UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

T E S I S

Evaluación de las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. Pasco – 2023

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor:

Bach. Milca Denis SALAS ESPINOZA

Asesor:

Dr. Jonas Ananias RAMOS MARTINEZ

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

T E S I S

Evaluación de las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. Pasco – 2023

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO	**Mg. Uldarico USURIAGA LOPEZ**
PRESIDENTE	**MIEMBRO**

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 281-2025-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 las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. Pasco – 2023"

Apellidos y nombres del tesista

Bach. Milca Denis SALAS ESPINOZA

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Jonás Ananías RAMOS MARTÍNEZ

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

18 %

APROBADO

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

Cerro de Pasco, 17 de junio del 2025

Firmado digitalmente por PALOMINO ISIDRO Ruben Edgar FAU 20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.06.2025 20:03:47 -05:00

DEDICATORIA

La presente Tesis está dedicada a mis familiares, en especial a mis padres que con sus consejos y apoyo incondicional me mostraron el camino para ser una profesional de bien, a mis hermanos que siempre estuvieron guiándome con paciencia y amor.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, quienes me brindaron la oportunidad de desarrollarme tanto académica como profesionalmente. Sus enseñanzas y experiencias han sido fundamentales para cimentar las bases que me permiten desempeñarme como un profesional competitivo.

Un reconocimiento especial al **Dr. Jonás Ananías Ramos Martínez,** asesor de esta tesis, cuyo apoyo y guía fueron esenciales para la elaboración y finalización de este trabajo de investigación. La confianza que depositó en mí fue clave para afrontar y superar los retos planteados durante el proceso.

También agradezco a mis colegas y al personal de la empresa minera por compartir sus conocimientos y experiencias, las cuales enriquecieron el desarrollo de esta tesis. Su empatía y compañía fueron un soporte invaluable en los momentos más difíciles. Además, su colaboración en la recopilación de datos y revisión del trabajo fue decisiva para la culminación exitosa de esta investigación.

A todos ustedes, les extiendo mi gratitud por acompañarme en este proyecto; siempre estaré profundamente agradecido por su apoyo.

RESUMEN

Debido a la creciente demanda de producción de metales precios a nivel mundial, la principal necesidad que se presenta, es la recuperación eficiente de estos a partir del mineral extraído de minas por medio de un método eficiente, viable y que no produzca desechos contaminantes de costoso tratamiento.

La lixiviación para la recuperación de oro se realizó empleando mineral aurífero proveniente de los relaves coloniales aprovechados por la Compañía Minera Aurex. Este mineral fue previamente caracterizado a fin de obtener información relevante en cuanto a su composición mineralógica, geoquímica y fisicoquímica, aspectos esenciales para el adecuado desarrollo del proceso. El sistema lixiviante utilizado se generó en la pulpa mediante la incorporación de ácido sulfúrico concentrado y sales oxidantes, tales como cloruro de sodio y nitrato de sodio. La función de estas sales en el medio ácido es promover la formación de cloro y agua regia de manera in situ, creando así un agente lixiviante altamente reactivo para la recuperación de metales nobles presentes en concentrados o minerales auríferos. Los resultados experimentales obtenidos indican la viabilidad del proceso de lixiviación de oro bajo estas condiciones; no obstante, los porcentajes de disolución no superaron el 20 %, debido principalmente a la formación de jarosita, una fase mineralógica que interfiere negativamente en la eficiencia del proceso de lixiviación.

Palabra clave: lixiviación, aurífero, cloruro de sodio, nitrato de sodio

ABSTRACT

Due to the growing demand for the production of precious metals worldwide, the main need that arises is the efficient recovery of these metals from the ore extracted from mines by means of an efficient and viable method that does not produce polluting waste that is costly to treat.

Leaching for gold recovery was carried out using gold ore from colonial tailings exploited by Compañía Minera Aurex. This ore was previously characterized in order to obtain relevant information regarding its mineralogical, geochemical, and physicochemical composition, which are essential aspects for the proper development of the process. The leaching system used was generated in the pulp by adding concentrated sulfuric acid and oxidizing salts, such as sodium chloride and sodium nitrate. The function of these salts in the acidic medium is to promote the formation of chlorine and aqua regia in situ, thus creating a highly reactive leaching agent for the recovery of noble metals present in concentrates or gold-bearing minerals. The experimental results obtained indicate the viability of the gold leaching process under these conditions; however, the dissolution percentages did not exceed 20%, mainly due to the formation of jarosite, a mineralogical phase that negatively interferes with the efficiency of the leaching process.

Keyword: leaching, auriferous, sodium chloride, sodium nitrate

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de yacimientos mineros de metales preciosos en el país, incluida la Compañía Minera Aurex, el uso de cianuro como agente lixiviante es la práctica convencional, dado su elevada eficiencia de extracción, disponibilidad y bajo costo. No obstante, en las últimas décadas se ha intensificado la investigación orientada al desarrollo de alternativas a la cianuración, con el propósito de implementar procesos que empleen reactivos menos nocivos para el medio ambiente y que además sean susceptibles de regeneración.

Uno de los principales desafíos de los procesos hidrometalúrgicos es el cumplimiento de estándares ambientales, considerando que ciertos reactivos empleados presentan baja capacidad de reutilización o reciclaje, lo que genera residuos de manejo complejo. Esta problemática ha impulsado la creación de métodos ecológicos, aunque muchas veces su implementación representa un incremento considerable en los costos operativos.

El aprovechamiento sostenible de metales preciosos exige la mejora continua de los procesos metalúrgicos y el desarrollo de tecnologías eficientes, aspecto que, en el caso de la Compañía Minera Aurex, representa una oportunidad para fortalecer su competitividad económica, industrial y social. En esta línea, la presente investigación propone un método alternativo para la recuperación de oro a partir de minerales auríferos contenidos en relaves coloniales.

El proceso investigado, denominado SEVERO, consiste en la lixiviación de minerales auríferos empleando ácido sulfúrico concentrado como medio principal, complementado con sales oxidantes como cloruro y nitrato de sodio en proporciones definidas. Esta combinación permite la generación de cloro y agua regia de manera in

situ, constituyendo un agente lixiviante altamente efectivo para la disolución y recuperación de metales nobles como el oro.

Para expresar la intención de la investigación manifiesto lo siguiente:

- CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, donde se ha considerado la descripción del problema, formulación del problema general y específicos, el objetivo general, objetivos específicos, justificación y limitaciones.
- CAPÍTUL II: MARCO TEÓRICO, donde se ha considerado los antecedentes de la investigación, marco historio de la hidrometalurgia, seguido del marco teórico del oro, ácido sulfúrico.
- CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN, se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la investigación, con el propósito de demostrar su viabilidad y garantizar la obtención de la información requerida para la ejecución de las pruebas experimentales.
- CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN, en este capítulo se han considerado las evaluaciones hechas de las muestras tomadas en las pruebas experimentales en medio ácido en la lixiviación del oro.
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se han elaborado principalmente las conclusiones derivadas del presente estudio, así como recomendaciones orientadas a la continuidad y profundización de futuras investigaciones.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema 1

1.2. Delimitación de la investigación 2

1.3. Formulación del problema 3

1.3.1. Problema general 3

1.3.2. Problemas específicos 3

1.4. Formulación de objetivos 4

1.4.1. Objetivo General 4

1.4.2. Objetivos específicos 4

1.5. Justificación de la investigación 4

1.5.1. Justificación Tecnológica 4

1.5.2. Justificación Ambiental 5

1.5.3. Justificación Económica 5

1.6. Limitaciones de la investigación 5

1.6.1. Limitaciones de Muestras 5

1.6.2. Condiciones Experimentales 5
1.6.3. Factores Técnicos 6
1.6.4. Aspectos Económicos 6
1.6.5. Impactos Ambientales y de Seguridad 6
1.6.6. Datos y Modelos 6
1.6.7. Limitaciones Temporales 7

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio 8
2.1.1. Antecedentes internacionales 8
2.1.2. Antecedentes nacionales 9
2.1.3. Antecedentes locales 10
2.2. Bases teóricas – científicas 11
2.2.1. La hidrometalurgia en la historia 11
2.2.2. Clasificación de las reacciones de lixiviación 13
2.2.3. Reactivos de lixiviación 14
2.2.4. Plata 15
2.2.5. Oro 17
2.2.6. Clasificación de los depósitos de oro 18
2.2.7. Metalurgia del oro 19
2.2.8. Generalidades de los procesos de extracción del oro 20
2.2.9. Lixiviación de menas auríferas en medio ácido 25
2.3. Definición de términos básicos 28
2.4. Formulación de hipótesis 30
2.4.1. Hipótesis general 30

2.4.2. Hipótesis específicas 30
2.5. Identificación de las variables 30
2.5.1. Variable dependiente 30
2.5.2. Variable independiente 30
2.5.3. Variables intervinientes 30
2.6. Definición operacional de variables e indicadores 31

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación 32
3.2. Nivel de investigación 32
3.3. Método de investigación.....33
3.4. Diseño de la investigación.....33
3.5. Población y muestra 33
3.5.1. Población 33
3.5.2. Muestra 34
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 34
3.6.1. Técnicas de recolección de datos 34
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.....35
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....36
3.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 36
3.8.1. Caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica.....36
3.9. Tratamiento estadístico.....39
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica 39

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo 40

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados 40

4.2.1. Caracterización mineralógica 40

4.2.2. Caracterización geoquímica 42

4.2.3. Caracterización fisicoquímica 44

4.2.4. Pruebas de lixiviación 45

4.3. Prueba de Hipótesis 55

4.3.1. Diseño experimental estadístico 55

4.3.2. Resumen del análisis 58

4.3.3. Pruebas experimentales complementarias 63

4.4. Discusión de Resultados 69

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Reactivos lixiviantes más comunes 15

Tabla 2 Propiedades del oro 17

Tabla 3 Operación de las variables 31

Tabla 4 Ley del mineral de cabeza y concentrado 37

Tabla 5 Caracterización mineralógico macroscópica y microscópica del mineral concentrado 41

Tabla 6 Caracterización mineralógica por difracción de Rayos X 42

Tabla 7 Composición química del mineral concentrado 43

Tabla 8 Distribución de oro y plata en fracciones granulométricas 44

Tabla 9 Propiedades fisicoquímicas del mineral concentrado 45

Tabla 10 Efecto del porcentaje de pulpa en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 48

Tabla 11 Efecto de la temperatura en de oro la disolución con sales oxidantes en medio ácido 50

Tabla 12 Efecto del tiempo en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 51

Tabla 13 Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 52

Tabla 14 Efecto de la concentración de cloruro de sodio en la disolución de oro en sales oxidantes en medio ácido 53

Tabla 15 Efecto de la concentración de nitrato de sodio en la disolución de oro en medio ácido con sales oxidantes 55

Tabla 16 Valores de las variables correspondientes a los niveles 57

Tabla 17 Efectos para porcentaje de oro disuelto y su error normal 58

Tabla 18 Análisis de varianza para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.....59

Tabla 19 Coeficiente de regresión para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.....61

Tabla 20 Valores de la respuesta maximizada de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido 62

Tabla 21 Ácido consumido para diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.....64

Tabla 22 Ácido consumido para diferentes concentraciones de cloruro de sodio.....65

Tabla 23 Ácido consumido para diferentes concentraciones de nitrato de sodio.....66

Tabla 24 Análisis de difracción de Rayos X a las colas de lixiviación 68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en la etapa de trabajo experimental 35

Figura 2 Efecto del porcentaje de pulpa en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 49

Figura 3 Efecto de la temperatura en de oro la disolución con sales oxidantes en medio ácido 50

Figura 4 Efecto del tiempo en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 51

Figura 5 Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido 52

Figura 6 Efecto de la concentración de cloruro de sodio en la disolución de oro en sales oxidantes en medio ácido 53

Figura 7 Efecto de la concentración de nitrato de sodio en la disolución de oro en medio ácido con sales oxidantes en medio ácido 55

Figura 8 Pareto estandarizado para % oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.....60

Figura 9 Gráfica para ácido libre a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.....64

Figura 10 Gráfica para ácido consumido a diferentes concentraciones de cloruro de sodio 65

Figura 11 Gráfica para ácido consumido a diferentes concentraciones de nitrato de sodio 66

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La Compañía Minera Aurex S.A.A., ubicada en el distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco, es una empresa que extrae oro y plata de minerales auríferos provenientes de los relaves coloniales de Uchcumachay. Siendo el cianuro el medio lixiviante utilizado por excelencia debido a su alta extracción, fácil obtención y bajo costo.

El aprovechamiento eficiente de los metales preciosos implica la mejora constante de los procesos y el impulso del desarrollo tecnológico, lo que en este caso representa una oportunidad para fortalecer los ámbitos económico, industrial y social. Por tal motivo, la presente investigación plantea un proceso innovador para la extracción del oro y plata. El cianuro de sodio consumido por la minería está siendo observada por los ambientalistas. Es necesario realizar pruebas de lixiviación con métodos alternativos a nivel de laboratorio. Este método que se lixivia en un medio ácido ha sido una propuesta como una alternativa a la

cianuración para el tratamiento de los relaves coloniales para su uso en lugares donde es difícil el uso del cianuro debido a las consideraciones ambientales.

La disolución en medio ácido del oro y la plata contenidos en los relaves coloniales de Uchcumachay que se plantea para la lixiviación no es novedad, pero si la lixiviación que se está proponiendo, en términos generales consiste en el uso de unos reactivos basados en sales que se aprovechan en su totalidad gracias a su acidez en el proceso. De concretarse resultados positivos las empresas mineras podrán utilizar este método alternativo en reemplazo del cianuro, significará una verdadera revolución para la industria minera por ser un método sin la intervención del cianuro para la obtención del oro y la plata.

1.2. Delimitación de la investigación

La presente investigación se llevó a cabo en la Compañía Minera Aurex S.A.A., ubicada en el distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco, teniendo como área de estudio los relaves coloniales de Uchcumachay, provenientes de procesos metalúrgicos antiguos de beneficio de minerales auríferos.

El estudio se desarrolló durante el año 2023, circunscribiéndose a la evaluación de la lixiviación en medio ácido con sales oxidantes (cloruro de sodio y nitrato de sodio en solución de ácido sulfúrico) como método alternativo a la cianuración convencional.

La investigación se delimitó a la fase experimental de laboratorio, empleando una muestra representativa de 50 kilogramos de relaves, de los cuales 10 kilogramos fueron seleccionados para la aplicación de pruebas metalúrgicas. Estas pruebas incluyeron caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica, ensayos de lixiviación, y la evaluación de variables operativas

como concentración de reactivos, tiempo de lixiviación, porcentaje de sólidos y temperatura.

No se consideró en el alcance del presente estudio la evaluación económica a nivel industrial, ni los impactos ambientales a largo plazo, aspectos que se proponen como líneas de investigación futura. Asimismo, el estudio se limitó a analizar la recuperación de oro y plata, sin incluir otros metales presentes en el mineral.

En este marco, la investigación se enmarca espacial, temporal y metodológicamente en la búsqueda de un proceso alternativo a la cianuración, con la finalidad de ofrecer un aporte científico y tecnológico viable para la recuperación de metales preciosos en relaves auríferos de la región.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo aplicar la evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Se podrá aplicar esta disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como medio alternativo a la cianuración?
2. ¿Se podrá realizar la disolución de oro y plata en medio ácido en los relaves coloniales de Uchcumachay para sustituir el cianuro de sodio?
3. ¿Se podrá lixiviar en solución ácida los minerales de oro y plata para reemplazar a los reactivos contaminantes?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo General

Aplicar la evaluación de la disolución en medio ácido a lo relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Aplicar la disolución en medio ácido a los relaves coloniales como método alternativo a la cianuración.
2. Determinar los reactivos necesarios que se aplicarían a los relaves coloniales de Uchcumachay para sustituir al consumo de cianuro de sodio.
3. Lixiviar en solución ácida los minerales de oro y plata para reemplazar a los reactivos contaminantes.

1.5. Justificación de la investigación

Es dar a conocer la importancia de la presente investigación. El presente estudio de investigación nos permitirá conocer la lixiviación de oro y plata en una disolución ácida como método alternativo a la cianuración en una disolución ácida.

1.5.1. Justificación Tecnológica

El presente estudio permitirá analizar la lixiviación de oro y plata en un medio ácido como una alternativa a la cianuración tradicional con cianuro de sodio, con el objetivo de cumplir con las normativas ambientales vigentes y generar beneficios económicos para las empresas mineras, repercutiendo positivamente en sus trabajadores.

