



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

Recuperación de oro mediante pretratamiento en procesos de lixiviación con cianuro a partir de relaves de flotación piritosos en la provincia de Casma – Ancash

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

Luis Andrés CARREÑO OJEDA

Juan Jose ESPINOZA BARANDIARAN

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Carreño, M. & Espinoza, J (2025). *Recuperación de oro mediante pretratamiento en procesos de lixiviación con cianuro a partir de relaves de flotación piritosos en la provincia de Casma – Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Luis Andres Carreño Ojeda
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48181719
URL de ORCID	No aplica
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Juan Jose Espinoza Barandiaran
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47798398
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Vladimir Alejandro Arias Arce

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07009405
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Luis Vidarte Merizalde
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.16 Lixiviación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Centro poblado: Ciudad Universitaria de Lima Urbanización: Los Cipreses Manzana y lote: No aplica Calle: Germán Amézaga N°375 Latitud: -12.05611 Longitud: -77.08444
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Otras ingenierías y tecnologías https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.02



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 12, del mes de noviembre del 2025 siendo las 12:00 m, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Dr. VLADIMIR ALEJANDRO, Arias Arce
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 26.11.2025 14:35:45 -05:00

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada:
«RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE PRETRATAMIENTO EN PROCESOS DE
LIXIVIACIÓN CON CIANURO A PARTIR DE RELAVES DE FLOTACIÓN PIRITOSOS EN
LA PROVINCIA DE CASMA - ANCASH» presentada por Don: JUAN JOSE ESPINOZA
BARANDIARAN, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de
Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al
graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento
vigente, cuyo resultado fue la nota de:

CATORCE. (14) APROBADO

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del
Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica,
otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Juan Jose
Espinoza Barandiaran**.

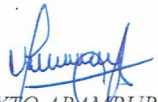
Siendo las 1:00 p.m. horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas
Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 12 de noviembre del 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Dr. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 12, del mes de noviembre del 2025 siendo las 12:00 m, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Dr. VLADIMIR ALEJANDRO, Arias Arce
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 26.11.2025 14:36:20 -05:00

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: **«RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE PRETRATAMIENTO EN PROCESOS DE LIXIVIACIÓN CON CIANURO A PARTIR DE RELAVES DE FLOTACIÓN PIRITOSOS EN LA PROVINCIA DE CASMA - ANCASH»** presentada por Don: LUIS ANDRÉS CARREÑO OJEDA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

CATORCE

(14)

APROBADO

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Luis Andrés Carreño Ojeda**.

Siendo las **1:00 p.m** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 12 de noviembre del 2025

Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente

Dr. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro

Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º001178-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE PRETRATAMIENTO EN PROCESOS DE LIXIVIACIÓN CON CIANURO A PARTIR DE RELAVES DE FLOTACIÓN PIRITOSOS EN LA PROVINCIA DE CASMA - ANCASH” presentado por los bachilleres **LUIS ANDRÉS Carreño Ojeda** y **JUAN JOSE Espinoza Barandarian** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **18%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 10 de octubre del 2023

Firma del Asesor _____

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS

DNI: 08608364

DEDICATORIA

El desarrollo del siguiente proyecto está dedicado a nuestros progenitores, quienes, a pesar de cualquier circunstancia vivida, nunca dejaron de creer en nosotros.

AGRADECIMIENTO

Los sinceros agradecimientos a nuestro profesor y asesor el Dr. Vidal Aramburú, quien nos supo orientar en la elaboración y desarrollo del proyecto. De la misma manera, un agradecimiento a cada uno de los profesores de la E.P de metalurgia – UNMSM.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	16
1.1. Descripción de la Problemática	17
1.2. Formulación del Problema	18
1.1.1. Problema General	18
1.1.2. Problemas Específicos	18
1.3. Justificación de la Investigación	18
1.3.1. Justificación Tecnológica.....	18
1.3.2. Justificación Económica.....	19
1.4. Alcance de la Investigación.....	19
1.5. Objetivos	19
1.5.1. Objetivo General.....	19
1.5.2. Objetivos Específicos.....	20
1.6. Hipótesis y Variables	20
1.6.1. Hipótesis General.....	20
1.6.2. Hipótesis Específicas	20
1.6.3. Identificación de Variables.....	21
1.6.4. Operacionalización de Variables	21
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Antecedentes.....	23

