficiencia.

Figura 11
Recuperación de oro con inyección forzada de oxígeno

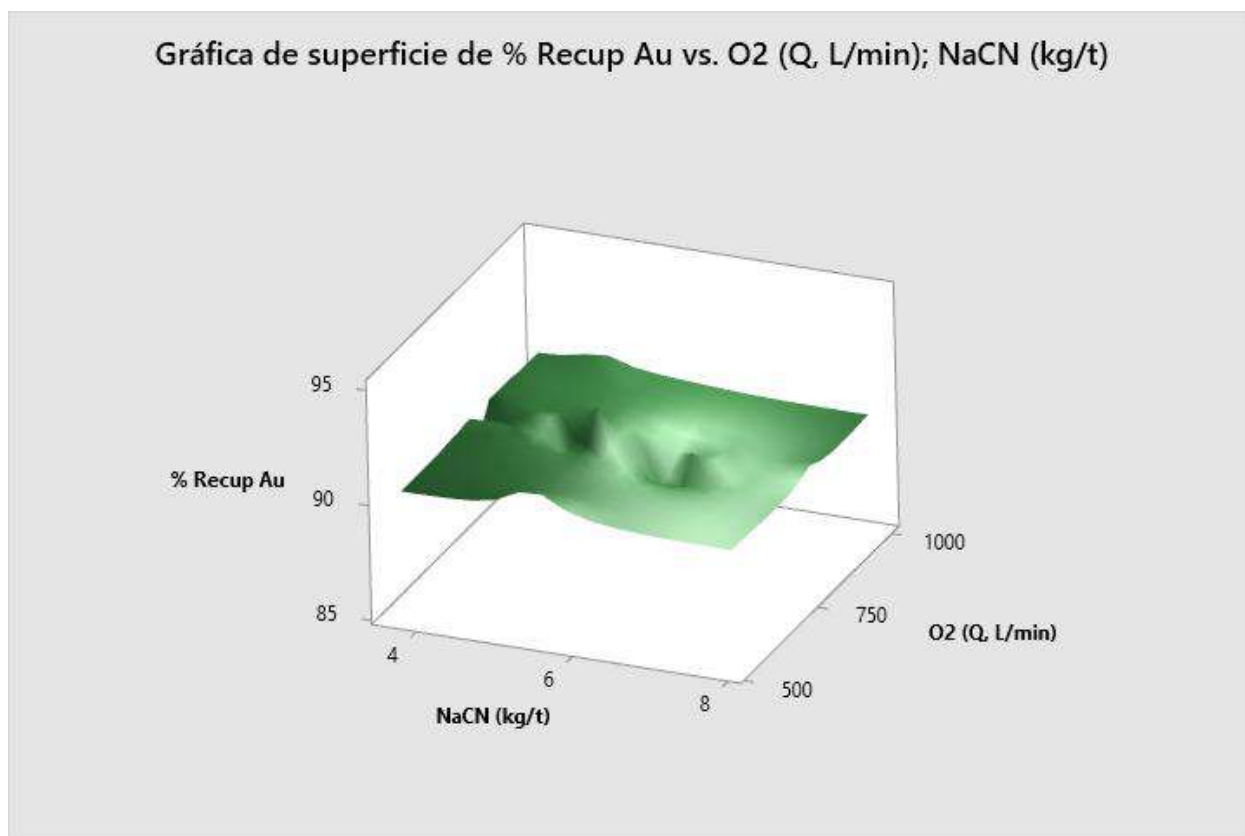


Sobre la variación en el tiempo de la recuperación del oro con inyección forzada de oxígeno, en la Figura 11 muestra la gráfica de control I-MR del porcentaje de recuperación de oro (Recup Au). El proceso presenta una media de 90.07%, con límites de control individuales entre 86.31% y 93.84%. Se identifican cuatro puntos fuera de control (uno en I y tres en MR), evidenciando variaciones atípicas en las observaciones 27 y 34. La desviación estándar a largo plazo es de 1.5158, superior a la desviación a corto plazo (1.2551), lo cual indica variabilidad acumulada en el tiempo. Aunque la media es adecuada, el proceso no está completamente bajo control estadístico, requiriendo corrección y seguimiento.

4.1.2.3. Recuperación del oro con inyección de oxígeno forzada

Figura 12

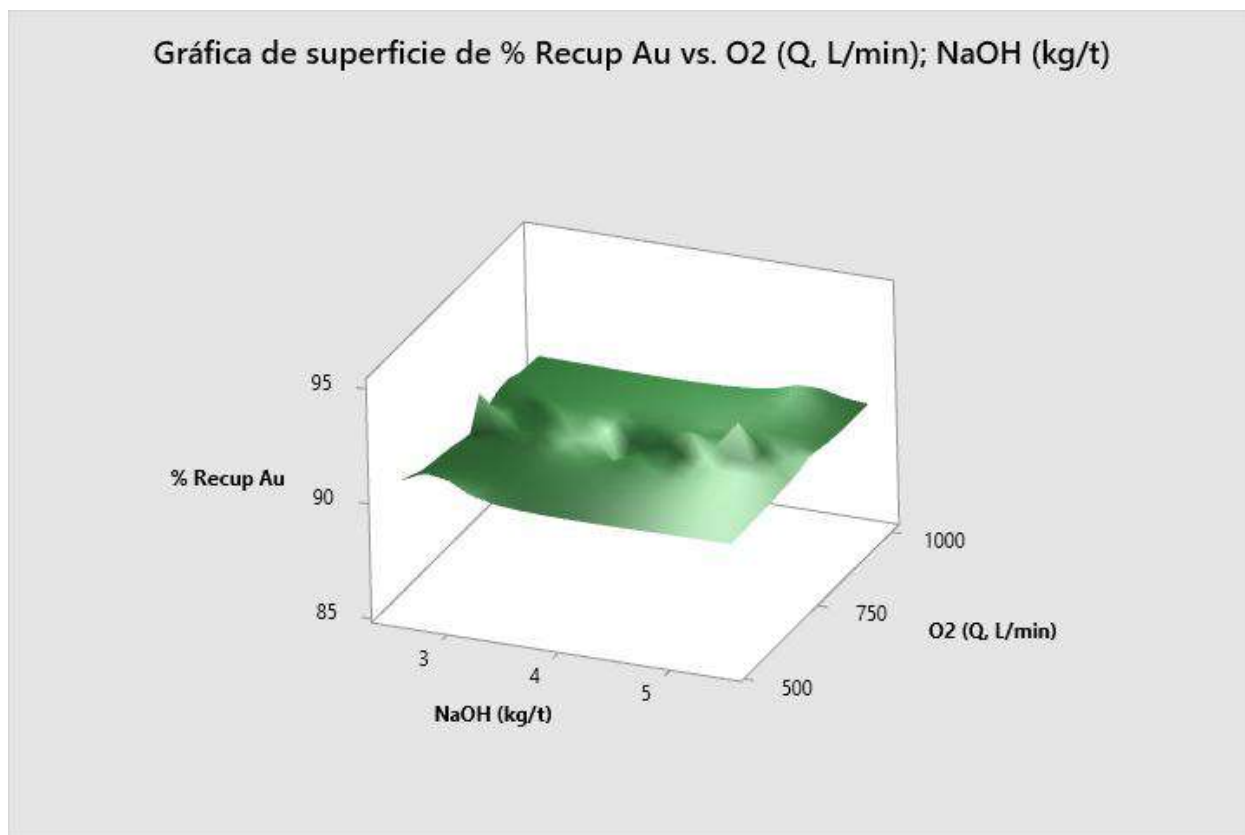
Recuperación de Au en relación del caudal de oxígeno (L/min) y NaCN (kg/t)



La Figura 12 muestra la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de oro (%Recup Au) en función del caudal de oxígeno (L/min) y del consumo de NaCN (kg/t). Se observa que la recuperación aumenta progresivamente con el incremento del oxígeno hasta valores cercanos a 95%, evidenciando una mejor oxidación y disolución del oro. Sin embargo, a caudales muy altos o bajos, la recuperación tiende a disminuir. El balance óptimo entre flujo de oxígeno y concentración de NaCN permite maximizar la eficiencia del proceso de cianuración sin generar consumo excesivo de reactivos.

Figura 13

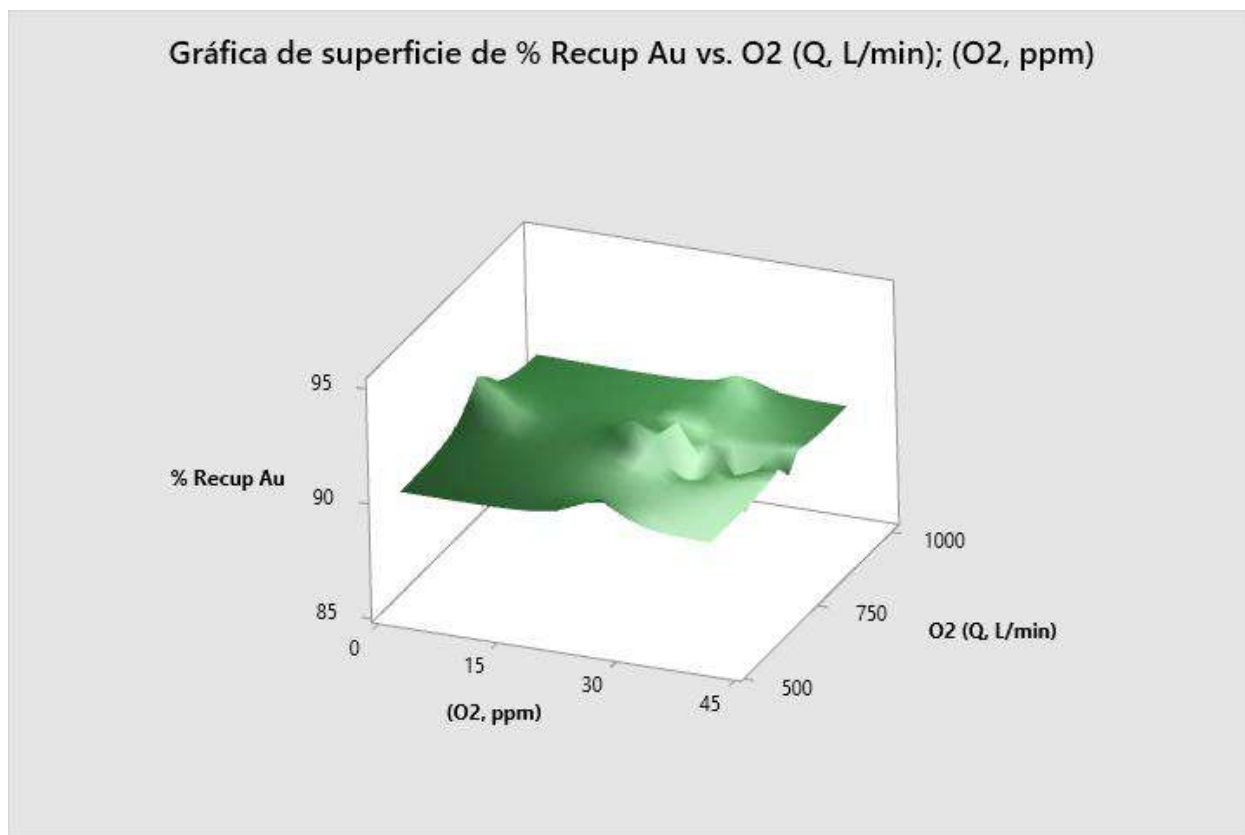
Recuperación del oro en relación de caudal (L/min) y NaOH (kg/t)