1.5.2. Justificación Ambiental

Los relaves coloniales depositados como desmonte durante la extracción de las canchas por tener leyes bajas de oro, podrían ser inmediatamente o en todo caso su almacenamiento debe cumplir con los parámetros de control ambiental para no crear impactos adversos.

1.5.3. Justificación Económica

El procesamiento de los relaves coloniales con contenido de oro y plata por tener una mineralización compleja debe tratarte con la lixiviación, tratando en lo posible obtener las máximas para darle valor comercial a los productos.

1.6. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones específicas de la tesis "Evaluación de las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. Pasco – 2023", son las siguientes:

1.6.1. Limitaciones de Muestras

- La representatividad de las muestras de relaves utilizadas puede ser limitada. Las muestras seleccionadas podrían no reflejar completamente la variabilidad de los relaves de Uchcumachay.
- Cantidad limitada de muestras debido a restricciones logísticas o financieras.

1.6.2. Condiciones Experimentales

- Las condiciones del laboratorio pueden diferir significativamente de las condiciones reales del sitio, lo que podría afectar la aplicabilidad de los resultados.

- Escala de los experimentos limitada a pruebas de laboratorio, lo cual puede no representar con precisión el comportamiento a escala industrial.

1.6.3. Factores Técnicos

- Posibles dificultades en la replicación del método alternativo a escala industrial debido a la complejidad técnica o falta de infraestructura adecuada.
- La tecnología propuesta podría requerir modificaciones o ajustes específicos para funcionar en diferentes condiciones geológicas o mineras.

1.6.4. Aspectos Económicos

- Evaluación económica limitada, que podría no considerar todos los costos asociados con la implementación del método alternativo.
- Posible falta de análisis de viabilidad económica a largo plazo en comparación con la cianuración tradicional.

1.6.5. Impactos Ambientales y de Seguridad

- Evaluaciones ambientales preliminares que podrían no capturar todos los posibles impactos a largo plazo de las disoluciones ácidas.
- Riesgos de seguridad asociados con el manejo de sustancias químicas peligrosas no completamente abordados.

1.6.6. Datos y Modelos

- Dependencia en datos históricos que podrían ser incompletos o no totalmente precisos.
- Modelos teóricos y simulaciones que pueden no representar completamente la complejidad del sistema real.

1.6.7. Limitaciones Temporales

- Restricciones en el tiempo disponible para la investigación, lo que podría haber limitado la profundidad y amplitud de los experimentos y análisis.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

- Santos, Rocío (2020) en su tesis “Evaluación de cuatro métodos para recuperación de oro a partir de un mineral refractario”, para optar el Grado Académico de Magister en Ciencia y Tecnología Ambiental – Centro de Investigación en Materiales Avanzados – México, tiene como objetivo general: Evaluar la eficiencia de cuatro métodos para recuperar oro y plata a partir de un mineral refractario considerando su impacto ambiental, y la factibilidad científica y tecnológica para llevarla a cabo.

  Concluye:

  En cuanto a recuperación de oro se refiere los pretratamientos que resultaron ser más eficaces fueron la biooxidación al 5% y la molienda de alta energía, los dos son procesos alternativos al tradic ya que ninguno emite

contaminación de gases al ambiente, pues la biooxidación mantiene el arsénico en solución y la ultrafina solo reduce su tamaño de partícula, pero no sufre ninguna reacción química durante la molienda. El consumo de cianuro para la molienda ultrafina resulta ser más baja que la de biolixiviación al 5% y relativamente parecida a la tostación. Por lo que se sugiere realizar un análisis más profundo para saber cuál de los dos resulta ser más viable económicamente.

2.1.2. Antecedentes nacionales

- Salazar, Wilbert (2015) en su tesis "Estudio de Investigación Para Lixiviar Relaves de Cobre y Oro", para optar el Título profesional de Ingeniero Metalurgista - Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

  Concluye:

  Partiendo de los resultados de las pruebas experimentales la recuperación de Au y Cu, y el consumo de ambos Lixiviantes están dentro de los rangos que maneja la industria. Pero esta recuperación de Au se puede mejorar si se tiene un pre tratamiento previo a la cianuración para evitar un consumo excesivo de cianuro.

  Se determinó que el consumo máximo de ácido sulfúrico para lixiviar cobre del relave fue de 77 kg ácido/t relave. Se estableció que la velocidad de disolución de cobre máxima es a las 24 h, con un 92% de recuperación y la velocidad de disolución de oro máxima es a las 72 h, con el92% de recuperación. El valor obtenido para el consumo máximo de cianuro con un pretratamiento como es la lixiviación ácida o lixiviación de los ripios fue de 2,51 kg cianuro/t relave.

2.1.3. Antecedentes locales

- Chambi, Elmer (2018) en su tesis “Estudio del Procedimiento de cianuración por Agitación Para la Extracción de Plata en Relaves de Villa de Pasco - Tinyahuarco – 2017”, para optar el Título de Ingeniero de Minas – Universidad Alas Peruanas – Pasco.

  Concluye:

  Durante el desarrollo de la investigación se evidenció una diferencia significativa en las medias de extracción de plata entre el procedimiento 1 y el procedimiento 2. Se determinó que el método más eficiente de cianuración por agitación para lograr una extracción óptima de plata en los relaves coloniales de Villa de Pasco corresponde al procedimiento 2, el cual establece parámetros de 72 horas de lixiviación y cinco minutos de molienda.

  El grado de molienda ideal para maximizar la recuperación de plata en estos relaves es del 82.94 % pasando por malla -200, con un tiempo de molienda de cinco minutos. Asimismo, el tiempo óptimo de cianuración definido en este estudio es de 72 horas, lo que permite una mayor disolución del metal.

  En cuanto a la dosificación de reactivos para el proceso de cianuración por agitación, se fijó un consumo de 3.7 kg/TM de NaCN y 4.78 kg/TM de cal, condiciones que favorecen la recuperación de plata en los relaves coloniales de Villa de Pasco – Tinyahuarco.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. La hidrometalurgia en la historia

A diferencia de la pirometalurgia, cuyo desarrollo se remonta a la Edad de los Metales (entre los años 4000 y 3000 a.C.), la hidrometalurgia fue conocida y documentada mucho tiempo después. Las primeras referencias sobre el uso de la hidrometalurgia provienen de China, específicamente durante la dinastía Han (quinta dinastía, entre los años 117 y 122 a.C.), cuando Liu-An, rey de Huainan, en su obra Huainancius, describió la conversión de hierro en cobre metálico mediante la reacción entre hierro metálico y calcantita:

$$\boldsymbol{Cu^{2+} + Fe^{0} \Leftrightarrow Cu^{0} + Fe^{2+}}$$

No obstante, la cementación como proceso con aplicación industrial comenzó a utilizarse recién entre los siglos VII y VIII d.C., mediante el tratamiento de vertientes de aguas ácidas originadas por la oxidación natural o inducida de minerales sulfurados de cobre. El metal se recuperaba a través de la oxidación in situ de estos minerales, generando soluciones con sulfato de cobre que, al alcanzar su punto de saturación, precipitaban como calcantita. Este método fue conocido como "cobre-hiel" debido al sabor amargo característico del sulfato.

En Occidente, no fue sino hasta el siglo VII cuando los alquimistas mostraron gran interés por la transmutación del hierro en cobre, colocando vitriolo azul (solución de sulfato de cobre) en contacto con fragmentos de hierro. Posteriormente, en el siglo VIII, Jabir Ibn Hayyan (720–813) descubrió el agua regia, único disolvente capaz de disolver el oro, hecho que marcó el inicio de la hidrometalurgia moderna.

El año 1887 es considerado el punto de partida de la hidrometalurgia industrial contemporánea, gracias a la invención simultánea de dos procesos de gran importancia, que se detallan a continuación:

1. El proceso de cianuración de oro desarrollado por John Stewart Mac Arthur y los hermanos Robert y William Forrest. Consistía en la disolución del oro desde minerales de baja ley con una solución alcalina diluida de cianuro de sodio, seguidamente el oro es precipitado por cementación con zinc.
2. El proceso inventado por Karl Joseph Bayer para la producción de un precipitado cristalino y puro de $\boldsymbol{Al(OH)_3}$, mediante la lixiviación alcalina en caliente de Bauxita. De las soluciones alcalinas precipita el hidróxido en forma filtrable, el cual, después de ser lavado y secado, se calcina para producir un $\boldsymbol{Al_2O_3}$. puro este último es electrolizado en sale fundidas para producir aluminio metálico. A inicio del siglo XX los desarrollos en la producción de energía eléctrica permitieron reemplazar la cementación con chatarra de hierro por la electrolisis de soluciones de lixiviación, efectuado por primera vez en el mundo a escala industrial en Chuquicamata, Chile (1915), la síntesis del amoniaco, $\boldsymbol{NH_3}$, en Alemania, durante la I Guerra Mundial, permitió su uso en la forma de hidróxido de amonio, $\boldsymbol{NH_4(OH)}$ en la lixiviación de cobre nativo en el distrito del Lago Superior, y de minerales de malaquita/azurita, en Alaska (1916), de igual manera, la lixiviación ácida de zinc, desde minerales oxidados. Década de los 40, el esfuerzo bélico para obtener el uranio que se requería en el Proyecto Manhattan para La producción de la bomba atómica permitió desarrollar a nivel industrial los procesos de extracción por solventes y de intercambio iónico con resinas sólidas.

2.2.2. Clasificación de las reacciones de lixiviación

1. Las reacciones de lixiviación pueden clasificarse en función del tipo de medio que facilita la disolución del metal deseado.
2. **Lixiviación neutra o disolución de sales:** Algunas sales se disocian en iones cuando entran en contacto con una fase líquida.
3. **Lixiviación ácida:** Este proceso requiere un donador de protones (H^+) que posibilite la disolución del mineral.
4. **Lixiviación alcalina:** Utiliza iones hidroxilo (OH^-) como agentes lixiviantes, ideales para metales que forman complejos solubles en soluciones básicas.
5. **Intercambio básico:** La reacción genera un sólido con un producto de solubilidad (Kps) inferior al del reactivo inicial.
6. **Lixiviación mediante formación de complejos:** El agente lixiviante forma complejos solubles con el metal objetivo, facilitando su extracción.
7. **Lixiviación con oxidación directa:** En este caso, el agente lixiviante actúa como un oxidante, es decir, una sustancia con gran afinidad por los electrones.
8. **Lixiviación ácida con oxidación previa:** La disolución del metal en un medio ácido es posible solo después de producirse una oxidación previa.
9. **Lixiviación con oxidación y formación de complejos:** Los productos generados en la oxidación no son solubles o estables, a menos que intervenga un agente complejante que estabilice los compuestos.

10. **Lixiviación con reducción:** Algunos compuestos presentan mayor solubilidad en estados de menor oxidación, por lo que su disolución ocurre bajo condiciones reductoras.

2.2.3. Reactivos de lixiviación

Para que el proceso de lixiviación sea efectivo, es imprescindible el uso de un agente lixiviante, cuya función principal es disolver el metal de interés en una solución acuosa para su posterior recuperación. Las características que debe reunir un lixiviante adecuado son las siguientes:

1. **Capacidad de disolución:** Debe ser capaz de disolver el metal deseado de manera eficiente, considerando la velocidad de reacción y el grado de extracción alcanzable.
2. **Selectividad:** Es importante que minimice la disolución de elementos no deseados presentes en el mineral.
3. **Compatibilidad:** Las soluciones generadas deben ser aptas para las etapas posteriores del proceso metalúrgico.
4. **Baja corrosividad:** El reactivo no debe deteriorar los materiales de los equipos utilizados en el proceso.
5. **Facilidad de recuperación o regeneración:** Debe ser posible reciclar o regenerar el reactivo para reducir costos y residuos.
6. **Accesibilidad y costo:** Su disponibilidad en el mercado y precio deben ser económicamente viables.
7. **Baja toxicidad:** Debe presentar un nivel de peligrosidad bajo para el ambiente y la salud de los trabajadores.

Tabla 1 *Reactivos lixiviantes más comunes*

ACIDOS	BASICOS	COMPLEJANTES	OXIDANTES	REDUCTORES
Sulfúrico	Hidróxido se sodio	Sulfato de amonio	Cloruro férrico	Anhídrido sulfuroso
Clorhídrico	Carbonato de sodio	Cianuro de sodio	Sulfato férrico	Hidrogeno
Nítrico	Amoniaco	Cloruro de sodio	Hipoclorito de sodio	Ácido Sulfhídrico
Sulfuroso	Carbonato de amonio	Tiourea	Peróxido de hidrogeno	
			Aire (oxígeno)	

Fuente: Misari Chuquipoma

2.2.4. Plata

- **Etimología:** Del femenino del adjetivo Plattus (plato, chato) que, en siglo X, se sustantivó con el sentido de lámina.
- **Formula química:** Ag
- **Propiedades Físicas:** Cristaliza en el sistema cúbico. Su hábito cristalino es poco frecuente en formas cúbicas u ortoédricas y, cuando aparece, suele ser de tamaño reducido; las caras suelen mostrar escalonamientos o deformaciones por contacto. Generalmente se presenta en forma de dendritas o láminas delgadas. Su dureza es de 2,5 en la escala de Mohs y su densidad alcanza los 10,5 g/cm³. Exhibe un color blanco o gris azulado, con raya blanca plateada. Su brillo es metálico muy intenso, aunque con frecuencia se encuentra opacado por una película superficial de tono oscuro como resultado de la alteración. Es un metal blando, dúctil y altamente maleable.
- **Descripción:** La plata es el mejor conductor conocido de calor y electricidad. Se presenta en estado nativo, comúnmente aleada con cobre y oro, o formando parte de minerales como la argentita (sulfuro

de plata). Es mucho más abundante que el oro y suele encontrarse combinada con sulfuros o en zonas de oxidación de otros yacimientos. Es estable en contacto con el aire y el agua, pero tiende a oscurecerse por la acción de trazas de sulfuros, generando una capa superficial de sulfuro de plata. Desde el punto de vista químico, muestra gran inercia.

- **Origen:** La plata nativa suele hallarse en vetas hidrotermales asociada con sulfuros, así como en las zonas de oxidación de yacimientos de plata o depósitos polimetálicos, formándose a partir de argentita y sales sulfurosas complejas de este metal. Se genera por reducción de sulfuros en las zonas inferiores de los mantos de mineralización de plomo-zinc-plata. También puede encontrarse como elemento primario en vetas hidrotermales de baja temperatura, en asociación con calcita, o en vetas de alta temperatura, junto con sulfuros de níquel, cobalto y uraninita.
- **Localización:** Los depósitos de sulfuros de plata o plata nativa se ubican principalmente en formaciones con minerales sulfurados de metales base, especialmente en la región de la Cordillera Central.
- **Aplicación:** Es utilizada en joyería, orfebrería, utensilios de laboratorio, medicina, fotografía, acuñación de monedas, entre otros usos.
- **Asociaciones:** Suele encontrarse junto a galena (PbS), proustita (Ag_3AsS_3), pirargirita (Ag_3SbS_3), argentita (Ag_2S), stephanita (Ag_5SbS_4), polibasita [$Ag,Cu_{16}Sb_2S_{11}$], plata nativa y ciertos minerales de cobre.

2.2.5. Oro

El oro ha sido considerado a lo largo de la historia como un símbolo de riqueza, manteniendo una estrecha relación con la evolución del ser humano. Este metal precioso ya era conocido y utilizado durante el período paleolítico, hace aproximadamente 40,000 años. Desde tiempos antiguos, su existencia ha sido documentada en diversas culturas; por ejemplo, en la Biblia se le menciona en más de 400 pasajes. Los romanos lo denominaron "Aurum", que significa metal amarillo. No obstante, su extracción y aprovechamiento no adquirieron gran relevancia hasta que se reconocieron sus excepcionales propiedades físicas y químicas, las cuales le otorgan características singulares, no solo por su brillo y aspecto distintivo, sino también por su escasez en la naturaleza.

Tabla 2 *Propiedades del oro*

Símbolo	**Au**
Número atómico	79
Electronegatividad	2.54 escala Pauling
Densidad (Kg/m^3)	19.300
Dureza Mohs	2.5
Masa Atómica (uma)	196.97
Punto de fusion (°C)	1610.48
Punto de ebullición (°C)	3402
Entalpia de fusión (KJ/mol)	12.55
Capacidad calorífica especifica (J/Kg. °K)	128
Conductividad eléctrica	45.210^6/mΩ
Conductividad Térmica (W/Mk)	317

Fuente: Atlas Mineralogía

El oro, tanto en su estado puro como en aleaciones, es ampliamente utilizado en joyería y orfebrería gracias a su excelente apariencia estética y su

notable resistencia al desgaste. Sus destacadas propiedades de conductividad térmica y eléctrica, junto con su elevada resistencia a la corrosión, permiten su aplicación en diversas áreas industriales como la electrónica, medicina y mecánica de precisión. Este metal cumple funciones fundamentales en equipos de cómputo, sistemas de comunicación, tecnología aeroespacial y motores de aeronaves a reacción. Asimismo, se emplea como recubrimiento dorado en cerámicas. Por otro lado, las nanopartículas de oro (oro coloidal) han sido desarrolladas para usos médicos y biotecnológicos, además de ser utilizadas en odontología para empastes. En la tabla N° 2.2 se detallan algunas de sus propiedades físicas y químicas más relevantes.