2.2.	Bases Teóricas	24
2.2.1.	Beneficio de oro.....	24
2.2.1.1.	Lixiviación de Menas con Contenido de Metales Preciosos	24
2.2.2.	Minerales Refractarios	29
2.2.2.1.	Importancia del Pre-tratamiento en Minerales Refractarios.....	30
2.2.2.2.	Pre-aireación como Pre-tratamiento en Minerales Refractarios	32
2.3.	Glosario de Términos.....	32
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		35
3.1.	Procedimiento Metodológico de la Investigación	35
3.2.	Tipo y Diseño de Investigación	35
3.3.	Unidad de Análisis	36
3.3.1.	Casma.....	36
3.3.1.1.	Etimología de la Palabra Casma	36
3.3.1.2.	Ubicación Geográfica.....	37
3.3.1.3.	Límites.....	37
3.3.1.4.	Acceso	37
3.4.	Tamaño de muestra	39
3.5.	Selección Tamaño de Muestra.....	39
CAPÍTULO IV: PRUEBAS EXPERIMENTALES		40
4.1.	Mineralogía del Relave	40
4.1.1.	Interpretación de la Distribución de Minerales Observados	41
4.1.2.	Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación.....	42
4.2.	Pruebas de Moliendabilidad del Relave.....	46

4.3.	Lixiviación en Botella a Diferentes Granulometrías.....	47
4.4.	Tratamiento de Preaireación de los Relaves.....	50
4.4.1.	Desarrollo del Esquema de Pruebas.....	52
4.5.	Análisis de Varianza para la Recuperación de Oro	53
4.5.1.	Ecuación de Regresión para la Recuperación de Oro	55
4.6.	Análisis de Varianza para el Consumo de Cianuro	56
4.6.1.	Ecuación de Regresión para el Consumo de Cianuro	59
4.7.	Cinética de Lixiviación de Relaves Preaireados, con Intercambio de Solución ...	60
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....		62
5.1.	Análisis e Interpretación de Resultados	62
5.2.	Prueba de Hipótesis.....	65
5.2.1.	Prueba de Hipótesis General	65
5.2.2.	Prueba de Hipótesis Específica 1.....	66
5.2.3.	Prueba de Hipótesis Específica 2.....	66
5.2.4.	Prueba de Hipótesis Específica 3.....	67
5.3.	Discusión de Resultados.....	67
CONCLUSIONES		69
RECOMENDACIONES		71
BIBLIOGRAFÍA		72
ANEXOS.....		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables independientes y dependientes.....	22
Tabla 2 Especies mineralógicas del relave.....	40
Tabla 3 Volumen y liberación de las especies mineralógicas	43
Tabla 4 Volumen y liberación de los enlaces	45
Tabla 5 Condiciones del proceso de molienda	46
Tabla 6 Granulometría en función del tiempo.....	46
Tabla 7 Condiciones del proceso de lixiviación.....	48
Tabla 8 Lixiviación a 85%-200 malla.....	48
Tabla 9 Lixiviación a 90%-200 malla.....	48
Tabla 10 Lixiviación a 95%-200 malla.....	49
Tabla 11 Lixiviación a 100%-200 malla.....	49
Tabla 12 Condiciones del tratamiento de preaireación.....	51
Tabla 13 Variables del tratamiento de preaireación.....	51
Tabla 14 Diseño factorial del tratamiento de preaireación.....	51
Tabla 15 Pruebas de preaireación y lixiviación.....	52
Tabla 16 ANOVA para la recuperación de oro	53
Tabla 17 Resumen del modelo de la recuperación de oro.....	54
Tabla 18 Coeficientes de codificación de la recuperación de oro	54
Tabla 19 ANOVA para el consumo de cianuro.....	57
Tabla 20 Resumen del modelo del consumo de cianuro.....	57
Tabla 21 Coeficientes de codificación del consumo de cianuro.....	58

Tabla 22 Resumen de los datos reportados en la lixiviación.....	60
Tabla 23 Resumen de los datos reportados de la lixiviación según la granulometría	63
Tabla 24 Diseño factorial de la investigación	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Disolución del oro en soluciones cianuradas	26
Figura 2 Diagrama de Eh-pH par el sistema Au-H ₂ O-CN a 25 °C	27
Figura 3 Diagrama de Eh-pH para el sistema Ag-H ₂ O-CN a 25°	28
Figura 4 Tipos de asociaciones de oro con sulfuros	30
Figura 5 Formas de interferencia del mineral refractario en el proceso de lixiviación.....	31
Figura 6 Variables de control de Pre-aireación	32
Figura 7 Diseño de la investigación	36
Figura 8 Mapa de Ancash.....	38
Figura 9 Liberación de las especies mineralógicas	42
Figura 10 Volumen de los enlaces	43
Figura 11 Partículas mixtas de marcasita- gangas y pirita-gangas	44
Figura 12 Partículas mixtas de pirita-calcopirita-arsenopirita-gangas.....	44
Figura 13 Partículas libres de pirita, calcopirita y arsenopirita	45
Figura 14 Moliendabilidad del relave	47
Figura 15 Recuperación de Au vs granulometría	50
Figura 16 Pareto de la recuperación de Au	55
Figura 17 Gráfica normal de la recuperación de Au	56
Figura 18 Pareto del consumo de cianuro	58
Figura 19 Gráfica normal de la recuperación de Au	59
Figura 20 Cinética de recuperación de oro	61
Figura 21 Consumo de cianuro en el tiempo	61

