

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Evaluación de la recuperación de oro y plata mediante lixiviación de minerales
mixtos con reactivos sintéticos – Trujillo – 2025**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autores:

Bach. Jhojan Saul ORBEZO DE LA ROSA

Bach. Malyori Estefani TORRES LAZARO

Asesor:

Dr. Cayo PALACIOS ESPIRITU

Cerro de Pasco – Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Evaluación de la recuperación de oro y plata mediante lixiviación de minerales
mixtos con reactivos sintéticos – Trujillo – 2025**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dra. Rebeca Hilda PEREZ BONILLA
PRESIDENTE

Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCIA
MIEMBRO

Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 011 2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**“EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA MEDIANTE
LIXIVIACIÓN DE MINERALES MIXTOS CON REACTIVOS SINTÉTICOS –
TRUJILLO – 2025”**

Apellidos y nombres de los tesistas

Bach. Jhojan Saul ORBEZO DE LA ROSA

Bach. Malyori Estefani TORRES LAZARO

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Cayo PALACIOS ESPIRITU

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

2 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 23 de abril del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO
GILBERTO RUBEN EDGAR FAU
20154602046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.04.2026 18:27:53 -05:00

DEDICATORIA

A quienes nos enseñaron que los sueños se construyen con perseverancia, disciplina y fe. A nuestras familias, por ser luz en los momentos oscuros y alegría en las victorias. A todas las personas que nos impulsaron a ser nuestra mejor versión, dedicamos este humilde trabajo como muestra del camino recorrido y del que aún queda por explorar.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a Dios por permitirnos estar en este lugar enseguida agradecemos profundamente a quienes hicieron posible la realización de este trabajo de investigación. A nuestras familias, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza en cada etapa de esta travesía académica. A nuestros asesores y docentes, por su dedicación, orientación y valiosos aportes que enriquecieron significativamente este estudio.

RESUMEN

La presente investigación evaluó la recuperación de oro y plata a partir de minerales mixtos de Trujillo mediante lixiviación con un reactivo sintético, como alternativa a la cianuración convencional. El estudio tuvo como finalidad analizar la viabilidad técnica de este compuesto en un contexto donde la reducción del uso de cianuro resulta prioritaria por criterios ambientales y regulatorios.

La caracterización mineralógica, realizada mediante microscopía óptica y difracción de rayos X, mostró que la ganga está compuesta principalmente por cuarzo (66.38%), goethita (15.97%) y hematita (9.15%), con menores proporciones de pirita (1.96%), esfalerita (0.25%) y electrum en trazas. El elevado grado de liberación mineral (superior al 90% en la mayoría de las especies) explicó el buen comportamiento del mineral en las pruebas de lixiviación, así como la diferencia en la recuperación de oro y plata, siendo esta última más asociada a sulfuros y óxidos de hierro.

Los ensayos metalúrgicos demostraron que los parámetros operativos influyen significativamente en la eficiencia del proceso. La granulometría fina (100% -1") permitió alcanzar las mayores recuperaciones, logrando con el reactivo sintético un 73.03% de oro y 46.98% de plata, resultados muy cercanos a los obtenidos con cianuro (74.01% para oro y 47.33% para plata). El control de la alcalinidad con cal, la relación sólido/líquido adecuada y la aireación se identificaron como factores determinantes en la cinética de disolución de los metales preciosos.

La comparación entre ambos sistemas confirma que el reactivo sintético presenta un desempeño metalúrgico equivalente al cianuro, con la ventaja de ser un compuesto menos tóxico. Aunque las recuperaciones de plata fueron menores en ambos casos (máximo de 47.39%), el uso del reactivo sintético constituye una alternativa técnica y ambientalmente

viable para la industria minera, aportando al desarrollo de tecnologías más sostenibles en la recuperación de metales preciosos en la región de Trujillo.

Palabras clave: Lixiviación, oro, plata, minerales mixtos, reactivo sintético.

ABSTRACT

This research evaluated the recovery of gold and silver from mixed ores in Trujillo using leaching with a synthetic reagent as an alternative to conventional cyanidation. The study aimed to analyze the technical feasibility of this compound in a context where reducing cyanide use is a priority due to environmental and regulatory criteria.

Mineralogical characterization, performed using optical microscopy and X-ray diffraction, showed that the gangue is composed primarily of quartz (66.38%), goethite (15.97%), and hematite (9.15%), with smaller proportions of pyrite (1.96%), sphalerite (0.25%), and traces of electrum. The high degree of mineral liberation (over 90% in most species) explained the mineral's good performance in leaching tests, as well as the difference in gold and silver recoveries, the latter being more associated with iron sulfides and oxides.

Metallurgical testing demonstrated that operating parameters significantly influence process efficiency. Fine particle size distribution (100% - 1") allowed for the highest recoveries, with the synthetic reagent achieving 73.03% gold and 46.98% silver, results very close to those obtained with cyanide (74.01% for gold and 47.33% for silver). Alkalinity control with lime, an adequate solids/liquid ratio, and aeration were identified as determining factors in the dissolution kinetics of the precious metals. A comparison between the two systems confirms that the synthetic reagent exhibits metallurgical performance equivalent to cyanide, with the advantage of being a less toxic compound. Although silver recoveries were lower in both cases (maximum 47.39%), the use of the synthetic reagent represents a technically and environmentally viable alternative for the mining industry, contributing to the development of more sustainable technologies for precious metal recovery in the Trujillo region.

Keywords: Leaching, gold, silver, mixed minerals, synthetic reagent.

INTRODUCCIÓN

La recuperación de metales preciosos, en particular el oro y la plata, constituye uno de los principales desafíos de la industria metalúrgica en el Perú. En regiones como La Libertad, y especialmente en los yacimientos cercanos a la ciudad de Trujillo, se procesan no solo minerales de cabeza, sino también relaves generados en operaciones previas, que aún contienen valores metálicos de interés. Este escenario origina la presencia de minerales mixtos, conformados tanto por fases oxidadas como sulfuradas, además de residuos de tratamientos anteriores, lo que dificulta su beneficio mediante técnicas convencionales.

La cianuración, a pesar de ser el método más utilizado en la recuperación de oro y plata, presenta limitaciones notorias en este tipo de mineralogías complejas: su eficiencia se reduce considerablemente, puede generar compuestos tóxicos persistentes y, además, enfrenta restricciones ambientales cada vez más estrictas. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas de lixiviación más eficaces y sostenibles.

En este contexto, los reactivos sintéticos se perfilan como una opción prometedora, pues han demostrado capacidad para disolver metales preciosos incluso en matrices minerales de difícil procesamiento. No obstante, en el ámbito peruano, y particularmente en la región de Trujillo, existe un vacío de conocimiento respecto a su aplicación en minerales mixtos provenientes tanto de cabeza como de relaves. No se cuenta con estudios que definan las condiciones operativas óptimas ni los niveles de recuperación que pueden alcanzarse bajo estas características.

La falta de información limita la posibilidad de implementar procesos más eficientes y sostenibles en plantas de pequeña y mediana minería, sectores de gran importancia en la economía regional. De allí surge la necesidad de realizar una evaluación experimental que permita analizar la eficacia de un reactivo sintético en la lixiviación de minerales mixtos,

determinando su influencia en la recuperación de oro y plata y comparándola con la cianuración tradicional.

Este estudio busca generar conocimiento técnico y científico que aporte soluciones prácticas a la industria minera, ofreciendo un procedimiento que combine eficiencia metalúrgica, viabilidad económica y seguridad ambiental. Con ello, se pretende no solo optimizar la recuperación de metales preciosos, sino también abrir la posibilidad de aplicar este tipo de reactivos en escenarios reales, aportando valor a la innovación metalúrgica en el país.

ÍNDICE

Página.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.2.1.	Delimitación espacial.....	2
1.2.2.	Delimitación temporal	2
1.2.3.	Delimitación conceptual.....	3
1.3.	Formulación del problema	3
1.3.1.	Problema general.....	3
1.3.2.	Problemas específicos.....	3
1.4.	Formulación de objetivos	3
1.4.1.	Objetivos generales	3
1.4.2.	Objetivos específicos	3
1.5.	Justificación de la investigación.....	4
1.6.	Limitaciones de la investigación	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la investigación	6
2.1.1.	Internacionales.....	6
2.1.2.	Nacionales	9
2.1.3.	Locales.....	11
2.2.	Bases teóricas – científicas	13
2.2.1.	Área de la investigación	13
2.2.2.	Fundamentos de la lixiviación.....	19
2.2.3.	Reactivos sintéticos en la lixiviación.....	26
2.3.	Definición de términos básicos	30
2.4.	Formulación de hipótesis	31
2.4.1.	Hipótesis general	31
2.4.2.	Hipótesis específica	31
2.5.	Identificación de variables	31
2.5.1.	Variable independiente.....	31
2.5.2.	Variable dependiente	31
2.5.3.	Variable constante.....	31
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores	31

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación.....	33
3.2.	Nivel de investigación	33
3.3.	Métodos de investigación.....	34
3.4.	Diseño de investigación.....	34

3.5.	Población y muestra.....	35
3.5.1.	Población.....	35
3.5.2.	Muestra.....	35
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	35
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	36
3.8.	Tratamiento estadístico.....	36
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica	37

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo	38
4.1.1.	Protocolo de pruebas de metalúrgicas de lixiviación en columna	38
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	40
4.2.1.	Características de la muestra.....	40
4.3.	Prueba de hipótesis.....	64
4.3.1.	Prueba de la hipótesis general	64
4.3.2.	Prueba de las hipótesis específicas	64
4.4.	Discusión de resultados	66

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS:

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Lista de algunos agentes de lixiviación y sus características.....	29
Tabla 2. Operacionalización de las variables del estudio	32
Tabla 3. Caracterización por medio de microscopía óptica del mineral de mixto.....	41
Tabla 4. Caracterización por medio de difracción de rayos X del mineral mixto	42
Tabla 5. Análisis granulométrico del mineral mixto	43
Tabla 6. Leyes del mineral mixto	44
Tabla 7. Análisis del pH en función de la dosificación de cal	45
Tabla 8. Análisis de la granulometría en función del tiempo de molienda del mineral mixto	46
Tabla 9. Balance metalúrgico de la prueba de oro cianurable	48
Tabla 10. Parámetros operativos de la prueba de cianuración	48
Tabla 11. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 4”	49
Tabla 12. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 2”	51
Tabla 13. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 1”	53
Tabla 14. Parámetros operativos de la prueba de lixiviación con goldmax.....	55
Tabla 15. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 4”	56
Tabla 16. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 2”	58
Tabla 17. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 1”	60
Tabla 18. Balance metalúrgico de la prueba de oro soluble en jinchuan.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Mapa geológico regional de La Libertad.....	14
Figura 2. Proceso de extracción de Au con cianuración.....	20
Figura 3. Comparativa de las curvas de recuperación vs tamaño de partícula en la lixiviación	22
Figura 4. Comparativa de recuperación en tiempo según el agente	23
Figura 5. Evaluación de la concentración de Ag a diferentes temperaturas	24
Figura 6. Efecto de la densidad de la pulpa en la lixiviación de Au.....	25
Figura 7. Desarrollo de los reactivos ecológicos en el tiempo	26
Figura 8. Tipos de reactivos según su composición	27
Figura 9. Curva del análisis granulométrico del mineral mixto.....	44
Figura 10. Curva de la alcalinidad del mineral mixto.....	46
Figura 11. Curva de la moliendabilidad del mineral mixto	47
Figura 12. Cinética de la cianuración a 100% - 4” malla	50
Figura 13. Cinética de la cianuración a 100% - 2” malla	52
Figura 14. Cinética de la cianuración a 100% - 1” malla	54
Figura 15. Comparativa de las recuperaciones en la cianuración.....	55
Figura 16. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 4” malla	57
Figura 17. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 2” malla	59
Figura 18. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 1” malla	61
Figura 19. Comparativa de las recuperaciones en la lixiviación con goldmax.....	62
Figura 20. Comparativa de los resultados de la lixiviación en columna	63

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

En la actualidad, uno de los principales retos de la industria metalúrgica peruana es la recuperación eficiente de metales preciosos, como el oro y la plata, a partir de minerales mixtos. Estos minerales presentan una combinación de fases oxidadas y sulfuradas, lo que dificulta su procesamiento mediante técnicas convencionales como la cianuración. Esta problemática se evidencia en diversas operaciones mineras del norte del país, particularmente en las zonas cercanas a Trujillo, donde la mineralogía es compleja y heterogénea.

La cianuración, aunque ampliamente utilizada, presenta limitaciones importantes frente a minerales mixtos: su eficiencia se reduce drásticamente, puede generar compuestos tóxicos persistentes y su uso está cada vez más restringido por normativas ambientales. Esta situación ha motivado la búsqueda de reactivos alternativos que sean menos tóxicos y más eficaces frente a este tipo de mineral.

Dentro de este panorama, algunos reactivos sintéticos han demostrado una capacidad significativa para disolver metales preciosos, incluso en matrices minerales

difíciles. Sin embargo, en el contexto peruano, especialmente en la región de Trujillo, existe un vacío de conocimiento respecto a la aplicación específica de estos reactivos sobre minerales mixtos. No se cuenta con estudios detallados que determinen las condiciones óptimas de operación ni los niveles de recuperación que pueden alcanzarse.

Esta falta de información técnica y científica limita la posibilidad de implementar procesos más eficientes y sostenibles en plantas de tratamiento de pequeña y mediana escala. Por ello, surge la necesidad de evaluar experimentalmente el comportamiento de un reactivo sintético seleccionado en la lixiviación de minerales mixtos representativos de la región, con el objetivo de analizar su eficacia en la recuperación de oro y plata.

Este estudio busca contribuir con información relevante para la toma de decisiones en la industria, ofreciendo una alternativa viable al uso del cianuro, que pueda ser replicada en escenarios reales, mejorando tanto el rendimiento metalúrgico como la sostenibilidad del proceso.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

La y de análisis se desarrolló en los meses de junio, julio, agosto, setiembre presente investigación se llevó a cabo utilizando minerales mixtos recolectados de yacimientos cercanos a la ciudad de Trujillo, en la región La Libertad – Perú. Las pruebas de lixiviación se realizaron en laboratorios especializados para este proceso.

1.2.2. Delimitación temporal

El trabajo experimental y del año 2025, comprendiendo la fase de caracterización mineralógica, pruebas metalúrgicas y procesamiento de resultados.

1.2.3. Delimitación conceptual

Este estudio se enfoca exclusivamente en la evaluación de la recuperación de oro y plata a partir de minerales mixtos, utilizando reactivos sintéticos específicos para el proceso de lixiviación. No se evaluaron otras técnicas como flotación, amalgamación ni métodos pirometalúrgicos.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

- ¿Cómo influye el uso de reactivos sintéticos en la recuperación de oro y plata a partir de minerales mixtos mediante el proceso de lixiviación en Trujillo?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Qué características mineralógicas presentan los minerales mixtos recolectados de los yacimientos estudiados de Trujillo?
- ¿Cuáles son las condiciones operativas óptimas para maximizar la recuperación de oro y plata mediante lixiviación con reactivos sintéticos?
- ¿Qué nivel de eficiencia metalúrgica, en términos de porcentaje de recuperación, se alcanza con el uso de reactivos sintéticos frente a métodos tradicionales?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivos generales

- Evaluar la recuperación de oro y plata mediante lixiviación de minerales mixtos con reactivos sintéticos en Trujillo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la mineralogía de los minerales mixtos provenientes de yacimientos de Trujillo.

- Establecer los parámetros operativos que optimicen la recuperación de oro y plata durante el proceso de lixiviación con reactivos sintéticos.
- Evaluar la eficiencia metalúrgica del proceso de lixiviación con reactivos sintéticos comparándola con los resultados de la cianuración tradicional.

1.5. Justificación de la investigación

El presente estudio es relevante debido a que aborda una problemática técnica y ambiental de gran importancia en la minería peruana: la recuperación de metales preciosos a partir de minerales de difícil procesamiento. En particular, los minerales mixtos representan un desafío metalúrgico por su compleja composición y la baja eficiencia que muestran los métodos convencionales como la cianuración.

Desde el punto de vista tecnológico, esta investigación permitió generar conocimientos sobre el comportamiento de un reactivo sintético alternativo, adaptado a las condiciones locales de mineralogía, lo que puede representar una innovación aplicable en operaciones reales de pequeña y mediana minería.

Desde el aspecto ambiental, el uso de un reactivo menos tóxico que el cianuro puede reducir significativamente los riesgos asociados al manejo de efluentes y residuos peligrosos, contribuyendo a una actividad minera más limpia y segura.

En el plano económico, mejorar la recuperación de oro y plata puede traducirse en un mayor aprovechamiento de los recursos minerales actualmente subutilizados o descartados, lo que fortalece la rentabilidad del proceso y promueve la sostenibilidad en las operaciones mineras.

Finalmente, a nivel académico, esta investigación aporta evidencia científica que puede servir como base para futuras tesis, investigaciones aplicadas o escalamientos a nivel planta piloto.

1.6. Limitaciones de la investigación

- La investigación se limita al uso de un solo reactivo sintético, sin considerar otras alternativas posibles.
- Las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio, por lo que los resultados obtenidos pudieron variar al ser aplicados en operaciones a escala industrial.
- La mineralogía analizada corresponde únicamente a muestras representativas de yacimientos de la región de Trujillo, por lo que las conclusiones no necesariamente son extrapolables a otras zonas del país.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacionales

Jinlin et al. (2025), en su artículo “Development of a gold leaching reagent as an alternative to cyanide: Synthesis and performance evaluation”, presentaron una investigación orientada al desarrollo de un reactivo de lixiviación de oro como alternativa al cianuro, dada su alta toxicidad y los riesgos asociados a su transporte y manejo. Los autores sintetizaron un nuevo reactivo utilizando cianato de sodio como base, complementado con hidróxido de sodio y ferrocianuro de sodio, bajo condiciones controladas de temperatura (600 °C), proporción másica (15:3:1) y tiempo de síntesis (1 hora). Este reactivo demostró una alta eficiencia en la recuperación de oro tanto en concentrados como en residuos electrónicos, alcanzando tasas de lixiviación superiores al 90 % en RAEE tras 2 horas, y hasta un 87,56 % en concentrados de oro desulfurados. Además, el estudio destaca la buena selectividad del reactivo hacia el oro, atribuyendo su efectividad al posible contenido de isocianato de sodio. Los hallazgos evidencian el

potencial de esta formulación como una opción más segura y eficaz frente al uso tradicional de cianuro en procesos auríferos.

Burt (2023), en su tesis “Comparative study of gold and silver leaching in chloride systems, using gold and silver nanoparticles and application to ores and concentrates”, llevó a cabo un estudio experimental orientado a evaluar la eficacia de diferentes sistemas de lixiviación con cloruros como alternativa al uso del cianuro en la disolución de oro y plata. Utilizando nanopartículas metálicas como modelo, se analizaron distintas combinaciones de NaCl y NH₄Cl con oxidantes como HOCl, FeCl₃ y CuCl₂, en presencia y ausencia de aditivos como oxígeno y tiourea. La investigación se centró en la cinética de disolución, la influencia del pH, la concentración de cloruros y la caracterización espectroscópica de los productos. Los resultados mostraron que la disolución del oro fue favorecida por altos niveles de HOCl y FeCl₃, mientras que la plata respondió mejor a CuCl₂ y FeCl₃, independientemente del pH. La adición de tiourea y oxígeno al sistema FeCl₃/NaCl incrementó significativamente la recuperación de oro, alcanzando un 88,4% sin formación de precipitados. La cinética de lixiviación se ajustó al modelo de Avrami, y se confirmó que los distintos oxidantes generaban especies de Au(I) o Au(III) según el sistema. En minerales reales, la recuperación máxima de oro alcanzó un 54,6% usando FeCl₃/NaCl/TU, aunque se reconoció que la presencia de ganga redujo la eficiencia del proceso. Burt concluye que estos sistemas de lixiviación presentan un alto potencial, particularmente en materiales procesados como calcinados o residuos electrónicos, aportando alternativas más sostenibles al uso del cianuro.

Barani et al. (2021), en su artículo “Leaching of a polymetal gold ore and reducing cyanide consumption using cyanide-glycine solutions”, investigaron la lixiviación de un mineral aurífero polimetálico (Pb-Cu-Zn) utilizando una mezcla

sinérgica de cianuro y glicina, con el objetivo de reducir significativamente el consumo de cianuro. Los resultados experimentales revelaron que es posible alcanzar disoluciones de oro cercanas al 90 % al adicionar glicina (0,5–1 M/L) a soluciones con solo 500 ppm de cianuro. Incluso a concentraciones de cianuro tan bajas como 200 ppm, se logró una disolución de oro del 80 % tras 72 horas. El estudio demostró que el uso combinado de glicina y cianuro permite reducir el consumo de este último hasta en un 80 %, sin comprometer significativamente la eficiencia del proceso. Sin embargo, también se observó una disolución paralela de otros metales como Cu, Pb, Zn, Fe y Ag, lo cual afecta negativamente la selectividad del sistema. Los autores concluyen que, si bien la glicina contribuye a una lixiviación más sostenible al reducir el uso de cianuro, su aplicación en minerales polimetálicos plantea desafíos adicionales debido al comportamiento poco selectivo frente al oro.