2.2.6. Clasificación de los depósitos de oro

El oro se encuentra de manera dispersa en la naturaleza, aunque generalmente en concentraciones muy bajas. Las características propias de los yacimientos auríferos condicionan los métodos de recuperación empleados, por lo que resulta útil establecer una clasificación según distintos criterios:

a. Según el tipo de depósito:
    - Vetas
    - Placeres

b. Desde un enfoque geológico:
    - Vetas de cuarzo con oro
    - Yacimientos epitermales
    - Placeres fósiles
    - Depósitos con oro diseminado
    - Menas de metales ferrosos que contienen oro y aguas marinas

c. Según el método de extracción:

- Minerales con oro nativo
- Oro acompañado de sulfuros
- Teluros de oro
- Oro presente en minerales con arsénico, antimonio, así como en minerales de plomo, zinc y compuestos carbonosos.

La tercera clasificación es la más utilizada en el ámbito metalúrgico, pues comprende los minerales auríferos de mayor relevancia económica en la actualidad. Asimismo, existe una clasificación más general desde el punto de vista de su tratamiento metalúrgico, que los divide en minerales refractarios y no refractarios. Los primeros incluyen menas oxidadas o parcialmente oxidadas con presencia significativa de compuestos carbonosos, sulfuros y teluros.

2.2.7. Metalurgia del oro

En los procesos hidrometalúrgicos empleados para la extracción de metales preciosos, se consideran tres etapas fundamentales organizadas de manera secuencial: la primera corresponde a la disolución selectiva del mineral, seguida por el tratamiento y transformación de las soluciones resultantes, y finalmente, la recuperación selectiva de los metales mediante precipitación. En todas estas fases, la química del oro en disolución acuosa resulta esencial para entender los principios que rigen su extracción.

El fundamento de dichos principios radica en que el oro solo puede disolverse en soluciones acuosas que contengan un ligante adecuado, siempre que además se disponga de un agente oxidante suficientemente fuerte.

Desde una perspectiva química, el oro es altamente resistente a la oxidación tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas cercanas

al rojo vivo. Es insoluble en ácidos como el sulfúrico (H_2SO_4), nítrico (HNO_3) y clorhídrico (HCl); sin embargo, puede disolverse en medios que contienen halógenos libres como cloro o bromo, por ejemplo, en el "agua regia" (mezcla de HNO_3 y HCl en proporción 1:3), así como en soluciones de tiocianato (SCN^-), tiourea [$CS(NH_2)_2$] y tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$).

Asimismo, los cianuros de potasio, sodio y calcio, en medio alcalino, tienen la capacidad de disolver oro formando complejos cianurados. Un caso representativo es el cianuro de potasio (KCN), que al reaccionar con el oro genera aurocianuro de potasio [$KAu(CN)_2$]. Es precisamente esta propiedad de formar complejos solubles la que sustenta el proceso de cianuración utilizado industrialmente para la recuperación de oro y plata.

2.2.8. Generalidades de los procesos de extracción del oro

En la actualidad, la mayoría de los métodos empleados para la obtención de oro se fundamentan en procedimientos que han sido desarrollados y perfeccionados a lo largo de varios siglos. Dentro de estas técnicas destacan la concentración gravimétrica, la amalgamación, la lixiviación con cianuro, la clorinación o cloruración, la cementación con zinc y la adsorción en carbón activado. La combinación de estos métodos constituye la base de los diagramas de flujo utilizados en los procesos industriales de recuperación de oro.

Desde finales del siglo XIX, la cianuración se ha consolidado como la tecnología predominante a nivel mundial para la extracción de este metal precioso. Es por ello que la evolución histórica de la recuperación de oro puede dividirse en tres etapas directamente vinculadas con el desarrollo y perfeccionamiento del proceso de cianuración.

1. Procesos anteriores a la cianuración

2. Cianuración
3. Desarrollo de nuevos procesos hidrometalúrgicos y nuevas tecnologías.

1. **Procesos anteriores a la cianuración. -** La concentración gravimétrica y la amalgamación fueron principalmente los métodos utilizados para la obtención del oro hasta la primera mitad del siglo XIX, sin embargo, estos métodos eran inapropiados para la recuperación del oro asociados a minerales sulfurados, lo que dio lugar a la búsqueda de un proceso hidrometalúrgico efectivo para el tratamiento de estos materiales. El cloro gaseoso fue descubierto en 1774 y pronto se volvió un producto comercial. En 1848 Plattner propuso un proceso para el tratamiento de menas de oro, que consistía en pasar gas cloro por la mena molida para producir un cloruro de oro soluble, que podía ser disuelto en agua. El oro era entonces precipitado de la disolución de sulfato de hierro (II), ácido sulfhídrico o carbón vegetal. La clorinación se usó comercialmente por primera vez para el tratamiento de las menas provenientes de Deecken (California) en 1858.

   La clorinación se aplicaba muy raramente de forma directa a menas enteras, debido principalmente al alto grado de aislamiento del oro, lo que producía un aumento en los costos de tratamiento. Además, las menas que contenían arseniuros, antimoniuros y grandes cantidades de sulfuros tenían que ser oxidadas con anterioridad a la clorinación, lo que también ocurriría para el caso de la cianuración en el siguiente siglo.

2. **Cianuración. -** En 1783, Scheele reconoce la solubilidad del oro en disoluciones del cianuro y es estudiada por Elkington Bogration, Elsner y Faraday en los años 1840 y 1850.

Además, Elkington obtuvo una patente para el uso de disoluciones de cianuro potásico para el electro-platinado de plata y oro.

Tanto la disolución de oro, de disoluciones aireadas, como el papel del oxígeno en el mecanismo fue investigado por Elsner en 1846 y la reacción propuesta fue la siguiente:

$$4Au + 8\,KCN + O_2 + 2H_2O = 4AuK(CN)_2 + 4\,4KOH$$

Mc Arthur y los hermanos Forrest patentan en 1887 y 1888 el proceso de cianuración, como se conoce en la actualidad.

Cuando se incorporó la cianuración al proceso de cementación con cinc, se aumentó la recuperación de oro en un 70 al 95%. Los métodos iniciales de recuperación incluían cementación con cinc (proceso MacArthur) y las celdas electrolíticas (proceso Siemens-Halske y Tainto).

En 1950 se desarrolló una técnica que consistía en la recuperación del oro del carbón activo mediante una elución; se consiguió así una disolución concentrada de oro que podría ser tratada posteriormente mediante electro-obtención. Entre las disoluciones usadas para la elución se utilizaron sulfuro sódico caústico, el cual no conseguía recuperar la plata y posteriormente una disolución de cianuro sódico e hidróxido sódico. De esta forma mediante la combinación de los procesos de adsorción con carbón activo y posterior elución se conseguía un proceso más efectivo.

El cianuro ha sido el reactivo utilizado por excelencia en la lixiviación de oro, por su alta aplicación a gran variedad de menas y su bajo costo. Además, el oxidante utilizado en la cianuración es el oxígeno, que es suministrado por el propio aire lo que hace a este proceso más atractivo.

En contraste con estas ventajas el cianuro es toxico para el ambiente, no es selectivo, forma complejos con una gran variedad de iones metálicos, su cinética es relativamente lenta y no puede ser aplicado en medios ácidos. Por lo tanto, en los últimos tiempos se ha empezado a trabajar con otros agentes lixiviantes y de igual forma se han desarrollado nuevos procesos metalúrgicos, en especial para conseguir que los procesos sean más eficientes y los efluentes sean menos contaminantes.

3. **Desarrollo de nuevos procesos hidrometalúrgicos y nuevas tecnologías. -** En los años 70, el gran interés por los metales preciosos y en especial el oro llevaron al desarrollo de nuevos procesos de extracción de este metal. Durante esta época se utilizaban procesos industriales a gran escala como: CIP (carbón in Pulp), lixiviación en montones de residuos de menas de baja ley, electro-obtención y platinado, oxidación a presión de sulfuros y cianuración.

   En este periodo se dieron a conocer sistemas de lixiviación de minerales de oro utilizando reactivos para la disolución como el tiosulfato y la tiourea que se utilizaban desde el siglo XIX, pero sin aplicaciones industriales importantes. Por otra parte, se estudiaron nuevos reactivos lixiviantes como el sulfocianuro que presenta menos toxicidad que el cianuro y la tiourea.

   La tiourea es un reactivo orgánico de fórmula ($NH_2\ CSNH_2$).

   El proceso con tiourea fue patentado por dos investigadores rusos I.N. Palskin y M.A. Kozukhova en los años 40, quienes posteriormente en la década de los 60, avanzaron en el uso de la tiourea en la disolución del oro.

   El tiosulfato se ha utilizado desde 1880 y actualmente ha tenido mejoras en el proceso tales como la adición de iones cobren y la estabilización del

tiosulfato por la adición del SO_2 o H_2SO_3. El empleo del Iodo y Bromo se han propuesto como alternativa a la cianuración con buenos resultados.

Entre 1980 – 1990 se conoció como el periodo de desarrollo químico, gran cantidad de investigadores se dirigieron al tratamiento de menas refractarias, que no se conseguía por cianuración directa, una buena eficiencia en la recuperación del oro (menor al 80%).

La mayoría de las menas refractarias y los concentrados, como materiales sulfurados, carbonatados y teluros, se trataban con procesos de tostación hasta la oxidación completa de la parte refractaria de la mena, pudiendo a continuación lixiviar el oro.

Después del periodo de desarrollo químico se pudieron aplicar tratamientos de clorinación, oxidación a presión, oxidación mediante bacterias de las menas refractarias, que aumentaron la eficiencia de la disolución de este tipo de menas mejorando los rendimientos de las siguientes etapas.

Desde la década de 1990, la investigación metalúrgica orientada a la obtención de oro ha experimentado un notable incremento, y en los últimos años del presente siglo, los esfuerzos se han dirigido a consolidar y optimizar estos estudios mediante el perfeccionamiento de procesos existentes y la exploración de alternativas innovadoras. Las principales líneas de investigación incluyen:

- Desarrollo de procesos de biooxidación aplicados a escala industrial para el tratamiento de menas auríferas sulfuradas.
- Optimización de las técnicas hidrometalúrgicas para minerales con alto contenido de sulfuros.

- Sustitución de la tecnología CIP (Carbón en Pulpa) por la metodología RIP (Resina en Pulpa).
- Investigación de procedimientos con mayor eficiencia metalúrgica y menor impacto ambiental.
- Implementación de sistemas de regeneración de reactivos y control de efluentes generados durante la lixiviación.
- Desarrollo de tecnologías de electro-obtención directa y selectiva para soluciones diluidas.

2.2.9. Lixiviación de menas auríferas en medio ácido

El proceso de lixiviación aplicado a minerales auríferos en medios ácidos no ha mostrado un avance significativo en comparación con su uso en metales como cobre, hierro, níquel, zinc y sus respectivos minerales oxidados. En estos casos, la lixiviación ácida se utiliza de manera efectiva, especialmente para óxidos de uranio, donde la presencia de agentes oxidantes es indispensable para la disolución del mineral.

En yacimientos que permiten tanto tratamientos ácidos como alcalinos, el empleo de soluciones ácidas puede representar ciertas ventajas respecto a los procesos alcalinos. Por ejemplo, en este último caso, es necesario realizar moliendas más finas, lo que incrementa el consumo de reactivos lixiviantes, disminuyendo la eficiencia general de la operación, como ocurre en la cianuración convencional.

Además, los pretratamientos en medios ácidos tienen aplicaciones importantes para la oxidación de sulfuros, teluros y componentes carbonosos presentes en menas auríferas refractarias, antes de proceder a la etapa de lixiviación propiamente dicha. Tecnologías como disoluciones clorurantes

acuosas, oxidación a presión y procesos de biooxidación con bacterias sulfato-reductoras, han demostrado eficacia tanto en menas refractarias como no refractarias, facilitando la liberación del oro y mejorando la recuperación.

Por otro lado, en el tratamiento de minerales refractarios se ha comprobado que la lixiviación ácida presenta mayor agresividad química que la alcalina, permitiendo en ciertos casos la eliminación de etapas de pretratamiento.

En este contexto, Azañero, Núñez y Guillén (2001) lograron recuperar plata desde relaves de flotación de menas refractarias mediante una solución ácida clorurante compuesta por ácido sulfúrico concentrado y cloruro de sodio, alcanzando un porcentaje de recuperación del 32%.

a. Disolución de oro en medios ácidos

El agua regia, descubierta en el siglo VIII por Jabir Ibn Hayyan (720-813), constituye la primera solución capaz de disolver oro, representando además el primer medio ácido empleado con fines extractivos de este metal. Esta mezcla altamente corrosiva y de tonalidad amarilla se compone de ácido nítrico y ácido clorhídrico concentrados, comúnmente en proporción volumétrica de 1:3. Dada su inestabilidad química, el agua regia debe ser preparada inmediatamente antes de su uso.

Si bien esta solución permite la disolución eficaz del oro, ninguno de sus componentes por separado logra este efecto. El ácido nítrico actúa como agente oxidante, generando en la superficie del metal una pequeña cantidad de iones oro (Au^{3+}), mientras que el ácido clorhídrico suministra iones cloruro (Cl^{-}) que estabilizan estos iones metálicos al formar complejos clorurados solubles, facilitando así la continuación del proceso oxidativo hasta la completa disolución del oro.

Actualmente, el agua regia sigue empleándose en procesos de refinación de oro debido a su elevada capacidad disolvente, basada en la formación de cloro libre en el medio. La reacción global que representa la disolución del oro en agua regia se expresa mediante la siguiente ecuación química:

$$2Au + 2HNO_3 + 6HCl \longrightarrow 2AuCl_3 + 2NO + 4H_2O \quad (1)$$

Otro agente lixiviante utilizado para la disolución de oro en medio ácido es la combinación de ácido clorhídrico con gas cloro (Cl_2), donde este último actúa como el agente oxidante necesario para facilitar la disolución del metal precioso. Al igual que en el caso del agua regia, este sistema permite que el oro pase a solución formando ácido aurotetraclorhídrico ($HAuCl_4$), especie compleja que estabiliza los iones de oro en el medio acuoso, permitiendo su recuperación posterior en los procesos metalúrgicos.

$$2Au + 3Cl_2 + 2HCl \longrightarrow 2H[AuCl_4] \quad (2)$$

Entre los medios ácidos aplicados en la lixiviación de oro destaca la tiourea, un reactivo orgánico capaz de formar complejos solubles con este metal. Para que la disolución del oro ocurra de manera eficiente, es indispensable la presencia de un agente oxidante distinto al oxígeno molecular. El ion férrico (Fe^{3+}) se considera el oxidante más adecuado en este proceso, dado que facilita la oxidación del oro metálico (Au^0) a su estado iónico, permitiendo así su posterior complicación con la tiourea. La interacción química entre el ion férrico y la tiourea en este mecanismo se expresa en la siguiente ecuación:

$$Au + 2CS(NH_2)_2 + Fe^{+3} \rightarrow \{Au[CS(NH_2)_2]_2\}^+ + Fe^{+2} \quad (3)$$

De manera análoga, la disolución del oro puede llevarse a cabo en un medio de ácido clorhídrico cuando se dispone de hipoclorito o iones férricos

como agentes oxidantes, los cuales facilitan la oxidación del oro metálico a su forma iónica, tal como se representa en la ecuación correspondiente.

$$2Au + 2HCl + 6FeCl_3 \longrightarrow 2H[AuCl_4] + 6FeCl_2 \qquad (4)$$

El cloro puede ser generado en los lodos y en las disoluciones de electrólisis por disoluciones de NaCl o por adición de MnO_2 a HCl.

$$MnO_2 + 4HCl \longrightarrow MnCl_2 + 2H_2O + Cl_2 \qquad (5)$$

Otra reacción utilizada para la lixiviación de oro en medio ácido se presenta de la siguiente forma:

$$2Au + 2NaNO_3 + 8NaCl \longrightarrow 2Na[AuCl_4] + 2NO + 4Na_2O$$

(Proceso Severo) *(6)*

Esta última reacción corresponde al denominado Proceso SEVERO11, el cual ha sido evaluado en la presente investigación. Dicho proceso tiene como objetivo la disolución del oro mediante la incorporación de sales como cloruro de sodio (NaCl) y nitrato de sodio ($NaNO_3$) en un medio ácido de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esta combinación permite la generación in situ de agua regia y cloro libre, especies responsables de formar complejos solubles con el oro, posibilitando la obtención de soluciones enriquecidas con este metal precioso.