NOMENCLATURA

py	:	pirita
apy	:	arsenopirita
mc	:	marcasita
cp	:	calcopirita
GGs	:	gangas
%	:	porcentaje
rpm	:	revoluciones por minuto
S/L	:	sólido/líquido
min	:	minutos
h	:	horas
pH	:	potencial de hidrógeno
g	:	gramos
mg	:	miligramos
ml	:	mililitros
L	:	litros
g/TM	:	gramos por toneladas métricas
kg/TM	:	kilogramos por toneladas métricas
GL	:	grados de libertad
SC	:	suma de cuadrados
MC	:	media de cuadrados
EE	:	error estándar

FIV	:	factor de inflación de la varianza
S	:	desviación estándar
R^2	:	coeficiente de determinación

RESUMEN

Una muestra representativa de relave procedente de Casma presentó mediante análisis químico por ensayo al fuego una ley de 8.23 g/TM de oro, Con la finalidad de identificar las especies de minerales involucrados en la muestra de relave, se realizó el estudio de microscopía óptica de luz reflejada, la cual identificó la presencia predominante de pirita y gangas, con una distribución 40.46% y 51.48%, respectivamente. Además, se observaron especies sulfuradas como calcopirita, arsenopirita y marcasita, las cuales se encuentran formando enlaces binarios y ternarios con la pirita. En base a la caracterización de la muestra, se desarrollaron pruebas de lixiviación en botella a distintas granulometrías, determinando que para un tamaño de partículas de 95% - 200 Malla, se logró recuperar 66.35% de oro con un consumo de 14.56 kg-CN/TM en un periodo de 24 horas. Como consecuencia de las bajas recuperaciones y alto consumo de reactivo, se proyectaron pruebas de tratamiento de preaireación sin intercambio de solución y lixiviación de los relaves empleando diseños experimentales factoriales. Las variables que se estudiaron fueron el tiempo de preaireación y el pH de la pulpa, con valores de 5 y 10 horas para el tiempo de preaireación y valores de pH de 10.5 a 12. Como resultado del análisis estadístico de los resultados, se concluyó que la variable de mayor influencia tanto para la recuperación de oro y el consumo de cianuro es el tiempo de preaireación, con valores de contribución de 88.87% y 86.26%, respectivamente. Así mismo se presentó el modelo $\% \text{ Recuperación (Au)} = 42.76 + 2.403(t) + 1.880(\text{pH}) - 0.1374(t)*\text{pH}$, con una confiabilidad pronosticada de 92%. Con respecto al consumo de cianuro, este obedece a la ecuación: $\text{Consumo CN (kg/TM)} = 12.42 - 0.412(t) + 0.123(\text{pH}) - 0.0127(t)(\text{pH})$, la cual presenta una confiabilidad de 96.52%. La mejor prueba de lixiviación sin intercambio de solución logró recuperar 73.45% de oro, con un consumo de 8.4 kg/TM de cianuro.

Con la finalidad de aumentar la recuperación de oro, se realizaron pruebas de preaireación con intercambio de solución y lixiviación de los relaves, logrando recuperar 76.28% de oro en un tiempo de 36 horas, con un consumo de 8.5 kg-CN/TM.