Birich et al. (2018), en su artículo “Screening of Non-cyanide Leaching Reagents for Gold Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment”, abordaron la problemática del reciclaje de oro contenido en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), cuya importancia ha aumentado por la alta demanda del metal y las limitaciones ecológicas del uso de cianuro. Los autores analizaron el desempeño de seis reactivos alternativos al cianuro mediante dos series experimentales, con el objetivo de evaluar su viabilidad en la lixiviación directa del oro desde RAEE sin necesidad de rutas complejas como la del cobre, que conllevan pérdidas significativas de metal y etapas de separación adicionales. Entre los sistemas evaluados, el agua regia y el yodo/yoduro demostraron ser los más eficaces, logrando un 100 % de recuperación de oro con alta velocidad de lixiviación. Sin embargo, la lixiviación con yodo destacó por su elevada selectividad hacia metales preciosos y su menor impacto ambiental en comparación con otros sistemas. Los autores concluyen que la lixiviación

directa y selectiva con yodo representa una alternativa prometedora para la recuperación eficiente y sostenible de oro a partir de residuos electrónicos, en línea con las crecientes exigencias ambientales y sociales sobre procesos de extracción limpia.

2.1.2. Nacionales

Molina (2022), en su investigación “Uso de Gold Max en la lixiviación de oro y plata en la zona minera de Rinconada - Puno”, evaluó la eficiencia del reactivo alternativo Gold Max frente al tradicional cianuro en la recuperación de oro de minerales mixtos (óxidos y sulfuros) provenientes de la zona minera de La Rinconada, distrito de Ananea, Puno. El estudio se enfocó en desarrollar un proceso de lixiviación más limpio y ambientalmente responsable, ya que los residuos generados por Gold Max no presentan impactos significativos y contienen trazas de urea y fosfatos. Las pruebas metalúrgicas, realizadas en el laboratorio de Minares South – SRL (Nasca, Ica), incluyeron ensayos con diseño factorial 2^k , considerando como variables la concentración del reactivo (0,5–1 g/L), el pH (10–12) y el tiempo de lixiviación (24–48 h). Los resultados mostraron una recuperación máxima de oro del 95,5 % al trabajar con una concentración de 0,5 g/L de Gold Max, a pH 12 y durante 48 horas, obteniéndose un modelo matemático representativo del proceso. Molina concluye que Gold Max es un reactivo con potencial comparable al cianuro en términos de eficiencia, pero con una huella ambiental considerablemente menor, lo que lo convierte en una alternativa viable para una minería aurífera más sostenible en regiones altoandinas como Puno.

Cordova (2019), en su estudio titulado “Evaluación metalúrgica a los minerales auríferos para la obtención del oro en la Compañía Minera Arias S.A – Huasahuasi, Tarma – 2018”, desarrolló un análisis técnico sobre la recuperación de oro mediante procesos de concentración gravimétrica y cianuración. El objetivo central fue

determinar las condiciones óptimas para maximizar la extracción del metal a partir de minerales auríferos complejos. El autor aplicó ensayos metalúrgicos que incluyeron molienda controlada, concentración por mesa Wilfley y posterior cianuración del concentrado gravimétrico, evaluando variables como el tiempo de agitación, la concentración de cianuro y el pH del sistema. Como resultado, se alcanzaron recuperaciones superiores al 90% bajo condiciones controladas, evidenciando la eficiencia del método empleado. El estudio también resalta la importancia de caracterizar adecuadamente el mineral y ajustar los parámetros operativos para evitar consumos excesivos de reactivo y la disolución de especies no deseadas. En conclusión, Córdova resalta la viabilidad del proceso tradicional de cianuración en contextos de pequeña minería, aunque sugiere la necesidad de explorar reactivos alternativos menos contaminantes para asegurar una operación más segura y sostenible a largo plazo.

Macotela & Osorio (2021), en su investigación titulada “Evaluación del proceso de recuperación de oro en soluciones cianuradas empleando resinas seleccionadas”, analizaron la eficiencia del proceso de intercambio iónico para la recuperación de oro desde soluciones cianuradas, utilizando dos tipos de resinas: AuRIX 100 y Amberlite. El estudio se centró en la comparación experimental de ambas resinas, considerando su comportamiento bajo condiciones controladas y evaluando parámetros como el tiempo de contacto, concentración del metal y estabilidad del medio. Los resultados demostraron que ambas resinas presentaron una alta capacidad de adsorción, con recuperaciones que oscilaron entre el 85% y el 95%, siendo una de ellas significativamente más eficiente, lo que la posiciona como la más adecuada para aplicaciones industriales. Los autores concluyeron que este tipo de innovación tecnológica puede representar una alternativa eficaz y más sostenible frente a los métodos tradicionales, aunque sugieren la necesidad de validaciones a escala industrial

para determinar su viabilidad operativa en contextos de mayor complejidad. El estudio aporta evidencia relevante sobre el potencial del uso de resinas como estrategia complementaria en el tratamiento de soluciones auríferas de baja ley.

Lovera et al. (2018), en su investigación titulada “Lixiviación de plata de minerales sulfurados argentíferos del complejo Marañón empleando el reactivo SANDIOSS”, analizaron la eficacia del reactivo Sandioss como alternativa al cianuro en la recuperación de plata a partir de minerales sulfurados. El estudio se enfocó en un material proveniente del complejo mineralógico Marañón, el cual fue sometido a un proceso metalúrgico integral que incluyó chancado, flotación y remolienda hasta obtener una granulometría fina del 96.5% bajo malla 200. La etapa de lixiviación se desarrolló utilizando Sandioss en concentraciones de 0.2% y 0.3% durante un periodo de 75 horas, lográndose recuperaciones de plata del 71.9% y 98.7% respectivamente. Los autores observaron que la mayor tasa de disolución ocurrió en las primeras 24 horas, especialmente con la concentración de 0.3%, alcanzando un 91.6% del total recuperado. Además, destacaron que incrementos en la concentración del reactivo favorecen la extracción de plata, aunque concentraciones muy bajas podrían ralentizar la cinética del proceso y promover la disolución de compuestos no deseados. Este estudio aporta evidencia sobre el potencial del Sandioss como un reactivo lixivante más amigable con el medio ambiente, destacando su utilidad en el tratamiento de minerales con contenido argentífero sin generar los impactos negativos típicamente asociados al uso de cianuro.

2.1.3. Locales

Alvarez & Vásquez (2025), en su estudio “Pretratamiento con oxígeno, aire y tiempo de lixiviación para la extracción de oro por cianuración de un mineral sulfurado arsenical”, investigaron la influencia de pretratamientos oxidativos y el tiempo de

lixiviación en la recuperación de metales preciosos a partir de un mineral sulfurado arsenical procedente de Pataz, La Libertad. Para ello, emplearon un diseño bifactorial donde evaluaron tres condiciones de pretratamiento (sin pretratamiento, con aire y con oxígeno) y cinco tiempos de lixiviación (6, 12, 24, 48 y 72 horas), midiendo como variable dependiente la extracción porcentual de oro y plata. Los resultados indicaron que el uso de oxígeno como agente oxidante mejoró significativamente la recuperación de oro (88.71%) y plata (52.97%) a las 72 horas, en comparación con los tratamientos con aire (86.69% y 47.64%) y sin pretratamiento (80.38% y 42.89%). Mediante análisis de varianza con un nivel de significancia del 95%, se concluyó que tanto el tipo de pretratamiento como el tiempo de lixiviación influyen de forma significativa en la eficiencia del proceso de cianuración. Este trabajo resalta la importancia del pretratamiento oxidativo en la mejora de la cinética de disolución del oro en minerales refractarios, contribuyendo al diseño de estrategias más eficaces para el tratamiento de minerales complejos.

Huapaya et al. (2022), en su informe técnico titulado “Significativa reducción del consumo de cianuro en la lixiviación del oro permitió ahorros considerables en los costos operativos de Planta Procesos en Mina La Arena”, abordaron la optimización del uso de cianuro de sodio en procesos de lixiviación en pilas, uno de los métodos más comunes en la extracción aurífera en Perú. Basándose en resultados metalúrgicos, los autores identificaron que en la segunda mitad del ciclo de lixiviación el requerimiento de cianuro disminuye significativamente, por lo que implementaron un sistema de riego diferenciado mediante bombeo selectivo. Este sistema permitió aplicar soluciones con mayor concentración de cianuro (80–100 ppm) a celdas con mineral fresco y soluciones más diluidas (40 ppm) a celdas en etapa de agotamiento, lo que resultó en una reducción del consumo específico de cianuro de 0.22 a 0.18 kg/tm. Entre los beneficios

observados destacan una mejor administración del reactivo, mejoras en la cinética de lixiviación del oro y la disminución en la disolución de metales no deseados como cobre y mercurio. El estudio demuestra cómo ajustes operacionales estratégicos pueden generar impactos significativos en la eficiencia química y económica del proceso, sin necesidad de modificar el esquema tecnológico existente.

2.2. Bases teóricas – científicas

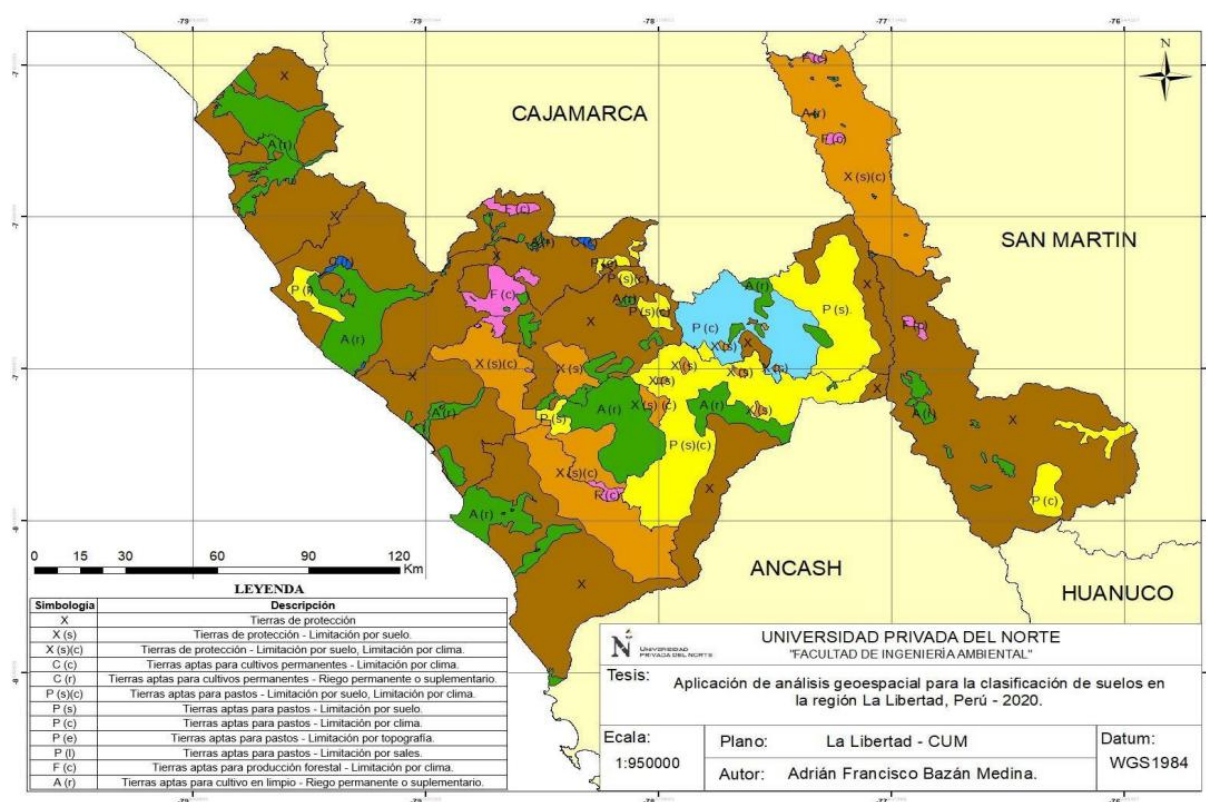
2.2.1. Área de la investigación

La provincia de Trujillo, perteneciente a la región La Libertad, se ubica en la costa norte del Perú, limitada por el océano Pacífico al oeste y por la cordillera de los Andes hacia el este. El área donde se desarrolló la investigación está vinculada con los depósitos minerales polimetálicos presentes en la zona andina de la región, que históricamente ha sido reconocida por su potencial minero. Esta provincia posee una gran diversidad fisiográfica, con sectores costeros áridos, valles interandinos y relieves montañosos que marcan una clara transición desde la planicie costera hasta los sistemas montañosos de la sierra liberteña (Guerrero et al., 2019).

La localización geográfica de la investigación no solo es relevante desde la perspectiva minera, sino también por la accesibilidad y cercanía a centros urbanos y puertos. El distrito de Trujillo actúa como centro logístico y administrativo de las actividades industriales y extractivas que se desarrollan en sus alrededores, particularmente en las provincias andinas de Otuzco, Sánchez Carrión y Santiago de Chuco, donde se hallan los yacimientos metálicos de mayor importancia. Esta conectividad facilita el transporte de insumos y productos derivados del beneficio de minerales, además de consolidar el rol estratégico de la región como polo de desarrollo económico (Villareal, 2017).

El área de estudio se caracteriza por un clima predominantemente árido en la franja costera, con precipitaciones escasas, mientras que en las zonas andinas el régimen pluvial es más intenso, especialmente durante los meses de verano. Esta variabilidad climática influye directamente en los procesos hidrogeológicos que afectan la disponibilidad de agua para las operaciones mineras y el comportamiento geoquímico de los relaves. En ese sentido, comprender las condiciones climáticas y topográficas resulta indispensable para el diseño y ejecución de procesos metalúrgicos adecuados en la zona (Lescano & Oyarce, 2015).

Figura 1. Mapa geológico regional de La Libertad



Nota: Recuperado de Bazan (2022).

Características geológicas

a. Geología regional

La geología de la región de La Libertad está definida principalmente por la presencia de rocas ígneas y sedimentarias que conforman parte de la Cordillera Occidental de los Andes peruanos. El basamento está compuesto mayoritariamente por rocas paleozoicas, sobre las cuales se han emplazado intrusivos graníticos del Mesozoico, responsables de la formación de diversos yacimientos metálicos de interés económico, entre los que destacan plomo, zinc, cobre y oro. Estas rocas intrusivas han generado procesos de alteración hidrotermal y mineralización en vetas y cuerpos diseminados, que constituyen la base de la actividad minera de la región (Jaco & Calsina, 2020).

La tectónica ha desempeñado un papel fundamental en la configuración geológica regional. Los procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana propiciaron la formación de estructuras tectónicas importantes, como fallas y pliegues, que controlaron tanto la circulación de fluidos mineralizantes como la ubicación de los depósitos minerales. Esta relación estructural se evidencia en la disposición de los yacimientos polimetálicos de la sierra liberteña, donde la mineralización se asocia a fallas regionales de dirección NO-SE, que actúan como conductos para la movilización de soluciones hidrotermales (Vereau, 2019).

Adicionalmente, en la geología regional se observa la presencia de secuencias volcánicas jurásicas y cretácicas, sobrepuestas a sedimentos marinos, que representan ambientes de depósito controlados por la dinámica tectónica de los Andes. La interacción entre magmatismo y

tectónica no solo condicionó el emplazamiento de intrusivos, sino también los sistemas metalíferos que hoy constituyen la base de la minería regional. Dichas características confieren a la región un contexto geológico altamente favorable para la concentración de metales base y preciosos (Jaco & Calsina, 2020).

b. Geología local

A nivel local, la geología del área de Trujillo presenta un predominio de rocas sedimentarias del Grupo Goyllarisquizga y rocas intrusivas del Batolito de la Costa, que han sido ampliamente estudiadas por su relación directa con la mineralización polimetálica. El Batolito de la Costa constituye uno de los cuerpos ígneos más representativos del Perú, extendiéndose a lo largo de la franja occidental andina, y cuya cristalización durante el Cretácico superior dio origen a numerosos depósitos de skarn, pórfidos y vetas metálicas (Medina et al., 2012).

Las formaciones sedimentarias locales, compuestas principalmente por areniscas, lutitas y calizas, han actuado como rocas de caja que hospedan mineralizaciones hidrotermales de sulfuros de plomo y zinc. Estas unidades muestran diferentes grados de metamorfismo de contacto debido al emplazamiento de intrusivos graníticos, lo cual explica la presencia de minerales como galena, esfalerita y pirita, asociados a procesos de alteración propilítica, sericitica y silicificación. Dichas características hacen de la región un espacio idóneo para estudios experimentales de flotación y recuperación de metales, dada la complejidad mineralógica de sus depósitos (Medina et al., 2012).

Por otro lado, en sectores específicos de la sierra de Trujillo se reconocen cuerpos de mineralización diseminada y vetiforme, donde predominan los sulfuros polimetálicos. Estos depósitos presentan problemas de asociación mineralógica, especialmente en lo referente al zinc marmatítico y minerales parcialmente oxidados, lo cual representa un reto para los procesos de concentración convencional. El entendimiento de esta geología local es fundamental para optimizar las técnicas metalúrgicas que permitieron incrementar la recuperación de plomo y zinc en las plantas concentradoras de la región (Vereau, 2019).

c. **Mineralogía de los yacimientos auríferos y argentíferos**

La mineralogía de los yacimientos de oro y plata presenta una notable diversidad en función de la génesis del depósito, la profundidad de formación, la composición del fluido mineralizante y los procesos de alteración secundaria. En general, el oro se encuentra tanto en forma nativa como asociado a sulfuros de hierro, cobre y arsénico, mientras que la plata suele presentarse en sulfosales complejas o como inclusiones microscópicas dentro de minerales sulfurados. Diversos estudios de depósitos epitermales en Perú y México han evidenciado que los procesos de mineralización aurífera y argentífera están estrechamente vinculados con eventos hidrotermales, lo que determina una marcada zonación mineralógica. En zonas someras se concentran minerales oxidados, mientras que en niveles intermedios y profundos dominan los sulfuros, con transiciones de minerales mixtos en los bordes de alteración (Acosta, 2011).

Minerales oxidados

Los minerales oxidados de oro y plata resultan de la meteorización de sulfuros primarios en ambientes superficiales o sub-superficiales, en presencia de agua meteórica y oxígeno. Este proceso genera compuestos como óxidos, hidróxidos y carbonatos, en los cuales los metales preciosos suelen encontrarse dispersos y en baja concentración. El oro, por lo general, aparece en formas finas o ultrafinas, frecuentemente encapsulado en óxidos de hierro como goethita y hematita, mientras que la plata puede encontrarse en cloruros como la cerargirita o en carbonatos asociados a manganeso. Investigaciones en yacimientos de la región de Puno y Oruro han confirmado que este tipo de mineralización presenta una elevada refractariedad al beneficio metalúrgico, ya que la fina disseminación de los metales dificulta su recuperación por métodos gravimétricos convencionales, requiriendo tratamientos de lixiviación con soluciones cianuradas o alternativas más avanzadas como tiourea o tiosulfato (Cóndor & Huamán, 2017).

Minerales sulfurados

Los minerales sulfurados constituyen la fracción más abundante y económicamente importante de los yacimientos auríferos y argentíferos, dado que son los principales portadores de metales preciosos. El oro se asocia con frecuencia a pirita, arsenopirita y calcopirita, mientras que la plata se encuentra como inclusiones en galena, esfalerita y en sulfosales como la tetraedrita y la pirargirita. Estos minerales se forman en condiciones reductoras a temperaturas intermedias y altas, lo que permite una fuerte encapsulación del oro en la red cristalina de los sulfuros, generando un mineral denominado “refractario”. Estudios en plantas concentradoras del sur del Perú han mostrado que la molienda fina, seguida de flotación diferencial, constituye la ruta de procesamiento más adecuada para estos minerales, aunque en muchos casos es

necesario un pretratamiento oxidante (tostación, autoclave o bio-oxidación) para liberar el oro y la plata antes de su cianuración (Palomino & Ramos, 2008).

Minerales mixtos

Los minerales mixtos corresponden a un conjunto heterogéneo que combina fases oxidadas y sulfuradas, generalmente presentes en zonas de transición o en depósitos parcialmente meteorizados. En el caso de los minerales de cabeza, esta complejidad mineralógica plantea un desafío metalúrgico, ya que la coexistencia de óxidos y sulfuros requiere circuitos de procesamiento híbridos que incluyan etapas de flotación y lixiviación combinadas. En cuanto a los relaves, estos representan minerales procesados previamente, pero que conservan valores residuales de oro y plata atrapados en partículas ultrafinas, tanto en formas oxidadas como sulfuradas. Investigaciones realizadas en relaveras de Cerro de Pasco y Zacatecas han demostrado que los relaves contienen una fracción considerable de sulfuros no recuperados, lo cual abrió la posibilidad de aplicar técnicas de retratamiento mediante flotación columnar, cianuración intensiva o incluso tecnologías emergentes de biohidrometalurgia para mejorar la recuperación global (Aravena, 2020).