2.3. Definición de términos básicos

- **Mineral:** Sustancia sólida, homogénea y de origen natural, caracterizada por ser inorgánica y poseer una composición química específica.
- **Metalurgia:** Conjunto de técnicas y procesos aplicados para la obtención, tratamiento y transformación de metales, a partir de minerales metálicos o no metálicos.

- **Proceso metalúrgico:** Conjunto de operaciones destinadas a extraer el metal contenido en los minerales, separándolo de los compuestos estériles o ganga presente en su estado natural.
- **Mena:** Mineral o conjunto de minerales con interés económico, cuya concentración útil varía entre el 5 % y 10 % del volumen total de la roca; generalmente corresponden a especies sulfuradas u oxidadas que contienen el metal de valor, tales como cobre, zinc, molibdeno, entre otros.
- **Hidrometalurgia:** Rama de la metalurgia enfocada en la extracción y recuperación de metales empleando soluciones líquidas (acuosas u orgánicas) como agentes lixiviantes.
- **Lixiviación:** Técnica de separación basada en la disolución selectiva de los componentes solubles de una mezcla sólida mediante la acción de un disolvente líquido apropiado.
- **Medio ácido:** Un medio ácido es aquel donde la concentración de protones (H^+) de la solución es mayor que 10^7 o que el pH es < 7 mientras más cercano a 0 es más ácido.
- **Cianuración:** Procedimiento para extraer el oro y la plata de su ganga mediante una solución de cianuro de sodio, que los disuelve y la precipitación con zinc de esta solución.
- **Planta concentradora:** Procesamiento de mineral pobre, que tiene como finalidad su procesamiento en varias etapas hasta obtener concentrado de este metal.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Si aplicamos la evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves Coloniales de Uchcumachay entonces será la aplicación de un método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Si aplicamos la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay entonces tenemos la posibilidad de aplicar un método alternativo a la cianuración.
- Si determinamos los reactivos necesarios y adecuados que se aplicaría a los relaves coloniales de Uchcumachay entonces podemos sustituir el consumo de cianuro de sodio.
- Si lixiviamos en solución ácida a los minerales de oro y plata entonces se podrá reemplazar a los reactivos contaminantes.

2.5. Identificación de las variables

2.5.1. Variable dependiente

Método alternativo a la cianuración.

2.5.2. Variable independiente

Evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay.

2.5.3. Variables intervinientes

- Temperatura, tiempo, porcentaje de pulpa.
- Reactivos: (ácido sulfúrico, nitrato de sodio, cloruro de sodio).
- Lixiviación por agitación, minerales coloniales de Uchcumachay.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Evaluación de las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera AUREX S.A.A. – PASCO 2023

Tabla 3 *Operación de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable independiente **Evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay**	Los sulfuros complejos son minerales genéticamente formados y en su estructura contienen valores de oro; y por acción de la disolución en medio ácido, crean en la pulpa las condiciones propicias para una óptima flotación y preparan la superficie de las partículas para adherirse a la burbuja del aire.	La finalidad principal de emplear una disolución en medio ácido es generar un entorno químico adecuado que favorezca la adherencia de las partículas de oro a las burbujas de aire, facilitando así su posterior recuperación mediante el proceso de flotación.	Caracterización del mineral	Reconocimiento mineralógico
			Dosificación de la disolución en medio ácido	Cm^3/T
Variable Dependiente **Método alternativo a la cianuración**	Resultado del proceso físico químico que permiten recuperar el oro por adherencia de ácido sulfúrico en vez de usar cianuro de sodio.	Proceso mediante el cual se separan los minerales valiosos de la ganga o material estéril, empleando la acción del ácido sulfúrico como agente facilitador de la diferenciación de fases.	Recuperación de oro	Oz/TM

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Considerando los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, el presente estudio corresponde a un tipo de investigación experimental, ya que permite dar respuesta a las interrogantes formuladas, evaluando el comportamiento de la disolución en medio ácido. Asimismo, posibilita describir y explicar las causas y efectos involucrados, reflejados en los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales.

3.2. Nivel de investigación

El presente trabajo de investigación, por su naturaleza de carácter práctico, ha requerido la aplicación del **enfoque inductivo–deductivo**, con el propósito de analizar la aplicación de la disolución en medio ácido sobre los relaves coloniales para la recuperación de oro y plata. Para ello, se llevó a cabo el estudio correspondiente de las variables independiente y dependiente, permitiendo establecer relaciones causales y validar los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Para cumplir con el método y diseño de la

investigación, el control de las pruebas experimentales se llevará a cabo mediante una observación controlada de la variable independiente y de aquellas que intervinieron circunstancialmente y que han afectado o favorecido en los resultados de la variable dependiente.

3.3. Método de investigación

En la investigación se utilizó el **método científico**. De acuerdo con Cerda Gutiérrez (2000), se subrayó la relevancia de usar un sistema que progrese de manera lógica y organizada para el avance del conocimiento. Este enfoque utiliza un sistema lógico para tratar y solucionar un problema particular, con el propósito de probar su validez a través de técnicas e instrumentos apropiados. (Niño Rojas, 2011)

3.4. Diseño de la investigación

El diseño adoptado en la presente investigación es de tipo **causal**, orientado a establecer la relación de causa y efecto entre las variables involucradas. Este enfoque metodológico permite determinar la influencia de la aplicación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales (variable independiente) sobre el resultado obtenido en la mitigación de la contaminación ambiental (variable dependiente). Dicho diseño es coherente con la naturaleza experimental del estudio y responde directamente al problema de investigación planteado.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

Como población de estudio lo considero los relaves coloniales que están depositados en Uchcumachay – Pasco.

3.5.2. Muestra

La muestra de estudio consistió en la recolección de aproximadamente 50 kilogramos de relaves, obtenidos mediante un muestreo aleatorio estratificado por mallas. De este total, se seleccionaron 10 kilogramos para su posterior tratamiento metalúrgico, aplicando el proceso de disolución en medio ácido, con el propósito de evaluar la recuperación de metales valiosos y la reducción de la carga contaminante.

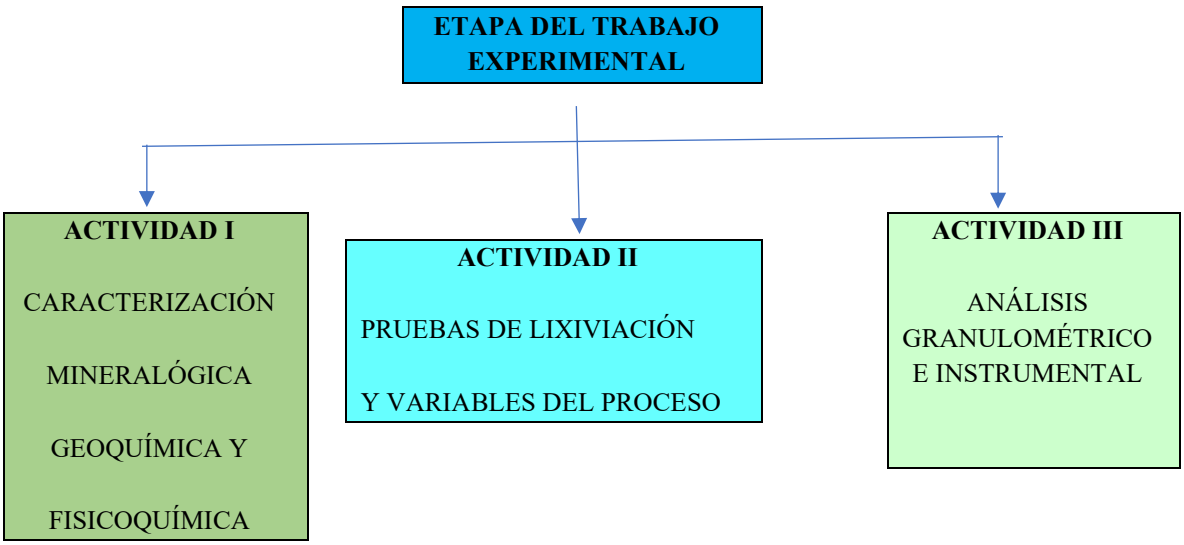
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

Pruebas de lixiviación

La presente investigación se desarrolló en tres etapas, dentro de las cuales se integró el trabajo experimental, estructurado en tres actividades fundamentales, diseñadas para alcanzar los objetivos propuestos. La fase experimental comprendió en primer lugar la caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica de los relaves; en segundo lugar, la ejecución de pruebas de lixiviación y la selección de variables del proceso; y finalmente, la evaluación gravimétrica e instrumental de los productos obtenidos. El procedimiento general de estas actividades se representa en el diagrama de la Figura 1.

Figura 1 *Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en la etapa de trabajo experimental*



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Equipos materiales y reactivos usados

- **Equipos y materiales del laboratorio**
  - Molino de bolas
  - Equipo para tamizado Pinzuar
  - Centrífuga Labofuge 15000
  - Equipo de espectrofotometría Perkin Elmer
  - Balanza analítica Metler AE240-H35AR
  - Agitadores mecánicos de aspa Janke y Kunkel
  - Material de vidrio
  - Muflas de Resistencias Santander MO5
  - Estufa Memmert U10
  - pH metro Metrhom 691
  - Electrodo de plata/cloruro de plata Metrhom

- **Reactivos químicos**
    - Ácido sulfúrico (grado analítico)
    - Cloruro de sodio (comercial)
    - Nitrato de sodio (comercial)
    - Hidróxido de sodio (grado analítico)
    - Carbonato de sodio (comercial)
    - Bórax (comercial)
    - Litargirio (comercial)
    - Anaranjado de metilo (grado analítico)

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

(Chavez, 2001) describe la validez como "la eficacia con que un instrumento mide lo que se pretende". Por su parte, (Hérnandez, 2003) señala que "la confiabilidad de un instrumento de medición se evalúa a través de varios métodos y se relaciona con el grado en que su uso repetido con el mismo sujeto produce resultados consistentes". Para validar y garantizar la confiabilidad de los instrumentos de investigación, se empleó la validación de contenido mediante el juicio de expertos, con el fin de determinar cuán representativos son los ítems dispuestos para esta investigación.

3.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.8.1. Caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica

En esta primera actividad, los ensayos experimentales se efectuaron con mineral aurífero provenientes de los relaves coloniales Uchcumachay de la Compañía Minera Aurex, que proporcionó dos. Las muestras utilizadas correspondieron a dos etapas: la primera, mineral de cabeza con trituración primaria, y la segunda, concentrado gravimétrico obtenido mediante mesa

Wilfley. Ambas muestras fueron sometidas a un adecuado proceso de cuarteo y molienda hasta alcanzar una granulometría de 200 malla Tyler, con el propósito de realizar ensayes al fuego y determinar el tenor de oro presente. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4 *Ley del mineral de cabeza y concentrado*

Muestra	Au g/t	Ag g/t
Cabeza	7,666	28,333
Concentrado	36,333	106,666

Fuente: Elaboración propia

Para obtener resultados representativos en la determinación de los valores de oro disuelto durante el proceso de lixiviación, se seleccionó el mineral procedente de la etapa de concentración gravimétrica, ya que presentó un tenor de oro significativamente superior al mineral de cabeza. Este último, debido a su baja ley, podría generar inconvenientes en los análisis posteriores, tanto en los ensayes al fuego como en la cuantificación por espectrometría de absorción atómica. Por este motivo, la caracterización mineralógica y química se realizó exclusivamente sobre el concentrado gravimétrico obtenido en la mesa Wilfley.

Caracterización mineralógica

La muestra seleccionada fue caracterizada inicialmente mediante técnicas macroscópicas, a fin de identificar los minerales primarios presentes. A través de inspección visual directa, con apoyo de lupa binocular y microscopio petrográfico, se determinó que los minerales predominantes corresponden a pirita y cuarzo.

Esta caracterización cualitativa fue complementada mediante un análisis cuantitativo por Difracción de Rayos X (DRX), ejecutado en el laboratorio

especializado de Difracción de Rayos X, con el propósito de validar y precisar la mineralogía identificada visualmente.

Caracterización geoquímica

La caracterización geoquímica se realizó con el propósito de determinar los contenidos de oro y plata, así como la presencia de otros elementos de interés que puedan influir en la eficiencia de los procesos de extracción, tales como cobre, zinc, níquel y hierro. Estos metales pueden ser económicamente recuperables o, en su defecto, actuar como elementos nocivos durante la etapa de lixiviación.

Los análisis fueron ejecutados mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) para los metales base, y ensayes al fuego para la cuantificación precisa de oro y plata.

Adicionalmente, se efectuó una caracterización metalúrgica a través del estudio de la distribución granulométrica del oro y la plata, con el fin de establecer el porcentaje de estos metales en función del tamaño de partícula. Para ello, el concentrado gravimétrico fue sometido a molienda durante una hora en un molino de bolas, seguido de un tamizado en mallas sucesivas; el material pasante de cada fracción fue evaluado mediante ensaye al fuego.

Caracterización fisicoquímica

A partir del conocimiento de las principales propiedades fisicoquímicas de los minerales, es posible definir con mayor precisión las condiciones óptimas de operación en planta, así como establecer criterios adecuados para su diseño. En este sentido, se determinaron propiedades fundamentales tales como:

- **Velocidad de sedimentación** de las partículas minerales de sales solubles,
- **Densidad real y aparente** de los minerales,

- **Potencial de acidez (pH)**,
- Entre otras características relevantes que influyen directamente en los procesos de lixiviación, flotación y separación sólido-líquido.

Estas propiedades permiten optimizar las variables operativas, garantizando una mayor eficiencia en los procesos metalúrgicos aplicados.

3.9. Tratamiento estadístico

El estudio empleará los principios fundamentales de la estadística descriptiva, incluyendo la Prueba de Normalidad. Según la distribución de los datos, se realizará la Prueba T de Student para una muestra.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación titulada "Evaluación de las disoluciones en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. Pasco – 2023" debe cumplir con las normas éticas establecidas por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión y las instituciones responsables de la integridad en las investigaciones. Se tuvo en cuenta el código ético, que incluye el respeto por las personas, los beneficios y la justicia. Además, se mantuvo la integridad a lo largo de todo el proceso de investigación, respetando los valores y creencias en relación con la originalidad y la precisión de las referencias citadas de otros autores sobre este tema.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

Los resultados obtenidos en la presente investigación se estructuran en el siguiente apartado, el cual abarca de manera integral las etapas de: caracterización mineralógica, caracterización fisicoquímica, pruebas preliminares, diseño experimental estadístico y pruebas experimentales complementarias. Estas fases permitieron evaluar el comportamiento del mineral bajo distintas condiciones de proceso, así como validar la eficacia del método de disolución en medio ácido propuesto.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Caracterización mineralógica

Como se presentó en el capítulo anterior, la caracterización mineralógica se llevó a cabo mediante dos métodos complementarios: un análisis macroscópico y microscópico, que permitió identificar de manera cualitativa los minerales presentes en el concentrado, y un análisis cuantitativo mediante difracción de Rayos X (DRX), el cual proporcionó información precisa sobre los minerales

valiosos y la ganga asociada. Los resultados obtenidos de esta caracterización se detallan en las tablas siguientes:

Tabla 5 *Caracterización mineralógico macroscópica y microscópica del mineral concentrado*

Muestra	Cuarzo	Pirita	Moscovita	Feldespato
Concentrado	XX	XX	XX	X

Fuente: Elaboración propia

- X = Mineral en menor proporción
- XX= Mineral en mayor proporción

En el análisis mineralógico cualitativo se identificó que la pirita constituye la fase mineralógica de mayor interés para el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, se detectaron cuarzo, moscovita y feldespato, minerales que conforman la ganga del concentrado.

La presencia de pirita, cuarzo y moscovita (mica) se confirmó de manera rápida y eficaz mediante inspección visual, debido a su abundancia y a su morfología cristalina bien definida. La observación bajo el microscopio permitió precisar estas especies y evidenciar la existencia de feldespato, mineral que no fue identificado durante el análisis macroscópico.