En la Figura 13 se presenta la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de oro (%Recup Au) en función del caudal de oxígeno (L/min) y el consumo de NaOH (kg/t). Se observa que la recuperación mejora progresivamente con el aumento del flujo de oxígeno, alcanzando valores cercanos al 95% cuando el consumo de NaOH es moderado (3–5 kg/t). Esto evidencia que la oxigenación optimiza la oxidación del oro y la estabilidad del medio alcalino, favoreciendo su disolución. Sin embargo, niveles extremos de ambas variables disminuyen la eficiencia del proceso de cianuración.

Figura 14

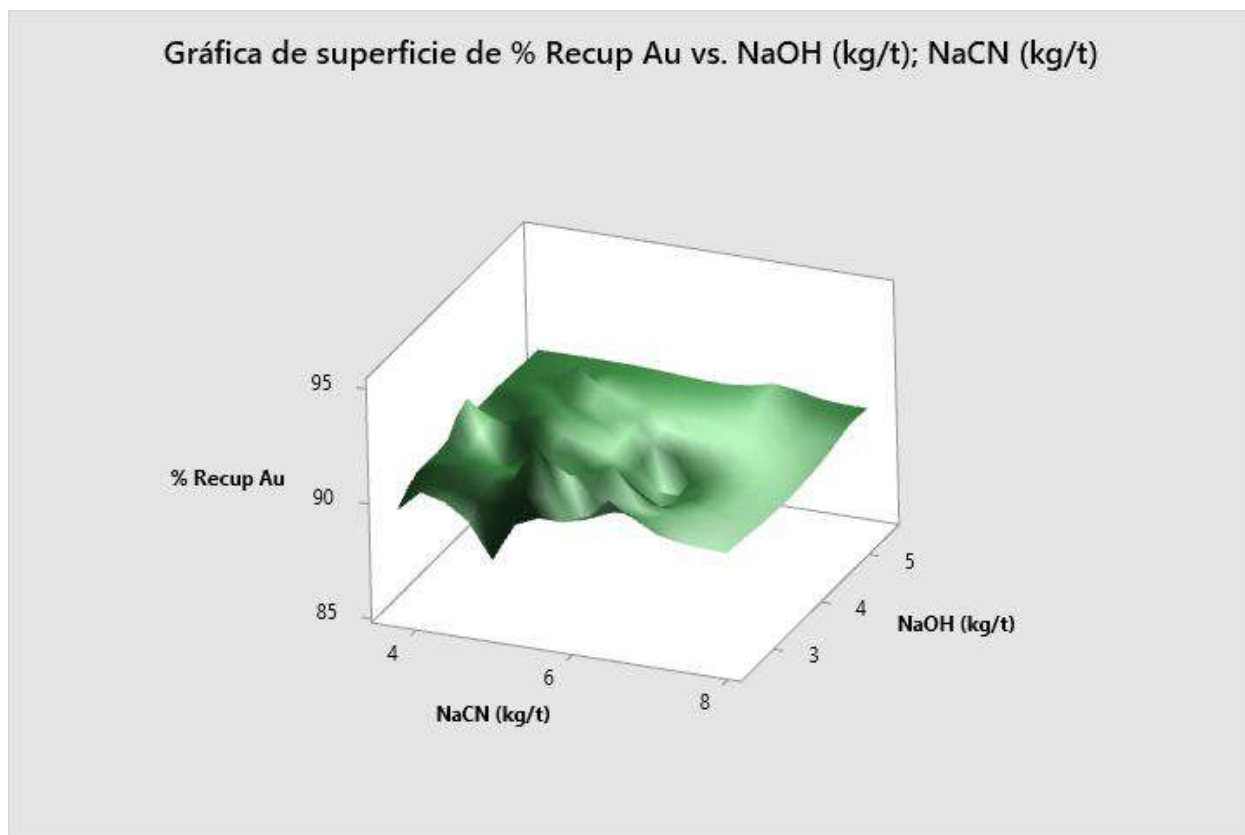
Recuperación de oro en relación del caudal (L/min) y concentración (ppm) de oxígeno



En la Figura 14 se presenta la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de oro (%Recup Au) en función del caudal de oxígeno (L/min) y la concentración de oxígeno (ppm). Se observa que la recuperación aumenta al incrementar ambos parámetros, alcanzando valores cercanos al 95% con flujos y concentraciones intermedias. Este comportamiento demuestra que la oxigenación adecuada favorece la oxidación del oro y la disolución del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, optimizando la cianuración. Sin embargo, excesos de caudal o concentración generan turbulencias y pérdida de eficiencia. El equilibrio entre ambas variables resulta esencial para lograr mayor eficiencia metalúrgica.

Figura 15

Porcentaje de extracción de oro en relación a la dosis de NaOH y NaCN (kg/t)

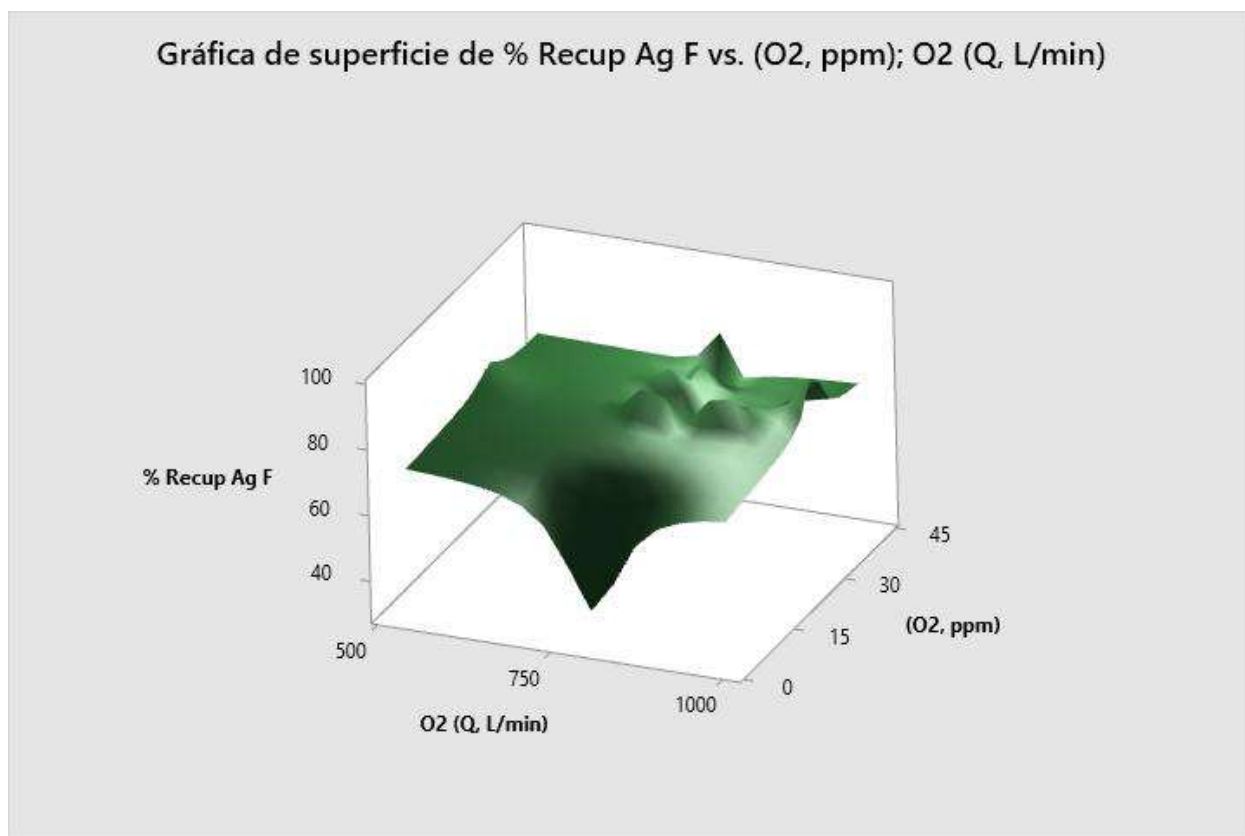


En la Figura 15 se observa la superficie de respuesta del porcentaje de extracción de oro (%Recup Au) en función de la dosis de NaOH y NaCN (kg/t). Los resultados muestran que las recuperaciones más altas, cercanas al 95%, se alcanzan con niveles moderados de ambos reactivos, donde se mantiene un equilibrio entre la alcalinidad y la disponibilidad de cianuro libre. A bajas dosis de NaCN, la disolución del oro disminuye notablemente. Sin embargo, incrementos excesivos en NaOH o NaCN no mejoran significativamente la recuperación, confirmando que el óptimo metalúrgico se logra dentro de una zona intermedia de operación.