ABSTRACT

A representative sample of tailings from Casma presented a grade of 8.23 g/TM of gold through chemical analysis by fire assay. In order to identify the mineral species involved in the tailings sample, a reflected light optical microscopy study was performed, which identified the predominant presence of pyrite and gangues, with a distribution of 40.46% and 51.48%, respectively. In addition, sulfide species such as chalcopyrite, arsenopyrite and marcasite were observed, which are found forming binary and ternary bonds with pyrite. Based on the characterization of the sample, bottle leaching tests were carried out at different granulometries, determining that for a particle size of 95% - 200 Mesh, 66.35% of gold was recovered with a consumption of 14.56 Kg-CN/TM in a period of 24 hours. As a consequence of the low recoveries and high reagent consumption, pre-aeration treatment tests without solution exchange and tailings leaching were projected using factorial experimental designs. The variables studied were pre-aeration time and pulp pH, with values of 5 and 10 hours for the pre-aeration time, and pH values from 10.5 to 12. As a result of the statistical analysis of the results, it was concluded that the variable with the greatest influence on both gold recovery and cyanide consumption is the pre-aeration time, with contribution values of 88.87% and 86.26%, respectively. Likewise, the model $\% \text{ Recovery (Au)} = 42.76 + 2.403(t) + 1.880(\text{pH}) - 0.1374 (t)*\text{pH}$ was presented, with a predicted reliability of 92%. Regarding cyanide consumption, this is based on the equation: $\text{CN consumption (kg/MT)} = 12.42 - 0.412 (t) + 0.123 (\text{pH}) - 0.0127 (t) (\text{pH})$, which has a reliability of 96.52%. The best leaching test without solution exchange recovered 73.45% of gold, with a consumption of 8.4 kg/MT of cyanide.

To increase gold recovery, pre-aeration tests with solution exchange and tailings leaching were conducted, recovering 76.28% of gold in 36 hours, with a consumption of 8.5 kg-CN/MT.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En la industria minero-metalúrgica, los metales preciosos y en especial el oro son un recurso de gran valor económico dentro del contexto social. Las actividades de beneficio de oro avanzan a pasos agigantados, gracias al desarrollo de diversos métodos de tecnología limpia que acondicionan a los procesos tradicionales.

Grandes cantidades de minerales sulfurados con contenido de metales preciosos contienen especies que perjudican los procesos tradicionales de lixiviación con cianuro a tal punto que son considerados inviables económicamente por las bajas recuperaciones y el alto consumo de reactivos que se obtienen mediante estos procesos (Larrabure & Rodríguez, 2021). La cianuración es un método que se conoce desde el siglo XVIII, empleándose inicialmente para lixiviar cobre, y luego se usó para disolver especies de oro y plata presentes en minerales oxidados; luego se aplicó a menas sulfuradas, siempre y cuando las características del mineral lo permitan (Dai et al., 2012). Donde dicho metal se encuentra en tamaños inferiores a las 20 micras y en un alto porcentaje; así mismo, la presencia de sulfuros de hierro como pirita, pirrotita, marcasita, minerales de arsénico, antimonio, bismuto, entre otros, hacen que dicho proceso se convierta inviable técnica y económicamente (Larrabure & Rodríguez, 2021).

Uno de los procesos que se emplea para contrarrestar el problema de la presencia de estas especies sulfuradas es realizar un pretratamiento químico térmico de tostación previo a la cianuración (Li & Wang, 2022). Actualmente se propone un proceso alternativo de tratamiento conocido como preaireación previo al proceso metalúrgico de lixiviación con cianuro para la recuperación de oro a partir de relaves piritosos que se encuentran en la provincia de Casma.

1.1. Descripción de la Problemática

Uno de los métodos usados para la extracción de los metales preciosos, en especial de oro, en la actualidad es la disolución con cianuro, cuyo proceso no siempre se aplica exitosamente en forma directa debido a las especies de minerales con características adversas a la cianuración.

Entre los principales factores que dificultan el tratamiento por lixiviación con cianuro está la presencia de oro microscópico diseminado en una matriz sulfurada, ya sea que este metal se presente libremente o en forma encapsulada. Así mismo, el contenido de especies sulfuradas como la pirita u otros sulfuros de metales base, así como especies arsenicales, de antimonio, bismuto, etc. (Li & Wang, 2022).

El problema principal es que los productos de las reacciones químicas de descomposición compiten por reaccionar con el cianuro, elevando el consumo de reactivos en el proceso; también es posible que pueda reaccionar con el oxígeno de la solución, reduciendo la capacidad de disolución de estos metales (Botz y otros, 2016).

Los principales factores de la refractariedad de estas menas se determinan por la poca respuesta que ofrecen a los procesos convencionales de lixiviación y son causados por (Larrabure & Rodríguez, 2021):

- Oro fino encapsulado o diseminado en matriz de sulfuros.
- Presencia de materiales a base, o con contenido de carbono (preg-robbing).
- Especies de afinidad química por el cianuro(cianicidas).
- Presencia de materiales ávidos de oxígeno.