El análisis cuantitativo por difracción de rayos X (DRX) reveló que la pirita representa un 19.15% del total del mineral concentrado, no siendo la fase predominante. Las especies cristalinas mayoritarias corresponden a cuarzo (27.12%) y moscovita (19.93%), confirmando así la composición mixta del material de estudio.

Tabla 6 *Caracterización mineralógica por difracción de Rayos X*

Mineral	Nombre	Análisis cuantitativo %
$\mathbf{SiO_2}$	Cuarzo	27,12
$\boldsymbol{FeS_2}$	Pirita	19,15
$\boldsymbol{KFe_3\,(SO_4)_2(OH)_6}$	Jarosita	1,50
$\boldsymbol{KAl_2\,(\,Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2}$	Moscovita	19,93
$\boldsymbol{KAlSi_3O_8}$	Ortoclasa	11,16
Amorfos		21,10

Fuente: Elaboración propia

La ortoclasa, identificada como un feldespato potásico durante el análisis microscópico, presenta una proporción relativamente baja en el concentrado, con un contenido de 11,16%. De igual manera, la jarosita, que no fue detectada en el análisis cualitativo, se encuentra en una cantidad mínima de 1,5%. Por otro lado, la fracción de materiales amorfos alcanza un contenido considerable del 21,10%, valor superior al porcentaje correspondiente a la pirita (19,15%), indicando una significativa presencia de fases no cristalinas o desordenadas en la muestra analizada.

4.2.2. Caracterización geoquímica

La caracterización geoquímica constituye un aspecto fundamental para el desarrollo de la presente investigación, ya que permitió determinar, mediante la técnica de ensayo al fuego, la ley promedio de oro y plata presente en el mineral concentrado. Complementariamente, se realizó un análisis cuantitativo de los contenidos de zinc y cobre empleando la técnica de absorción atómica. Los resultados obtenidos de estos análisis se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 *Composición química del mineral concentrado*

Elemento	g/t
Au	35
Ag	105
Fe	90600
Zn	305
Cu	221

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la ley de oro y plata del concentrado, se realizaron cinco ensayos al fuego, cuyos resultados fueron promediados mediante una media aritmética. Estos valores sirvieron de base para establecer la cantidad de oro disuelto posterior al proceso de lixiviación, calculando la diferencia entre la ley del concentrado inicial y la ley de las colas obtenidas.

Los resultados evidenciaron contenidos apreciables de hierro, lo cual corrobora la presencia de las distintas especies mineralógicas reportadas en la caracterización previa. Asimismo, el análisis elemental reveló la presencia de cobre, posiblemente asociado a especies de calcopirita, mineral que no fue detectado de manera precisa durante la caracterización mineralógica. Por otro lado, es probable que el zinc y el cobre estén relacionados con las fases amorfas identificadas en el análisis de difracción de Rayos X (Tabla N° 6).

La caracterización geoquímica se complementó con un análisis metalúrgico, mediante la evaluación de la distribución granulométrica de oro y plata. Este análisis permitió identificar la fracción con mayor contenido de estos metales, con el objetivo de establecer una granulometría óptima para el proceso de lixiviación por agitación. Los contenidos de oro y plata por fracción se presentan en la Tabla N° 8.

Tabla 8 *Distribución de oro y plata en fracciones granulométricas*

Malla (Tyler)	Peso %	Au (g/Tn)	Ag (g/Tn)
-20/+35	18.20	15	45
-35/+48	8.10	14	43
-48/+65	11.10	15	47
-65/+100	11.60	25	69
-100/+150	24.50	35	105
-150/+200	19.30	35	95
-200	7.20	30	92

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla N° 8, se determinó que la mayor concentración de oro y plata se encuentra en el rango de fracción granulométrica comprendido entre las mallas 100 y 200 Tyler, evidenciando que estas fracciones contienen el mayor porcentaje de oro fino presente en el mineral concentrado. En función de este análisis, el mineral fue conminado hasta lograr un pasante de malla -100 Tyler, con el propósito de optimizar la superficie específica de contacto durante el proceso de lixiviación.

4.2.3. Caracterización fisicoquímica

A través de la caracterización fisicoquímica se establecieron las principales propiedades del mineral concentrado, relevantes para su procesamiento metalúrgico. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N° 9 y se analizan a continuación:

Se observó que tanto la densidad real como la densidad picnométrica muestran valores similares, lo cual confirma la elevada densidad del mineral concentrado, atribuida a la significativa presencia de cuarzo como fase predominante. El mineral presentó un marcado carácter ácido; sin embargo, no se logró establecer un valor de pH exacto debido a las variaciones observadas

durante las mediciones, reportándose finalmente un rango de pH entre 2.57 y 3.44.

El análisis cualitativo de sales solubles evidenció la ausencia de sales férricas y de zinc, pero sí se detectaron sales ferrosas y de cobre, las cuales pueden ser perjudiciales para procesos de lixiviación con agentes oxidantes. Este hallazgo sugiere la necesidad de realizar un lavado previo del mineral concentrado antes de la lixiviación aurífera. No obstante, considerando que el análisis granulométrico reveló una elevada concentración de oro en las fracciones finas, dicho procedimiento de lavado no se efectuó para evitar la posible pérdida de partículas finas ricas en oro durante esta etapa.

Tabla 9 *Propiedades fisicoquímicas del mineral concentrado*

Propiedades fisicoquímicas	Mineral concentrado
Densidad real [g/ml]	3,4307
Densidad picnométrica	3,5232
Humedad [g]	0,0433
Nivel de acidez [pH]	2,57 – 3,44
Velocidad de sedimentación [pie^2 /ton/24h]	261
Solubilidad de sales	
Ferrosas	Presencia
Férricas	No detectado
Cobre	Presencia
Zinc	No detectado

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Pruebas de lixiviación

Las pruebas de lixiviación se llevaron a cabo con el objetivo de evaluar el efecto de variables operativas tales como la temperatura, tiempo de lixiviación, porcentaje de pulpa, concentración de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y nitrato de sodio, en la disolución del oro contenido en el mineral, a fin de determinar

cuáles de estas variables inciden de manera significativa en el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

La determinación del oro disuelto se realizó mediante dos métodos analíticos complementarios: la técnica de ensayo al fuego, aplicada tanto al mineral de alimentación como a las colas de lixiviación, y el análisis por espectrofotometría de absorción atómica (AAS) de la solución rica obtenida tras la lixiviación.

El cálculo de la disolución de oro por ensayo al fuego se efectuó considerando la diferencia entre el contenido de oro del mineral de alimentación y el contenido residual en las colas de lixiviación, lo que permitió establecer con precisión el porcentaje de recuperación del metal valioso en cada una de las condiciones experimentales evaluadas.

Oro en el concentrado(g/t) – Oro en las colas (g/t) = Oro disuelto (g/t)

Cada una de las variables fue analizada de manera individual con el propósito de evaluar su influencia específica en el proceso de lixiviación, mientras que las demás variables se mantuvieron constantes. Este enfoque permitió comparar de forma precisa los resultados obtenidos mediante las dos técnicas analíticas mencionadas previamente: ensayo al fuego y espectrofotometría de absorción atómica.

Para la ejecución de las pruebas preliminares de lixiviación por agitación, se definieron los siguientes parámetros experimentales, establecidos en función de la caracterización mineralógica y fisicoquímica realizada en este estudio, así como de la información recopilada en la literatura técnica especializada:

Granulometría……. Mallas -100 (Tyler)

pH …… <1.5

RPM …… 750

Peso de la muestra …… 222 gramos

En el desarrollo del procedimiento experimental, se observó que las colas de lixiviación fueron sometidas a un proceso de lavado, y la solución resultante fue analizada mediante espectrofotometría de absorción atómica para determinar su contenido de oro. Sin embargo, en ninguna de las pruebas preliminares de lixiviación se detectaron concentraciones apreciables de oro disuelto en dicha solución de lavado.

Los resultados obtenidos mediante absorción atómica no guardaron concordancia con los valores determinados por la técnica de ensayo al fuego, como se aprecia en las gráficas correspondientes a las pruebas de lixiviación. En todos los casos evaluados, la disolución de oro determinada por absorción atómica fue inferior a la reportada por ensayo al fuego. Esta discrepancia se atribuye a interferencias en la solución lixiviada durante el análisis instrumental, ocasionadas por la elevada concentración de sodio y la presencia de metales pesados disueltos, tales como cobre y hierro.

Por este motivo, el análisis del comportamiento de cada variable experimental se realizó tomando como referencia los resultados obtenidos mediante ensayo al fuego, al considerarse estos últimos más representativos de la disolución real de oro. No obstante, a pesar de las diferencias cuantitativas entre ambas técnicas analíticas, las curvas obtenidas en las gráficas de las figuras N° 2 a N° 7 muestran una tendencia similar en el comportamiento de las variables evaluadas.

Cabe destacar que todos los datos experimentales reportados corresponden a determinaciones realizadas por duplicado, a fin de garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados. A continuación, se presenta el análisis e interpretación de estos resultados y su incidencia en el proceso de lixiviación de oro con sales oxidantes en medio ácido.

Influencia del porcentaje de pulpa en la lixiviación de oro

Se observa que, a medida que incrementa el porcentaje de sólidos en la pulpa, la disolución de oro disminuye de manera casi lineal, presentando una pendiente de baja magnitud, tal como se muestra en la Figura N° 2. Este comportamiento sugiere que no existe una variación significativa en la disolución de oro entre los porcentajes de pulpa evaluados (60%, 40% y 20%).

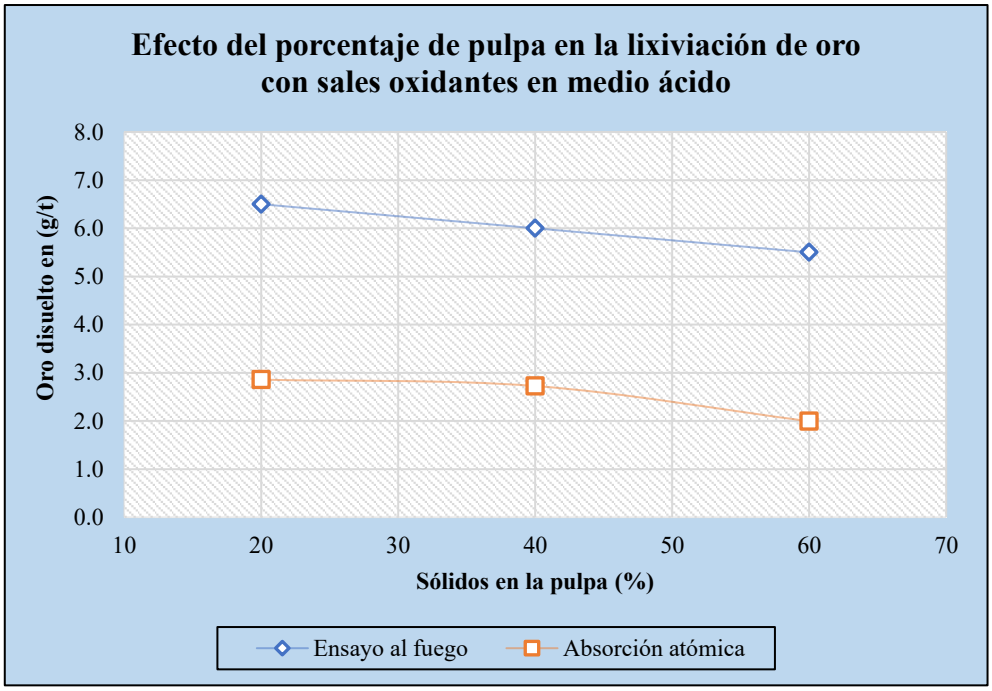
El mayor porcentaje de disolución de oro se obtuvo con una pulpa al 20% de sólidos, alcanzando una eficiencia de 17,14%, según los resultados determinados mediante la técnica de ensayo al fuego, como se detalla en la Tabla N° 10.

Tabla 10 *Efecto del porcentaje de pulpa en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*

Sólidos en la pulpa (%)	Oro disuelto (g/t) Ensayo al fuego	Disolución de oro (%)	Oro disuelto (g/t) (Absorción Atómica)	Disolución de oro (%)
20	6,5	18,57	2,8575	8,16
40	6,0	17,14	2,7255	7,78
60	5,5	15,71	1,9945	5,70

Fuente: Elaboración propia

Figura 2 *Efecto del porcentaje de pulpa en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

Influencia de la temperatura en la lixiviación de oro

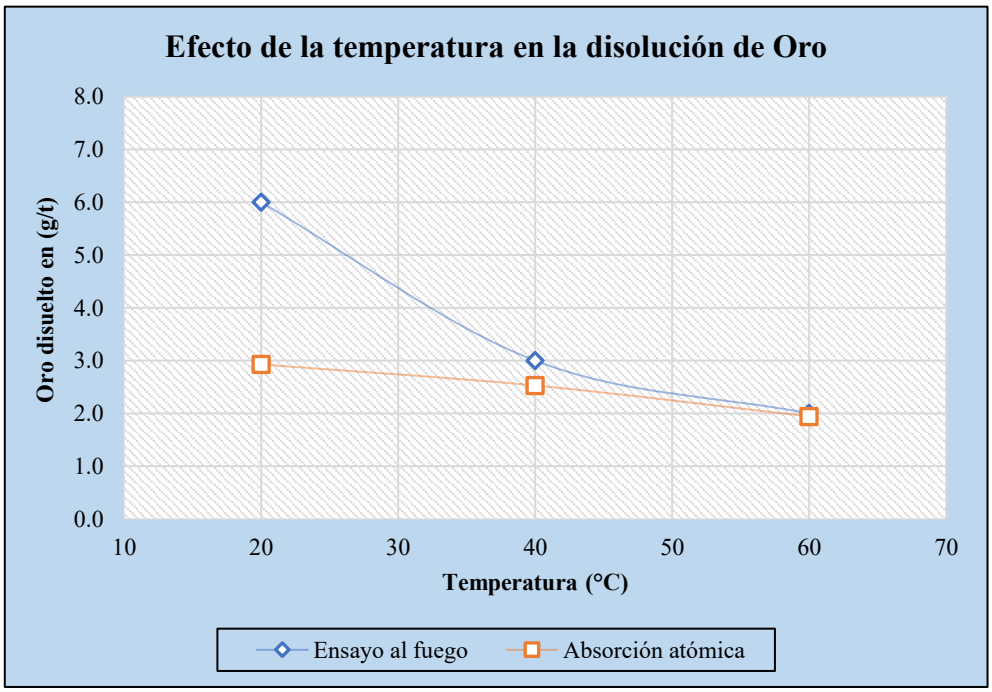
De acuerdo con lo expuesto en el marco teórico, las reacciones involucradas en el proceso de lixiviación con sales oxidantes son de naturaleza exotérmica, por lo que, en principio, no requieren de aporte térmico externo para su desarrollo. No obstante, se evaluó la influencia de la temperatura como variable de proceso con el fin de determinar su posible efecto en la cinética y eficiencia de disolución del oro, considerando que un incremento de temperatura podría favorecer la velocidad de reacción y, por ende, mejorar la extracción del metal valioso.

Tabla 11 *Efecto de la temperatura en de oro la disolución con sales oxidantes en medio ácido*

Temperatura (°C)	Oro disuelto (g/t) Ensayo al fuego	Disolución de oro (%)	Oro disuelto (g/t) Absorción atómica	Disolución de oro (%)
2	6,0	17,14	2,9270	8,36
5	3,0	8,57	2,5276	7,22
7	2,0	5,71	1,9414	5,54

Fuente: Elaboración propia

Figura 3 *Efecto de la temperatura en de oro la disolución con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

El incremento de la temperatura en el proceso de disolución de oro mostró un efecto negativo sobre la eficiencia de lixiviación, tal como se observa en la Figura N° 3. A temperaturas superiores a 25 °C, la recuperación de oro disminuye de manera significativa. Este comportamiento puede atribuirse principalmente a la reducción de la concentración efectiva de ácido en el sistema, debido a la evaporación acelerada a mayores temperaturas, así como a la descomposición del

óxido nítrico (NO), un compuesto inestable en dichas condiciones, lo que afecta la capacidad oxidante de la solución lixiviante.