4.1.2.4. Recuperación de la plata con inyección de oxígeno forzada

Figura 16

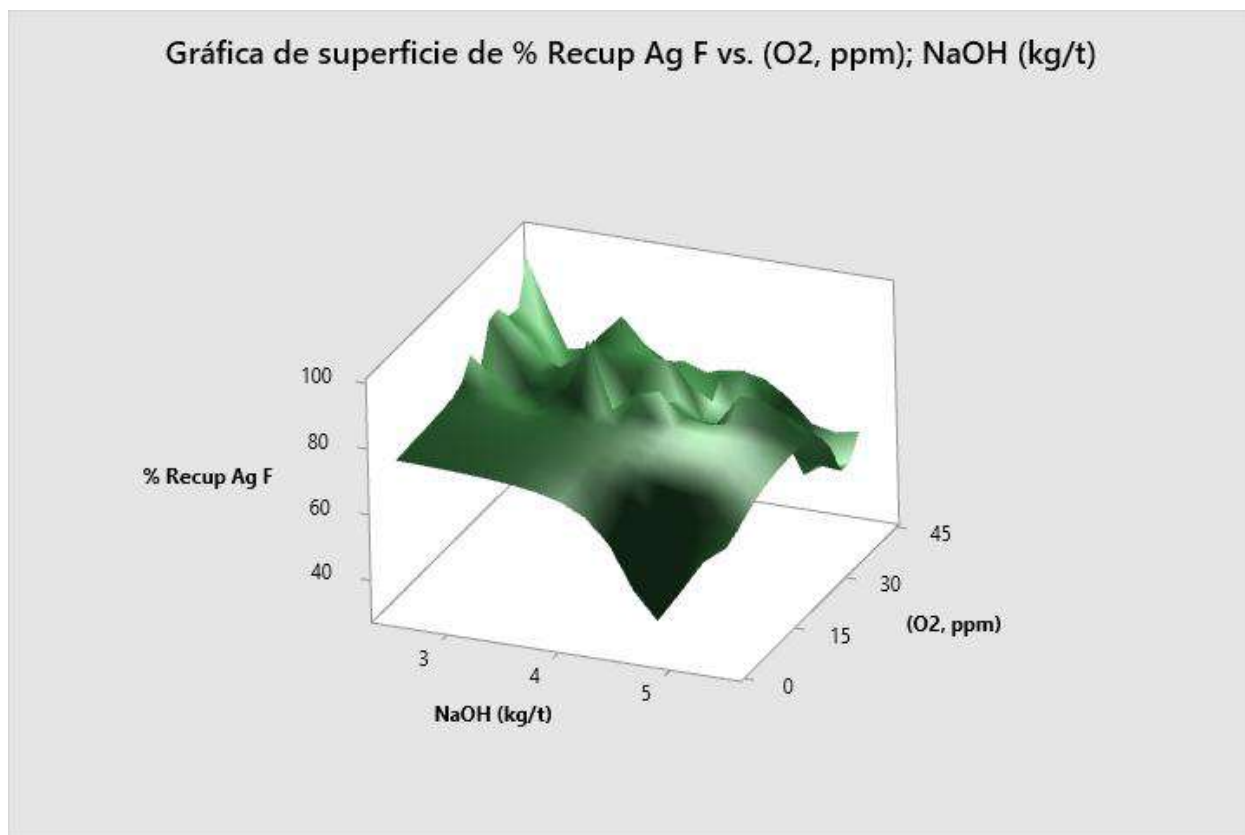
Extracción de la plata concentración del oxígeno ppm y el caudal L/min



La Figura 16 presenta la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de plata (%Recup Ag F) en función del caudal de oxígeno (L/min) y la concentración de oxígeno (ppm) durante la cianuración con inyección forzada. Se aprecia que la recuperación aumenta progresivamente con el incremento del oxígeno, alcanzando valores cercanos al 100%, evidenciando una mayor eficiencia de oxidación y disolución del complejo argentocianuro. Sin embargo, niveles excesivos de caudal o concentración tienden a disminuir el rendimiento, indicando que el equilibrio entre ambas variables optimiza la recuperación metalúrgica.

Figura 17

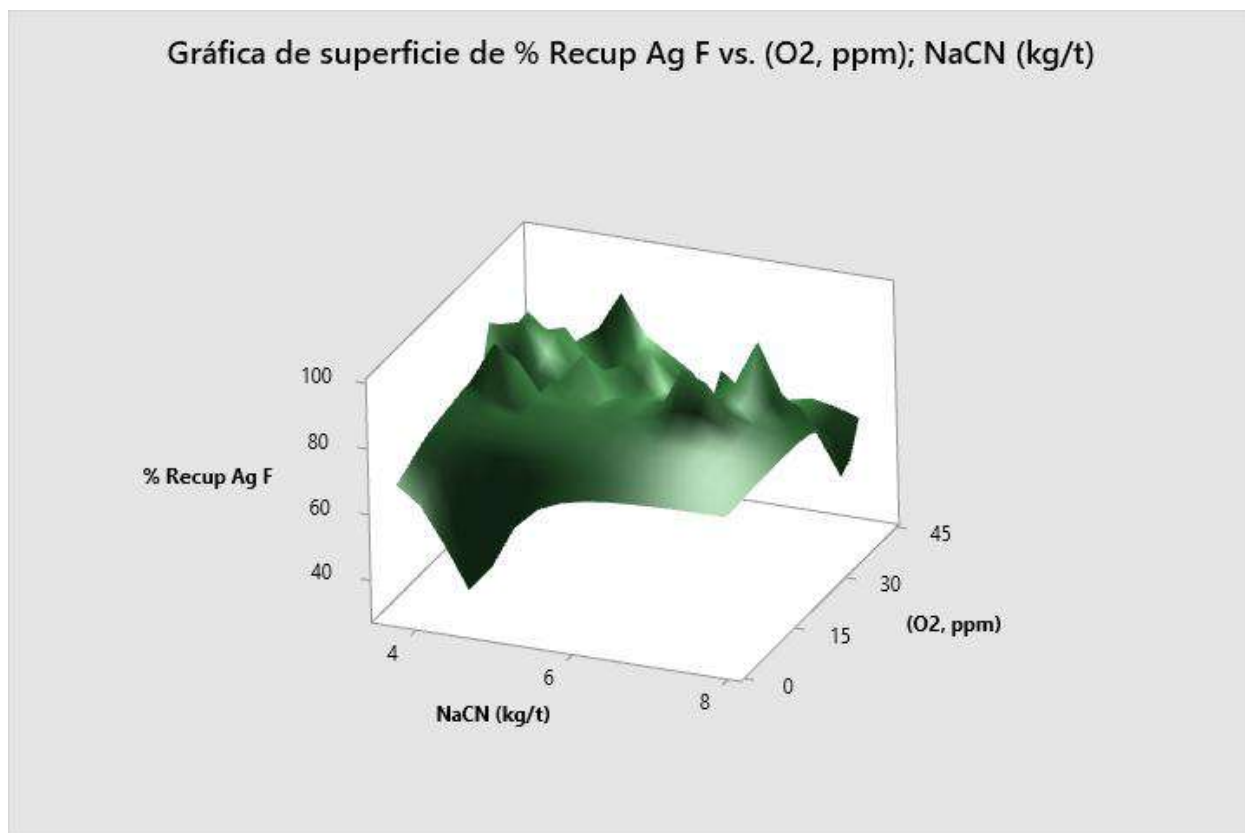
Extracción de la plata en relación de la concentración del oxígeno ppm y NaOH (kg/t)



Respecto la Figura 17 muestra la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de plata (%Recup Ag F) en función de la concentración de oxígeno (ppm) y el consumo de NaOH (kg/t) durante la cianuración con oxigenación forzada. Se observa que las recuperaciones más altas, entre 90% y 100%, se obtienen con niveles moderados de oxígeno (20–35 ppm) y consumos de NaOH entre 3.5 y 4.5 kg/t, donde se favorece la oxidación y estabilidad del medio alcalino. Cuando el oxígeno o la alcalinidad son excesivos, la eficiencia disminuye, indicando la necesidad de un balance operativo óptimo.

Figura 18

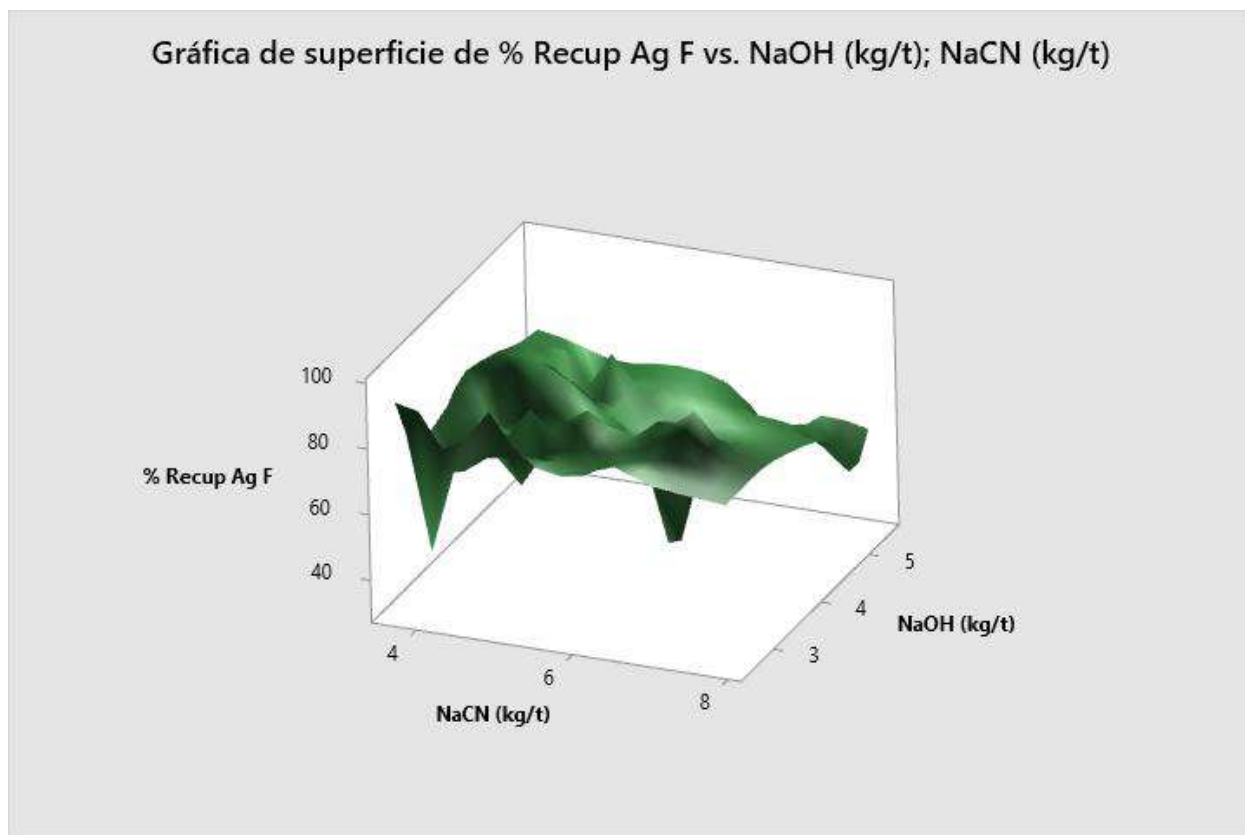
Porcentaje de recuperación de Ag en relación a NaCN (kg/t) y concentración de oxígeno



La Figura 18 presenta la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de plata (%Recup Ag F) en función de la concentración de oxígeno (ppm) y el consumo de NaOH (kg/t) durante la cianuración con inyección forzada de oxígeno. Se observa que las mayores recuperaciones, en el rango de 90% a 100%, se obtienen con concentraciones de oxígeno entre 25 y 40 ppm y consumos de NaOH entre 3.5 y 4.5 kg/t. Estos niveles permiten una adecuada oxidación y estabilidad alcalina. Fuera de estos rangos, la eficiencia metalúrgica disminuye ligeramente.