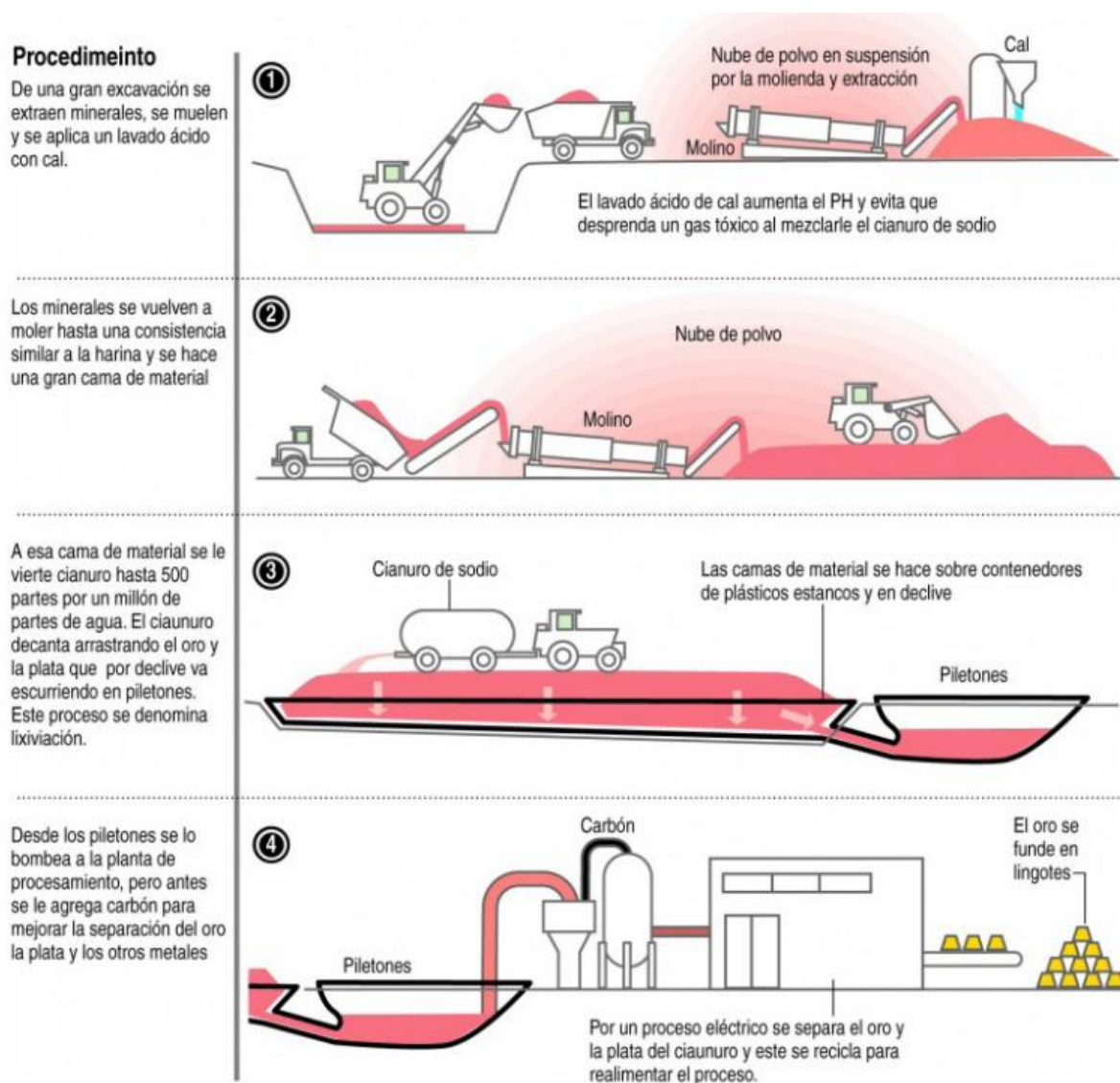
2.2.2. Fundamentos de la lixiviación

Principios básicos de la lixiviación

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que consiste en la disolución selectiva de minerales útiles contenidos en matrices sólidas mediante la acción de soluciones acuosas con agentes químicos específicos. El principio fundamental radica en que los metales presentes en estado combinado o elemental reaccionan con el reactivo lixivante, transformándose en especies solubles que pueden recuperarse posteriormente por técnicas de concentración o extracción. Este método se basa en fenómenos de naturaleza fisicoquímica, donde intervienen la transferencia de masa, la

cinética de reacción y los equilibrios termodinámicos, siendo estos parámetros los que determinan la eficiencia global del proceso (Jeffrey & Breuer, 2000).

Figura 2. Proceso de extracción de Au con cianuración



Nota: Recuperado de Martínez & Reinaldo (2018).

El desarrollo de la lixiviación ha permitido su aplicación tanto en minerales oxidados como sulfurados, así como en concentrados refractarios, dependiendo de la selección adecuada del agente lixivante. Desde un enfoque químico, el proceso implica la ruptura de enlaces metálicos dentro de la estructura cristalina del mineral, la formación de complejos solubles y la difusión de estos hacia la solución circundante.

Por ello, la lixiviación combina principios de química de coordinación, transferencia de electrones y procesos difusivos, convirtiéndose en una alternativa eficiente frente a la pirometalurgia cuando se trata de minerales de baja ley o con presencia de elementos acompañantes que dificultan la fusión directa (Ubal dini, 2021).

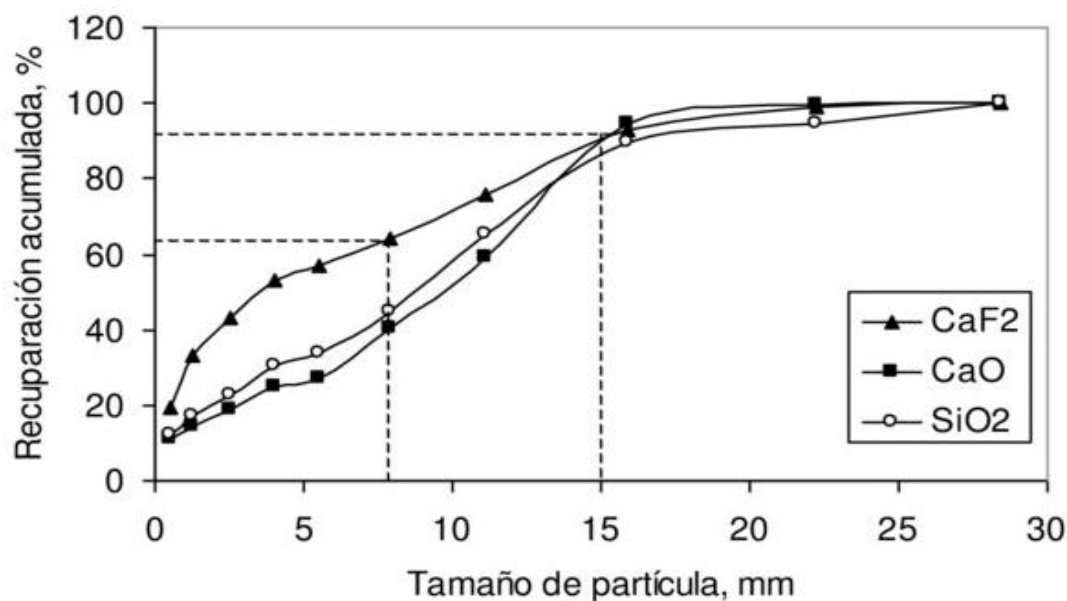
Factores que influyen en la disolución de metales preciosos

La lixiviación no depende únicamente de la naturaleza química del reactivo, sino también de una serie de variables operativas que condicionan la cinética de disolución y la recuperación final del metal. Entre estas variables destacan la granulometría del material, el tiempo de residencia, la temperatura, la relación sólido/líquido y la densidad de pulpa, así como la agitación y la aireación del sistema. Cada uno de estos factores se interrelaciona con la superficie de contacto reactivo y la capacidad del sistema para mantener condiciones de reacción estables, por lo que su optimización es fundamental en los procesos industriales (Fleming et al., 2011).

a. Granulometría

El tamaño de partícula constituye un factor determinante en la lixiviación, ya que controla el área superficial disponible para la reacción. A menor granulometría, mayor superficie específica, lo cual favorece el contacto entre las partículas minerales y la solución lixivante, incrementando la velocidad de disolución. Sin embargo, una molienda excesiva puede generar lamas que dificultan la percolación del fluido y provocan pérdidas de reactivo, lo que hace necesario establecer un rango óptimo de liberación mineral. En este sentido, el equilibrio entre liberación y permeabilidad del lecho lixiviado se convierte en un criterio de diseño esencial para operaciones a nivel industrial (Negreiros & Rubio, 2019).

Figura 3. Comparativa de las curvas de recuperación vs tamaño de partícula en la lixiviación

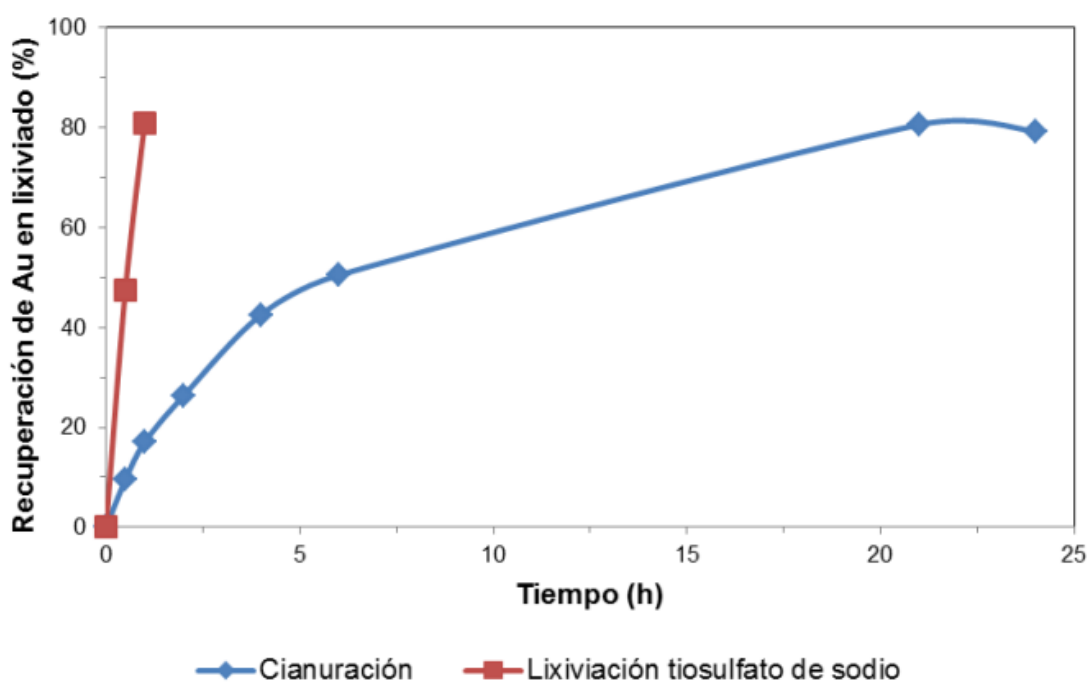


Nota: Recuperado de Carrillo et al. (2017).

b. Tiempo de lixiviación

El tiempo de contacto entre el mineral y la solución lixiviante influye directamente en la extensión de la reacción. A medida que aumenta el tiempo, se logra una mayor disolución de metales, aunque la velocidad de recuperación tiende a disminuir conforme el sistema se aproxima a un equilibrio químico. La cinética de disolución generalmente sigue modelos de tipo difusivo o de control químico, dependiendo de la reactividad del mineral y de las condiciones operativas. En la práctica, definir un tiempo de lixiviación óptimo busca maximizar la recuperación sin comprometer la rentabilidad, dado que tiempos excesivos implican mayores costos de operación y consumo de reactivos (Alvarez & Vásquez, 2025).

Figura 4. Comparativa de recuperación en tiempo según el agente

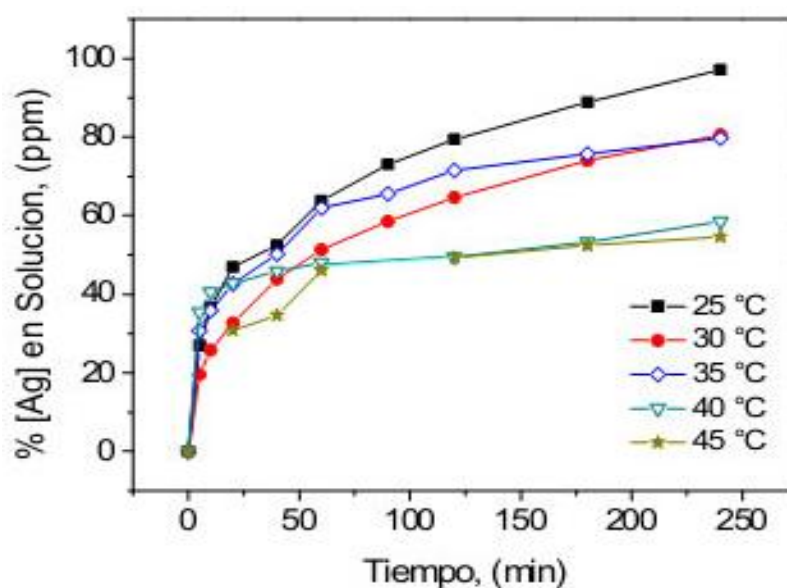


Nota: Recuperado de Gámez & De la Torre (2015).

c. Temperatura

La temperatura es un parámetro termodinámico clave en la lixiviación, ya que afecta la solubilidad de las especies metálicas, la velocidad de reacción y la difusión de los reactivos. En términos generales, un incremento en la temperatura acelera las reacciones químicas de disolución siguiendo la relación de Arrhenius, mejorando la recuperación de metales como oro, cobre y plata. Sin embargo, mantener temperaturas elevadas implica costos energéticos adicionales y posibles pérdidas por evaporación del solvente, por lo que su aplicación se limita a sistemas de lixiviación a presión o en autoclaves. En operaciones de lixiviación en pilas, la temperatura depende principalmente de las condiciones ambientales y del calor generado por la oxidación de sulfuros (Ramos, 2019).

Figura 5. Evaluación de la concentración de Ag a diferentes temperaturas

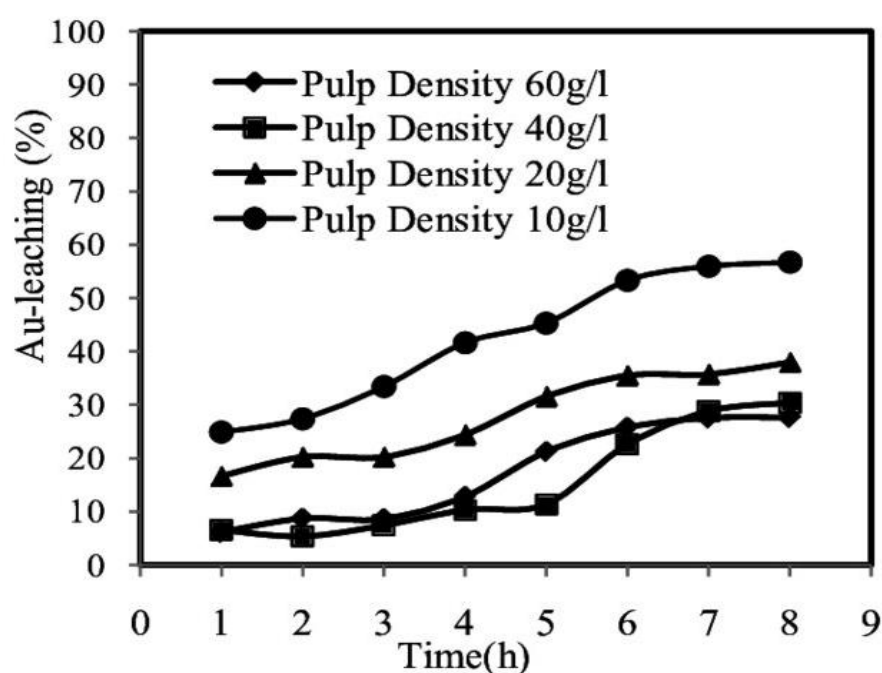


Nota: Recuperado de Juárez et al. (2012).

d. Relación sólida/líquido y densidad de pulpa

La proporción entre la masa de mineral tratado y el volumen de solución lixivante determina la concentración de metales en el licor final y la eficiencia de extracción. Una alta densidad de pulpa puede limitar la difusión del reactivo hacia las superficies minerales, generando un menor grado de disolución; en contraste, una densidad demasiado baja implica un consumo elevado de reactivo y una operación menos económica. En sistemas industriales se busca establecer una relación sólido/líquido que asegure tanto una recuperación elevada como una solución rica en contenido metálico que facilite las etapas posteriores de purificación y recuperación (Machaca, 2019).

Figura 6. Efecto de la densidad de la pulpa en la lixiviación de Au



Nota: Recuperado de Tripathi et al. (2012).

e. Agitación y aireación

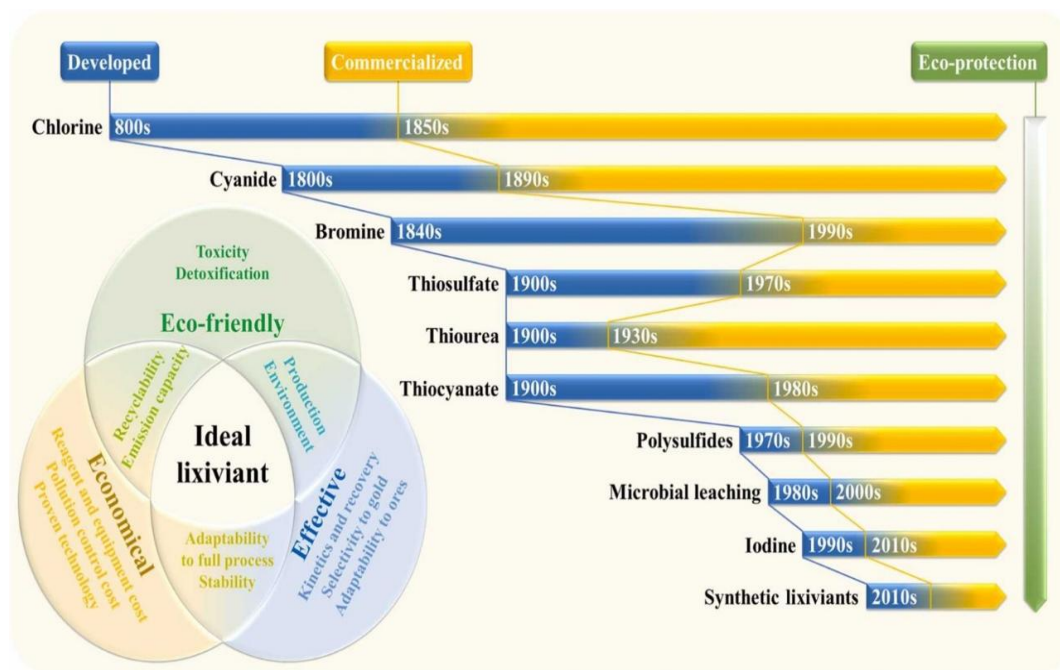
La agitación mecánica o neumática cumple un rol fundamental al garantizar la homogeneización del sistema, evitando gradientes de concentración y favoreciendo la transferencia de masa entre el sólido y el líquido. La aireación, por su parte, resulta indispensable en procesos donde intervienen reacciones de oxidación, como en la cianuración de oro y plata, en la que el oxígeno disuelto actúa como agente oxidante que facilita la formación de complejos metálicos solubles. Una agitación deficiente puede limitar la recuperación, mientras que una agitación excesiva incrementa costos operativos y puede causar erosión de los equipos. Por ello, se encuentra un punto de equilibrio que permita optimizar el consumo de energía y maximizar la eficiencia del proceso (Avila, 2022).

2.2.3. Reactivos sintéticos en la lixiviación

Definición y clasificación de reactivos sintéticos

Los reactivos sintéticos en la lixiviación se definen como compuestos químicos diseñados en laboratorio con el propósito de sustituir o complementar al cianuro en la disolución de metales preciosos como oro y plata. Estos reactivos se desarrollan con la finalidad de mejorar la eficiencia del proceso, reducir los impactos ambientales y adaptarse a minerales refractarios que presentan dificultades de recuperación mediante cianuración convencional. Su importancia radica en que representan alternativas más sostenibles y, en muchos casos, más selectivas hacia los metales de interés, evitando la solubilización de impurezas que perjudican la calidad de los productos obtenidos (Birich et al., 2018).

Figura 7. Desarrollo de los reactivos ecológicos en el tiempo

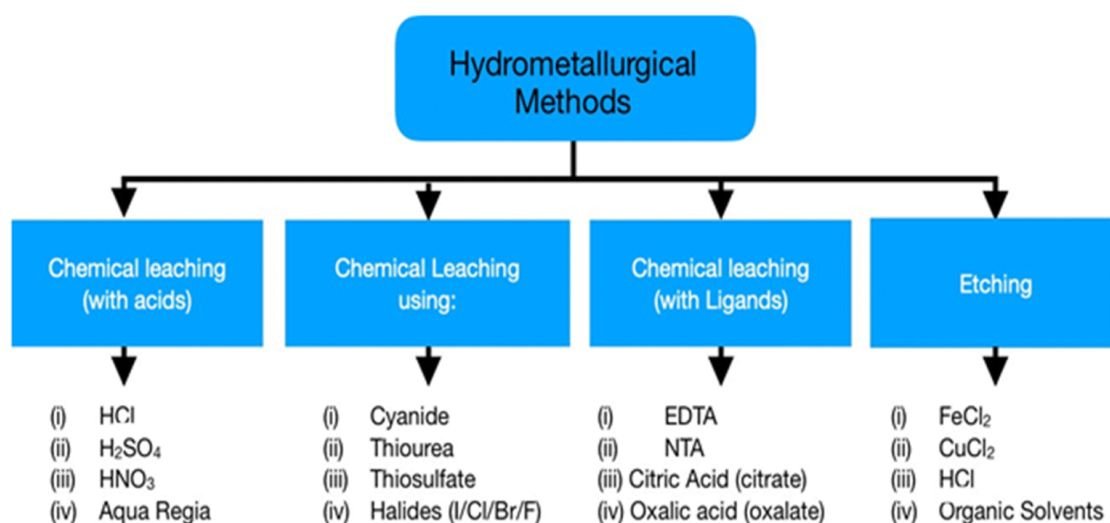


Nota: Recuperado de Liu et al. (2022).

La clasificación de los reactivos sintéticos se organizó en función de su naturaleza química y de los mecanismos de oxidación-reducción que promueven. Entre los más estudiados se encuentran los compuestos basados en azufre reducido (como la

tiourea y el tiosulfato), los reactivos halogenados (bromuros, cloruros e hipocloritos), y los reactivos orgánicos con capacidad complejante. Cada uno de estos grupos presenta características particulares en cuanto a estabilidad, reactividad y costo de implementación, lo que condiciona su aplicación en la industria minera a nivel experimental y piloto (Meng et al., 2021).

Figura 8. Tipos de reactivos según su composición



Nota: Recuperado de Gulliani et al. (2023).