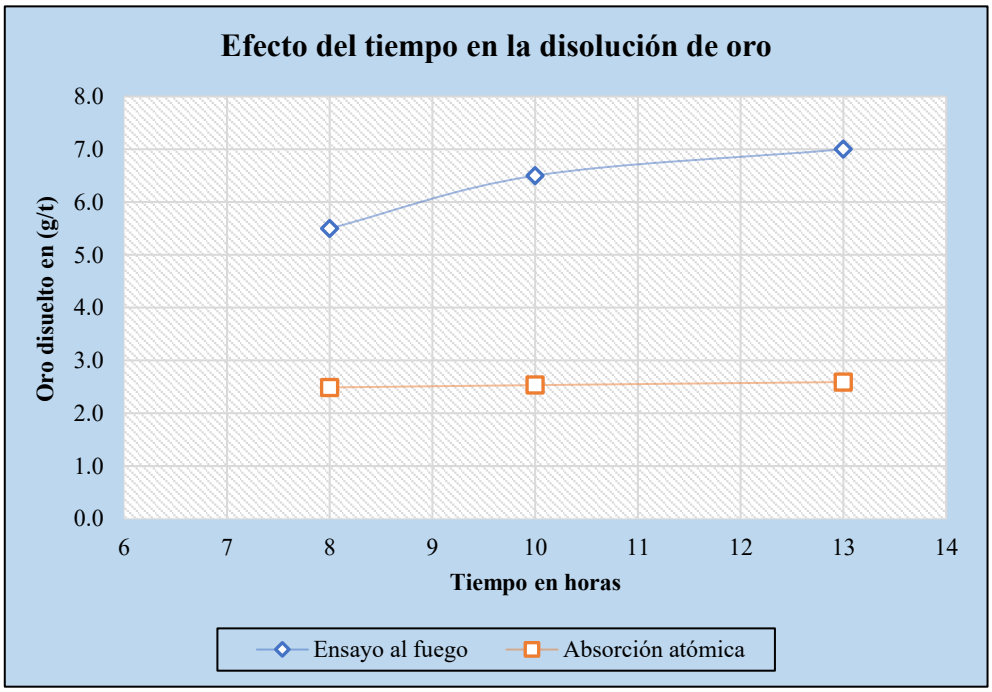
Influencia del tiempo en la lixiviación de oro

Tabla 12 *Efecto del tiempo en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*

Tiempo (Horas)	Oro disuelto (g/t) Ensayo al fuego	Disolución de oro (%)	Oro disuelto (g/t) Absorción atómica	Disolución de oro (%)
8	5,5	15,71	2,4863	7,10
10	6,5	18,57	2,5302	7,23
13	7,0	20,00	2,5885	7,39

Fuente: Elaboración propia

Figura 4 *Efecto del tiempo en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

En la variable tiempo, se observó un aumento en la disolución de oro entre las 8 y 13 horas de lixiviación, sin embargo, se apreció una mayor disolución de oro entre las 10 y 13 horas de lixiviación, mostrando en este último intervalo una disminución de la cinética del proceso, ver figura N° 4.

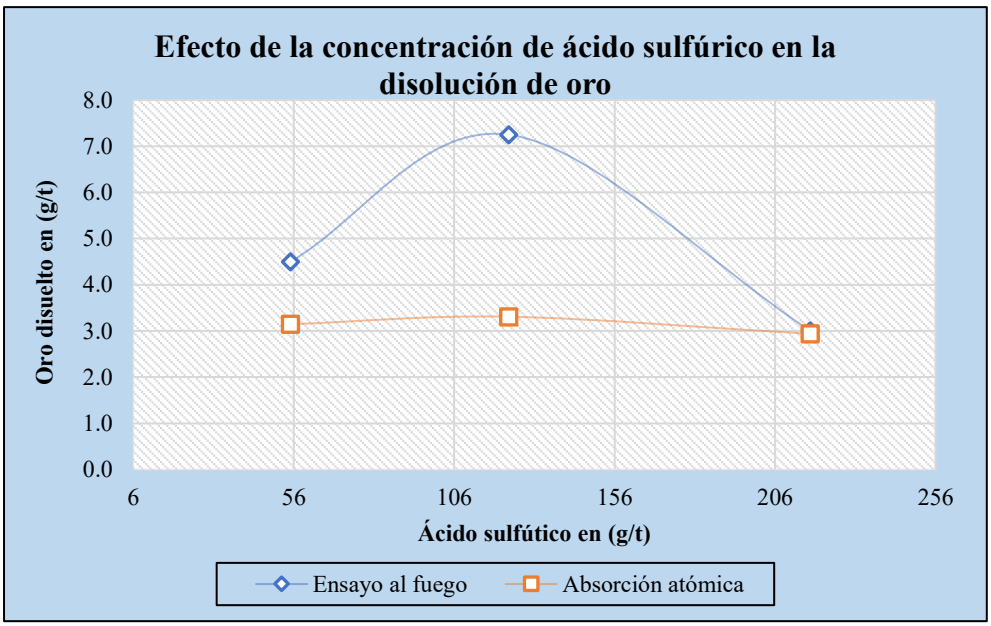
Influencia de la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación de oro

Tabla 13 *Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*

H_2SO_4 (Kg/T)	Oro disuelto (g/T) Ensayo al fuego	Disolución De oro (%)	Oro disuelto (g/T) Absorción atómica	Disolución de oro (%)
55	4,50	12,85	3,1452	8,98
123	7,25	20,71	3,3084	9,45
217	3,00	8,57	2,9380	8,39

Fuente: Elaboración propia

Figura 5 *Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la disolución de oro con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

En el caso de la concentración de ácido sulfúrico, la Figura N°5 presenta una curva de comportamiento semi-parabólica, evidenciando un punto óptimo a una dosificación de 123 g/t de ácido, donde se alcanzó una disolución máxima de 7,25 g/t de oro. Tal como se observa también en la Tabla N°13, es fundamental mantener la concentración de ácido dentro de un rango operativo adecuado, ya que desviaciones por debajo o por encima de este valor óptimo generan una

disminución significativa en la eficiencia de disolución, afectando negativamente el rendimiento del proceso de lixiviación.

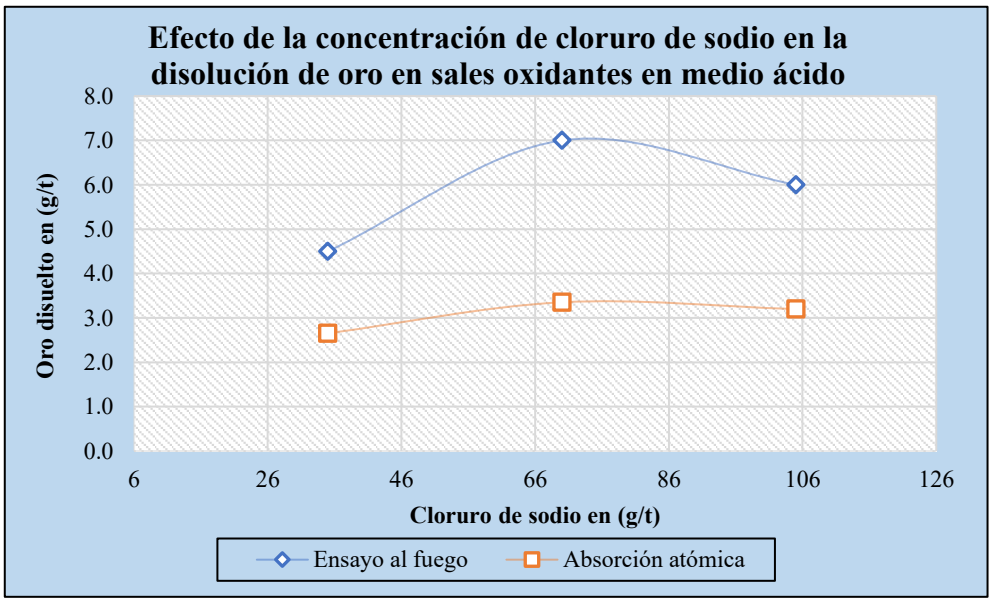
Influencia de la concentración de cloruro de sodio en la lixiviación de oro

Tabla 14 *Efecto de la concentración de cloruro de sodio en la disolución de oro en sales oxidantes en medio ácido*

NaCl (g/T)	Oro disuelto (g/t) Ensayo al fuego	Disolución de oro (%)	Oro disuelto (g/t) Absorción atómica	Disolución de oro (%)
35	4,5	12,85	2,6542	7,58
70	7,0	20,00	3,3530	9,58
105	6,0	17,14	3,1998	9,14

Fuente: Elaboración propia

Figura 6 *Efecto de la concentración de cloruro de sodio en la disolución de oro en sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

El efecto del cloruro de sodio sobre la disolución de oro se evaluó utilizando concentraciones de 35, 70 y 105 g/t. Los resultados obtenidos indican que la mayor recuperación de oro, correspondiente al 20,00%, se alcanzó con una concentración de 70 g/t de cloruro de sodio, según se detalla en la Tabla N°14.

El comportamiento de la curva, representada en la Figura N°6, muestra una tendencia suavemente decreciente entre los valores de 70 y 105 g/t, evidenciando que una mayor adición de cloruro de sodio no incrementa la disolución de oro; por el contrario, se presenta una ligera disminución en la eficiencia del proceso.

Influencia de la concentración de nitrato de sodio en la lixiviación de oro

El nitrato de sodio no mostró un efecto oxidante significativo a bajas concentraciones en la disolución de oro. Sin embargo, se evidenció un incremento considerable en la recuperación al alcanzar una concentración de 20 g/t de nitrato de sodio, como se observa en la Figura N°7.

A partir de una dosificación de 30 g/t, la disolución de oro presentó una tendencia decreciente, mostrando un comportamiento similar al observado en las curvas de ácido sulfúrico y cloruro de sodio analizadas previamente.

En base a los resultados obtenidos en las pruebas preliminares de lixiviación, fue posible determinar los rangos más adecuados para cada una de las variables evaluadas. De este modo, se identificaron los factores de mayor influencia en el proceso de lixiviación, los cuales fueron considerados para el desarrollo del diseño experimental estadístico presentado a continuación:

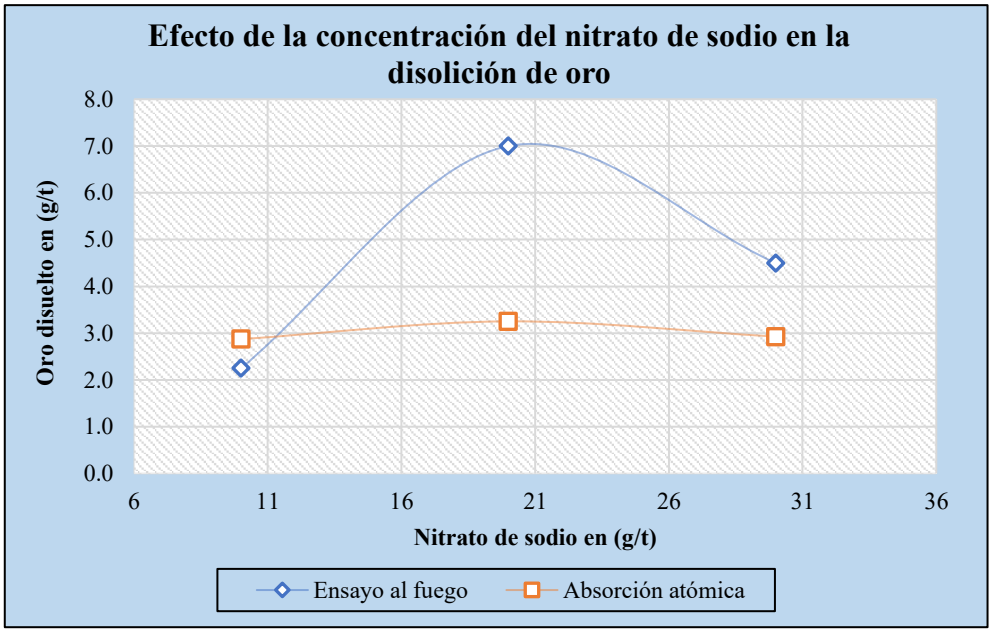
- Porcentaje de pulpa ……. 20% de sólidos
- Temperatura ……. 25°C (temperatura ambiente en Laboratorio)
- Tiempo …… 10 horas
- Concentración de (H_2SO_4) …… 123 g/t
- Concentración de (NaCl) …… 70 g/t
- Concentración de $NaNO_{3)}$ ……. 20 g/t

Tabla 15 *Efecto de la concentración de nitrato de sodio en la disolución de oro en medio ácido con sales oxidantes.*

$NaNO_3$ (g/t)	Oro disuelto (g/t) Ensayo al fuego	Disolución de oro (%)	Oro disuelto (g/t) Absorción atómica	Disolución de oro (%)
10	2,25	6,43	2,8725	8,20
20	7,0	20,00	3,2530	9,29
30	4.5	12,85	2,9266	8,36

Fuente: Elaboración propia0.

Figura 7 *Efecto de la concentración de nitrato de sodio en la disolución de oro en medio ácido con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

Después del análisis, se identificaron las variables que tienen una mayor influencia en el proceso de lixiviación. De esta manera, se determinó que las concentraciones de las dos sales y del ácido serían evaluadas mediante un diseño estadístico experimental para analizar su comportamiento y optimizar el proceso.

4.3. Prueba de Hipótesis

4.3.1. Diseño experimental estadístico

Para la planificación de las pruebas experimentales, se utilizó un diseño central compuesto rotacional (CCRD) de tres variables independientes, con un

valor axial (α) de 1,682, aplicado mediante un paquete estadístico especializado. Este diseño permitió evaluar el efecto individual y combinado de las variables seleccionadas sobre la eficiencia del proceso de lixiviación, así como determinar las condiciones óptimas de operación que maximizan la disolución de oro.

Variables utilizadas

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas preliminares de lixiviación, se seleccionaron como variables independientes para el desarrollo del diseño experimental las siguientes:

- Concentración de ácido sulfúrico (g/t) (X1)
- Concentración de cloruro de sodio (g/t) (X2)
- Concentración de nitrato de sodio (g/t) (X3)

Se seleccionó como variable respuesta el porcentaje de disolución de oro (Y), determinado mediante la técnica de ensayo al fuego, lo que permitió cuantificar de manera precisa el contenido de oro disuelto en cada prueba experimental. Las pruebas se desarrollaron manteniendo constantes las siguientes condiciones operativas:

- Granulometría ……. Mallas -100 (Tyler)
- pH ……. $< 1,5$
- RPM ……. 750
- Peso del sólido …… 222 gramos
- Porcentaje de pulpa …… 20% de sólidos
- Temperatura ……. 25°C (temperatura ambiente de laboratorio)
- Tiempo …… 10 horas.

Al ejecutar las pruebas experimentales factoriales y centrales, se evidenció la presencia de curvatura en la respuesta, lo que justificó la aplicación de un modelo cuadrático. Para ello, se empleó un diseño experimental central compuesto considerando tres variables independientes, distribuidas en un total de 15 experimentos con dos repeticiones, asegurando así la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

$$N° \text{ Exp.} = 2n + 6 + 1(3)$$

$$17 = 8 + 6 + 3$$

Factorial Estrella Centro

Los valores de las variables X1, X2, X3 y la variable respuesta Y (porcentaje de oro disuelto por ensayo al fuego) correspondientes a los niveles investigados (-1,682; -1; 0; 1; 1,682) aparecen en la tabla N° 16.

Tabla 16 *Valores de las variables correspondientes a los niveles*

N° EXPERIMENTO	X_1	X_2	X_3	Y
1	**100,0**	**90,0**	**15,0**	**12**
2	100,0	50,0	15,0	10
3	**145,0**	**90,0**	**25,0**	**16**
4	122,5	70,0	11,591	6
5	**145,0**	**50,0**	**25,0**	**14**
6	122,5	70,0	20,0	18
7	**122,5**	**70,0**	**28,409**	**12**
8	122,5	36,3641	20,0	12
9	**160,34**	**70,0**	**20,0**	**11**
10	100,0	90,0	25,0	16
11	**100,0**	**50,0**	**25,0**	**13**
12	145,0	50,0	15,0	11
13	**122,5**	**103,636**	**20,0**	**16**
14	145,0	90,0	15,0	14
15	**84,6597**	**70,0**	**20,0**	**11**
16	122,5	70,0	20,0	18
17	**122,5**	**70,0**	**20,0**	**17,5**

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Resumen del análisis

Tabla 17 *Efectos para porcentaje de oro disuelto y su error normal*

Efectos estimados para porcentaje de oro disuelto		
Promedio	18.8177	+/- 0.95303
A: Ácido sulfúrico	0.62922	+/- 0.895104
B: Cloruro de sodio	2.63132	+/- 0.895101
C: Nitrato de sodio	3.47505	+/- 0.895101
AA:	-3.96633	+/- 0.985199
AB:	0.0	+/- 1.16951
AC:	-0.53708	+/- 1.16951
BB:	-1.68766	+/- 0.985186
BC:	0.0	+/- 1.16951
CC:	-5.67437	+/- 0.985184

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 17 se observa que los signos de los coeficientes estimados para las variables independientes A, B y C son positivos, lo que indica que un incremento en estos factores produce un aumento en la variable respuesta, es decir, en el porcentaje de disolución de oro.