1.2. Formulación del Problema

1.1.1. Problema General

- ¿La baja recuperación de oro y de qué forma podemos recuperar sus valores contenidos en los relaves piritosos de las plantas concentradoras de flotación en la provincia de Casma?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo podemos identificar las especies de minerales y los grados de liberación presentes en los relaves piritosos con contenido de oro en la provincia de Casma?
- ¿Qué tratamiento de oxidación permitirá modificar la matriz sulfurada y favorecer la extracción de oro?
- ¿Cuáles son las condiciones de la cianuración de oro en relaves piritosos previo tratamiento de oxidación, en la provincia de Casma?

1.3. Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica dado que el tratamiento de preaireación de los relaves piritosos permitirá recuperar oro mediante la cianuración en la provincia de Casma; así mismo, aumentará la rentabilidad de los procesos, dándole un valor agregado a las relaveras piritosas con contenido de metales preciosos. Por consecuencia, la presente investigación promueve la formación de empleo y el desarrollo de las comunidades involucradas en las actividades de beneficio minero-metalúrgicas.

1.3.1. Justificación Tecnológica

La presente investigación se justifica tecnológicamente porque el tratamiento de preaireación de los relaves piritosos permitirá recuperar oro mediante el proceso de lixiviación con cianuro. Así

también, la investigación propone un tratamiento para darle viabilidad técnica a los pasivos mineros, mediante el proceso hidrometalúrgico de lixiviación con cianuro.

1.3.2. Justificación Económica

La presente investigación se justifica económicamente dado que permitirá aumentar la rentabilidad de los procesos, dándole un valor agregado a las relaveras piritosas con contenido de metales preciosos; además, la presente investigación promueve la formación de empleo y el desarrollo de las comunidades involucradas en las actividades de beneficio minero metalúrgicas.

1.4. Alcance de la Investigación

La investigación del procesamiento de los relaves piritosos con contenidos metálicos valiosos de oro mediante el tratamiento de preaireación previo a la lixiviación con cianuro, en la provincia de Casma, permitirá recuperar oro en función de las variables independientes que intervienen en el proceso, con la finalidad de darle viabilidad técnica y económica al procesamiento de relaves piritosos de flotación en la Casma, que por muchos años permanecen con gran potencial económico debido el contenido de especies valiosas que por falta de investigación no son reprocesadas, así también, el tratamiento del pasivo estudiado permitirá generar un incremento en la producción metálica de oro a nivel mundial y por consiguiente el aumento de los ingresos por producción de este metal.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Recuperar el oro presente en los relaves piritosos mediante el tratamiento de preaireación y el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma,

incrementar su recuperación en 10% y reducir el consumo de cianuro en un 6 kg/TM.

1.5.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar la muestra de los relaves piritosos y determinar los grados de liberación adecuados para la extracción de oro en la provincia de Casma.
- Oxidar la matriz sulfurada como pretratamiento para la lixiviación con cianuro.
- Determinar el tiempo y las condiciones del proceso de cianuración previa oxidación.

1.6. Hipótesis y Variables

1.6.1. *Hipótesis General*

- La preaireación de los relaves piritosos con contenido de oro permitirá recuperar oro mediante el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma. Aumentando su recuperación y disminuyendo el consumo de cianuro.

1.6.2. *Hipótesis Específicas*

- La preaireación de los relaves piritosos en la provincia de Casma permitirá oxidar los principales sulfuros con contenido de oro.
- La microscopía óptica de los relaves piritosos permitirá identificar especies de minerales involucradas y determinar el grado de liberación adecuado para recuperar oro en la provincia de Casma.
- La lixiviación con cianuro de los relaves piritosos pre oxidados permitirá recuperar oro en la provincia de Casma.

1.6.3. Identificación de Variables

Las variables por considerarse en el proceso de preaireación son:

Variable independiente

- Tiempo de Pre-aireación
- pH de Pre-aireación

Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de oro

Variables intervinientes controladas

- Fuerza de cianuro
- Consumo de óxido de calcio (cal)
- Oxígeno disuelto en pulpa
- Velocidad de agitación
- Relación L/S

1.6.4. Operacionalización de Variables

Para procesar e identificar la influencia de las variables en los procesos de preaireación y lixiviación, se aplicarán balances metalúrgicos, a fin de evaluar e interpretar las relaciones entre las variables, independientes y dependientes en estudio.