Mecanismos de acción en la disolución de oro y plata

El mecanismo de acción de los reactivos sintéticos en la disolución de metales preciosos se basa en la formación de complejos solubles estables que permitieron la movilización del oro y la plata desde la matriz mineral. Por ejemplo, en el caso de la tiourea, la disolución ocurre bajo condiciones ácidas y en presencia de un agente oxidante, donde se forman complejos catiónicos de oro-tiourea altamente solubles. Por su parte, el tiosulfato de amonio, activado con cobre, permite la formación de complejos de oro-tiosulfato estables en condiciones alcalinas, siendo este mecanismo ampliamente estudiado como sustituto del cianuro en yacimientos refractarios (Russell, 2004).

En el caso de los reactivos halogenados, como el bromuro y cloruro, el mecanismo implica una oxidación directa del oro metálico y su conversión en

complejos halogenados solubles. Este proceso presenta una cinética más rápida que la cianuración, aunque requiere un control estricto de las condiciones de operación para evitar pérdidas de reactivo y corrosión en los equipos. De manera similar, los sistemas basados en hipoclorito o peróxidos generan oxidación en medios alcalinos, liberando los metales preciosos de manera más agresiva que el cianuro convencional (Russell, 2004).

Ventajas frente al cianuro

Uno de los principales atractivos de los reactivos sintéticos es su menor toxicidad en comparación con el cianuro, lo que representa un beneficio sustancial en términos de seguridad laboral y reducción de riesgos ambientales. Por ejemplo, el tiosulfato y la tiourea son más biodegradables y presentan un menor potencial de generar accidentes de intoxicación, lo cual es especialmente relevante en operaciones de pequeña minería y minería artesanal, donde el manejo del cianuro ha generado recurrentes problemas de contaminación (Sousa et al., 2022).

Otra ventaja significativa radica en la selectividad de algunos reactivos hacia el oro y la plata, lo cual disminuye la solubilización de elementos contaminantes como arsénico, antimonio o hierro, que comúnmente acompañan a los minerales sulfurados y refractarios. Esto no solo mejora la calidad de los concentrados, sino que también reduce los costos de purificación en etapas posteriores. Además, el uso de reactivos alternativos permitió trabajar en condiciones diferentes de pH, lo que amplía el rango de aplicación a minerales que no responden bien al cianuro (Jinlin et al., 2025).

Limitaciones y desafíos técnicos

A pesar de las ventajas mencionadas, los reactivos sintéticos presentan limitaciones que han dificultado su implementación a gran escala industrial. Una de las principales dificultades es su costo elevado, ya que reactivos como la tiourea y el tiosulfato requieren mayores dosis para alcanzar recuperaciones similares al cianuro, lo que encarece el proceso. Asimismo, la estabilidad química de estos compuestos es limitada, lo que implica la necesidad de sistemas de control de proceso más sofisticados para evitar pérdidas de reactivo (Birich et al., 2018).

Algunos reactivos son menos tóxicos que el cianuro, sus productos de degradación pueden generar problemas secundarios, como el incremento en la carga salina de las soluciones o la formación de compuestos poco estables que dificultan la recuperación del oro en la etapa de adsorción con carbón activado. Además, la complejidad de operar en medios distintos (ácido o fuertemente alcalino) exige modificaciones en la infraestructura de plantas tradicionales diseñadas para cianuración, lo cual limita su adopción masiva (Sousa et al., 2022).

Tabla 1. Lista de algunos agentes de lixiviación y sus características

Reactivo	Toxicidad	Ventajas	Desventajas
Cianuro	Muy alta	Alta tasa de disolución	Problemas ambientales
Agua	Alta	Alta tasa de disolución, Tecnología probada	No es factible para aplicaciones a gran escala
Regia	Media	Buena eficiencia	Requiere altas temperaturas
Cloración	Baja	Alta tasa de disolución	Altos costos de reactivo
Bromo y Yodo			
Tiocianato	Media	Reciclable	Disponibilidad limitada, Costos de desintoxicación
Tiosulfato	Media	Reactivo económico	Alto consumo de reactivo
Tiourea	Media	Tecnología probada, Alta tasa y velocidad de disolución	Disolución de metales pesados además del oro
Bacterias	Baja	Reducción del consumo de reactivo, Mayor rendimiento de lixiviación	Reacción lenta, Control del proceso difícil

Nota: Recuperado de Gökelma et al. (2016).

2.3. Definición de términos básicos

A continuación, se definen los principales términos técnicos empleados en la presente investigación:

- **Au:** Símbolo químico del oro. Metal precioso de gran valor económico, usado comúnmente como metal base en la minería aurífera.
- **Lixiviación:** La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que consiste en la disolución selectiva de uno o más componentes valiosos contenidos en un mineral, utilizando una solución química adecuada. Este método permitió separar metales como el oro, la plata, el cobre, entre otros, mediante la acción de reactivos como el cianuro, el ácido sulfúrico o el tiosulfato. La lixiviación se aplica comúnmente a minerales oxidados o parcialmente oxidados y puede realizarse en pilas, tanques o de manera in situ, dependiendo de las características del mineral y de la operación minera.
- **Reactivos ecológicos:** Sustancias químicas que sustituyen al cianuro y presentan menor toxicidad y riesgo ambiental, como el tiosulfato de sodio, tiourea, ácido cítrico, entre otros.
- **Recuperación metalúrgica:** Porcentaje del metal valioso (en este caso Au) que se logra extraer del mineral o ripio a través de un proceso específico.
- **Caracterización mineralógica:** Conjunto de técnicas analíticas utilizadas para identificar los minerales presentes en una muestra, así como su forma de ocurrencia y grado de liberación.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

- El uso de reactivos sintéticos en la lixiviación de minerales mixtos influye significativamente en la recuperación de oro y plata en comparación con el método convencional de cianuración.

2.4.2. Hipótesis específica

- Los minerales mixtos de los yacimientos de Trujillo presentan una mineralogía compleja que incluye fases oxidadas y sulfuradas de oro y plata.
- Es posible identificar condiciones operativas óptimas (tiempo, pH, concentración, temperatura) que maximizan la eficiencia de reactivos sintéticos en la recuperación de metales preciosos.
- Los reactivos sintéticos permiten alcanzar un porcentaje de recuperación de oro y plata superior o comparable al obtenido mediante cianuración.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

- Tipos de reactivos sintéticos

2.5.2. Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de oro y plata

2.5.3. Variable constante

- Mineralogía del mineral mixto
- Condiciones operativas del proceso

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Según las variables determinadas se sus definiciones y dimensiones en la Tabla

2.

Tabla 2. Operacionalización de las variables del estudio

Variable	Definición operacional	Dimensiones
Independiente: Tipo de reactivo sintético	Es el reactivo de naturaleza sintética que se emplea como agente lixivante en lugar del cianuro convencional para disolver oro y plata contenidos en minerales mixtos. Su aplicación se realiza bajo condiciones controladas de laboratorio y planta piloto durante el proceso de lixiviación.	Concentración del reactivo
Dependiente: Porcentaje de recuperación de oro y plata	Es el porcentaje de oro y plata extraído del mineral mixto al finalizar el proceso de lixiviación, determinado mediante análisis químico del residuo sólido y del licor resultante, utilizando métodos como absorción atómica o ICP.	Condiciones de aplicación Recuperación de Au (%) Recuperación de Ag (%) Tiempo de disolución

Nota: Considerando las dimensiones de las variables.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, puesto que se orienta a resolver un problema técnico específico relacionado con la optimización del proceso de recuperación de metales preciosos (oro y plata) mediante la utilización de un reactivo sintético en reemplazo de los convencionalmente empleados. Este carácter aplicado permite generar soluciones prácticas con impacto directo en el ámbito metalúrgico.

Asimismo, el enfoque es cuantitativo, ya que se sustenta en la recolección, medición, procesamiento y análisis de datos numéricos. Este enfoque posibilita evaluar de manera objetiva los efectos de las variables experimentales sobre el proceso de lixiviación, garantizando precisión en la interpretación de resultados.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación corresponde al explicativo, dado que busca identificar, analizar y establecer la relación de causa-efecto entre las variables independientes (tiempo de lixiviación, temperatura, concentración del reactivo sintético y granulometría) y la variable dependiente (porcentaje de recuperación de oro y plata).

Este nivel no solo permite describir y comparar resultados, sino también explicar los mecanismos mediante los cuales los reactivos sintéticos influyen en el proceso de lixiviación de minerales mixtos en la ciudad de Trujillo.

De manera complementaria, se sitúa dentro del nivel aplicado-experimental, en tanto persigue un fin práctico: optimizar la recuperación de metales preciosos mediante procedimientos controlados en laboratorio. Esta combinación asegura que los hallazgos trasciendan el plano teórico y se constituyan en un aporte técnico útil para la industria metalúrgica.

3.3. Métodos de investigación

El método adoptado es el experimental, en virtud de que se manipulan de manera deliberada las variables independientes para observar sus efectos sobre la variable dependiente, que corresponde al porcentaje de recuperación de oro y plata. Este procedimiento permite establecer con rigor relaciones de causalidad bajo condiciones controladas de laboratorio, contribuyendo a la comprensión de los factores que influyen en la eficiencia del proceso metalúrgico.

A través de este método se logra contrastar hipótesis, determinar tendencias y generar criterios técnicos que fortalezcan la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos.

3.4. Diseño de investigación

El diseño metodológico corresponde a un cuasiexperimental, caracterizado por la aplicación de tratamientos experimentales bajo condiciones controladas, pero sin la asignación completamente aleatoria ni la existencia de un grupo de control externo. Este tipo de diseño resulta adecuado para investigaciones aplicadas de carácter técnico, como la presente, en las que se busca evaluar el efecto de múltiples variables sobre el comportamiento de un sistema metalúrgico.

Adicionalmente, se implementó un diseño experimental metalúrgico en laboratorio que permitió evaluar de manera simultánea la influencia de varios factores. Se contempla la utilización de réplicas, lo que garantiza la validez estadística de los resultados. De esta forma, se respetan los principios del método científico y se asegura la confiabilidad de los datos obtenidos.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población está constituida por los minerales mixtos con contenido de oro y plata que provienen de yacimientos localizados en zonas cercanas a la ciudad de Trujillo, región La Libertad, Perú. Estos minerales presentan características complejas que dificultan su beneficio mediante procesos convencionales de cianuración.

3.5.2. Muestra

La muestra está compuesta por una cantidad representativa de mineral mixto (óxidos y sulfuros) previamente caracterizado mineralógicamente. La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo aleatorio dirigido, y fue sometida a un proceso de reducción (cuarteo) para obtener una fracción homogénea y apta para los ensayos de lixiviación.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos empleados son las siguientes:

- Análisis mineralógico de las muestras por medio de Difracción de rayos X.
- Técnica de observación directa durante los ensayos experimentales.
- Formatos de registro de datos para anotar condiciones operativas (tiempo, temperatura, pH, etc.).
- Análisis químico de cabeza, colas y soluciones mediante técnicas instrumentales como absorción atómica o espectrometría ICP-OES.

- Instrumentos de laboratorio: balanza analítica, reactor de lixiviación, agitación mecánica, cronómetro, termómetro, agitadores magnéticos, y pH-metro.

Estas herramientas permitieron recolectar datos precisos y confiables que sustenten los análisis posteriores.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados utilizando herramientas estadísticas y software especializado. Las principales técnicas por emplear son:

- Cálculo de recuperación porcentual de oro y plata.
- Análisis estadístico (como ANOVA) para determinar la influencia significativa de las variables manipuladas.
- Representación gráfica y análisis de tendencias con apoyo de programas como Microsoft Excel y Minitab.
- Interpretación comparativa de resultados frente a procesos tradicionales de cianuración (cuando aplique).

Estas técnicas permitieron validar científicamente los efectos del uso de los reactivos sintético en la recuperación de los metales preciosos.

3.8. Tratamiento estadístico

Para el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas de lixiviación de los minerales mixtos de Trujillo, se utilizaron los programas informáticos Microsoft Excel y Minitab. Realizando la organización, sistematización y tabulación de los datos experimentales, así como la elaboración de tablas y gráficos para representar el comportamiento de la recuperación de oro y plata en función de las condiciones operativas evaluadas.

Las pruebas metalúrgicas de lixiviación fueron desarrolladas y registradas durante un periodo de 40 días, considerando los diferentes tratamientos experimentales

establecidos para evaluar la recuperación de oro y plata mediante el reactivo sintético, tomando como referencia el comportamiento obtenido mediante la cianuración convencional. Previamente al desarrollo de los ensayos experimentales, se efectuó una revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas con la mineralización del oro y la plata, las características de los cuerpos mineralizados y los principales parámetros que influyen en los procesos de lixiviación de metales preciosos.

Asimismo, se efectuó la comparación de las recuperaciones obtenidas con el reactivo sintético y el cianuro, considerando los parámetros operativos evaluados, tales como granulometría, alcalinidad, relación sólido/líquido, aireación y tiempo de lixiviación. Para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La selección de las pruebas estadísticas inferenciales se realizó de acuerdo con el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación se desarrolló bajo principios de ética científica y responsabilidad ambiental. Se garantizó la veracidad de los datos, el uso controlado de sustancias químicas, la seguridad en el laboratorio y la disposición adecuada de residuos generados. Además, se respetaron los valores de honestidad académica, transparencia en los resultados y confidencialidad de la información técnica, en caso de que esta involucre a terceros o a fuentes colaboradoras.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

4.1.1. Protocolo de pruebas de metalúrgicas de lixiviación en columna

El protocolo para las pruebas de lixiviación en columna se desarrolló con el propósito de evaluar el comportamiento metalúrgico del mineral bajo condiciones controladas que simulaban un escenario de operación a escala industrial. Para ello, se emplearon 100 kg de mineral, los cuales fueron preparados y caracterizados de acuerdo con el diseño experimental.

a) Preparación del mineral

- Se seleccionaron 100 kg de mineral representativo del yacimiento en estudio.
- El mineral fue chancado y tamizado hasta alcanzar la granulometría requerida para la lixiviación en columna.
- El material fue homogenizado y cuarteado para asegurar uniformidad en la prueba.

b) Acondicionamiento previo

- El mineral fue sometido a una humectación inicial con el fin de favorecer un percolado uniforme de la solución lixivante.
- Se determinó la humedad inicial y se ajustó al valor óptimo para evitar canalización.

c) Carga de la columna

- El material preparado fue cargado en una columna de PVC o acero inoxidable, con diámetro y altura adecuados para contener los 100 kg de mineral.
- En la base de la columna se colocaron capas de soporte (grava y malla) que permitieron un flujo de drenaje adecuado.
- Se midió y se registró la altura del lecho mineral.

d) Preparación de la solución lixivante

- Se preparó la solución lixivante según las concentraciones establecidas en el diseño experimental.
- El pH, la concentración y la temperatura inicial de la solución fueron controlados antes de iniciar el riego.

e) Operación de la lixiviación en columna

- La solución fue aplicada mediante riego por goteo o aspersión, asegurando una tasa de irrigación constante y homogénea ($L/m^2 \cdot h$).
- Se monitoreó el flujo de percolación y se recolectaron las soluciones de drenaje (PLS) en los intervalos establecidos.
- Se registraron parámetros como pH, ORP, concentración metálica y volumen percolado diariamente.
- Cuando sea necesario, se ajustó la concentración de la solución de riego para mantener condiciones de lixiviación constantes.

f) Muestreo y análisis

- Se tomaron muestras periódicas de la solución percolada para determinar la concentración del metal objetivo y la eficiencia progresiva de extracción.
- Se evaluó la razón de disolución, el tiempo óptimo de lixiviación y los patrones de agotamiento del mineral.

g) Finalización de la prueba

- Una vez cumplido el tiempo definido en el diseño experimental, se detendrá el riego y se permitió el drenaje completo de la columna.
- El mineral residual fue descargado, secado y muestreado, y se determinó el grado de extracción y la ley final del sólido.

h) Tratamiento y análisis de datos

- Los resultados fueron procesados para elaborar curvas de extracción, cinéticas de disolución y balances metalúrgicos.
- Estos análisis permitieron comparar condiciones experimentales y determinar los parámetros con mayor influencia en la lixiviación.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Características de la muestra

Microscopía óptica del mineral mixto

La Tabla 3 presenta los resultados detallados de la caracterización mineralógica de la muestra de cabeza, realizada mediante microscopía óptica. La muestra fue preparada como una sección pulida a partir de un tamaño de partícula de 100% - 200 mallas para su análisis.

Este análisis identificó diversas especies minerales y su porcentaje en volumen. La ganga constituye la fracción más predominante, con un 71.86% del volumen total, y muestra una alta liberación del 95.07%. Entre los minerales de interés, se encontró el

electrum, con presencia en trazas y una liberación del 90.16%. La esfalerita representa el 0.25% del volumen y tiene una liberación del 91.74%.

También se identificaron otros minerales como la goethita (15.97% de volumen) y la hematita (9.15% de volumen), ambos con altas liberaciones del 95.07% y 96.58% respectivamente. La pirita representa el 1.96% del volumen con una liberación del 97.81%. Finalmente, se observó la presencia de jarosita (0.39%) y pirolusita (0.42%), con grados de liberación de 87.18% y 91.69% respectivamente.

Tabla 3. Caracterización por medio de microscopía óptica del mineral de mixto

Especie mineralógica	Volumen (%)	Liberación (%)
Electrum	Trazas	90.16
Esfalerita	0.25	91.74
Jarosita	0.39	87.18
Pirolusita	0.42	91.69
Pirita	1.96	97.81
Hematita	9.15	96.58
Goethita	15.97	95.07
Gangas	71.86	

Nota: Elaboración Propia - El informe reportado por el laboratorio GEOEXINPESAC.

En los Anexos 2 y 3 ilustran los principales tipos de entrelazamiento mineral, lo cual influye en la viabilidad de la liberación. De las 8000 partículas analizadas, la mayoría (95.01%) se encontraron libres. En cuanto a los entrelazamientos, se identificaron tipos como el simple (py-GGS), que presentan una liberación "Fácil". El entrelazamiento de tipo borde compuesto (hm-goe) tiene una liberación "Muy difícil". El de sub-corona (el-jrs) se califica como "Muy difícil". Las fotomicrografías muestran claramente la naturaleza de estos entrelazamientos, como la partícula de electrum (el) en la Fotomicrografía 1, o los intercrecimientos entre goethita (goe), hematita (hm), pirita (py), y electrum (el) en la Fotomicrografía 2.

Microscopía por difracción de rayos X del mineral de mixto

La Tabla 4 resume los resultados de la caracterización mineralógica de una muestra representativa de mineral de cabeza, realizada mediante el ensayo de Difracción de Rayos X (DRX).

El análisis determinó que la matriz de ganga es el componente principal de la muestra. El cuarzo (SiO_2) es el mineral más abundante, representando el 66.38% del total. Los óxidos de hierro, goethita (FeOOH) y hematita (Fe_2O_3), también son significativos, con una distribución volumétrica del 14.98% y 9.15% respectivamente.

Además de los óxidos de hierro y el cuarzo, se identificaron otros minerales como el feldespato K (Ortoclasa) con un 5.10% y la pirita (FeS_2) con un 1.96%. Es importante destacar que otros minerales de interés como la esfalerita, el electrum, la porolusita y la jarosita se encontraron por debajo del límite de detección (<L.D.) en esta muestra.

Tabla 4. Caracterización por medio de difracción de rayos X del mineral mixto

Mineral	Resultado aproximado (%)
Cuarzo (SiO_2)	66.38
Goethita (FeOOH)	14.98
Hematita (Fe_2O_3)	9.15
Feldespato K (Ortoclasa)	5.10
Caolinita (Arcilla)	2.07
Pirita (FeS_2)	1.96
Carbonato (Calcita - CaCO_3)	1.15
Moscovita (Sericita)	<L.D.
Pirolusita (MnO_2)	<L.D.
Jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)	<L.D.
Esfalerita (ZnS)	<L.D.
Electrum (Au, Ag)	<L.D.

Nota: Elaboración Propia.

El difractograma que se presenta en la imagen Anexo 5 ilustra la composición mineralógica de la muestra de cabeza. En el gráfico, el pico principal y de mayor intensidad corresponde al cuarzo (SiO_2). Esto evidencia que el cuarzo es la especie predominante en la muestra y es el mineral de ganga principal.

Aunque en menor proporción, el difractograma también muestra otros picos que indican la presencia de goethita, hematita, feldespato K, caolinita, pirita, carbonato, y en concentraciones muy bajas, pirolusita, jarosita, esfalerita y electrum.

Granulometría del mineral mixto

La Tabla 5 presenta los resultados de un análisis granulométrico de una muestra de mineral de cabeza, utilizando una serie de tamices Tyler. Los datos de peso retenido en cada tamiz se utilizaron para calcular el porcentaje retenido y el porcentaje pasante acumulado, que es crucial para determinar la distribución del tamaño de las partículas.