Figura 19

Porcentaje de extracción de la plata en relación de NaOH y NaCN (kg/t)

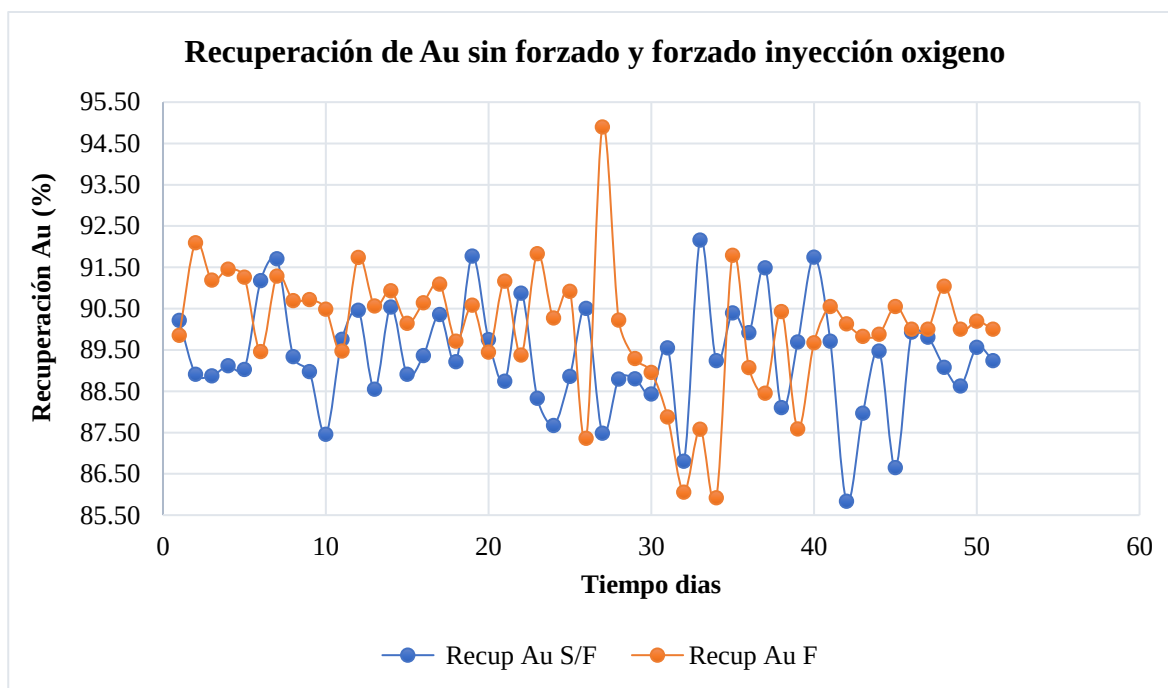


La extracción de la plata en la figura 19 presenta la superficie de respuesta del porcentaje de recuperación de plata (%Recup Ag F) en función del consumo de NaOH (kg/t) y NaCN (kg/t) durante la cianuración con oxigenación forzada. Se observa que las recuperaciones más elevadas, entre 90% y 100%, se obtienen cuando el NaOH se mantiene entre 3.5 y 4.5 kg/t y el NaCN entre 5 y 6.5 kg/t, condiciones que favorecen la disolución del complejo argentocianuro. Sin embargo, fuera de estos rangos, la recuperación disminuye, evidenciando la necesidad de mantener una proporción adecuada entre ambos reactivos.

4.1.2.5. Recuperación de oro y plata en relación del tiempo

Figura 20

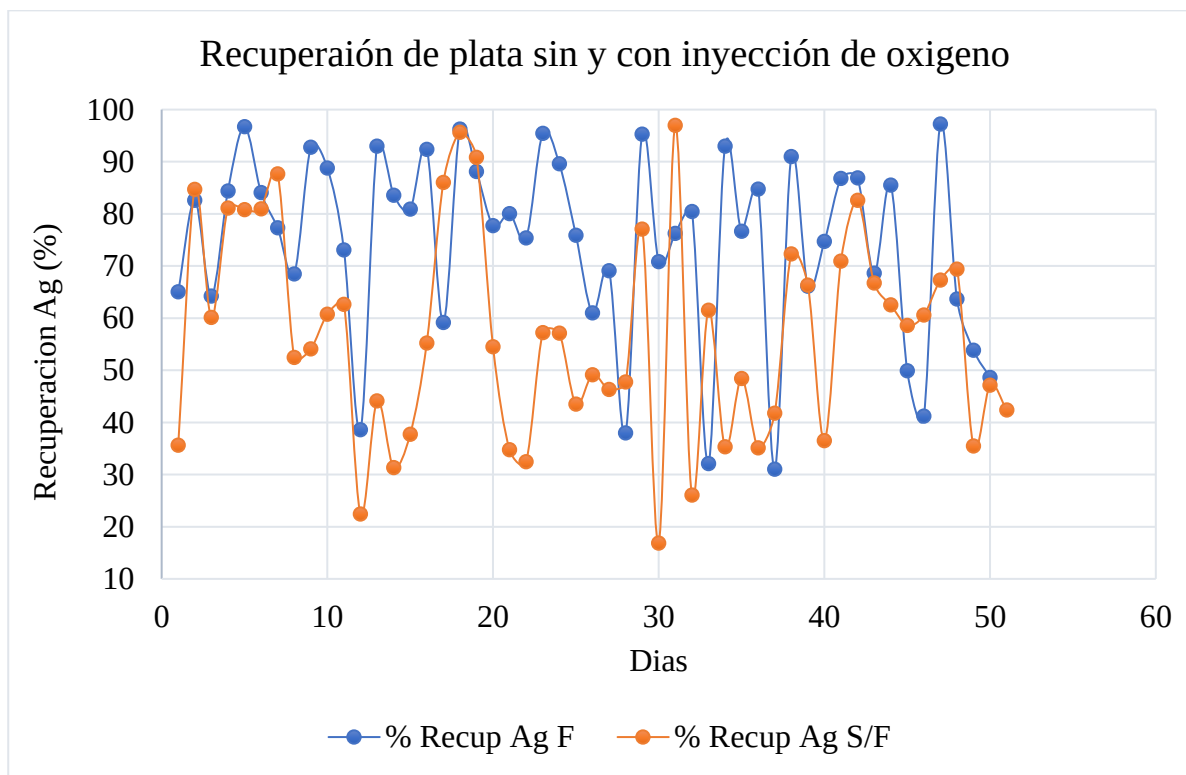
Curva de la recuperación de oro con y sin inyección de oxígeno



La Figura 20 muestra la recuperación de oro con y sin inyección forzada de oxígeno durante 52 días. La inyección de oxígeno genera picos de recuperación superiores (hasta 94.6%), pero también presenta mayor variabilidad e inestabilidad. En cambio, la curva sin oxígeno es más constante, aunque con menores recuperaciones. La inyección de oxígeno mejora el rendimiento, pero requiere control riguroso. Sin oxígeno, el proceso es más estable. La presencia del oxígeno potencia la cinética, pero puede ser menos confiable sin monitoreo adecuado.

Figura 21

Recuperación de la plata con inyección de oxígeno forzado y sin inyección



En monitoreo en la extracción en la figura 21 muestra la recuperación de plata (Ag) con y sin inyección forzada de oxígeno a lo largo de 52 días de operación. Se observa que el proceso con inyección de oxígeno (%Recup Ag F) presenta una mayor variabilidad, alcanzando picos de recuperación superiores al 90%, mientras que el sistema sin oxígeno (%Recup Ag S/F) mantiene valores más bajos y estables, generalmente entre 40% y 80%. La oxigenación forzada incrementa la disolución del complejo argentocianuro, favoreciendo la cinética de lixiviación. Sin embargo, las fluctuaciones reflejan la sensibilidad del proceso ante variaciones en pH, dosificación de reactivos y condiciones de agitación. En conjunto, la inyección de oxígeno mejora el rendimiento metalúrgico de la plata, aunque requiere mayor control operacional para evitar pérdidas por exceso de oxidación o consumo innecesario de cianuro.

Tabla 7*Porcentaje de extracción de oro en relación sin y con inyección forzada de oxígeno*

Parámetro	Con inyección (F)	Sin inyección (S)	Diferencia / Observación
O₂ (ppm)	1.47 – 40.60	—	El oxígeno forzado mantiene niveles entre 25 y 40 ppm, optimizando la oxidación.
Caudal O₂ (L/min)	534 – 998	—	Control estable del flujo, con tendencia media de 800 L/min.
NaOH (kg/t)	2.5 – 5.5	2.5 – 6.9	Similar rango, pero menor dispersión en sistema forzado.
NaCN (kg/t)	3.7 – 7.9	3.3 – 6.3	En promedio, menor consumo en sistema forzado.
% Recuperación Au	85.9 – 94.9 (prom. 90.5%)	85.8 – 92.1 (prom. 89.3%)	La inyección de oxígeno mejora la recuperación en $\approx 1.2\%$.
Estabilidad del proceso	Alta	Moderada	El sistema con oxígeno presenta menor variabilidad.
Eficiencia global	Óptima con dosis moderada de NaOH y NaCN.	Menor eficiencia por limitación de oxidación.	