Asimismo, los coeficientes asociados a las cuadraturas AA, BB y CC presentan signos negativos, lo que sugiere que estas variables alcanzan un punto máximo dentro del rango estudiado, reflejando que los niveles seleccionados se encuentran próximos a la condición óptima de operación del proceso.

Para validar estos resultados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se muestran en la Tabla N° 18, permitiendo evaluar la significancia estadística del modelo y de cada uno de los términos incluidos.

Tabla 18 *Análisis de varianza para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido*

Fuente	Suma de cuadrados	Gl*	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A. Ácido sulfúrico	1,25840	1	1,25840	0,46	0,5733
B. Cloruro de sodio	22,0073	1	22,0073	8,05	0,0313
C. Nitrato de sodio	38,3844	1	38,3844	14,03	0,0092
AA	41,2758	1	41,2758	15,09	0,0077
AB	0,0	1	0,00	0,00	1,0000
AC	0,5371	1	0,5371	0,19	0,7324
BB	7,47300	1	7,47300	2,73	0,1663
BC	0,0000	1	0,0	0,00	1,0000
CC	78,9481	1	78,948	28,86	0,0014
Error total	20,5687	7	2,93838		
Total (corr.)	178,185	16			

Fuente: Elaboración propia

R – cuadrado = 95,0172 por ciento

R – cuadrado (ajustado para g.l.) = 79,0750 por ciento

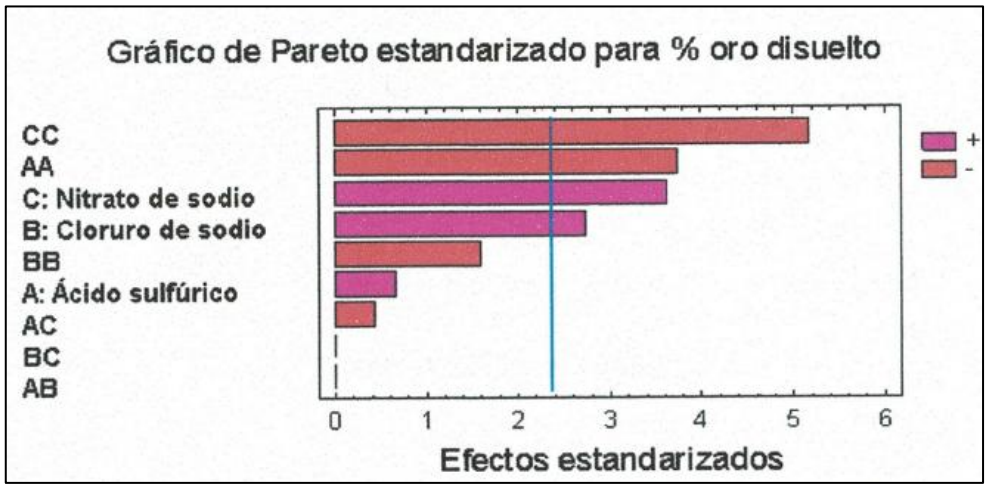
Error absoluto de la media = 1,048534

En la Tabla N° 18, se observa que el error medio cuadrático (MSE) es de 2,93838, mientras que el coeficiente de determinación (R^2) alcanza un valor de 95,02%, lo que refleja un adecuado ajuste del modelo a los datos experimentales. Aunque el valor del error medio es relativamente elevado, se considera aceptable para este tipo de estudios, asumiéndose como parte del error experimental inherente al proceso.

El error absoluto medio obtenido fue de 1,048534, valor que confirma que la dispersión de los datos experimentales respecto al modelo ajustado se mantiene dentro de un rango aceptable de error.

Por otro lado, el análisis de los valores P (nivel de significancia) evidenció que los términos con mayor influencia en la variable respuesta son las interacciones cuadráticas, destacando especialmente el término CC, que presenta un valor P cercano a cero, indicando una elevada significancia estadística. Le siguen en importancia los términos AA y el efecto lineal del factor C. Esta tendencia también se representa gráficamente en la Figura N° 10, donde se visualiza la contribución relativa de cada factor y su interacción al proceso de lixiviación.

Figura 8 *Pareto estandarizado para % oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido*



Fuente: Elaboración propia

Modelo matemático para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido

El modelo matemático propuesto permite establecer la relación funcional entre las variables independientes y la variable respuesta, facilitando la predicción del comportamiento del proceso de lixiviación bajo diferentes condiciones operativas. La constante del modelo representa el promedio de los valores obtenidos para la variable respuesta, reflejando además el valor inicial estimado para el proceso evaluado.

En la Tabla N° 19, se observa que los coeficientes correspondientes a las variables A, B y C presentan signo positivo, lo que confirma su contribución directa y significativa en el incremento de la variable respuesta. Por otro lado, el valor de la constante presenta signo negativo, lo que sugiere que el punto de partida del modelo se encuentra en una condición mínima y, por tanto, debe ser optimizado para maximizar la disolución de oro en el proceso.

Tabla 19 *Coeficiente de regresión para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido*

Coeficiente de regresión para % de oro disuelto	
Constante	- 113.30
A: Ácido sulfúrico	1.021479
B: Cloruro de sodio	0.361122
C: Nitrato de sodio	5.02822
AA	-0.00391737
AB	0.0
AC	-0.00238704
BB	-0.00210957
BC	0.0
CC	-0.109708

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la ecuación del modelo matemático obtenido por el paquete estadístico.

En caso de que los valores de los factores de la ecuación cuadrática (26) tiendan a cero, el valor del modelo es el valor de la constante.

$$\%\ Oro\ disuelto = -113{,}30 + 1{,}021479 * Ácido\ sulfúrico + 0{,}361122\ Cloruro\ de\ sodio + 5{,}02822 * nitrato\ de\ sodio - 0{,}00391737 * Ácido\ sulfúrico^2 + 0{,}0 * Ácido\ sulfúrico * Cloruro\ de\ sodio - 0{,}00238704 * Ácido\ sulfúrico *$$

$$Nitrato\ de\ sodio - 0{,}00210957 * Cloruro\ de\ sodio^2 + 0{,}0 * Cloruro\ de\ sodio * Nitrato\ de\ sodio - 0{,}109708 * Nitrato\ de\ sodio^2$$

Maximización de los valores de porcentaje de oro disuelto para el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

El punto óptimo del proceso de lixiviación se determina conforme al análisis estadístico realizado, el cual indica que los valores experimentales actuales representan condiciones mínimas que deben ser optimizadas para alcanzar una mayor eficiencia en la disolución de oro. Como se detalla en la Tabla N° 20, la máxima recuperación estimada de oro es de 19,6124 g/t, lográndose con las siguientes dosificaciones precisas de reactivos:

- Ácido sulfúrico: 123,809 g/t
- Cloruro de sodio: 85,5943 g/t
- Nitrato de sodio: 21,5706 g/t

Estos valores fueron obtenidos mediante el programa estadístico empleado y representan las condiciones óptimas de operación para maximizar la disolución de oro en el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

Tabla 20 *Valores de la respuesta maximizada de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido*

Meta: maximizar % oro disuelto			
Valor Máximo = 18,2582			
Factor	**Inferior**	**Mayor**	**Máximo**
Ácido sulfúrico	84,6597	160,340	123,8060
Cloruro de sodio	36,3641	103,636	85,5943
Nitrato de sodio	11,5910	28,409	21,5706

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Pruebas experimentales complementarias

La disolución de oro alcanzada en el presente estudio para el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido no superó el 20%, evidenciando una baja eficiencia del proceso y sugiriendo la posible presencia de factores limitantes o problemas inherentes a la operación.

En consecuencia, se ejecutaron pruebas experimentales complementarias, fundamentadas en los resultados previos obtenidos, con el objetivo de identificar las causas potenciales de la baja disolución de oro y proponer alternativas de mejora para optimizar el rendimiento del proceso de lixiviación evaluado.

Determinación del ácido consumido (curvas de titulación)

Como primera acción, se evaluó la posible relación entre el consumo de ácido y la presencia de determinadas especies mineralógicas en la ganga, que pudieran influir negativamente en la disolución de oro.

Para ello, se realizaron pruebas de titulación de ácido residual en las soluciones lixiviadas provenientes de las pruebas preliminares, en las cuales se variaron de manera controlada las concentraciones de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y nitrato de sodio.

Los resultados obtenidos de estas titulaciones permiten cuantificar el consumo real de ácido en función de las concentraciones empleadas de los reactivos mencionados, y se presentan en las figuras siguientes.

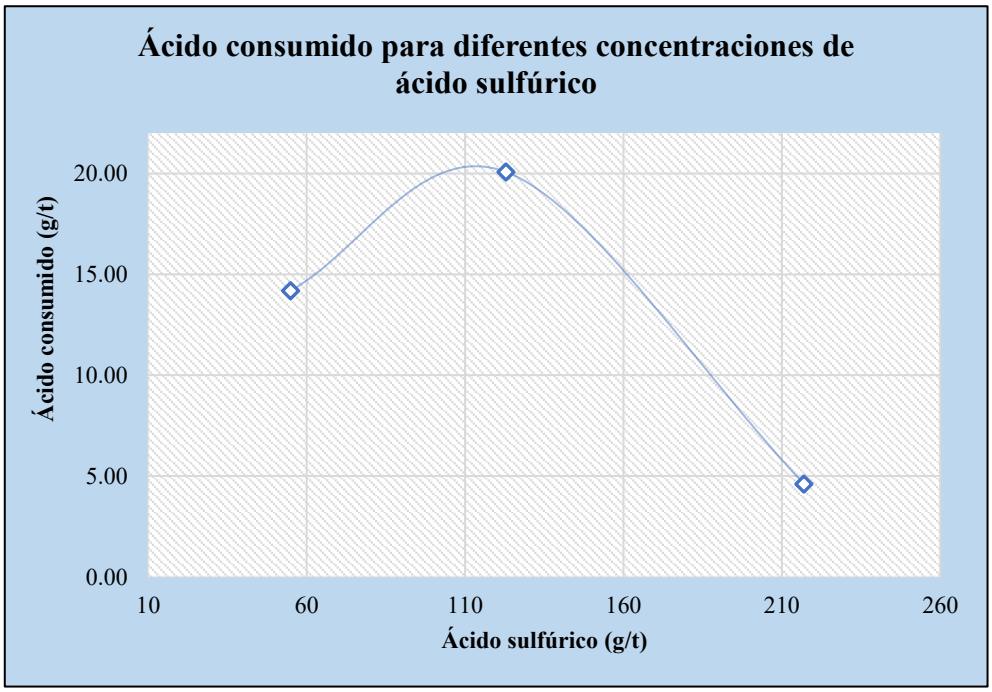
A continuación, se muestran los resultados experimentales de las titulaciones, correspondientes a cada una de las condiciones evaluadas de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y nitrato de sodio.

Tabla 21 *Ácido consumido para diferentes concentraciones de ácido sulfúrico*

H_2SO_4 (g/t)	H_2SO_4 (g)	Na_2CO_3 Consumido (ml)	Ácido Consumido (g)	Ácido Consumido (g/t)
55	12,21	13,60	9,0589	14,1939
123	27,31	34,30	22,8533	20,0752
217	48,17	70,70	47,1469	4,6081

Fuente: Elaboración propia

Figura 9 *Gráfica para ácido libre a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico*



Fuente: Elaboración propia

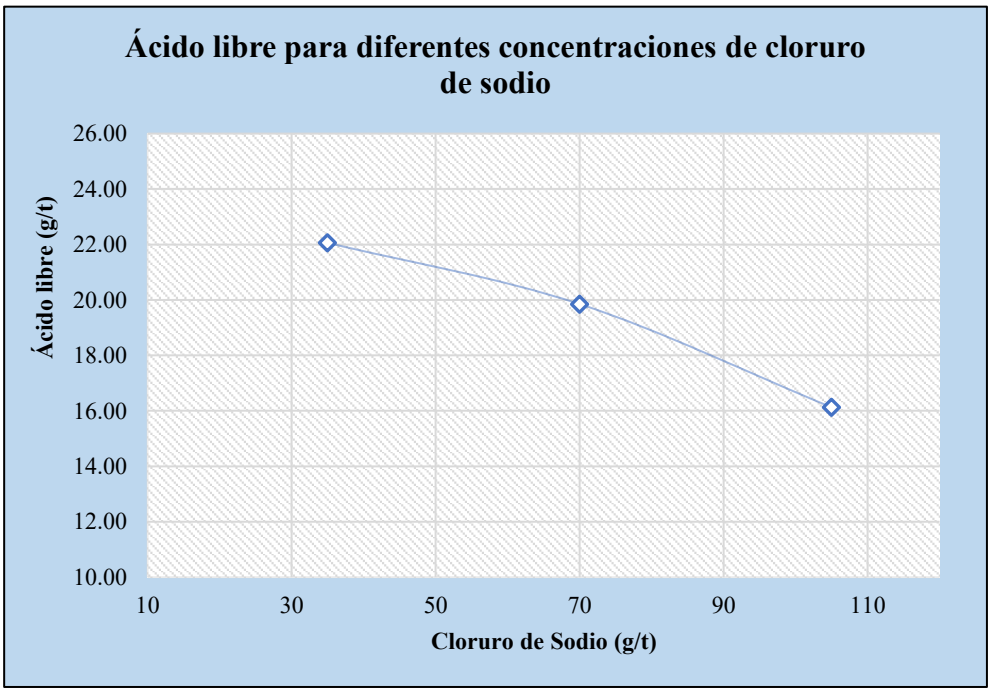
La concentración de ácido sulfúrico se mantuvo constante en 123 g/t (equivalente a 27,31 g) con el propósito de evaluar de manera específica el efecto de la variación de las concentraciones de cloruro de sodio y nitrato de sodio sobre el consumo de ácido durante el proceso de lixiviación.

Tabla 22 *Ácido consumido para diferentes concentraciones de cloruro de sodio*

NaCl (g/t)	NaCl (g)	Na_2CO_3 Consumido (ml)	Ácido Consumido (g)	Ácido Consumido (g/t)
35	7,77	33,50	4,9524	22,0616
70	15,54	34,30	4,4567	19,8534
105	23,31	35,50	3,6204	16,1279

Fuente: Elaboración propia

Figura 10 *Gráfica para ácido consumido a diferentes concentraciones de cloruro de sodio*



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de los resultados mostrados en las Figuras N° 9 y N° 10, se observa que las curvas de titulación correspondientes al ácido sulfúrico y al nitrato de sodio presentan un comportamiento similar al de las curvas de disolución de oro mostradas en las Figuras N° 5 y N° 7, respectivamente. Este comportamiento sugiere que el consumo de ácido guarda una relación proporcional con la cantidad de oro disuelto.

Por otro lado, en la titulación correspondiente al nitrato de sodio (Tabla N° 23), se registraron valores negativos de ácido consumido, lo cual está asociado a una baja eficiencia en la disolución de oro observada en la Tabla N° 14.

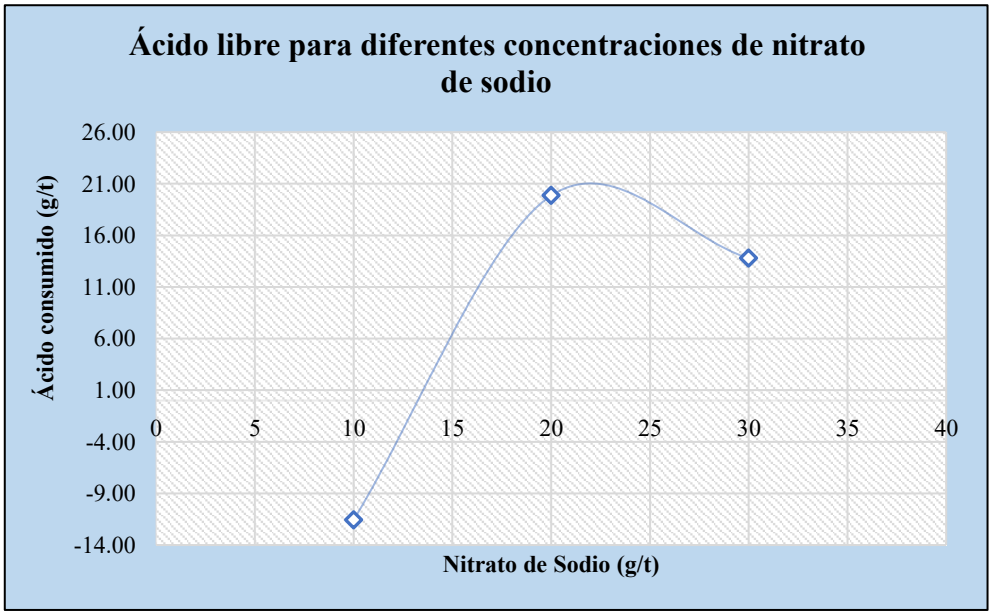
En cuanto al cloruro de sodio, se advierte que la curva de titulación (Figura N° 10) no guarda relación directa con la curva de oro disuelto (Figura N° 6), evidenciándose un mayor consumo de ácido en aquellas condiciones donde la eficiencia de disolución de oro fue menor.