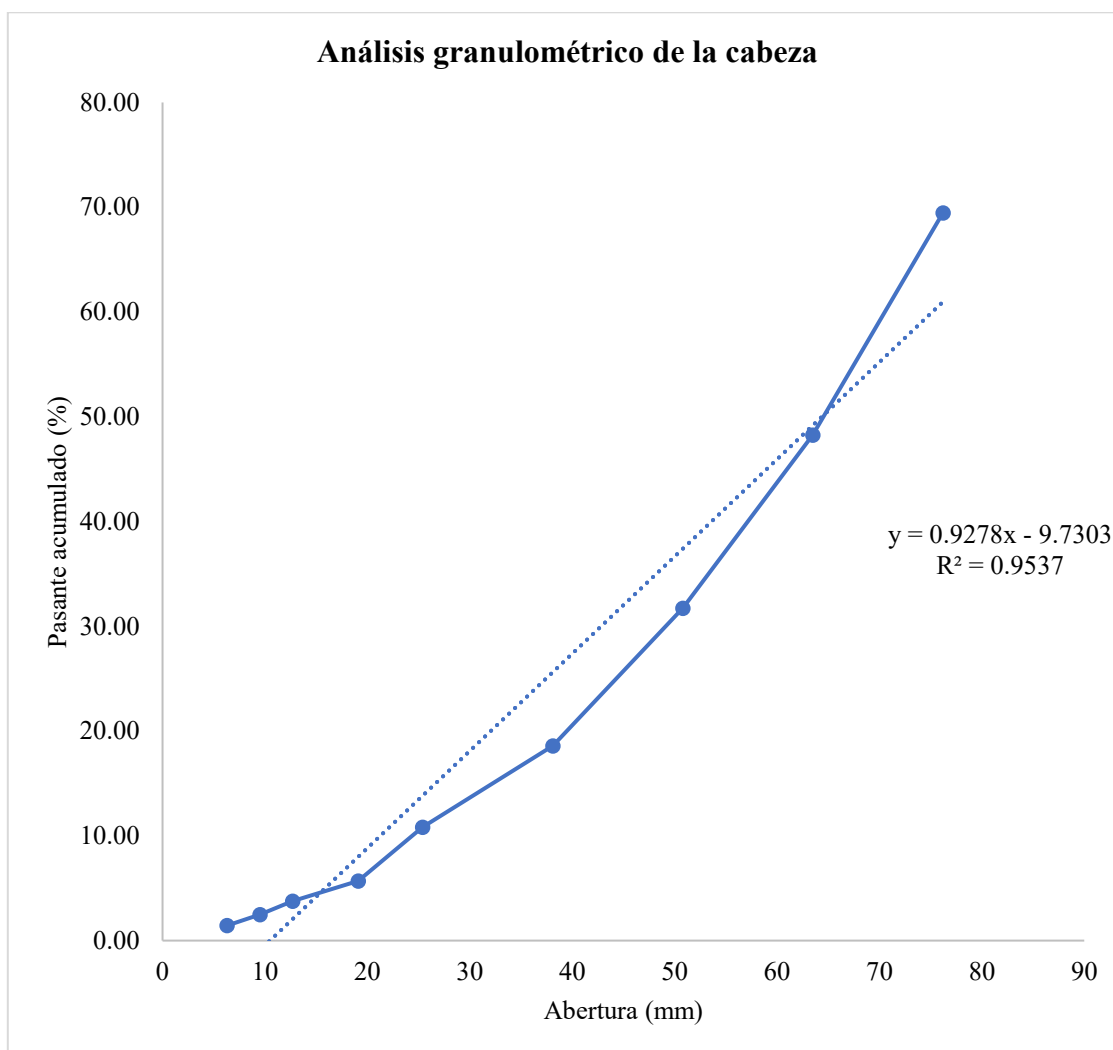
Tabla 5. Análisis granulométrico del mineral mixto

Tamiz (pulgadas)	Abertura (mm)	Peso retenido (Kg)	% retenido	% pasante acumulado
3"	76.2	128.25	30.54	69.46
2½"	63.5	89.07	21.21	48.26
2"	50.8	69.46	16.54	31.72
1½"	38.1	55.14	13.13	18.59
1"	25.4	32.60	7.76	10.83
¾"	19.1	21.53	5.13	5.70
½"	12.7	8.15	1.94	3.76
⅜"	9.5	5.38	1.28	2.48
¼"	6.3	4.39	1.05	1.44
Ciego		6.03	1.44	100.00
Total		420	100.00	

Nota: Elaboración Propia - Tamices de la serie Tyler.

La Figura 9, que complementa la tabla, muestra la curva del análisis granulométrico del mismo mineral de cabeza. Esta gráfica representa el porcentaje pasante acumulado en función de la abertura del tamiz en milímetros. La curva resultante es casi lineal, lo que se indica por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9537, sugiriendo un buen ajuste lineal de los datos. Este análisis es fundamental para entender el comportamiento del mineral durante las etapas de trituración y molienda.

Figura 9. Curva del análisis granulométrico del mineral mixto



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

Ensayo de cabeza del mineral de cabeza

La Tabla 6 muestra las leyes de oro (Au) y plata (Ag) para la muestra de cabeza.

La ley de oro en esta mezcla es de 1.52 g/TM, mientras que la de plata es de 25.70 g/TM.

Tabla 6. Leyes del mineral mixto

Elemento	Au (g/TM)	Ag (g/TM)
Ley	1.52	25.70

Nota: Elaboración Propia.

Prueba de alcalinidad mineral mixto

La Tabla 7 muestra el análisis del pH del mineral mixto en función de la dosificación de cal (CaO), un reactivo comúnmente utilizado para ajustar la alcalinidad en procesos de lixiviación. Los datos indican que un aumento gradual en la adición de cal, desde 0 g hasta 4 g, resulta en un incremento progresivo del pH, alcanzando un valor final de 12.7, esta prueba se realizó con 500 g de muestra y 1500 ml de volumen de agua.

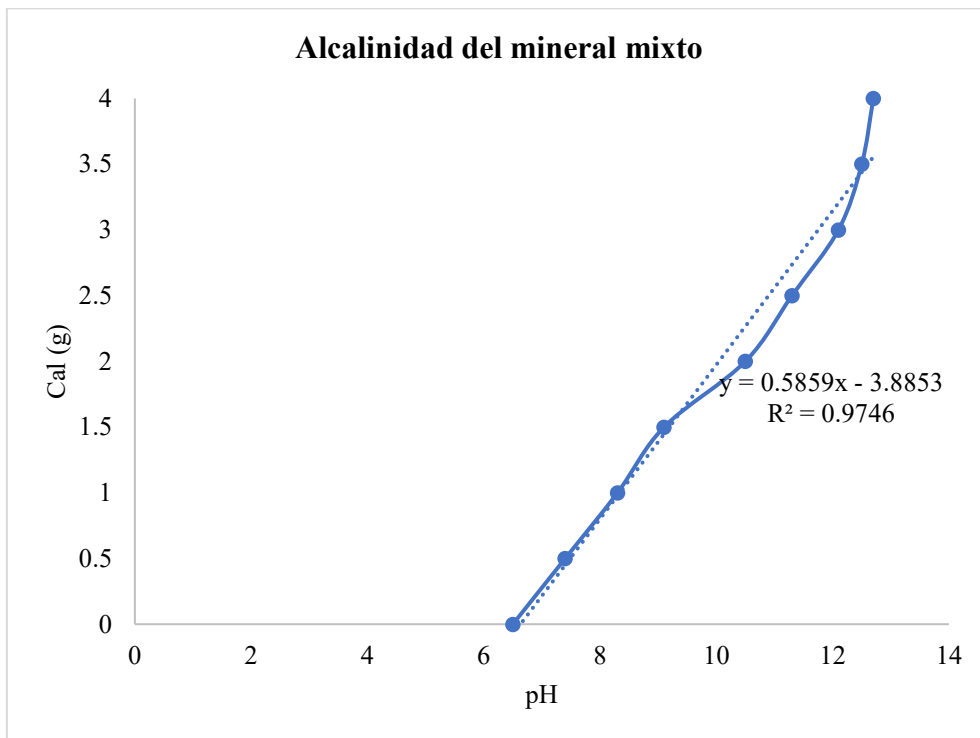
Tabla 7. Análisis del pH en función de la dosificación de cal

pH	Cal (g)
6.5	0
7.4	0.5
8.3	1
9.1	1.5
10.5	2
11.3	2.5
12.1	3
12.5	3.5
12.7	4

Nota: Elaboración Propia.

La Figura 10 presenta la curva de alcalinidad del mineral mixto, graficando la relación entre el pH y la cantidad de cal agregada. El gráfico ilustra una respuesta no lineal, donde el pH aumenta rápidamente con pequeñas adiciones de cal y luego se estabiliza. La curva tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9746, lo que sugiere un alto grado de correlación entre las dos variables. Esta curva es fundamental para determinar la cantidad de reactivo necesario para alcanzar un pH óptimo en la lixiviación.

Figura 10. Curva de la alcalinidad del mineral mixto



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

Moliendabilidad del mineral mixto

La Tabla 8 muestra el efecto del tiempo de molienda en la granulometría de una muestra de mineral de cabeza. Los resultados indican que a medida que aumenta el tiempo de molienda de 0 a 15 minutos, el tamaño de partícula del mineral disminuye considerablemente, pasando de 1850 μm a 63.7 μm . Este análisis es crucial para determinar el tiempo de molienda óptimo, con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado para las etapas posteriores del proceso de lixiviación.

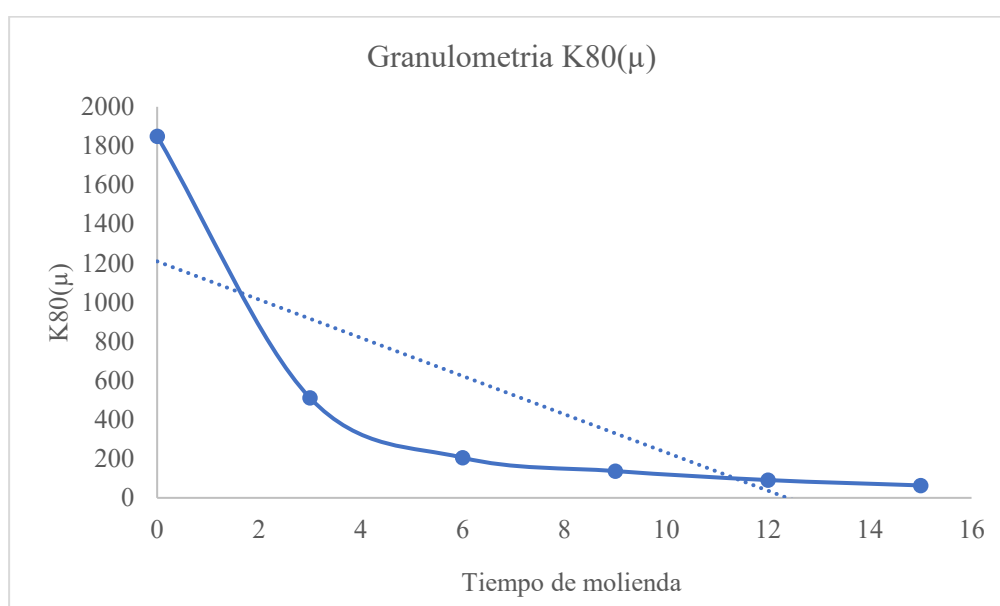
Tabla 8. Análisis de la granulometría en función del tiempo de molienda del mineral mixto

Tiempo molienda (min)	Granulometría K80 (μ)
0	1850
3	512.14
6	205.63
9	137.11
12	91.08
15	63.7

Nota: Elaboración Propia.

La Figura 11 muestra la curva de moliendabilidad del mineral de cabeza, graficando el tamaño de partícula (K80) en función del tiempo de molienda. La curva ilustra cómo el tamaño de partícula disminuye rápidamente en los primeros minutos de molienda y luego la tasa de reducción se desacelera a medida que el tiempo avanza. . Esta relación es esencial para establecer los parámetros de molienda, ya que una molienda excesiva puede generar costos innecesarios y afectar la posterior recuperación de los minerales.

Figura 11. Curva de la moliendabilidad del mineral mixto



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

Prueba de oro cianurable

La Tabla 9 presenta el balance metalúrgico de una prueba de cianuración para el oro y la plata. La prueba se realizó con una muestra de 300 g de mineral de cabeza, que mostró una ley inicial de 1.64 g/TM de oro y 22.88 g/TM de plata.

El análisis del proceso muestra que la lixiviación de oro fue altamente efectiva, logrando una recuperación de 93.29%. En el caso de la plata, la recuperación fue también significativa, alcanzando un 94.93%. Los resultados de la solución revelan una

ley de 0.51 g/TM de oro y 7.24 g/TM de plata, mientras que el relave contiene solo 0.11 g/TM de oro y 1.16 g/TM de plata, confirmando la alta eficiencia del proceso.

Tabla 9. Balance metalúrgico de la prueba de oro cianurable

Componentes	Peso (g)	Ley (g/TM o mg/lit)		Contenido fino (mg)		Recuperación (%)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza	300						
Solución	900	0.51	7.24	0.459	6.516	93.29	94.93
Relave	300	0.11	1.16	0.033	0.348	6.71	5.07
Cabeza Calculada		1.64	22.88			100.00	100.00

Nota: Elaboración Propia.

Pruebas de cianuración a diferentes granulometrías

La Tabla 10 presenta los parámetros operativos establecidos para la prueba de cianuración. La prueba se realizó con una muestra de 100 kg en un volumen de agua de 150 litros, lo que es crucial para la relación sólido-líquido en el proceso.

Se mantuvo una fuerza de cianuro de 1000 ppm para asegurar una disolución efectiva del oro y la plata. La tasa de riego se fijó en 5 l/h/m² y el tiempo total del proceso fue de 40 días.

Tabla 10. Parámetros operativos de la prueba de cianuración

Parámetro	Valor
Peso Muestra (Kg)	100
Volumen de agua (lt)	150
Tasa de Riego (l/h*m ²)	5
Fuerza de Cianuro (ppm)	1000
Tiempo (días)	40

Nota: Elaboración Propia - Condiciones determinadas por la experiencia laboral.

La Tabla 11 presenta el balance metalúrgico de una prueba de lixiviación con cianuro realizada con una granulometría de 100% - 4". Los datos muestran la evolución de la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) a lo largo de 40 días.

Al final del proceso (día 40), la recuperación de oro alcanzó el 62.17%, mientras que la de plata llegó al 45.99%. La tabla también muestra la concentración de cianuro y cal utilizada a lo largo del tiempo para mantener las condiciones óptimas del proceso.

La ley de cabeza calculada del mineral fue de 1.495 g/TM para el oro y 26.43 g/TM para la plata.

Tabla 11. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 4"

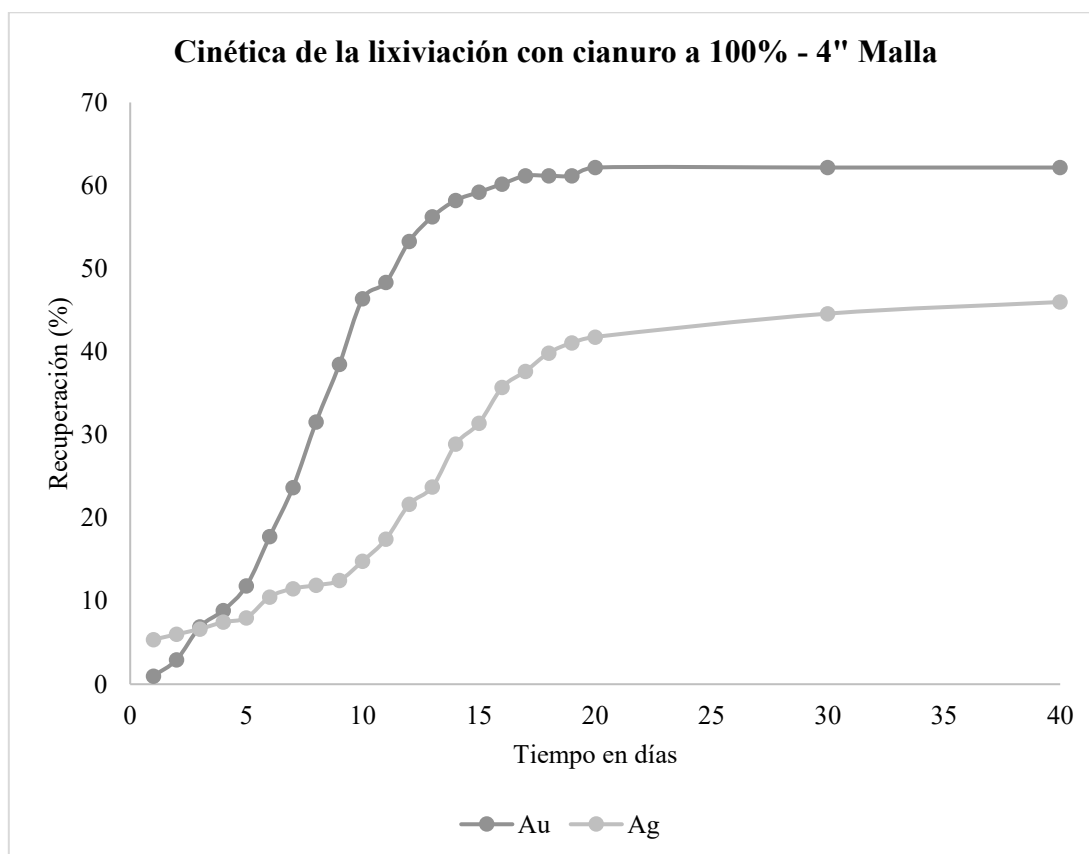
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Cianuro	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.01	0.92	1.5	138	0.99	5.37	0.1	0.1
2	0.03	1.03	4.5	154.5	2.96	6.01	0.11	0.12
3	0.07	1.14	10.5	171	6.91	6.65	0.14	0.145
4	0.09	1.28	13.5	192	8.88	7.47	0.15	0.19
5	0.12	1.37	18	205.5	11.84	8.00	0.17	0.2
6	0.18	1.8	27	270	17.76	10.51	0.22	0.22
7	0.24	1.97	36	295.5	23.68	11.50	0.24	0.23
8	0.32	2.04	48	306	31.58	11.91	0.28	0.25
9	0.39	2.14	58.5	321	38.49	12.49	0.33	0.27
10	0.47	2.54	70.5	381	46.38	14.82	0.37	0.28
11	0.49	2.99	73.5	448.5	48.36	17.45	0.4	0.29
12	0.54	3.71	81	556.5	53.29	21.65	0.41	0.31
13	0.57	4.07	85.5	610.5	56.25	23.75	0.43	0.32
14	0.59	4.95	88.5	742.5	58.22	28.89	0.47	0.32
15	0.6	5.38	90	807	59.21	31.40	0.49	0.33
16	0.61	6.12	91.5	918	60.20	35.72	0.5	0.34
17	0.62	6.45	93	967.5	61.18	37.65	0.52	0.34
18	0.62	6.83	93	1024.5	61.18	39.86	0.53	0.35
19	0.62	7.04	93	1056	61.18	41.09	0.53	0.361
20	0.63	7.16	94.5	1074	62.17	41.79	0.55	0.36
30	0.63	7.64	94.5	1146	62.17	44.59	0.55	0.36
40	0.63	7.88	94.5	1182	62.17	45.99	0.55	0.37

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 12 muestra la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) con cianuro a una granulometría de 100% - 4". El gráfico ilustra la recuperación de ambos metales a lo largo de 40 días.

La curva de oro muestra una recuperación que aumenta rápidamente en los primeros 10 a 15 días, alcanzando un valor de alrededor del 62%, y luego se estabiliza. Por otro lado, la curva de plata presenta una recuperación más gradual, llegando a aproximadamente un 46% al final del periodo.

Figura 12. Cinética de la cianuración a 100% - 4" malla



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Tabla 12 presenta el balance metalúrgico de una prueba de lixiviación con cianuro, realizada con una granulometría de 100% - 2". Los datos muestran la evolución de la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) durante 40 días.

Al final del proceso (día 40), la recuperación de oro alcanzó el 64.14%, mientras que la de plata fue del 47.39%. La tabla también detalla las concentraciones de cianuro y cal utilizadas a lo largo del tiempo, lo que demuestra las condiciones operativas mantenidas para optimizar la disolución de los metales.

La ley de cabeza calculada inicial del mineral fue de 1.355 g/TM para el oro y 23.68 g/TM para la plata.