La inyección de oxígeno en la tabla 7, incrementa la recuperación de oro en alrededor de 1.2%, reduce el consumo de reactivos y mejora la estabilidad del proceso. Las mejores condiciones se logran con NaOH entre 3–4.5 kg/t y NaCN entre 4–5 kg/t, junto con un flujo de oxígeno cercano a 800 L/min.

Tabla 8

Porcentaje de extracción de oro en relación sin y con inyección forzada de oxígeno

Parámetro	Sin inyección de oxígeno (S/F)	Con inyección forzada de oxígeno (F)	Diferencia / Observación
Rango de recuperación (%)	35 – 92	45 – 100	Incremento de hasta 8 puntos porcentuales con oxígeno.
Promedio de recuperación (%)	86.9	91.7	Mejora global de aproximadamente 5% en la extracción.
Estabilidad del proceso	Moderada, con alta dispersión de valores.	Más estable con tendencia ascendente.	El oxígeno reduce variaciones y mejora la cinética.
Condiciones óptimas (NaOH / NaCN) kg/t	3.5–4.5 / 4.0–5.0	3.5–4.5 / 5.0–6.5	Ligeramente mayor demanda de cianuro bajo oxigenación.
Eficiencia metalúrgica	Limitada por baja oxidación.	Alta, con mejor disolución del argentocianuro.	Proceso más eficiente y rápido.

La tabla 8 compara el porcentaje de extracción de plata en procesos de cianuración con y sin inyección forzada de oxígeno. Se aprecia que con oxígeno la recuperación promedio alcanza 91.7%, superando al sistema convencional con 86.9%. Además, el rango de extracción aumenta de 35–92% a 45–100%, demostrando una mejora significativa en la eficiencia metalúrgica. El proceso con oxigenación presenta mayor estabilidad y menor variabilidad, aunque requiere un ligero aumento en el consumo de NaCN. En conjunto, la inyección de oxígeno optimiza la cinética y maximiza la recuperación de plata.

Tabla 9*Recuperación de oro y plata con inyección de oxígeno y sin inyección*

Parámetro	Con inyección forzada (F)	Sin inyección (S)	Diferencia / Interpretación
Rango de recuperación de oro (%)	85.9 – 94.9	85.8 – 92.1	Incremento promedio de +1.5 %, evidenciando una mejor disolución del oro.
Rango de recuperación de plata (%)	38.6 – 97.2	16.9 – 95.7	Aumento promedio de +5.2 %, mostrando mayor eficiencia con oxigenación.
Promedio de recuperación Au (%)	90.27	88.88	Mejora atribuida a mayor oxidación y velocidad de lixiviación.
Promedio de recuperación Ag (%)	77.84	62.99	Incremento notable del rendimiento metalúrgico en la plata.
NaOH (kg/t)	2.5 – 5.5	2.5 – 6.9	Menor variabilidad y consumo más eficiente con oxígeno.
NaCN (kg/t)	3.7 – 7.9	3.3 – 6.3	Ligero aumento del consumo para mantener la estabilidad de cianuro.
Estabilidad del proceso	Alta	Media	La oxigenación mejora la homogeneidad y reduce fluctuaciones.

En la tabla 9 se describe una comparación del proceso de cianuración con y sin inyección forzada de oxígeno. Se evidencia que la oxigenación incrementa la recuperación promedio de oro de 88.88% a 90.27% y la plata de 62.99% a 77.84%, mostrando una mejora significativa en la eficiencia metalúrgica. Además, el proceso con oxígeno presenta mayor estabilidad operativa y mejor aprovechamiento de reactivos, optimizando la cinética de disolución y la calidad del producto final.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis general

Ha: La cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno permite una extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025

Ho: La cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno no permite una extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025

Tabla 10

Cianuración convencional e inyección forzada de aire y la extracción de oro

Hipótesis	Descripción	Evidencia experimental	Interpretación	Decisión
Ha (Alternativa)	La cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno permite una mayor extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025.	Con oxígeno: Recuperación promedio de Au = 90.27% y Ag = 77.84%.	La inyección forzada de oxígeno incrementa la recuperación de ambos metales, mejorando la cinética de disolución y la eficiencia metalúrgica.	Se acepta Ha.
		Sin oxígeno: Recuperación promedio de Au = 88.88% y Ag = 62.99%.		

Los resultados obtenidos confirman que la inyección forzada de oxígeno mejora la extracción tanto de oro como de plata, al incrementar la concentración de oxígeno disuelto y favorecer la formación de complejos aurocianurados y argentocianurados. El aumento promedio de recuperación (1.4% para oro y 15% para plata) evidencia una mayor eficiencia del proceso. Por ello, se acepta la hipótesis alternativa (Ha) y se rechaza la hipótesis nula (Ho), validando la efectividad del método en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025.

4.2.2. Contrastación de hipótesis específico

- **Ha:** La cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- **Ho:** La cianuración convencional no tiene efecto en el nivel de recuperación de oro en la empresa Paltarumi SAC.

Tabla 11

Contrastación de la hipótesis cianuración convencional y recuperación Au, Ag

Hipótesis	Descripción	Evidencia experimental	Interpretación	Decisión
Ha (Alternativa)	La cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa PALTARUMI SAC.	Recuperación promedio: Au = 88.88% y Ag = 62.99% sin inyección de oxígeno.	El proceso de cianuración convencional logra una extracción considerable de metales preciosos, evidenciando que el método tiene efecto positivo en la disolución de oro y plata, aunque con menor eficiencia que el sistema con oxígeno.	Se acepta Ha.

Los resultados en la tabla 11 demuestran que la cianuración convencional tiene un efecto directo en la recuperación de oro y plata, logrando valores promedio de 88.88% para oro y 62.99% para plata, lo que evidencia la efectividad del método incluso sin oxigenación adicional. Sin embargo, su eficiencia es inferior al proceso con inyección de oxígeno, donde las recuperaciones son más altas. Por tanto, se acepta la hipótesis alternativa (Ha) y se rechaza la hipótesis nula (Ho), validando que la cianuración convencional influye significativamente en la recuperación metálica.

- **Ha:** La inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.
- **Ho:** La inyección forzada de oxígeno durante la cianuración no influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.

Tabla 12

Contrastación de la recuperación de Au, Ag en relación a inyección de oxígeno forzado

Hipótesis	Descripción	Evidencia experimental	Interpretación	Decisión
Ha (Alternativa)	La inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa PALTARUMI SAC.	Con oxígeno: Au = 90.27%, Ag = 77.84%. Sin oxígeno: Au = 88.88%, Ag = 62.99%.	Los resultados muestran que el oxígeno acelera la cinética de disolución de ambos metales, mejorando la formación de complejos aurocianurados y argentocianurados, lo que incrementa la eficiencia de lixiviación.	Se acepta Ha.

Los resultados en la tabla 12 confirman que la inyección forzada de oxígeno mejora la cinética de disolución del oro y la plata, al aumentar la disponibilidad de oxígeno disuelto en la solución cianurada, lo que favorece la oxidación de los metales y acelera la formación de los complejos solubles $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$. Este efecto se traduce en mayores porcentajes de recuperación y menor tiempo de lixiviación, demostrando que el proceso con oxigenación es más eficiente. Por tanto, se acepta la hipótesis alterna (Ha) y se rechaza la hipótesis nula (Ho).

- **Ha:** La cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado permite identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.
- **Ho:** La cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado no permite identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.

Tabla 13

Contrastación de la diferencia entre convencional y forzada en la recuperación Au y Ag

Hipótesis	Descripción	Evidencia experimental	Interpretación	Decisión
Ha (Alternativa)	La cianuración convencional y la cianuración con inyección forzada de oxígeno permiten identificar diferencias en la eficiencia de recuperación de oro y plata en la empresa PALTARUMI SAC.	Con oxígeno: Au = 90.27%, Ag = 77.84%. Sin oxígeno: Au = 88.88%, Ag = 62.99%.	Se observan diferencias notorias en la eficiencia de ambos métodos. La oxigenación forzada mejora la recuperación de oro y especialmente la de plata, reflejando una cinética más activa y una disolución más completa de los metales preciosos.	Se acepta Ha.

Los resultados en la tabla 13 demuestran que la inyección forzada de oxígeno mejora significativamente la eficiencia de recuperación de oro y plata en comparación con la cianuración convencional. El aumento del oxígeno disuelto acelera la oxidación y formación de complejos metálicos, incrementando la disolución y el rendimiento. Por ello, se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula.

CAPITULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración mejora significativamente la recuperación de oro y plata en comparación con el proceso convencional, validando lo señalado por diversos antecedentes nacionales e internacionales.

En términos cuantitativos, la recuperación promedio de oro aumentó de 88.88 % a 90.27 % y la de plata de 62.99 % a 77.84 %, lo que evidencia una mejora directa en la eficiencia metalúrgica. Este incremento se atribuye al mayor contenido de oxígeno disuelto en la solución, el cual acelera la cinética de disolución y promueve la formación de los complejos $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, favoreciendo la oxidación de las especies metálicas y evitando la pasivación superficial de los sulfuros.

Los hallazgos son coherentes con los antecedentes internacionales: Valarezo et al. (2024) demostraron que la adición de oxidantes como H_2O_2 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ y glicina puede aumentar la recuperación de oro hasta en un 12 %, confirmando que el aporte de oxígeno adicional o reactivos oxidantes es esencial para mejorar la disolución de metales preciosos. Del mismo modo, Nicol et al. (2023) evidenciaron que oxidantes alternativos como el NBS aceleran la reacción electroquímica del oro, logrando una disolución similar a la obtenida con soluciones oxigenadas. Esto coincide con los resultados en PALTARUMI SAC, donde la oxigenación forzada actuó como catalizador de la reacción, aumentando la velocidad de lixiviación sin alterar significativamente el pH o el consumo de cianuro.