Tabla 1*Operacionalización de variables independientes y dependientes*

Variable	Definición	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Tiempo de Pre-aireación	Es el tiempo durante el cual el mineral es sometido a un proceso de pre-aireación antes de la cianuración, con el fin de modificar la superficie mineral y mejorar la recuperación de oro.	Duración del proceso (en horas)	Cuantitativa	Cronómetro
pH de Pre-aireación	Es el nivel de acidez o alcalinidad de la pulpa durante el proceso de pre-aireación, el cual influye en la reactividad superficial del mineral y en la eficiencia de recuperación del oro.	Valor de pH medido	Cuantitativa	pH-metro
Porcentaje de recuperación de oro	Es el porcentaje de oro que se recupera del mineral mediante el proceso de lixiviación, posterior al tratamiento de pre-aireación.	Porcentaje de oro extraído del mineral	Cuantitativa	AAS

Nota: Se presentan las fórmulas y abreviaturas de las especies.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

(Aguilar, 2021), en su trabajo de investigación “Aplicación de pre-aireación en lixiviación con cianuro de sodio en el mineral de interés de la mina “Cristhian David”, Pasaje-El Oro”, realizó una recuperación de oro mediante un tratamiento de inyección de aire dentro de la pulpa a través del proceso denominado lixiviación dinámica que según describe a medida que incrementa la concentración de oxígeno por aire insuflado en la solución aumenta la recuperación de oro. En el estudio se llevaron a cabo ocho pruebas distintas con variaciones de los caudales, estas se repitieron tres veces, se evidenció que con el tratamiento se alcanzó una recuperación de 27.056% de oro con 0.14 m³/h de aire insuflado, a diferencia de una recuperación de 23.052% sin haber aplicado el tratamiento.

(Carhuamaca & Cristobal, 2013), en su tesis “Recuperación del oro mediante la pre - aireación en concentrados de oro pirítico en la empresa “Analytica Mineral Services S.A.C” – Chala - Arequipa” presentada en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Manifiesta que al realizar una cianuración directa convencional al mineral que cuenta con la presencia de pirita, pirrotita, marcasita, calcopirita, electrum, pirargirita, arsenopirita, esfalerita y ganga se siendo las leyes de cabeza: 4,17 g Au/TM, 4,78 g Au/TM, 5,10 g Au/TM, y 5,42 g Au/TM se obtuvo como resultado los porcentajes de recuperación de oro de: 72,60 %, 77,49 %, 77,97 % y 77,58 %; respectivamente. Debido a este resultado poco favorable propuso la aplicación de la preaireación como tratamiento de concentrados de oro pirítico mediante pruebas de cianuración por agitación, obteniendo entre los valores más favorables una recuperación de 88.03% de oro con un tiempo de cianuración de 55 horas, pH de la pulpa de 10,5 y una aireación en la pulpa como oxígeno de 12.6 psi.

(Coello, 2017), en su investigación “Diseño de pre-tratamiento alcalino para proceso de cianuración de oro desde concentrados de flotación de menas refractarias” llevó a cabo un pretratamiento alcalino en minerales refractarios con presencia de arsenopirita en grandes cantidades, pirita y pirrotita en menor cantidad. Decidió aplicar una oxidación alcalina utilizando hidróxido de sodio (NaOH) en condiciones estándar de presión y temperatura, tomando en cuenta la concentración de NaOH (0.3-9 M), el porcentaje de sólidos (5-33 %) y el tiempo de agitación (6-48 H), así mismo hizo el ensayo de cianuración convencional de esta se obtuvo un resultado de recuperación del 26.9%, a diferencia de una recuperación de hasta 62.5% de la aplicación del pretratamiento alcalino donde se utilizó cianuro como agente lixivante. Llegando a concluir que es un tratamiento que optimiza y maximiza la recuperación del oro que se encuentra encapsulado dentro de la arsenopirita.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Beneficio de oro*

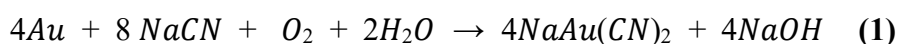
Uno de los principales procesos para la recuperación de oro, es el proceso hidrometalúrgico de lixiviación con cianuro.

2.2.1.1. Lixiviación de Menas con Contenido de Metales Preciosos

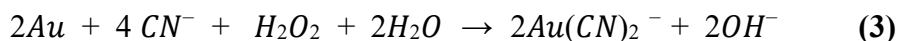
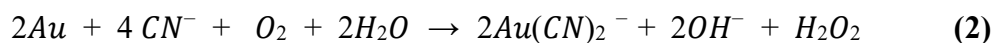
La lixiviación con cianuro es un tratamiento hidrometalúrgico que se basa en la solubilidad de los metales preciosos en una solución cianurada alcalina, es decir, a un pH determinado para que garantice la formación de complejos (CN-metal) (Manning & Kappes, 2016).