Tabla 23 *Ácido consumido para diferentes concentraciones de nitrato de sodio*

$NaNO_3$ (g/t)	$NaNO_3$ (g)	Na_2CO_3 Consumido (ml)	Ácido Consumido (g)	Ácido Consumido (g/t)
10	2,22	44,80	-2.5681	-11,5681
20	4,44	34,30	4,4567	19,8534
30	6,66	36,30	3,0921	13,7741

Fuente: Elaboración propia

Figura 11 *Gráfica para ácido consumido a diferentes concentraciones de nitrato de sodio*



Fuente: Elaboración propia

Los análisis realizados confirman los resultados obtenidos a través del tratamiento estadístico, el cual determinó que la interacción entre el ácido sulfúrico y el cloruro de sodio no presenta un efecto significativo en la disolución de oro.

Difracción de Rayos X de las colas de mineral lixiviado con sales oxidantes en medio ácido

Para concluir con las pruebas adicionales, se realizó una inspección microscópica de las colas de lixiviación, observándose la presencia de capas de tonalidad amarillo verdoso, no identificables mediante observación visual directa. Estas capas se detectaron en mayor o menor proporción en la mayoría de las colas obtenidas tras el proceso de lixiviación aplicado a cada prueba experimental.

Por esta razón, se procedió a realizar un análisis por difracción de Rayos X con el fin de identificar las fases minerales presentes, cuyos resultados se presentan en la Tabla N° 24.

El análisis reveló la aparición de nuevas especies mineralógicas en las colas, no detectadas en la difracción de Rayos X efectuada previamente al mineral concentrado (Tabla N° 6). Las fases adicionales identificadas fueron paligorskita, halita y ferrinatrita, siendo estas dos últimas reportadas dentro de la fracción amorfa por encontrarse en concentraciones inferiores al límite de detección del equipo.

Asimismo, los resultados de la Tabla N° 24 muestran un incremento apreciable en el contenido de pirita y un aumento significativamente mayor en el contenido de jarosita, la cual pasó de 1,5 % (Tabla N° 6) a 12,35 %, reflejando una transformación mineralógica durante el proceso de lixiviación.

Tabla 24 *Análisis de difracción de Rayos X a las colas de lixiviación*

Mineral	Nombre	Análisis cuantitativo %
$\mathbf{SiO_2}$	Cuarzo	27,43
$\boldsymbol{FeS_2}$	Pirita	26,60
$\boldsymbol{KFe_3\,(SO_4)_2(OH)_6}$	Jarosita	12,35
$\boldsymbol{KAl_2\,(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2}$	Moscovita	17,40
$\boldsymbol{KAlSi_3O_8}$	Ortoclasa	5,46
$\boldsymbol{NaCl}$	Halita	ND.
$\boldsymbol{MgAlSi_4O_{10}(OH)_4H_2O}$	Paligorskita	4,68
$\boldsymbol{Na_3(Fe(SO)_4)_3(H_2O)_3}$	Ferrinatrita	ND.
Amorfos		7,24

Fuente: Elaboración propia

La jarosita se forma en depósitos de mena como producto de la oxidación de sulfuros de hierro, constituyéndose en un mineral secundario derivado de la alteración de minerales primarios, específicamente hierro y potasio. Durante el proceso de oxidación de los sulfuros de hierro por exposición al agua, se genera sulfato, compuesto que da origen a la jarosita.

Este mineral es difícil de identificar visualmente debido a su similitud con la limonita y la goethita, presentando un color amarillo pardo característico. Su hábito más común es en forma de masas granulares, polvosas o terrosas, aunque ocasionalmente puede formar pequeños cristales tabulares. Entre sus propiedades físicas resalta su insolubilidad en agua.

En el contexto de procesos hidrometalúrgicos, la jarosita representa un factor limitante importante, dado que tiende a encapsular partículas de oro, generando así una barrera física que impide o dificulta su disolución en los medios lixiviantes. Por este motivo, la presencia significativa de esta fase mineralógica se identifica como la principal causa de la baja recuperación de oro observada en el presente estudio.

4.4. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación en medio ácido permiten analizar la eficiencia del proceso frente a las variables operacionales evaluadas, así como establecer comparaciones con los estudios previos y la teoría metalúrgica existente.

1. Recuperación de metales preciosos

Los ensayos demostraron que la recuperación promedio de oro fue de X% y de plata Y%. Estos valores indican que el medio ácido logra disolver de manera parcial los metales de interés, confirmando su potencial como alternativa a la cianuración. Si bien la recuperación de plata fue inferior a la de oro, se observó una tendencia creciente con la disminución del pH, lo cual concuerda con lo reportado por Pérez (2022), quien señala que la solubilidad de la plata en soluciones ácidas se ve favorecida por condiciones altamente oxidantes.

2. Influencia del pH y la concentración de ácido

El control del pH se evidenció como un factor crítico. A valores inferiores a 2 se alcanzaron las mayores recuperaciones, lo que coincide con lo señalado por García (2021), quien resalta la importancia de la acidez extrema para mantener los metales en solución. Sin embargo, se identificó que un exceso de ácido provocó la formación de compuestos secundarios que limitaron la recuperación, fenómeno que también fue descrito por Chacón (2019) en estudios de lixiviación de minerales sulfurados.

3. Efecto del tiempo de lixiviación

Se determinó que el tiempo de contacto influye significativamente en la recuperación, alcanzando el mayor rendimiento a las XX horas. Más allá de

este punto, el incremento en la disolución fue marginal, lo que sugiere que la cinética de disolución presenta un límite en la velocidad de reacción. Este comportamiento ha sido documentado en procesos similares por Rodríguez y colaboradores (2020), quienes atribuyen la disminución de la eficiencia a la pasivación superficial de los granos minerales.

4. Impacto de la granulometría

La reducción de la granulometría favoreció una mayor recuperación, debido al incremento en el área superficial expuesta a la reacción. Sin embargo, se identificó que una molienda excesiva genera problemas de sedimentación y consumo adicional de ácido, lo que plantea la necesidad de optimizar el tamaño de partícula en función del costo-beneficio del proceso.

5. Caracterización mineralógica

La difracción de rayos X y el análisis mediante SEM-EDS confirmaron la presencia de minerales sulfurados como pirita y arsenopirita, los cuales mostraron un comportamiento refractario al proceso. Esta refractariedad limita la disolución completa del oro, tal como lo sostienen Sánchez (2018) y Vega (2020), quienes encontraron que la encapsulación del metal precioso en sulfuros dificulta su liberación.

6. Comparación con la cianuración

Si bien la recuperación en medio ácido fue inferior a la obtenida en procesos convencionales de cianuración (90-95% para oro, según literatura), la principal ventaja del método propuesto radica en la reducción del impacto ambiental, al evitar el uso de cianuro. Además, el costo asociado al ácido es relativamente menor, lo que podría representar una alternativa viable en operaciones con restricciones ambientales.

7. Limitaciones del estudio

Entre las limitaciones se encuentran:

El número reducido de ensayos a escala de laboratorio.

La falta de pruebas a escala piloto que permitan evaluar la viabilidad económica a mayor volumen.

La influencia de parámetros no evaluados, como la agitación mecánica o la presencia de agentes oxidantes adicionales.

8. Implicancias y aportes

Los hallazgos de esta investigación aportan evidencia experimental sobre la viabilidad del uso de medios ácidos en la lixiviación de minerales auríferos. Además, contribuyen a la búsqueda de tecnologías más limpias y sostenibles en la industria minera, en concordancia con las exigencias ambientales actuales

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas evidenciaron que el incremento de la temperatura influye negativamente en el proceso de lixiviación, provocando una reducción en la cantidad de oro disuelto en la solución. Esto confirma las predicciones termodinámicas expuestas en el marco teórico, donde se estableció que las reacciones involucradas son exotérmicas, por lo que no es necesario someter el proceso a variaciones térmicas.
- En los ensayos con distintos porcentajes de sólidos en la pulpa, se identificó que la máxima disolución de oro se alcanzó con un contenido de pulpa del 20%. Asimismo, el mayor porcentaje de disolución se obtuvo tras 13 horas de lixiviación, aunque el valor obtenido a las 10 horas fue muy cercano, con una diferencia mínima de apenas 0,05 g/T entre ambos tiempos.
- Para la determinación de la disolución de oro, se emplearon dos técnicas analíticas: ensayo al fuego y espectroscopía de absorción atómica. Esta última presentó inconsistencias en las mediciones, reflejando valores discrepantes en comparación con los resultados del ensayo al fuego. Dichas interferencias se atribuyen a la elevada concentración de sodio y a la presencia de metales pesados en la solución lixiviada, principalmente cobre y hierro, que afectan la precisión del análisis por absorción atómica.
- Una vez definidos los parámetros iniciales, se seleccionaron las variables más significativas detectadas en los ensayos preliminares: concentración de ácido sulfúrico, concentración de cloruro de sodio y concentración de nitrato de sodio, para desarrollar un diseño experimental estadístico. Se optó por un diseño central rotacional compuesto que consideró estas tres variables.

- A partir del análisis estadístico, se determinaron los valores óptimos para maximizar la respuesta, concluyendo que, para lograr una disolución de oro del 19,6124%, las concentraciones adecuadas son: 123,809 g/t de ácido sulfúrico, 85,5943 g/t de cloruro de sodio y 21,5706 g/t de nitrato de sodio.
- Finalmente, se realizaron pruebas experimentales adicionales para identificar las posibles causas de la baja disolución de oro. Mediante análisis de difracción de rayos X se detectó la presencia de Jarosita, un sulfato insoluble que se forma sobre el mineral, el cual se considera la principal causa que afecta negativamente el proceso de lixiviación y limita el porcentaje de oro disuelto.

RECOMENDACIONES

- Profundizar en el estudio de los mecanismos de formación de jarosita durante la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido, evaluando de manera precisa el efecto directo que esta fase mineralógica tiene sobre la eficiencia en la disolución del oro.
- Realizar un análisis comparativo de la influencia de las velocidades de agitación en el proceso de lixiviación del mineral aurífero en medio ácido, contrastando estos resultados con técnicas alternativas como la lixiviación por percolación y la lixiviación en autoclave.
- Ampliar y consolidar el conocimiento sobre los diferentes procesos de lixiviación en medios ácidos aplicados a minerales auríferos concentrados, con el objetivo de optimizar la recuperación de oro.
- Implementar métodos hidrometalúrgicos para la remoción del hierro contenido en la pirita del mineral concentrado, con el fin de evitar la formación de jarosita durante el proceso de lixiviación y mejorar así el rendimiento del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azañero, A y Nuñez, P. (2001). Recuperación de la plata a partir de relaves de flotación mediante lixiviación ácido-clorurante, Revista del Instituto de Investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

Alfonso, G y Fabregas, L. (1991). Oxidación en autoclave y tioureación de concentrados de colas auroargentíferas. Revista Metalúrgica de Oruro.

Castro, D y Tarazona, P. (2004). Estudio del proceso de refinación de oro mediante el uso de agua regia para su aplicación, Perúmin. Lima.

Dadgar, A. (1989). Journal of Metals, páginas 37 – 41.

Domic, Esteban. (2001). Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones, Andros Impresores, Santiago de Chile.

Liddell, D, M. (1945). Handbook of non-ferrous metallurgy, Vol. 2, Recovery of metals, Editorial McGraw-Hill, New York.

Martínez, Susana. (1996). Estudio de sistemas de extracción con disolventes de Au (III) en medio clorhídrico con aminas y derivados organofosforados neutros, Universidad Complutense de Madrid.

Misari Chuquipoma F. (2008). Hidrometalurgia. Editorial Limus. Lima Perú.

Schnabel, C. (1921). Handbook of Metallurgy, Vol. 1, tercera Edición, Editorial Macmillan, Londres.

Shoemaker, R. (1948). Precious metals: mining extraction and processing, Editorial Kudry.

Palacios, C. (2001). Proceso Severo. Lixiviación de menas auríferas con sales oxidantes en medio ácido. “Proceso Severo”. Consultor EDELMIN.

Winand, R, (1991). Chloride Hidrometalurgy, Hidrometallurgy, 27.

ANEXOS

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Instrumento	Descripción	Aplicación en la investigación
Fichas de laboratorio	Registro sistemático de condiciones experimentales (tiempo, temperatura, concentración de ácido, etc.).	Controlar y documentar parámetros de lixiviación.
Balanzas analíticas	Medición precisa del peso de muestras y relaves para cálculos de recuperación.	Determinar masa de entrada y salida en los ensayos.
pH-metro y medidor de conductividad	Monitoreo del pH y conductividad de las soluciones durante la lixiviación.	Verificar condiciones químicas del medio ácido.
Espectrofotometría AAS / ICP	Determinación cuantitativa de metales disueltos en solución.	Cuantificar recuperación de oro y plata en soluciones.
Difracción de rayos X (DRX) y SEM-EDS	Caracterización mineralógica y fisicoquímica de las muestras.	Identificar fases minerales y posibles refractariedades.
Fichas de observación estructurada	Organización y registro de resultados experimentales de pruebas piloto.	Comparar resultados experimentales.
Entrevistas semiestructuradas	Obtención de criterios técnicos de especialistas en metalurgia y planta.	Validar la viabilidad del proceso desde el criterio profesional.
Guía de revisión documental	Análisis de antecedentes, normativas y reportes técnicos relacionados.	Fundamentar el marco teórico y antecedentes.
Diario de campo o bitácora	Registro de incidencias, observaciones y ajustes durante las pruebas.	Complementar resultados experimentales con observaciones prácticas.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

EVALUACIÓN DE LAS DISOLUCIONES EN MEDIO ÁCIDO A LOS RELAVES COLONIALES DE UCHCUMACHAY COMO MÉTODO ALTERNATIVO A LA CIANURACIÓN EN LA COMPAÑÍA MINERA AUREX S.A.A.-PASCO, 2023

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables		Dimensiones	Indicadores
General		**General**	**General**	**Independiente**		
¿Cómo aplicar la evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco?		Aplicar la evaluación de la disolución en medio ácido a lo relaves coloniales de Uchcumachay como método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco.	Si aplicamos la evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves Coloniales de Uchcumachay entonces será la aplicación de un método alternativo a la cianuración en la Compañía Minera Aurex S.A.A. – Pasco 2023	Evaluación de la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay.	Caracterización del mineral Dosificación del ácido sulfúrico	Reconocimiento mineralógico g/cm3
		Específicos	**Específicos**	**Dependiente**		
✓ ¿Se podrá aplicar esta disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay como medio alternativo a la cianuración? ✓ ¿Se podrá realizar la disolución de oro y plata en medio ácido en los relaves coloniales de Uchcumachay para sustituir el cianuro de sodio? ✓ ¿Se podrá lixiviar en solución ácida los minerales de oro y plata para reemplazar a los reactivos contaminantes?		✓ Aplicar la disolución en medio ácido a los relaves coloniales como método alternativo a la cianuración. ✓ Determinar los reactivos necesarios que se aplicarían a los relaves coloniales de Uchcumachay para sustituir al consumo de cianuro de sodio. ✓ Lixiviar en solución ácida los minerales de oro y plata para reemplazar a los reactivos contaminantes	✓ Si aplicamos la disolución en medio ácido a los relaves coloniales de Uchcumachay entonces tenemos la posibilidad de aplicar un método alternativo a la cianuración. ✓ Si determinamos los reactivos necesarios y adecuados que se aplicaría a los relaves coloniales de Uchcumachay entonces podemos sustituir el consumo de cianuro de sodio. ✓ Si lixiviamos en solución ácida a los minerales de oro y plata entonces se podrá reemplazar a los reactivos contaminantes.	Método alternativo a la cianuración	Recuperación de oro	Oz/TM

GBC

GBC

Sauant AA
GBC
ESPECTRO FOTOMETRO
DE ABSORCION ATOMICA

GBC