Asimismo, Díaz et al. (2024) destacaron la importancia de la oxidación previa en minerales sulfurados refractarios mediante biooxidación, alcanzando incrementos de hasta 61.44 % en oro y 94.24 % en plata. Aunque en el presente estudio no se aplicó un pretratamiento biológico, la inyección de oxígeno cumplió una función análoga, al generar un ambiente más oxidante que facilitó la ruptura de capas sulfuradas y liberó los metales para su posterior cianuración.

A nivel nacional, los estudios de Calderón & Fernández (2024) mostraron que el uso de H_2O_2 mejora la recuperación de oro y plata en más de 20 %, confirmando el papel crucial del oxígeno activo en el proceso de disolución. Igualmente, Gonzales & Bravo (2021) demostraron que al aumentar la concentración de oxígeno disuelto a 7.30 mg/L, la recuperación de oro alcanzó 99.10 %, concluyendo que la oxigenación directa incrementa la eficiencia de la cianuración, resultados que respaldan completamente los obtenidos en la planta PALTARUMI SAC.

Por otra parte, los resultados concuerdan con lo reportado por Ordoñez & Alarcón (2024), quienes determinaron que la ley de cabeza y el tamaño de partícula influyen directamente en la eficiencia de recuperación. En esta investigación, las condiciones de operación se mantuvieron controladas (densidad de pulpa, pH y granulometría), lo que permitió atribuir las mejoras en la recuperación principalmente al efecto de la inyección de oxígeno.

los resultados confirman que la oxigenación forzada es un factor determinante en la mejora de la cinética de disolución de oro y plata, optimizando la formación de los complejos metálicos, reduciendo tiempos de lixiviación y aumentando la eficiencia global del proceso. Estos hallazgos no solo coinciden con los antecedentes revisados, sino que además aportan

evidencia industrial directa sobre la eficacia de la inyección de oxígeno como una tecnología viable y sostenible para fortalecer la cianuración en plantas minero-metalúrgicas peruanas.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Los resultados de la investigación confirman que la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración mejora significativamente la eficiencia de recuperación de oro y plata en comparación con el proceso convencional. El incremento del oxígeno disuelto favorece la cinética de disolución de los metales preciosos, acelera la formación de complejos metálicos estables y optimiza el rendimiento metalúrgico en la empresa PALTARUMI SAC – 2025, validando así la hipótesis general planteada.

La cianuración convencional tiene un efecto directo en la recuperación de oro y plata, alcanzando porcentajes promedio de 88.88 % para oro y 62.99 % para plata, lo que demuestra su eficacia operativa básica. Sin embargo, su rendimiento es limitado por la baja disponibilidad de oxígeno disuelto, lo que reduce la velocidad de oxidación y la disolución completa de los metales.

La inyección forzada de oxígeno influye positivamente en la cinética de disolución del oro y la plata, al aumentar la velocidad de oxidación y evitar la pasivación de los sulfuros. Con este método se alcanzaron recuperaciones promedio de 90.27 % para oro y 77.84 % para plata, evidenciando una mejora significativa en la eficiencia del proceso frente al sistema convencional.

La comparación entre ambos métodos permite identificar diferencias claras en la eficiencia metalúrgica, confirmando que la cianuración con oxigenación forzada genera un proceso más estable, con menor consumo de reactivos y mayor recuperación. Estas diferencias demuestran que la inyección de oxígeno optimiza las condiciones químicas y cinéticas de la

cianuración, siendo una alternativa técnica viable para mejorar la recuperación de metales preciosos a nivel industrial.

6.2. Recomendaciones

Implementar un sistema de monitoreo continuo del caudal y concentración de oxígeno (ppm) durante la cianuración, asegurando niveles óptimos (25–40 ppm) para maximizar la disolución de oro y plata sin generar pérdidas por sobreoxidación o consumo excesivo de cianuro.

Realizar pruebas piloto para determinar la dosificación ideal de NaOH y NaCN bajo condiciones de oxigenación forzada, evitando desequilibrios en el pH o consumo innecesario de reactivos, con el fin de reducir costos y mantener alta eficiencia metalúrgica.

Replicar el proceso de inyección forzada de oxígeno en otros circuitos metalúrgicos (CIL, CIP o pilas de lixiviación), adaptando los parámetros de flujo, presión y tiempo de residencia, para evaluar su impacto en la recuperación global y sostenibilidad operativa.

Desarrollar investigaciones adicionales sobre la influencia del oxígeno en la degradación del cianuro y la generación de subproductos, asegurando un manejo ambiental responsable y la implementación de tecnologías limpias que garanticen la sostenibilidad del proceso metalúrgico en la empresa PALTARUMI SAC.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1. Referencias bibliográficas

- Albarracín, L., Ponce, D., & Giler, J. (2023). El impacto ambiental que provoca la minería en el Recinto Estero Hondo del cantón la Maná – Cotopaxi. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 2. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v2i10.3525>
- Alea, V., Guillen, M., Muñoz, C., Torrelles, E., & Villadomiu, N. (2001). *Estadística descriptiva. Aplicaciones prácticas*. Edicions Universitat Barcelona. https://www.google.com.pe/books/edition/Estad%C3%ADstica_descriptiva_Aplicaciones_pr/aR0saoQkzIcC?hl=es-419&gbpv=1
- Alzina, R. B. (2004). *Metodología de la investigación educativa*. Editorial La Muralla.
- Apaza, H., Rojas, Y., Mamani, E., & Chura, V. (2021). Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro | Aporte Santiaguino. *Aporte Santiaguino*, 14(1), 120-137.
- Arce-Villalobos, K., Arias-Castro, A., Hernández-Ugalde, K., Mora-Barrantes, J., & Sánchez-Gutiérrez, R. (2021). Impacto ambiental de diferentes sectores productivos de Costa Rica | Revista Tecnología en Marcha. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(2), 76-87. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4890>
- Argota, G., Espinoza, N., & Iannaccone, J. (2017). Evaluación de la toxicidad letal media por exposición a cianuro libre en efluentes y relaves mineros utilizando los biomodelos *Brachydanio rerio* Y *Eisenia andrei*. *Cátedra Villarreal*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.24039/cv20153147>

- Arias, J., Paternina, E., & Barragán, D. (2009). Adsorción física sobre sólidos: Aspectos termodinámicos. *Quím. Nova*, 32(5). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000500046>
- Arias-Arce, V., Sánchez-Rojas, T., Castillo-Aldave, Y., & Vega-Alave, R. (2023). Aislamiento y adaptación de *Pseudomonas pseudoalcaligenes* en un efluente de proceso de cianuración de minerales auríferos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(52), Article 52. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.26547>
- Arshad, M. (2024, septiembre 9). *Bioreactor Scale-Up: Mass Transfer*. <https://www.bioprocessintl.com/bioreactors/lessons-in-bioreactor-scale-up-part-3-experimental-determination-and-application-of-oxygen-mass-transfer-rate-mass-transfer-coefficient-and-oxygen-uptake-rate>
- Baharun, N., Pek, O., Rezaei, M., Shah, K., Yaraghi, A., Shah, N., Rama, T., & Ismail, S. (2020). Effect of hydrogen peroxide and lead(II) nitrate on gold cyanide leaching of Malaysian mesothermal deposit gold ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(5), 905-918.
- Batista, P., & Agapito, M. (2023). Proposta e simulação de rota de processo para reintrodução em minerodutos de pellet feed dispostos em bacias de emergência. *Interdisciplinary Studies Journal*, 16(9). https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A8%3A21006824/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A173786211&crl=c&link_origin=app.txyz.ai
- Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación: Para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson Educación. https://www.google.com.pe/books/edition/Metodolog_a_de_la_investigaci_n/h4X_eFai5

9oC?hl=es-

419&gbpv=1&dq=NIVEL+de+investigaci%C3%B3n+EXPLICATIVO&pg=PA115&printsec=frontcover

Bernal, J., Vega, R., Zapata, I., & Acevedo, E. (2024). Impacto económico-ambiental generado de las actividades mineras en Panamá. *Revista Semilla Científica*, 5, Article 5. <https://doi.org/10.37594/sc.v1i5.1383>

Botero, Y. (2021). *Estudio de mecanismos de cianuración de oro considerando interacciones fisicoquímicas de interfase*. [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80515>

Calderón, K., & Fernández, G. (2024). *Recuperación de oro y plata con cianuración de mineral sulfurado, con pretratamiento de diferentes concentraciones de H2O2* [Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/ce643287-e94b-43b7-8672-1695f3a9e21e>

Castro, J., Macho, L., & Casallas, E. (2023). Revista Tecnura. *Tecnura*, 27(75), Article 75. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>

Chimonyo, W., Claire, K., Wiese, J., & O 'connor, C. (2015). Redox potential control during flotation of sulphide minerals. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/283510716_Redox_potential_control_during_flotation_of_sulphide_minerals

Cos, E., & Fuentes, J. (2023). Análisis integral de la disolución de los metales preciosos con sistemas de lixiviación novedosos a base de aminas. *EPISTEMUS*, 17(34), Article 34. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.267>

- Díaz, B., Castillo, A., Vega, A., Arevalo-Aranda, C., & Reyes, I. (2024). Indirect bio-oxidation: Treatment of refractory gold and silver sulfides. *LACCEI*, 1(8), Article 8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1282>
- Eriez. (2020). *Gold Leach Tank Aeration*. https://austmine.imisccloud.com/Web/Web/News-Resources/Articles/2020/10-Oct/Gold-Leach-Tank-Aeration.aspx?utm_source=chatgpt.com
- Escalante, J., & Lovera, D. (2023). Geometalurgia aplicada a relaves auríferos cianurados en la región Arequipa y su posterior proceso por Gravimetría. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51), Article 51. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24969>
- Espinoza, L. A., Iriarte, G., Espinoza, L. O., Gutarra, R., Herrera, M., B, J. Z., R, V. S. A., & G, J. A. T. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: Aplicación en Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), Article 48. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Estela, J. (2023). Mineralogía del yacimiento de oro y plata del distrito de Colquemarca – Cusco. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), Article 2. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5338
- Estupiñan, R., Romero, P., García, M., Garcés, D., & Valverde, P. (2021). Mining in Ecuador. Past, present and future. *Boletín Geológico y Minero*, 132(4), Article 4. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.4.010>
- Fernández, B., Viña, J., Ayala, J., & Ania, C. (2021). Eficacia del permanganato potásico en la degradación de cianuro y tiocianato en aguas residuales mineras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 109-117. <https://doi.org/10.20937/RICA.53701>