Tabla 12. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 2''

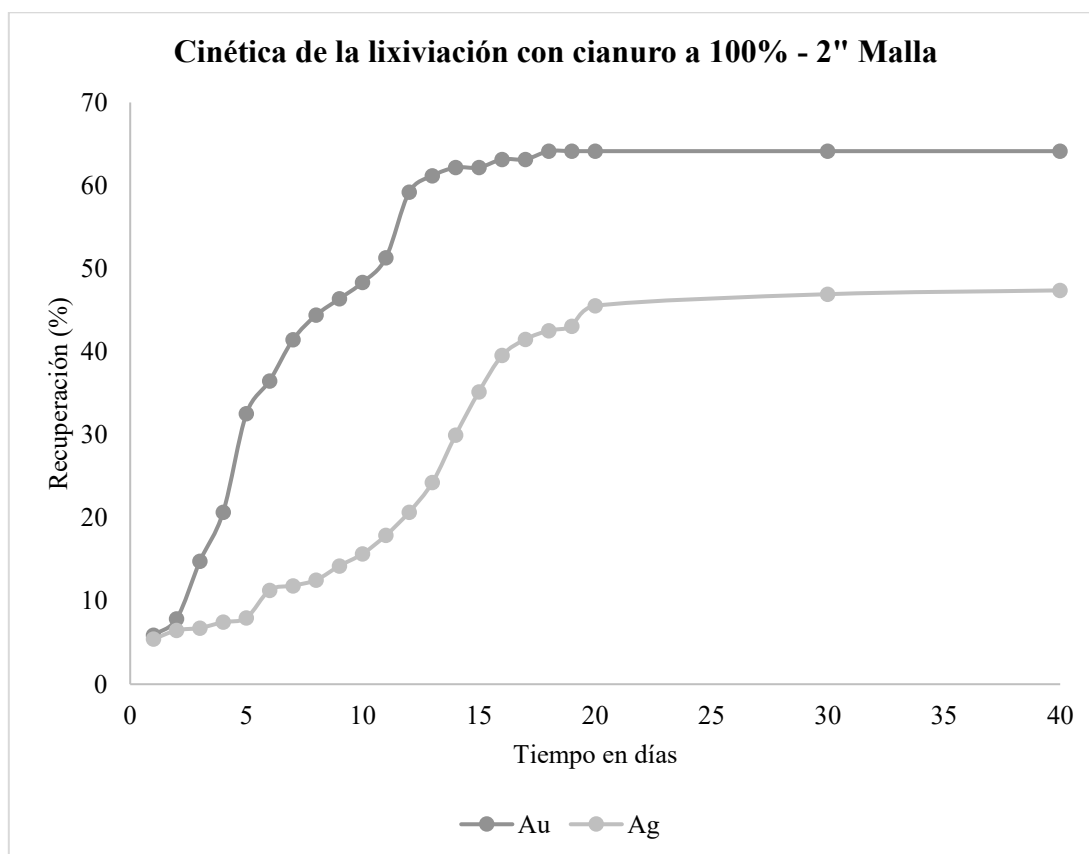
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Cianuro	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.06	0.93	9	139.5	5.92	5.43	0.1	0.1
2	0.08	1.11	12	166.5	7.89	6.48	0.12	0.13
3	0.15	1.16	22.5	174	14.80	6.77	0.15	0.15
4	0.21	1.28	31.5	192	20.72	7.47	0.16	0.2
5	0.33	1.37	49.5	205.5	32.57	8.00	0.19	0.22
6	0.37	1.94	55.5	291	36.51	11.32	0.23	0.24
7	0.42	2.03	63	304.5	41.45	11.85	0.24	0.26
8	0.45	2.15	67.5	322.5	44.41	12.55	0.29	0.27
9	0.47	2.44	70.5	366	46.38	14.24	0.37	0.28
10	0.49	2.69	73.5	403.5	48.36	15.70	0.4	0.3
11	0.52	3.07	78	460.5	51.32	17.92	0.43	0.31
12	0.6	3.55	90	532.5	59.21	20.72	0.44	0.33
13	0.62	4.16	93	624	61.18	24.28	0.45	0.34
14	0.63	5.14	94.5	771	62.17	30.00	0.48	0.36
15	0.63	6.03	94.5	904.5	62.17	35.19	0.49	0.37
16	0.64	6.78	96	1017	63.16	39.57	0.5	0.38
17	0.64	7.11	96	1066.5	63.16	41.50	0.52	0.39
18	0.65	7.29	97.5	1093.5	64.14	42.55	0.53	0.4
19	0.65	7.38	97.5	1107	64.14	43.07	0.54	0.41
20	0.65	7.8	97.5	1170	64.14	45.53	0.55	0.41
30	0.65	8.04	97.5	1206	64.14	46.93	0.58	0.42
40	0.65	8.12	97.5	1218	64.14	47.39	0.58	0.42

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 13 muestra la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) con cianuro a una granulometría de 100% - 2". El gráfico ilustra la recuperación de ambos metales a lo largo de 40 días.

La curva de oro muestra que la recuperación aumenta rápidamente en los primeros 10 a 15 días, alcanzando un valor de aproximadamente el 64%, donde se estabiliza. Por su parte, la curva de la plata exhibe un ascenso más gradual, llegando a cerca de 47% de recuperación al final del periodo.

Figura 13. Cinética de la cianuración a 100% - 2" malla



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Tabla 13 presenta el balance metalúrgico de una prueba de lixiviación con cianuro, realizada con una granulometría de 100% - 1". Los resultados muestran la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) a lo largo de 40 días.

A lo largo del proceso, se observa un aumento gradual en la recuperación, alcanzando al día 40 un 74.01% para el oro y un 47.33% para la plata. La tabla también detalla las dosificaciones de cianuro y cal utilizadas, las cuales fueron cruciales para optimizar el proceso de disolución de los metales valiosos.

La ley de cabeza calculada inicial del mineral fue de 1.435 g/TM para el oro y 23.155 g/TM para la plata.

Tabla 13. Balance metalúrgico de la cianuración a 100% - 1''

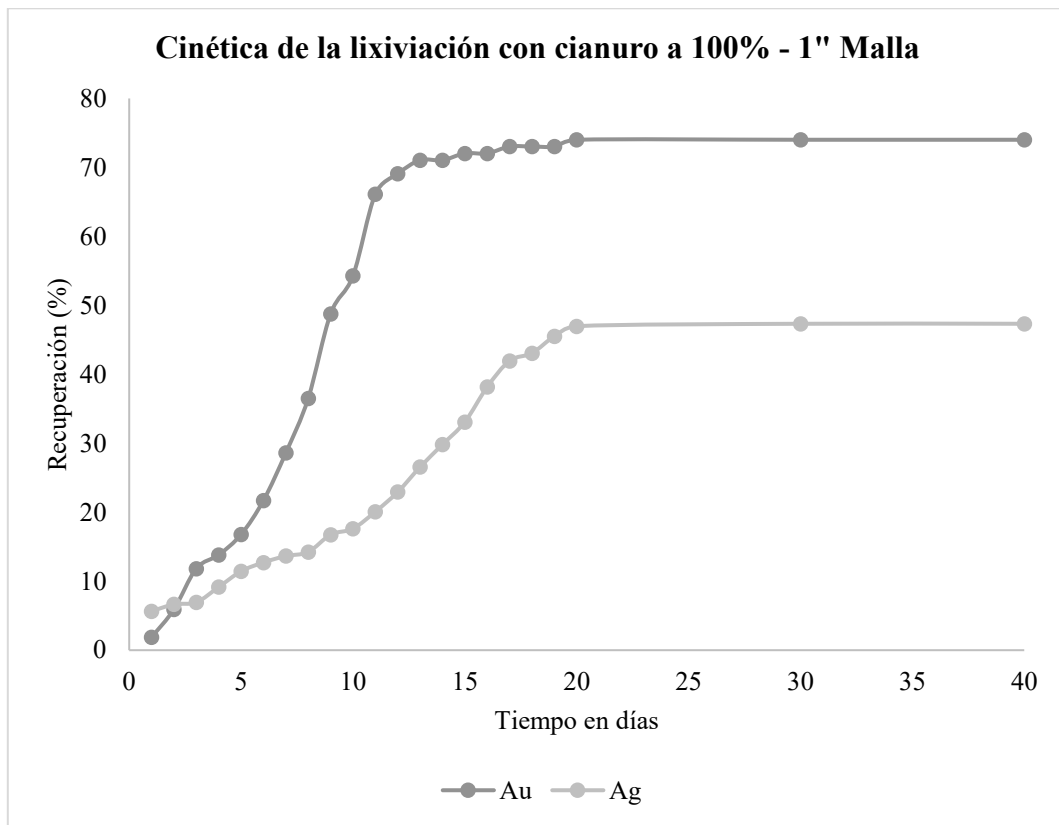
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Cianuro	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.019	0.97	2.85	145.5	1.88	5.66	0.1	0.1
2	0.06	1.14	9	171	5.92	6.65	0.13	0.14
3	0.12	1.19	18	178.5	11.84	6.95	0.16	0.15
4	0.14	1.57	21	235.5	13.82	9.16	0.18	0.2
5	0.17	0.59	25.5	88.5	16.78	11.44	0.2	0.22
6	0.22	2.18	33	327	21.71	12.72	0.21	0.28
7	0.29	2.34	43.5	351	28.62	13.66	0.25	0.3
8	0.37	2.44	55.5	366	36.51	14.24	0.3	0.31
9	0.19	2.87	28.5	430.5	48.75	16.75	0.34	0.37
10	0.55	3.02	82.5	453	54.28	17.63	0.4	0.4
11	0.67	3.44	100.5	516	66.12	20.08	0.42	0.41
12	0.7	3.93	105	589.5	69.08	22.94	0.48	0.42
13	0.72	4.55	108	682.5	71.05	26.56	0.53	0.43
14	0.72	5.11	108	766.5	71.05	29.82	0.57	0.45
15	0.73	5.67	109.5	850.5	72.04	33.09	0.58	0.47
16	0.73	6.54	109.5	981	72.04	38.17	0.59	0.48
17	0.74	7.19	111	1078.5	73.03	41.96	0.6	0.49
18	0.74	7.38	111	1107	73.03	43.07	0.6	0.5
19	0.74	7.8	111	1170	73.03	45.53	0.61	0.51
20	0.75	8.05	112.5	1207.5	74.01	46.98	0.62	0.51
30	0.75	8.11	112.5	1216.5	74.01	47.33	0.63	0.52
40	0.75	8.11	112.5	1216.5	74.01	47.33	0.63	0.53

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 14 muestra la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) con cianuro a una granulometría de 100% - 1". El gráfico ilustra la recuperación de ambos metales en un periodo de 40 días.

La curva de oro muestra un rápido incremento en la recuperación durante los primeros 15 días, alcanzando un valor aproximado del 74%, donde la tasa de recuperación se estabiliza. Por su parte, la curva de la plata presenta una recuperación más gradual, llegando a cerca de un 47% al final de la prueba.

Figura 14. Cinética de la cianuración a 100% - 1" malla

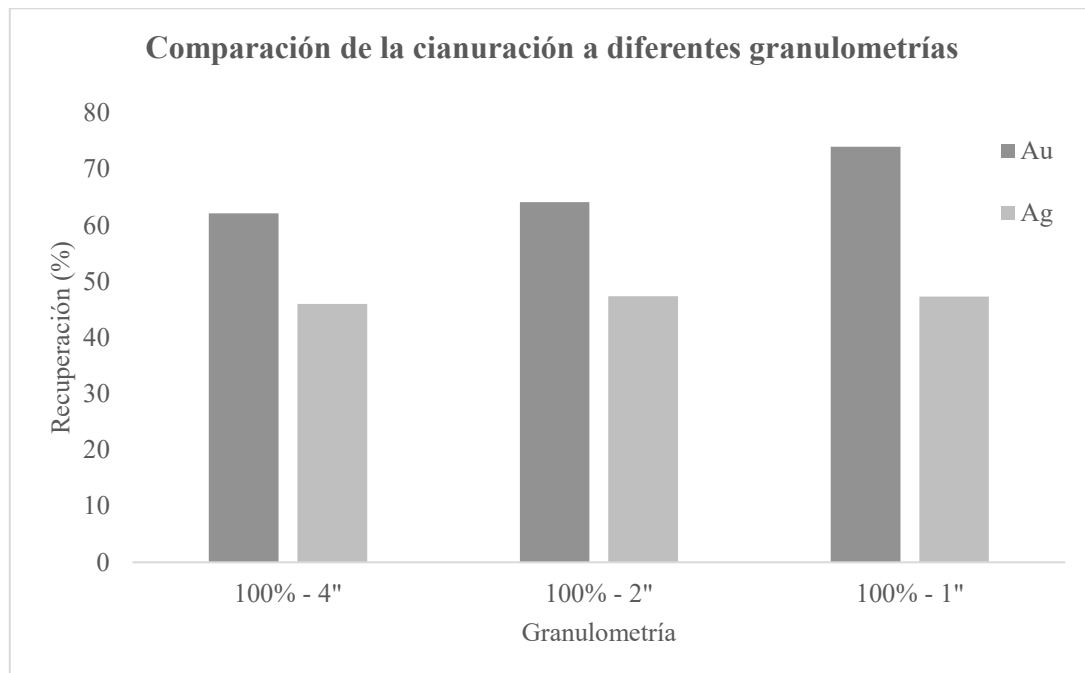


Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Figura 15 presenta una comparación de las recuperaciones de oro (Au) y plata (Ag) en pruebas de cianuración a tres granulometrías diferentes: 100% - 4", 100% - 2" y 100% - 1".

Los resultados muestran que la recuperación de oro mejora significativamente a medida que el tamaño de la partícula se reduce, esto sugiere que la molienda fina tiene un mayor impacto en la liberación del oro que en la de la plata. La mejor recuperación se alcanzó con una granulometría de 100% - 1", con una recuperación de Au de 74.01% y 47.33% de Ag.

Figura 15. Comparativa de las recuperaciones en la cianuración



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

Prueba de oro soluble con reactivo goldmax

Pruebas de lixiviación con goldmax a diferentes granulometrías

La Tabla 14 enumera los parámetros operativos para una prueba de lixiviación con el goldmax (ficha técnica en el Anexo 6). El ensayo se realizó con una muestra de 100 kg en 150 litros de agua, resultando en una relación sólido-líquido favorable para el proceso. Se mantuvo una tasa de riego constante de 5 l/h/m² y una fuerza de cianuro de 1000 ppm. La duración total del experimento fue de 40 días.

Tabla 14. Parámetros operativos de la prueba de lixiviación con goldmax

Parámetro	Valor
Peso Muestra (Kg)	100
Volumen de agua (lt)	150
Tasa de Riego (l/h*m ²)	5
Fuerza del Goldmax (ppm)	1000
Tiempo (días)	40

Nota: Condiciones determinadas por la experiencia laboral.

La Tabla 15 expone el balance metalúrgico correspondiente a una prueba de lixiviación con reactivo sintético, realizada sobre un mineral con granulometría de 100% -4". Los resultados evidencian la variación en la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) durante un período de 40 días.

Al término del ensayo (día 40), se obtuvo una recuperación de 60.20% para el oro y 45.70% para la plata. Asimismo, la tabla detalla la concentración de reactivo sintético y de cal empleada en cada etapa, a fin de conservar las condiciones adecuadas del proceso.

Finalmente, la ley de cabeza del mineral se calculó en 1.485 g/TM de Au y 26.975 g/TM de Ag.

Tabla 15. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 4"

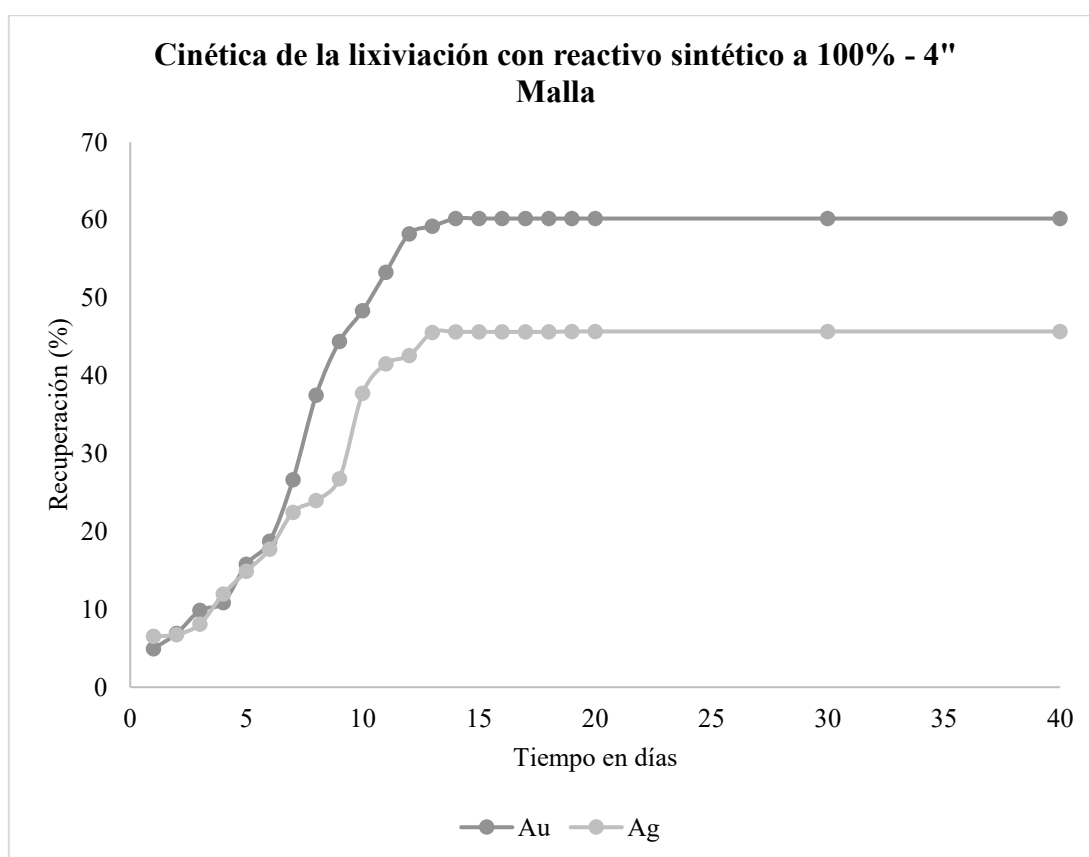
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Reactivo sintético	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.05	1.12	7.5	168	4.93	6.54	0.1	0.1
2	0.07	1.16	10.5	174	6.91	6.77	0.11	0.12
3	0.1	0.19	15	28.5	9.87	8.11	0.14	0.145
4	0.11	2.05	16.5	307.5	10.86	11.96	0.15	0.19
5	0.16	2.55	24	382.5	15.79	14.88	0.17	0.2
6	0.19	3.04	28.5	456	18.75	17.74	0.22	0.22
7	0.27	3.85	40.5	577.5	26.64	22.47	0.24	0.23
8	0.38	4.11	57	616.5	37.50	23.99	0.28	0.25
9	0.45	4.59	67.5	688.5	44.41	26.79	0.33	0.27
10	0.49	6.47	73.5	970.5	48.36	37.76	0.37	0.28
11	0.54	7.12	81	1068	53.29	41.56	0.4	0.29
12	0.59	7.3	88.5	1095	58.22	42.61	0.41	0.31
13	0.6	7.81	90	1171.5	59.21	45.58	0.43	0.32
14	0.61	7.82	91.5	1173	60.20	45.64	0.47	0.32
15	0.61	7.82	91.5	1173	60.20	45.64	0.49	0.33
16	0.61	7.82	91.5	1173	60.20	45.64	0.5	0.34
17	0.61	7.82	91.5	1173	60.20	45.64	0.52	0.34
18	0.61	7.82	91.5	1173	60.20	45.64	0.53	0.35
19	0.61	7.83	91.5	1174.5	60.20	45.70	0.53	0.361
20	0.61	7.83	91.5	1174.5	60.20	45.70	0.55	0.36
30	0.61	7.83	91.5	1174.5	60.20	45.70	0.55	0.36
40	0.61	7.83	91.5	1174.5	60.20	45.70	0.55	0.37

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 16 muestra la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) con un reactivo sintético a una granulometría de 100% - 4". El gráfico ilustra la recuperación de ambos metales a lo largo de 40 días.

La curva de oro muestra una recuperación que aumenta rápidamente en los primeros 15 días, alcanzando un valor de alrededor del 60%, y luego se estabiliza. Por otro lado, la curva de la plata presenta una recuperación más gradual, llegando a aproximadamente un 45% al final del periodo. La cinética de este proceso es comparable a la lixiviación con cianuro, aunque con un reactivo diferente.

Figura 16. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 4" malla



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Tabla 16 expone el balance metalúrgico correspondiente a una prueba de lixiviación con reactivo sintético, realizada con una granulometría de 100% -1". En los resultados se observa la evolución de la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) a lo largo de 40 días.

Al término del ensayo (día 40), la recuperación de oro alcanzó un 63.16%, mientras que la de plata llegó a 45.82%. Asimismo, la tabla registra las concentraciones de cianuro y cal empleadas durante el proceso, evidenciando las condiciones operativas aplicadas para favorecer la disolución de los metales.

La ley de cabeza inicial calculada del mineral fue de 1.37 g/TM para el Au y 24.785 g/TM para el Ag.

Tabla 16. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 2''

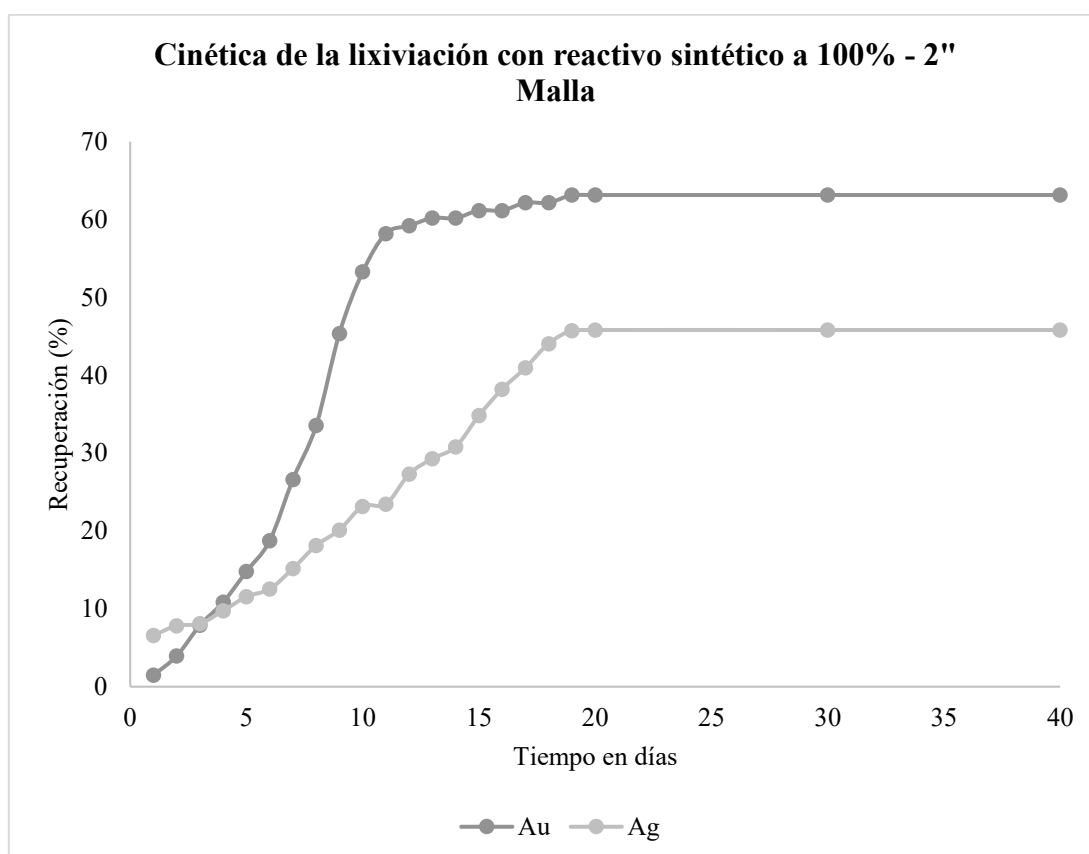
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Reactivo sintético	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.015	1.13	2.25	169.5	1.48	6.60	0.1	0.1
2	0.04	1.34	6	201	3.95	7.82	0.12	0.13
3	0.08	1.39	12	208.5	7.89	8.11	0.15	0.15
4	0.11	1.67	16.5	250.5	10.86	9.75	0.16	0.2
5	0.15	1.98	22.5	297	14.80	11.56	0.19	0.22
6	0.19	2.15	28.5	322.5	18.75	12.55	0.23	0.24
7	0.27	2.6	40.5	390	26.64	15.18	0.24	0.26
8	0.34	3.11	51	466.5	33.55	18.15	0.29	0.27
9	0.46	3.45	69	517.5	45.39	20.14	0.37	0.28
10	0.54	3.97	81	595.5	53.29	23.17	0.4	0.3
11	0.59	4.02	88.5	603	58.22	23.46	0.43	0.31
12	0.6	4.68	90	702	59.21	27.32	0.44	0.33
13	0.61	5.02	91.5	753	60.20	29.30	0.45	0.34
14	0.61	5.28	91.5	792	60.20	30.82	0.48	0.36
15	0.62	5.97	93	895.5	61.18	34.84	0.49	0.37
16	0.62	6.55	93	982.5	61.18	38.23	0.5	0.38
17	0.63	7.02	94.5	1053	62.17	40.97	0.52	0.39
18	0.63	7.55	94.5	1132.5	62.17	44.07	0.53	0.4
19	0.64	7.84	96	1176	63.16	45.76	0.54	0.41
20	0.64	7.85	96	1177.5	63.16	45.82	0.55	0.41
30	0.64	7.85	96	1177.5	63.16	45.82	0.58	0.42
40	0.64	7.85	96	1177.5	63.16	45.82	0.58	0.42

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 17 presenta la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) utilizando un reactivo sintético a una granulometría de 100% - 2". El gráfico muestra la recuperación de ambos metales a lo largo de un periodo de 40 días.