El cianuro es un compuesto químico bastante tóxico y aún no ha sido reemplazado en la industria de los metales preciosos que se explotan por lixiviación, debido a su alta eficiencia y bajo costo (Andrade & Hodouin, 2005; Srithammavut, 2008).

Hasta la fecha se han realizado diversos estudios de investigación que describen la mecánica de la disolución de metales preciosos (oro y plata). La reacción química que gobierna el proceso de cianuración de menas de oro fue propuesta por Elsner (1846) y se describe en la reacción 1 (Yannopoulos, 2012).



La reacción descrita anteriormente (1) se forma con dos reacciones que ocurren a la vez y describen completamente el mecanismo de la disolución de metales preciosos, y fue propuesta por Bodländer (1896) (Marsden & House, The Chemistry of Gold Extraction, 2006).

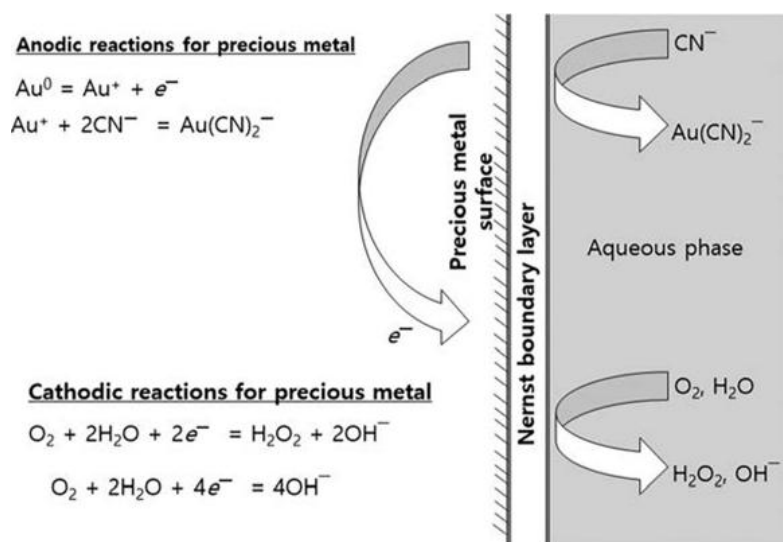


La reacción química 2 demuestra que se necesita oxígeno para que el oro se oxide y forme un complejo cianúrico, conocido como ión complejo estable ($Au(CN)_2^-$) (Birich y otros, 2019).

La extracción de oro mediante soluciones cianuradas es un mecanismo de reacciones electroquímicas, y el mecanismo de este fenómeno se representa en la figura 1 (De la Torre & Guevara, 2006).

Figura 1

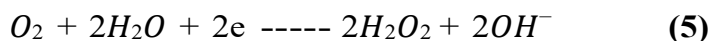
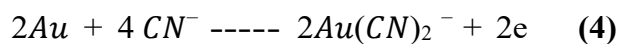
Disolución del oro en soluciones cianuradas



Nota: Reacción de cianuro y oro (De la Torre y otros, 2018)

En la figura 2 se puede observar que se produce la oxidación del cianuro como ion y se lleva a cabo a un potencial de -0.6 V, se produce la oxidación del ion cianuro, en la zona anódica, a un potencial de -0,6 V, y en la zona catódica se lleva a cabo la reducción del elemento oxígeno con un potencial de reacción de 0.4 V. Mientras que en la zona catódica se produce la reducción del oxígeno, a un potencial de 0,4 V.

Las reacciones que se llevan a cabo en el ánodo y el cátodo se describen a continuación en las ecuaciones 4 y 5 respectivamente. la cual se presenta en la reacción 1.10 (Marsden & House, 2006).