- Fierro, J., Quintero, E., Román, C., Cuida, E., Barreto, L., Alvarado, L., Cáceres, M., & León, J. (2022). *Evaluación de los aspectos hidrológicos, geoambientales y de riesgos del estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental del proyecto minero loma larga*. erraegeoambiental. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://miningwatch.ca/sites/default/files/t errae_informe_lomalarga_sep2022.pdf
- Flores, F., Vintimilla, E., & Barreno, D. (2024). Impacto de las Exportaciones Mineras en Ecuador Periodo 2018-2023: Perspectivas, Desafíos y Oportunidades. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), Article 4. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12581
- Gonzales, B., & Bravo, M. (2021). Influencia del oxígeno en la cianuración de minerales auríferos con carbón en pulpa para la extracción de oro. *Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión*. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5587>
- Gu, T., Rastegar, S., Mousavi, S., Li, M., & Zhou, M. (2018). Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge. *Bioresource Technology*, 261, 428-440. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.033>
- Guo, H., Deschênes, G., Pratt, A., & Fulton, M. (2005). Leaching kinetics and mechanisms of surface reactions during cyanidation of gold in the presence of pyrite or stibnite | Request PDF. *ResearchGate*, 22(2), 89-95. <https://doi.org/10.1007/BF03403120>
- Gupta, C., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press.
- Gupta, C., & Mukherjee, T. (1990). *Hydrometallurgy in Extraction Processes*. CRC Press. https://books.google.com.pe/books?id=F7p7W1rykpWC&printsec=frontcover&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- Gutarra, A., & Lovera, D. (2023). Recuperación de oro de minerales auríferos refractarios, la importancia de la caracterización mineralógica y el efecto del oxígeno en la lixiviación ácida. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51), Article 51. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25031>
- Habashi, F. (2017). *Principles of Extractive Metallurgy*. Routledge.
- Hernandez, R. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Huazo, J., Cisneros, G., Juárez, J. C., Teja, A. M., Hernández, O., & Legorreta, F. (2024). Efecto sinérgico de tiosulfato de sodio y glicina en la lixiviación de plata, utilizando peróxido de hidrógeno como oxidante y etilenglicol, en una muestra polimetálica de Zimapán: Influencia de la temperatura. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.29057/aactm.v11i11.13140>
- Jiménez, I., Rondón, W., Rojas de Astudillo, L., Rojas de Gáscue, B., Prin, J., Freire, D., Díaz, Y., Pino, K., & González, O. (2017). Síntesis de carbón activado a partir de epicarpio de attalea macrolepis y su aplicación en la remoción de pb²⁺ en soluciones acuosas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(2), Article 2. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.11>
- Khoshdast, H., & Sam, A. (2011). Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation. *The Open Mineral Processing Journal*, 4(1), 25-44. <https://doi.org/10.2174/1874841401104010025>
- Kondos, P., Griffith, W., & Jara, J. (1996). The use of oxygen in gold cyanidation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 35(1), 39-45. [https://doi.org/10.1016/0008-4433\(95\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0008-4433(95)00032-1)

- Locosch, J., & Knorre, H. (1988). Dissolved Oxygen in Cyanidation with Hydrogen Peroxide. *SME*. https://www.911metallurgist.com/blog/hydrogen-peroxide-to-increase-dissolved-oxygen-gold-leaching/?utm_source=chatgpt.com
- Lopez-Jimenez, C., Uribe-Guevara, J., & Cuesta-Ramírez, J. (2019). Impacto percibido en la salud de los mineros artesanales del municipio de Quinchía (Colombia) por el uso de mercurio y cianuro en el proceso de amalgamamiento de oro. *Revista de Salud Pública*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.15446/rsap.V21n3.81048>
- Lopez-Valdivieso, A., Sanchez, A., Ojeda, C., & Fuerstenau, M. (2006). Flotation and depression control of arsenopyrite through pH and pulp redox potential using xanthate as the collector. *International Journal of Mineral Processing*, 81(1), :27-34. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.06.003>
- Maldonado, G., Valdez, J., García, J., & Carrera, R. (2024). Análisis y perspectivas de los minerales Críticos: El Tesoro Latente de América Latina | Reincisol. *Ciencia y desarrollo social*, 3(6). [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)1008-1035](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)1008-1035)
- Marsden, J. (1987). A discussion on the dissolution rate of gold in alkaline cyanide solutions or—"Why worry about oxygen. *911Metallurgist*, 25-34.
- Marsden, J., & House, I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. SME.
- McLaughlin, J., Quinn, P., Agar, G., Clouthier, J., Dubé, G., & Leclerc, A. (1993). Oxygen Mass Transfer Considerations for Cyanidation Reactors. *OneMine*. <https://www.onetunnel.org/documents/oxygen-mass-transfer-considerations-for-cyanidation-reactors>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto

- Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/catalog/download/90/133/157?inline=1
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del oro*. San Marcos. <https://app.box.com/s/n2ijwocmhgzht4q6xq354ur5ignnsg76>
- Nicol, M., Staunton, W., & McGrath, T. (2023). *The Role of Oxidants in the Intensive Cyanidation of Gold. 1. Gold Dissolution* (SSRN Scholarly Paper No. 4617979). Social Science Research Network. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4617979>
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2019). *Metodología de la Investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U.
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2019). *Metodología de la Investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U.
- Oraby, E., Eksteen, J., & O'Connor, G. (2020). Gold leaching from oxide ores in alkaline glycine solutions in the presence of permanganate. *Hydrometallurgy*, 198, 105527. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105527>
- Oraby, E., Li, H., & Eksteen, J. (2019). An Alkaline Glycine-Based Leach Process of Base and Precious Metals from Powdered Waste Printed Circuit Boards. *Waste and Biomass Valorization*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00780-0>
- Ordoñez, I., & Alarcon, E. (2024). *Evaluación del proceso de cianuración de la extracción de oro a nivel de planta*. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/9902>
- Ozone Solutions. (2021, octubre 19). *Venturi Injector vs. Bubble Diffusion*. Ozone Solutions. <https://ozonesolutions.com/blog/venturi-injector-vs-bubble-diffusion/>

- Paitán, H. Ñ., Mejía, E. M., Ramírez, E. N., & Paucar, A. V. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa—Cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U.
- Pérez, G., Macías, I., Gutiérrez, J., Sampieri, Á., & Arriola, J. (2021). Adsorción de colorantes textiles en agua mediante carbón activado obtenido de serrín y cáscara de limón / Adsorption of textile dyes in water by activated carbon obtained from sawdust and lemon peel | Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. *Arquivos*, 4(4), 5703-5714. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-067>
- Petrus, H., Wanta, K. C., Setiawan, H., Perdana, I., & Astuti, W. (2018). Effect of pulp density and particle size on indirect bioleaching of Pomalaa nickel laterite using metabolic citric acid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/285/1/012004>
- Poma, C., & Guevara, V. (2024). Uso del amonio cuaternario en la separación de cobre y recuperación de cianuro en la extracción de metales por lixiviación. *Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú*. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.136>
- Ramos, N., & Calderón, J. (2022). Revisión del modelo geometalúrgico para la estimación de recursos minerales en depósitos pórfido cupríferos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 25(50), Article 50. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24261>
- Ruiz-Paternina, E., Villabona-Ortiz, Á., Tejada-Tova, C., Ortega-Toro, R., Ruiz-Paternina, E., Villabona-Ortiz, Á., Tejada-Tova, C., & Ortega-Toro, R. (2019). Thermodynamic Study of the Removal of Nickel and Chromium in Aqueous Solution using Adsorbents of Agro-

- Industrial Origin. *Información tecnológica*, 30(6). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600003>
- Ruiz-Sánchez, Á., & Juárez-Tapia, J. (2022). Obtención de cobre metálico a partir de la lixiviación de jales mineros originarios del estado de Zacatecas. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10, 1-9. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial7.9826>
- Sá, M., & Sadoyama, G. (2023). Caracterização e análise de viabilidade de processamento de minério de heap leaching via processo CIL. *Revista Foco*, 16(12). <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/3275>
- Sancho, J., Fernández, B., Ayala, J., García, M., & Lavandeira, A. (2011). Uses of the potassium permanganate to eliminate copper cyanide from waste water resulting from a lixiviation plant in a gold mine (II): Pilot plant experiences. *Revista de Metalurgia*, 47(3), Article 3. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1029>
- Sosa, R., & Argota, G. (2017). Predicción ecotoxicológica ante concentraciones no deseadas de cianuro libre en efluentes mineros-auríferos. *Campus*, 12(24), 179-186. <https://doi.org/10.24265/campus.2017.v22n24.03>
- Staunton, W. (2016). Chapter 30—Carbon-in-Pulp. En M. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing (Second Edition)* (pp. 535-552). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00030-X>
- Suárez, D., & Ubillus, K. (2022). Uso del epispermo de semilla de lúcum como carbón activado. *Anales Científicos*, 83(1), Article 1. <https://doi.org/10.21704/ac.v83i1.1887>

- Tejada, C., Herrera, A., & Ruiz, E. (2016). Utilización de biosorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios. *Ciencia en Desarrollo*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.19053/01217488.4228>
- Terán-Bojórquez, S., D. G. ., Alonso-González, O. ., Santos-Munguía, P. C. ., Elizondo-Álvarez, M. A. ., Bello-Teodoro. (2021). Agente lixivante alternativo al cianuro para minerales refractarios de telururo de oro. *Epistemos (Sonora)*, 15, 7-14.
- Ugarte, W., & Robles, H. (2023). Evaluación del impacto ambiental del proyecto de agua potable y saneamiento en baños del inca – Cajamarca. *REBIOL*, 43(1), Article 1.
- Valarezo, E., Astudillo, J., Ordóñez, V., Vaca, A., & Leon, W. (2024). Reactivos Usados para Mejorar la Lixiviación del Oro con Cianuro: Una Revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), Article 3. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12248
- Villalobos, I., Rondo-Jalca, K., Santos-Gonzales, A., Vega-Gonzalez, J., Cotrina T, M., & Portilla, H. (2023, 19-21). *Main gold mining companies using cyanidation leaching processes in Peru (#250)*. <https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/meta/FP250.html>
- Wills, B. A., Napier-Munn, T., & Wills, B. A. (with Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre). (2006). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7th ed). Elsevier/BH.
- Yannopoulos, J. C. (2012). *The Extractive Metallurgy of Gold*. Springer Science & Business Media.