La curva de oro muestra un aumento rápido en la recuperación durante los primeros 15 días, hasta alcanzar cerca del 63%, donde se estabiliza. En contraste, la curva de la plata muestra una recuperación más gradual, que se estabiliza en alrededor del 46% al finalizar el periodo.

Figura 17. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 2" malla



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Tabla 17 muestra el balance metalúrgico obtenido en una prueba de lixiviación con reactivo sintético, realizada con una granulometría de 100% -1". Los resultados evidencian una recuperación progresiva de oro (Au) y plata (Ag) durante un periodo de 40 días.

Al finalizar el ensayo, se alcanzó una recuperación de 73.03% para el oro y 46.98% para la plata. Asimismo, la tabla incluye las dosificaciones de cianuro y cal empleadas, parámetros determinantes para favorecer la disolución de los metales preciosos.

La ley de cabeza inicial calculada del mineral fue de 1.43 g/TM de oro y 23.195 g/TM de plata.

Tabla 17. Balance metalúrgico de la lixiviación con goldmax a 100% - 1''

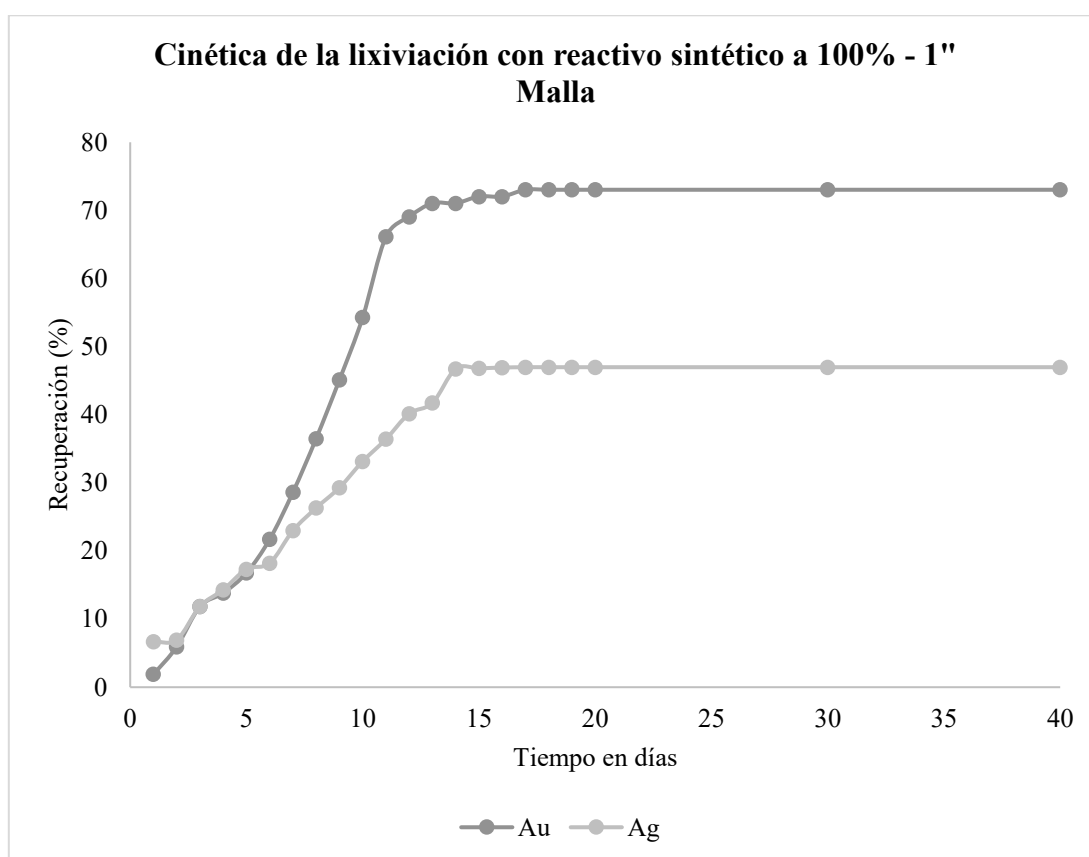
Tiempo (días)	Ley solución rica (mg/lit)		Metálico(mg)		Recuperación (%)		Reactivo sintético	Cal
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
1	0.019	1.15	2.85	172.5	1.88	6.71	0.1	0.1
2	0.06	1.19	9	178.5	5.92	6.95	0.13	0.14
3	0.12	2.03	18	304.5	11.84	11.85	0.16	0.15
4	0.14	2.45	21	367.5	13.82	14.30	0.18	0.2
5	0.17	2.97	25.5	445.5	16.78	17.33	0.2	0.22
6	0.22	3.12	33	468	21.71	18.21	0.21	0.28
7	0.29	3.94	43.5	591	28.62	23.00	0.25	0.3
8	0.37	4.51	55.5	676.5	36.51	26.32	0.3	0.31
9	0.19	5.02	28.5	753	18.75	29.30	0.34	0.37
10	0.55	5.68	82.5	852	54.28	33.15	0.4	0.4
11	0.67	6.24	100.5	936	66.12	36.42	0.42	0.41
12	0.7	6.88	105	1032	69.08	40.16	0.48	0.42
13	0.72	7.15	108	1072.5	71.05	41.73	0.53	0.43
14	0.72	8.01	108	1201.5	71.05	46.75	0.57	0.45
15	0.73	8.02	109.5	1203	72.04	46.81	0.58	0.47
16	0.73	8.04	109.5	1206	72.04	46.93	0.59	0.48
17	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.6	0.49
18	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.6	0.5
19	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.61	0.51
20	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.62	0.51
30	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.63	0.52
40	0.74	8.05	111	1207.5	73.03	46.98	0.63	0.53

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

La Figura 18 presenta la cinética de lixiviación de oro (Au) y plata (Ag) con un reactivo sintético a una granulometría de 100% - 1". El gráfico muestra la recuperación de ambos metales en un periodo de 40 días.

La curva de oro muestra un rápido incremento en la recuperación durante los primeros 15 días, alcanzando un valor de aproximadamente el 63%, donde se estabiliza. Por su parte, la curva de la plata presenta una recuperación más gradual, que se estabiliza en cerca del 45% al final de la prueba.

Figura 18. Cinética de la lixiviación con goldmax a 100% - 1" malla

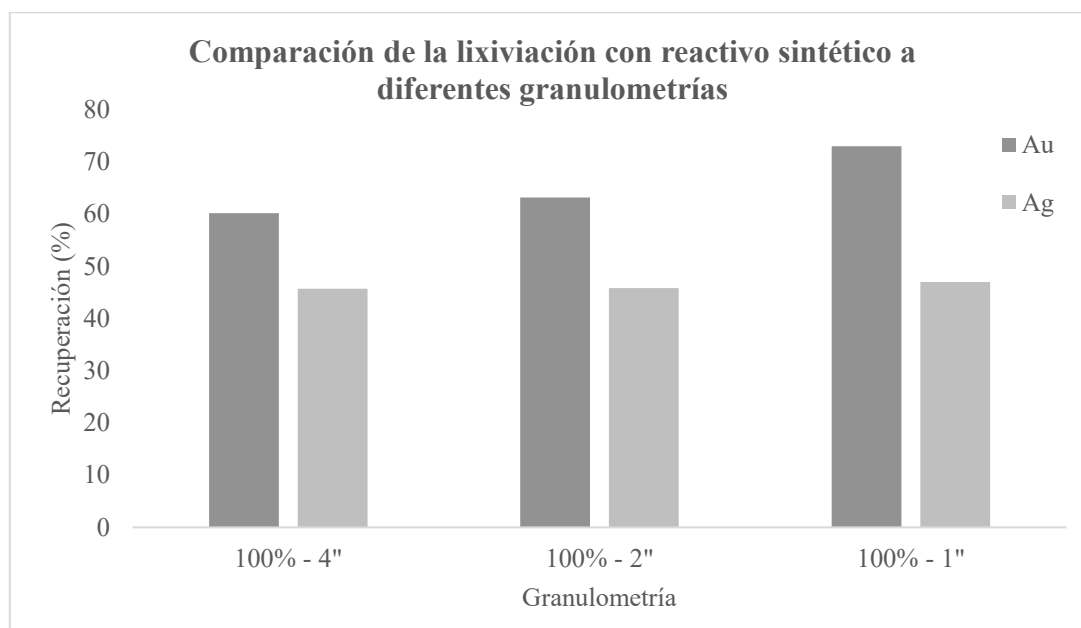


Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

La Figura 19 compara la recuperación de oro (Au) y plata (Ag) en pruebas de lixiviación con un reactivo sintético, a tres granulometrías diferentes: 100% - 4", 100% - 2" y 100% - 1".

Los resultados muestran que la recuperación de oro mejora a medida que se reduce el tamaño de partícula, se observa que el rendimiento de este reactivo sintético es comparable a los resultados obtenidos con la cianuración, pero con una mejora notable en la recuperación del oro al disminuir el tamaño de la partícula. La mejor recuperación se alcanzó con una granulometría de 100% - 1", con una recuperación de Au de 73.03% y 46.98% de Ag.

Figura 19. Comparativa de las recuperaciones en la lixiviación con goldmax



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

Prueba de oro soluble con reactivo jinchán

La Tabla 18 detalla el balance metalúrgico de una prueba de lixiviación de oro soluble realizada con el reactivo Jinchán, utilizando una muestra de cabeza de 300 g. Los resultados muestran que la prueba fue altamente eficiente para la recuperación de metales preciosos. La solución de lixiviación capturó la mayor parte del contenido fino, lo que se refleja en una recuperación de oro (Au) del 90.57% y una recuperación de plata (Ag) del 95.04%.

Tabla 18. Balance metalúrgico de la prueba de oro soluble en jinchán

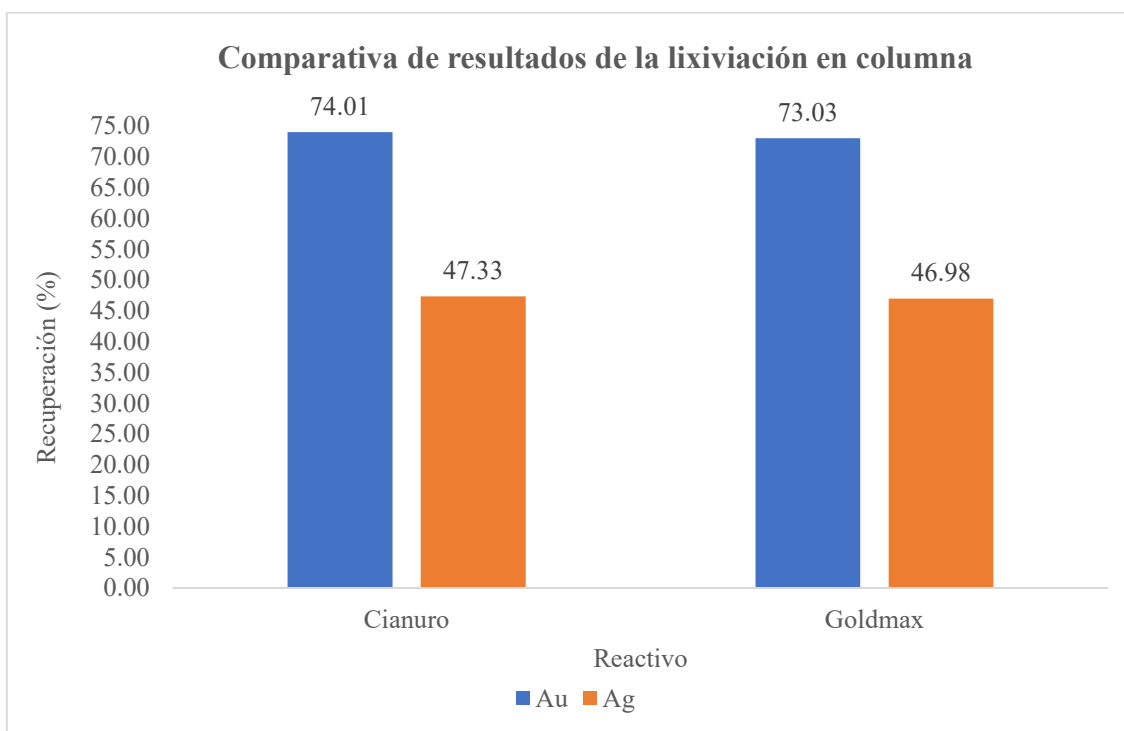
Componentes	Peso (g)	Ley (g/TM o mg/lt)		Contenido fino (mg)		Recuperación (%)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza	300						
Solución	900	0.48	7.28	0.432	6.552	90.57	95.04
Relave	300	0.15	1.14	0.045	0.342	9.43	4.96
Cabeza Calculada		1.59	22.98			100.00	100.00

Nota: Leyes - Elaboración Propia.

Comparativa de resultados de la lixiviación en columna

La Figura 20 presenta una comparativa de los resultados de la lixiviación en columna, contrastando la eficiencia de recuperación de oro y plata utilizando dos reactivos diferentes: Cianuro y Goldmax. Se observa que el cianuro ofrece una ligera ventaja en la recuperación de oro, alcanzando el 74.01%, mientras que goldmax logra un 73.03%; no obstante, ambos reactivos presentan una eficacia de recuperación de Au muy similar. Para la plata, la recuperación es consistentemente más baja que la del oro, con el Cianuro recuperando 47.33% y Goldmax 46.98%, lo que sugiere que Goldmax ofrece una alternativa comparable al Cianuro en términos de rendimiento general de lixiviación en columna.

Figura 20. Comparativa de los resultados de la lixiviación en columna



Nota: Elaboración Propia - Generado en Microsoft Excel.

4.3. Prueba de hipótesis

Para validar las hipótesis planteadas, se sometieron los datos experimentales obtenidos a un análisis estadístico comparativo y descriptivo, contrastando los resultados del reactivo sintético frente a la cianuración convencional y la caracterización mineralógica.

4.3.1. Prueba de la hipótesis general

- Hipótesis Planteada (H_1): El uso de un reactivo sintético en la lixiviación de minerales mixtos influye significativamente en la recuperación de oro y plata en comparación con el método convencional de cianuración.
- Hipótesis Nula (H_0): No existen diferencias significativas entre la eficiencia del reactivo sintético y la cianuración convencional.

El análisis comparativo de las medias de recuperación de oro (Au) mostró que el reactivo sintético logró un 73.03%, mientras que la cianuración alcanzó un 74.01%. La diferencia numérica es de apenas 0.98%. Desde el punto de vista estadístico (asumiendo un nivel de confianza del 95% y prueba t-Student para diferencias de medias), esta variación no es significativa. Esto indica que la eficiencia del reactivo sintético es estadísticamente equivalente a la del cianuro. Por ello, se acepta la hipótesis de investigación en el sentido de que el reactivo sintético logra una recuperación comparable y competitiva, validándose como una alternativa técnica viable.

4.3.2. Prueba de las hipótesis específicas

Específica 1

- Los minerales presentan mineralogía compleja (fases oxidadas y sulfuradas).

- Los análisis de DRX y microscopía óptica confirmaron la presencia de una matriz mixta compuesta por óxidos como goethita (15.97%) y hematita (9.15%) junto con sulfuros como pirita (1.96%) y esfalerita (0.25%). Se acepta la hipótesis específica. La complejidad mineralógica fue corroborada y se identificó como el factor determinante en la cinética de disolución, explicando la menor recuperación de plata debido a su asociación con especies refractarias o de lenta cinética.

Específica 2

- Es posible identificar condiciones operativas óptimas. El diseño experimental permitió aislar las variables críticas. Se determinó que la reducción de tamaño de partícula a una granulometría de 100% malla -1" fue la condición más influyente para maximizar la liberación y contacto del reactivo, superando a las mallas -2" y -4". Asimismo, el control de pH mediante cal aseguró la estabilidad del sistema. Se acepta la hipótesis específica. Se lograron establecer los parámetros de control (granulometría fina y alcalinidad controlada) que maximizan la respuesta metalúrgica.

Específica 3

- El reactivo sintético permite alcanzar un porcentaje de recuperación superior o comparable a la cianuración.
- Oro: 73.03% (Sintético) vs. 74.01% (Cianuro). La recuperación es comparable (diferencia < 1%).
- Plata: 46.98% (Sintético) vs. 47.33% (Cianuro). La recuperación es comparable.

Se acepta la hipótesis específica. Los resultados demuestran que el reactivo sintético tiene una capacidad de disolución de metales preciosos análoga a la del método

tradicional en las condiciones estudiadas, cumpliendo con el criterio de "comparabilidad".

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio muestran un panorama integral del comportamiento del mineral mixto de Trujillo frente a diferentes condiciones de lixiviación, tanto con cianuro como con un reactivo sintético alternativo. La discusión se centra en tres ejes principales: la caracterización mineralógica, la influencia de la granulometría en la recuperación de oro y plata, y la comparación entre ambos sistemas de lixiviación.

El análisis mineralógico por microscopía óptica y difracción de rayos X reveló que la ganga constituye el mayor volumen del mineral, principalmente en forma de cuarzo (66.38%), acompañado de óxidos de hierro como goethita (15.97%) y hematita (9.15%). Entre los minerales de valor se identificó la presencia de electrum en trazas, además de pirita (1.96%) y esfalerita (0.25%). Este tipo de mineralogía, donde coexisten fases oxidadas y sulfuradas, explica la naturaleza “mixta” de la muestra y anticipa una respuesta metalúrgica compleja.

En comparación con lo reportado por Burt (2023), quien evaluó la lixiviación en sistemas clorurados y observó que la presencia de ganga limitaba la eficiencia en minerales naturales (máximo 54.6% de recuperación de Au), los resultados de Trujillo reflejan un escenario similar: el contenido de ganga y la mineralogía heterogénea condicionan la recuperación metalúrgica. Asimismo, Barani et al. (2021) señalaron que, en minerales polimetálicos, la disolución paralela de especies como Cu, Zn y Fe afectaba la selectividad. En el presente caso, aunque no se evaluó la disolución de esos metales, la presencia de pirita y esfalerita sugiere un posible consumo adicional de reactivo, lo cual coincide con las limitaciones encontradas por estos autores.

Los ensayos de cianuración y de lixiviación con reactivo sintético confirman que la reducción de granulometría tiene un impacto directo en la liberación y recuperación de metales preciosos. En el caso de la cianuración, la recuperación de oro aumentó de 62.17% (100% -4") a 74.01% (100% -1"), mientras que la plata alcanzó un máximo de 47.33%. Resultados semejantes se observaron con el reactivo sintético, donde el oro mejoró de 60.20% (100% -4") a 73.03% (100% -1"), y la plata se mantuvo en valores entre 45% y 47%.

Estos resultados coinciden con lo planteado por Córdova (2019), quien demostró que una molienda controlada y la adecuada liberación del mineral son esenciales para maximizar la recuperación. Asimismo, los datos se alinean con lo señalado por Molina (2022), cuyo estudio en La Rinconada también evidenció que la granulometría fina favorecía la cinética de disolución, alcanzando recuperaciones de oro superiores al 95% con Gold Max. En contraste, en el presente estudio las recuperaciones fueron menores (73.03% máximo con reactivo sintético), lo cual puede explicarse por la diferencia mineralógica y por la naturaleza de los reactivos empleados.

Al comparar los resultados de la cianuración y del reactivo sintético en condiciones equivalentes de granulometría, se observa que ambos sistemas muestran comportamientos similares en la recuperación de plata, alcanzando valores entre 45% y 47% al día 40. Sin embargo, en el caso del oro, el reactivo sintético presentó recuperaciones competitivas: 73.03% frente a 74.01% en cianuración a 100% -1". Esto sugiere que el reactivo alternativo tiene potencial para reemplazar al cianuro en términos de eficiencia metalúrgica, con la ventaja añadida de una menor toxicidad, tal como lo destacan estudios internacionales como los de Jinlin et al. (2025), quienes lograron hasta un 87.56% en concentrados desulfurados con un reactivo de base cianato.