ANEXOS

Anexo 1 localización



Anexo 2 Matriz de consistencia.

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
Generales	¿En qué medida la cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno tendrá efecto en la extracción de oro y plata en la empresa minera Paltarumi SAC-2025?	Evaluar la cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno para ver la extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025	La cianuración convencional e inyección forzada de oxígeno permite una extracción de oro y plata en la empresa minera PALTARUMI SAC-2025	<u>Independiente</u> • Inyección de oxígeno <u>Dependiente.</u> Recuperación de oro	<u>Tipo de investigación:</u> Aplicada <u>Nivel de Investigación:</u> Explicativa
	¿Cómo la cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?	Analizar en qué medida la cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.	La cianuración convencional tiene efecto en el nivel de recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.	<u>Independiente</u> - Cianuración convencional <u>Dependiente.</u> - Recuperación de oro	<u>Diseño de Investigación:</u> No experimental transversal <u>Enfoque de Investigación:</u> Mixto
	¿En qué medida la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración afecta en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?	Evaluar en qué medida la inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC.	La inyección forzada de oxígeno durante la cianuración influye en la cinética de disolución de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC	<u>Independiente</u> - Inyección forzada de oxígeno <u>Dependiente.</u> - Cinética de disolución	<u>Población Muestra:</u> 102 datos <u>Técnica Recolección Datos:</u> Observación
Específico	¿En qué medida la cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado permitirá analizar la diferencia existente en la recuperación de oro y plata en la empresa Paltarumi SAC?	Comparar la cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado para identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.	La cianuración convencional y la cianuración con inyección de oxígeno forzado permite identificar las diferencias existentes en la eficiente de recuperación de oro y plata de ambos métodos en la empresa Paltarumi SAC.	<u>Independiente</u> - Cianuración convencional y inyección de oxígeno <u>Dependiente.</u> - Eficiencia de recuperación	<u>Técnica Procesamiento Información:</u> Estadístico

Anexo 3 Campaña del proceso de cianuración de minerales

CAMP	BLEND	TMH	%Hu	TMS	%Rec	Ley Au (g/T)	Fino Au (gr)	Recup (gr)	Ley Ag (g/T)	Fino Ag (gr)	NaOH (Kg/T)	NaCN (Kg/T)	NaOH (Tons)	NaCN (Tons)
C-181	B-978	272.350	3.47	262.898	89.64	21.469	5,644.164	5,059.624	18.420	4,842.654	2.90	4.33	0.76	1.14
	B-979	404.670	2.19	395.827	90.87	32.760	12,967.130	11,783.753	117.254	46,412.459	6.10	4.12	2.41	1.63
	B-980	348.530	3.21	337.336	91.06	25.507	8,604.317	7,835.476	32.859	11,084.448	6.38	3.85	2.15	1.30
	B-981	359.620	3.23	347.988	89.11	25.590	8,905.033	7,935.013	41.334	14,383.642	6.31	4.65	2.20	1.62
	B-982	237.920	4.63	226.895	91.26	29.093	6,601.113	6,024.466	122.499	27,794.356	8.67	3.98	1.97	0.90
	B-983	239.210	1.40	235.853	90.74	20.635	4,866.877	4,415.974	10.440	2,462.262	2.91	3.70	0.69	0.87
	B-984	236.400	2.72	229.959	90.61	27.066	6,223.986	5,639.633	25.033	5,756.487	3.13	3.84	0.72	0.88
	B-985	341.283	2.77	331.825	90.96	29.186	9,684.578	8,808.795	34.786	11,543.001	2.73	3.93	0.90	1.30
	B-986	649.210	2.95	630.055	91.90	27.996	17,638.898	16,209.873	30.031	18,921.323	4.91	3.63	3.10	2.29
	B-987	368.740	3.31	356.532	88.51	23.429	8,353.123	7,393.763	171.692	61,213.520	5.70	3.97	2.03	1.42
	B-988	103.990	2.75	101.129	91.87	45.002	4,551.036	4,181.108	38.772	3,921.005	6.62	6.60	0.67	0.67
	TOTAL	3561.923	2.97	3456.297	90.69	27.208	94,040.253	85,287.478	60.277	208,335.157	5.09	4.06	17.60	14.02
C-182	B-989	237.640	3.76	228.708	85.86	18.605	4,255.089	3,653.540	119.906	27,423.573	9.24	6.63	2.11	1.52
	B-990	343.010	2.27	335.231	90.16	37.805	12,673.265	11,426.115	33.417	11,202.566	2.50	4.84	0.84	1.62
	B-991	278.120	2.79	270.351	90.16	34.491	9,324.573	8,407.169	39.463	10,668.765	3.36	4.72	0.91	1.28
	B-992	164.510	2.35	160.640	89.21	21.682	3,482.971	3,107.266	18.819	3,023.007	2.85	4.71	0.46	0.76
	TOTAL	1023.280	2.77	994.930	89.43	29.887	29,735.898	26,594.090	52.585	52,317.910	4.34	5.19	4.32	5.17

Anexo 4 Oro y plata en el carbón en los tanques

CARBON									
ITEM	DESCRIPCION	Nº SACOS	P. Húmedo (Kg)	% Humedad	P. Seco (Kg)	Ley Au (gr/Kg)	Ley Ag (gr/Kg)	Fino Au (gr)	Fino Ag (gr)
1	TK-1 (20'x20')	115	5064.5	25.67	3764.2	1.174	0.224	4,419.198	843.186
2	TK-2 (20'x20')	115	5002.0	24.22	3790.4	3.322	0.819	12,591.758	3,104.350
3	TK-3 (20'x20')	120	4868.0	31.00	3359.1	2.067	2.052	6,943.357	6,892.970
4	TK-4 (20'x20')	115	4936.5	23.03	3799.5	0.718	1.571	2,726.113	5,970.471
5	TK-5 (20'x20')	115	4425.5	10.26	3971.5	0.341	1.446	1,352.692	5,743.579
6	TK-6 (20'x20')	115	4503.0	14.65	3843.3	0.228	1.505	877.429	5,784.190
7	TK-7 (20'x20')	115	5297.0	21.02	4183.4	0.061	0.165	254.348	691.091
8	TK-8 (20'x20')	115	5154.0	21.58	4041.9	0.075	0.338	303.141	1,366.158
9	TK-9 (20'x20')	115	5284.0	19.72	4241.9	0.083	0.163	350.384	693.132
10	D1 (12'x12')	25	1130.5	23.91	860.1	0.364	1.070	313.180	920.187
11	D2 (12'x12')	25	1044.5	21.45	820.5	0.288	1.631	236.373	1,337.998
12	D3 (12'x12')	25	1139.0	22.27	885.3	0.117	1.304	103.579	1,154.065
13	D4 (12'x12')	21	970.0	35.16	628.9	0.047	0.432	29.748	271.822
14	D5 (12'x12')	25	1172.0	20.51	931.6	0.027	0.042	24.874	38.755
15	D6 (12'x12')	25	1051.0	22.72	812.2	0.441	1.616	357.927	1,312.804
16	D8 (12'x12')	25	1092.0	20.06	872.9	0.463	1.858	403.737	1,621.933
17	D9 (12'x12')	25	1095.5	21.54	859.5	0.419	1.864	360.036	1,601.897
18	D10 (12'x12')	25	1091.0	21.70	854.3	0.184	1.475	157.187	1,259.889
19	D4 (12'x12') COSECHADO	26	1131.5	32.23	766.8	0.316	1.778	242.565	1,363.683
20	D5 (12'x12') COSECHADO	25	1246.5	32.71	838.8	0.583	1.997	489.418	1,674.938
		TOTAL						32,537.045	43,647.098
					44,126.16				

Anexo 5 Control de proceso de la cianuración de Au y Ag

Hora ingreso	Lote	Tipo mat	Tmh	H ₂ O	Tms	Ag	Au 100%	
						Ag	Oz/tc	Gr/tm
2:16	01-21851	MOLL	4.870	3.43	4.70	1.159	0.665	22.807
3:01	01-21852	MSLL	20.320	2.15	19.883	3.339	1.985	68.060
3:27	01-21853	MOLL	17.930	3.83	17.243	24.626	19.336	662.949
10:30	01-21854	MOLL	21.430	5.99	20.146	1.892	0.307	10.532
10:35	01-21855	MSLL	7.870	2.24	7.693	1.132	0.254	8.691
10:41	01-21856	MSLL	34.980	2.26	34.189	1.764	1.877	64.350
10:47	01-21857	MSLL	4.020	1.45	3.961	3.251	1.204	41.290
10:51	01-21858	MSLL	6.250	2.03	6.123	1.752	0.398	13.646
11:41	01-21859	MOLL	18.360	3.39	17.737	1.406	0.585	20.071
11:43	01-21860	MSLL	4.040	1.65	3.973	7.084	0.758	25.981
11:49	01-21861	MSLL	32.830	1.58	32.311	0.817	0.643	22.049
13:58	01-21862	MSLL	38.980	1.55	38.375	1.649	0.776	26.609
14:04	01-21863	MSLL	34.690	2.43	33.847	1.005	1.742	59.735
16:01	01-21864	MOC	3.580	4.87	3.405	0.243	0.933	31.978
16:07	01-21865	MSC	3.210	3.44	3.099	1.456	1.067	36.589
16:12	01-21866	MSC	14.180	3.40	13.697	0.430	0.419	14.359
16:46	01-21867	MOC	12.480	3.97	11.984	0.677	0.416	14.256
17:18	01-21868	MOC	16.660	3.78	16.030	0.640	0.454	15.555
17:39	01-21869	MSC	7.950	5.58	7.506	3.220	2.138	73.312
18:06	01-21870	MSC	20.180	2.95	19.584	0.597	0.406	13.910
21:05	01-21871	MSC	13.330	3.82	12.820	0.881	0.684	23.458
21:41	01-21872	MSC	6.990	2.96	6.783	0.574	0.937	32.125
0:36	01-21873	MOC	7.640	0.70	7.586	0.142	0.253	8.664
1:40	01-21874	MOC	20.510	0.77	20.352	1.138	0.598	20.516