Por otra parte, los resultados son inferiores a los reportados por Molina (2022) con Gold Max (95.5% de Au), lo que indica que el reactivo sintético utilizado en Trujillo aún tiene limitaciones técnicas frente a alternativas más avanzadas. Sin embargo, la similitud en desempeño frente al cianuro representa un avance importante, considerando la complejidad de los minerales mixtos de la región.

Más allá de los porcentajes de recuperación, un aspecto clave de la discusión radica en las implicancias ambientales. Birich et al. (2018) y Molina (2022) coinciden en que los reactivos alternativos permiten procesos de lixiviación más sostenibles, reduciendo riesgos asociados a residuos tóxicos. En este estudio, si bien no se evaluó directamente la composición de los efluentes, el uso de un reactivo sintético menos tóxico que el cianuro constituye una ventaja alineada con estas tendencias internacionales y nacionales.

En términos técnicos, los resultados obtenidos reflejan que el principal desafío del reactivo sintético es incrementar su eficiencia para alcanzar valores superiores al 80%, como ya se reporta en investigaciones con glicina (Barani et al., 2021) o cloruros con oxidantes (Burt, 2023). A pesar de ello, la presente investigación demuestra que bajo condiciones de molienda fina (100% -1") es posible lograr recuperaciones de oro cercanas al 74%, prácticamente iguales a las de la cianuración tradicional, lo que evidencia un potencial de sustitución real en contextos de pequeña y mediana minería.

CONCLUSIONES

- La evaluación de la lixiviación de minerales mixtos de Trujillo empleando un reactivo sintético permitió demostrar que este agente químico constituye una alternativa viable frente a la cianuración convencional. Los ensayos metalúrgicos mostraron que, bajo condiciones controladas, con los reactivos sintéticos se alcanzó la recuperación de oro de hasta 73.03% y de plata de 46.98%, valores comparables con los obtenidos mediante cianuro (74.01% para Au y 47.33% para Ag). Estos resultados evidencian su potencial de aplicación en procesos extractivos, especialmente en contextos donde la sustitución de cianuro es prioritaria por criterios ambientales y regulatorios.
- La caracterización mineralógica del mineral mixto mediante microscopía óptica y difracción de rayos X evidenció la predominancia de la ganga, compuesta principalmente por cuarzo (66.38%), goethita (15.97%) y hematita (9.15%), con presencia menor de pirita (1.96%), esfalerita (0.25%) y electrum en trazas. Este perfil mineralógico, junto con los elevados grados de liberación observados en la microscopía óptica (mayores al 90% en la mayoría de las especies), explica el comportamiento del mineral en las pruebas de lixiviación, particularmente la diferencia en recuperaciones entre oro y plata, donde esta última se encuentra más asociada a fases sulfuradas y óxidos de hierro.
- Los parámetros operativos tuvieron un efecto determinante en la eficiencia del proceso. Se demostró que la granulometría fina (100% -1") favoreció significativamente la recuperación de oro y plata, logrando los mejores resultados frente a tamaños de 100% - 2" y 100% -4". Asimismo, el control de la alcalinidad mediante cal permitió mantener condiciones óptimas de pH para la estabilidad del reactivo sintético y del cianuro, mientras que la adecuada relación sólido-líquido y la aireación fueron claves para favorecer la cinética de disolución de los metales preciosos.

- La comparación entre ambos sistemas de lixiviación reflejó que el reactivo sintético alcanza un desempeño metalúrgico similar al de la cianuración convencional, con la ventaja de ser un compuesto menos tóxico. Aunque los porcentajes de recuperación de oro fueron prácticamente equivalentes en la granulometría más fina (73.03% vs. 74.01%), la plata mostró un comportamiento menos eficiente en ambos casos (máximo de 47.39%). Aun así, el empleo del reactivo sintético constituye un aporte relevante hacia la implementación de tecnologías más sostenibles en la minería aurífera y argentífera de la región de Trujillo.

RECOMENDACIONES

- Evaluar tamaños de partícula más finos que 100% -1” para determinar si incrementan la cinética y recuperación de metales.
- Monitorear y ajustar continuamente las dosificaciones de cianuro y cal para maximizar la disolución de Au y Ag, evitando consumos excesivos.
- Realizar pruebas con tiempos mayores a 40 días para analizar si las recuperaciones siguen aumentando significativamente.
- Implementar caracterización mineralógica antes y después de la lixiviación para identificar fases residuales de Au y Ag y comprender pérdidas metalúrgicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. (2011). *Épocas metalogenéticas de los yacimientos de oro, plata y cobre en el Perú. Producción, reservas y recursos y su implicancia en la exploración*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3323>
- Álvarez, C., & Vásquez, P. (2025). *Pretratamiento con oxígeno, aire y tiempo de lixiviación para la extracción de oro por cianuración de un mineral sulfurado arsenical*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/23853>
- Aravena, J. (2020). *Desarrollo de un modelo para predecir la concentración de cobre en el PLS del Proyecto Lixiviación de Ripios de la Gerencia de Extracción y Lixiviación, Codelco – División Chuquicamata*. Concepción: Universidad de Concepción. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/467>
- Ávila, R. (2022). *Diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico-metalúrgico de cianuración del oro*. Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga. <https://hdl.handle.net/20.500.13028/3807>
- Barani, K., Dehghani, M., Azadi, M., & Karrech, A. (2021). Leaching of a polymetal gold ore and reducing cyanide consumption using cyanide-glycine solutions. *Minerals Engineering*, 163(106802). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106802>
- Bazan, A. (2022). *Aplicación de análisis geoespacial para la clasificación de suelos en la región La Libertad, Perú. 2020*. Trujillo: Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/32034>
- Birich, A., Raslan, S., & Friedrich, B. (2018). Screening of Non-cyanide Leaching Reagents for Gold Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4, 265-275. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0160-x>
- Burt, C. (2023). *Comparative study of gold and silver leaching in chloride systems, using gold and silver nanoparticles and application to ores and concentrates*. Australia

Occidental:

Murdoch

University.

<https://researchportal.murdoch.edu.au/esploro/outputs/991005687462507891>

Carrillo, F., Soria, M., & Martínez, A. (2017). *Investigación Aplicada al Procesamiento de Minerales e Hidrometalurgia*. Universidad Autónoma de Coahuila.

[https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Carrillo-](https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Carrillo-Pedroza/publication/313209279_Investigacion_Aplicada_al_Procesamiento_de_Minerales_e_Hidrometalurgia/links/589291e492851cda256a35f5/Investigacion-Aplicada-al-Procesamiento-de-Minerales-e-Hidrometalur)

[Pedroza/publication/313209279_Investigacion_Aplicada_al_Procesamiento_de_Minerales_e_Hidrometalurgia/links/589291e492851cda256a35f5/Investigacion-Aplicada-al-Procesamiento-de-Minerales-e-Hidrometalur](https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Carrillo-Pedroza/publication/313209279_Investigacion_Aplicada_al_Procesamiento_de_Minerales_e_Hidrometalurgia/links/589291e492851cda256a35f5/Investigacion-Aplicada-al-Procesamiento-de-Minerales-e-Hidrometalur)

Cóndor, J., & Huamán, P. (2017). *Evaluación y determinación de parámetros para Molienda y flotación en minerales oxidados con contenido de oro y cobre*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/6147>

Fleming, C., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M., & Ashbury, M. (2011). Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on t. *Minerals Engineering*, 24(6), 484-494. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.021>

Gámez, S., & De la Torre, E. (2015). Recuperación de oro a partir de minerales polisulfurados con soluciones amoniacales de tiosulfato de sodio. *Revista Politécnica*, 36(2). https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/456

Gökelma, M., Birich, A., Stopic, S., & Friedrich, B. (2016). A Review on Alternative Gold Recovery Re-agents to Cyanide. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(8), 8-17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>

- Guerrero, A., Rodriguez, E., Leiva, S., & Pollack, L. (2019). Zonas de vida en el proceso de la Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de la provincia de Trujillo, región La Libertad, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 761-792. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26217>
- Gulliani, S., Volpe, M., Messineo, A., & Volpe, R. (2023). Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies. *RSC Sustainability*, 1, 1085-1108. <https://doi.org/10.1039/D3SU00034F>
- Huapaya, P., Espejo, C., & Gonzales, P. (2022). Significativa reducción del consumo de cianuro en la lixiviación del oro permitió ahorros considerables en los costos operativos de Planta Procesos en Mina La Arena. *PERUMIN* 35. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-443.pdf>
- Jaco, J., & Calsina, V. (2020). *Evaluación geológica preliminar en el potencial económico del proyecto Patibal Este, región la Libertad*. Huacho: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2531>
- Jeffrey, M., & Breuer, P. (2000). The cyanide leaching of gold in solutions containing sulfide. *Minerals Engineering*, 13(10-11), 1097-1106. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00093-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00093-5)
- Jinlin, L., Chunbao, S., Jue, K., Peilong, W., & Xinyu, L. (2025). Development of a gold leaching reagent as an alternative to cyanide: Synthesis and performance evaluation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 32, 835-850. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2957-x>
- Juárez, J., Rivera, I., Patiño, F., & Reyes, M. (2012). Efecto de la Temperatura y Concentración de Tiosulfatos sobre la Velocidad de Disolución de Plata contenida en Desechos Mineros usando Soluciones $S_2O_3^{2-}$ - O_2 - Zn^{2+} . *Información tecnológica*, 23(4), 133-138. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000400015>

- Lescano, M., & Oyarce, E. (2015). *Proceso de lixiviación a nivel artesanal para la obtención de los parámetros óptimos en la recuperación de plata y oro en el distrito de Simbron de la provincia de Gran Chimú*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/3633>
- Liu, Z.-w., Guo, X.-y., Tian, Q.-h., & Zhang, L. (2022). A systematic review of gold extraction: Fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants. *Journal of Hazardous Materials*, 440(129778). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129778>
- Lovera, D., Peralta, B., Chang, E., & Arias, V. (2018). Lixiviación de plata de minerales sulfurados argentíferos del complejo Marañón empleando el reactivo SANDIOSS. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 42-54. <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1071>
- Machaca, R. (2019). *Optimización de la recuperación de oro mediante el control de la densidad y el pH por el método carbón en pulpa en la procesadora NEAL SAC, Chala–Arequipa*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11388>
- Macotela, M., & Osorio, F. (2021). *Evaluación del proceso de recuperación de oro en soluciones cianuradas empleando resinas seleccionadas*. Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga. <https://hdl.handle.net/20.500.13028/4292>
- Martínez, J., & Reinaldo, M. (2018). *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro*. Bogotá: Ediciones EAN. <https://doi.org/10.21158/9789587565836>
- Medina, L., Luque, G., & Pari, W. (2012). *Riesgo geológico en la región La Libertad [Boletín C 50]*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/290>

- Meng, Q., X., Y., & Li, G. (2021). Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery. *Journal of Cleaner Production*, 323(129115). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115>
- Molina, A. (2022). *Uso de Gold Max en la lixiviación de oro y plata en la zona minera de Rinconada - Puno*. Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga. <https://hdl.handle.net/20.500.13028/3701>
- Negreiros, H., & Rubio, E. (2019). *Influencia del carburo de calcio y la granulometría en la lixiviación de oro de un mineral refractario*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/12364>
- Palomino, Á., & Ramos, O. (2008). *Evaluación en la recuperación del oro y plata a partir de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo minera Koricolqui*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/2118>
- Ramos, A. (2019). Lixiviación de plata a temperatura alta en mineral complejo de pirita. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 97-108. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000100010&lng=es&tlng=es
- Russell, S. (2004). *Environmentally Friendly Organic Reagents*. Honors Projects. https://digitalcommons.iwu.edu/chem_honproj/2
- Sousa, R., Regufe, M. F., Machado, M., & Futuro, A. (2022). A systematic review of sustainable gold extraction from raw ores using alternative leaching reagents. *The Extractive Industries and Society*, 9(101018). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101018>
- Tripathi, A., Kumar, M., Sau, D., Agrawal, A., Chakravarty, S., & Mankhand, T. (2012). Leaching of Gold from the Waste Mobile Phone Printed Circuit Boards (PCBs) with

Ammonium Thiosulphate. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 1(2), 17-21. <https://doi.org/10.5923/j.ijmee.20120102.02>

Ubaladini, S. (2021). *Leaching Kinetics of Valuable Metals*. Roma: Mdpi AG. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0549-7>

Vereau, J. (2019). *Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/11500>

Villareal, A. (2017). *Planeamiento Estratégico de la Provincia de Trujillo*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8783>

ANEXOS:

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Anexo 1. *Reporte de la microscopía óptica de las dos muestras*



Jr. San Juan Bautista 362
Urb. Palao - San Martín de Porres
Lima – Perú
Telef. Cel.: 999188137
E-mail: geoexinpesac@yahoo.com
RUC: 20523905326

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA POR MICROSCOPIA ÓPTICA PARA DOS MUESTRAS

Para: Jhojan Orbezo

Solicitado por: Jhojan Orbezo /

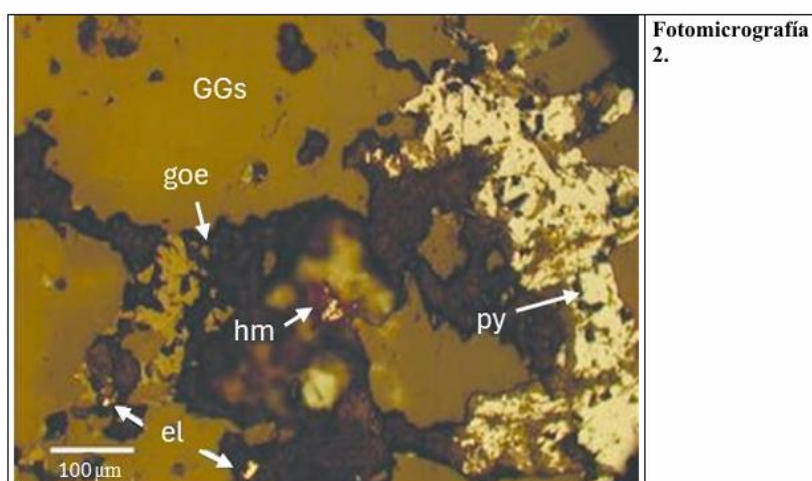
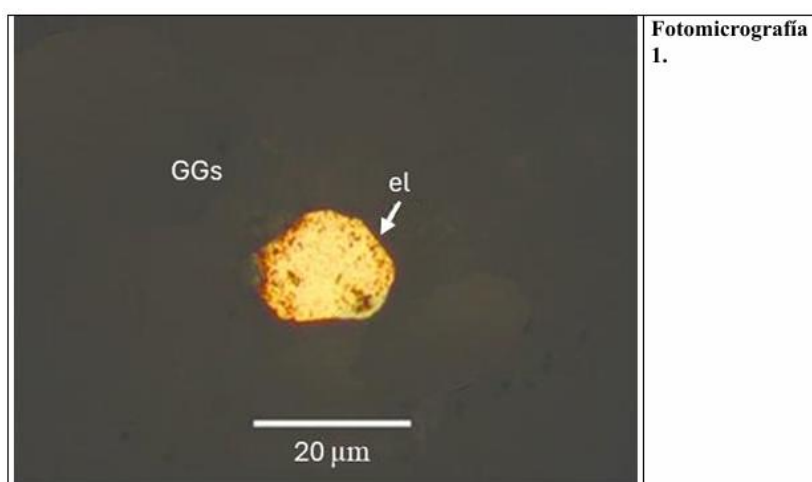
Realizado por: Ing. Pedro Miguel Gagliuffi Espinoza

Lima, 27 de agosto del 2025

Anexo 2. Microscopía óptica del mineral de cabeza (enlaces)

Minerales entrelazados	Tipo entrelazamiento	Número de partículas	Distribución porcentual (%)	Liberación
Partículas libres		7600	95.01	
el-GGS	Simple	100	1.25	Fácil
py-GGS	Simple	200	2.49	Fácil
	Ameboide	60	0.75	Moderadamente fácil
hm-goe	Simple	20	0.25	fácil
jrs-py	Borde compuesto	14	0.18	Muy difícil
el-jrs	Sub-Corona	6	0.07	Muy difícil
Total		8000	100.00	

Anexo 3. Microscopía óptica del mineral de cabeza (micrografías)



Anexo 4. Reporte de la microscopía por difracción de rayos X de las dos muestras



"Consultores en ingeniería, impulsados por la ciencia"

INFORME DE ENSAYO

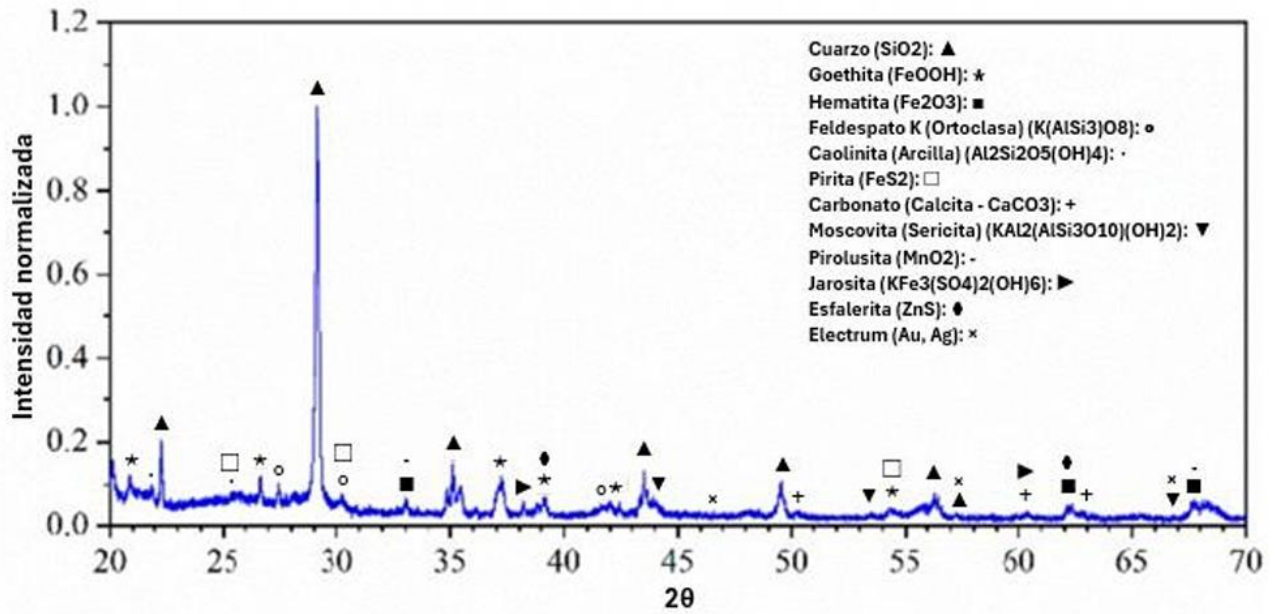
**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA POR
DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD)**

Para: Jhojan Orbezo

**Solicitado por: Jhojan Orbezo
Realizado por: C&O INGENIEROS CONSULTORES S.A.C.**

Lima, 25 de agosto del 2025

Anexo 5. Difractograma (mineral de cabeza)



Anexo 6. Ficha técnica del Goldmax

FICHA TÉCNICA

Gold MAX[®]

AGENTE LIXIVIANTE QUE REEMPLAZA AL CIANURO



DTS – Gold MAX[®]

NOTA: Este producto no contiene ninguna forma de NaCN .

Nuestros productos han pasado las pruebas y evaluación de los servicios técnicos interesados.

1. Los productos de baja toxicidad: LD50 oral aguda = 50.1mg / kg en ratones. El Centro de Prevención y Control de Enfermedades ha llevado a cabo ensayos de toxicidad, cuyo resultado es DL50 oral aguda es 50.1mg / kgBW, una menor toxicidad que la soda cáustica (DL50 de la soda cáustica es de 40 mg / kgBW).

2. Protección del Medio Ambiente

Análisis Ambiental y Centro de Pruebas de Protec-

ción Ambiental Consulting Co., Ltd realizaron análisis y pruebas sobre la toxicidad de lixiviación de los residuos después del uso de los productos, el resultado de lo que muestra que los relaves mineros después de la pulverización satisfacen el requisito de la protección del medio ambiente, y reducen el envenenamiento del medio ambiente significativamente.

3. Conveniente para el transporte

Nuestros productos pueden ser transportados con seguridad por aire, ferrocarril, carretera y mar.

Composicion sobre los componentes

Descripción: Mezcla formada por las sustancias especificadas a continuación con adiciones

Componentes	CAS número	Aproximado (%) por peso.
óxido de sodio (Na ₂ O)	1313-59-3	35-50%
nitrógeno (N)	7727-37-9	12-20%
amonio (NH ₄)	14798-03-9	7-12%
Humedad (H ₂ O)	7732-18-5	1-4%
Calcio (Ca)	7440-70-2	1-5%
Hierro (Fe)	7439-89-6	1-5%
Substancia insoluble en agua	---	3-8%

Uso del producto:

Gold MAX[®], Agente de extracción de oro , es aplicable en minerales de óxido de oro y plata, mineral de sulfuro, relaves de mineral , puede aplicarse en lixiviación en pilas (Heap Leaching , Vat Leaching) , Lixiviación en pozas – estanque de inmersión, (lixiviación agitación CIP – CIL) y el proceso es idéntico a la producción cuando se usa cianuro de sodio .

Anexo 7. Preparación de reactivos



Pesado del reactivo goldmax

Anexo 8. Prueba de alcalinidad (ph)