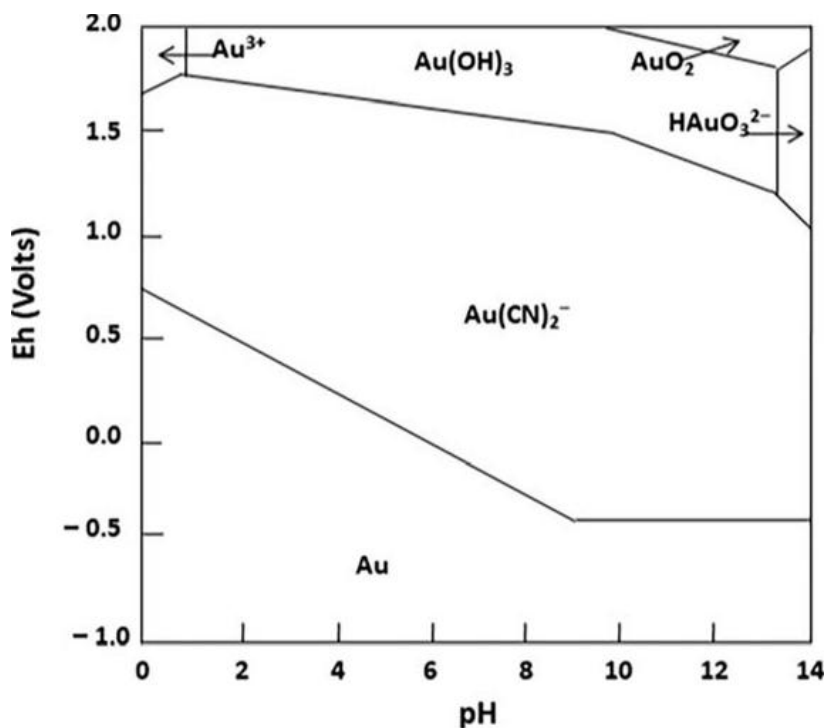


La figura 2 muestra el diagrama Eh-pH para el mecanismo de la disolución de oro y se observa que la formación del complejo cianáurico se lleva a cabo a un potencial de -0.6 V y se puede

apreciar los campos de estabilidad de los compuestos formados a diferentes condiciones (Eh y pH) (Ilyas & Lee, 2018).

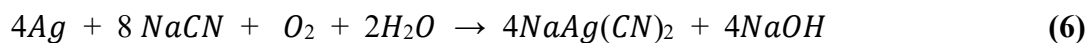
Figura 2

Diagrama de Eh-pH par el sistema Au-H₂O-CN a 25 °C

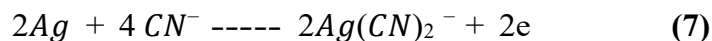


Nota: Reacción de cianuro y oro (Ilyas & Lee, 2018)

Las especies de minerales con contenido de oro generalmente llevan plata en su estructura molecular en distintas proporciones y el mecanismo de la disolución de este metal (plata) en soluciones con cianuro obedece a las mismas reacciones electroquímicas, el cual se describe en la reacción 6 (Higuera y otros, 2007).



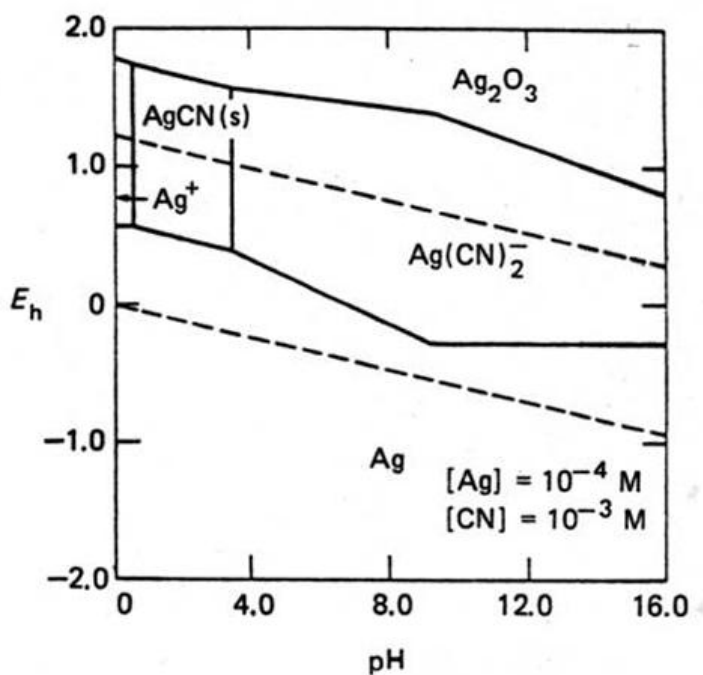
En la reacción 7, se muestra la reacción electroquímica que ocurre en la zona anódica para la disolución de la plata, y se lleva a cabo con un potencial de $-0,31$ V.



En la figura 3 se observa el diagrama Eh – pH para la disolución de la plata con cianuro y las regiones de estabilidad de la formación del ion complejo $Ag(CN)_2^-$, se observa que la formación tiene lugar con un amplio rango de pH, el mecanismo de la reacción se describe en la reacción 7 (Marsden & House, The Chemistry of Gold Extraction, 2006).

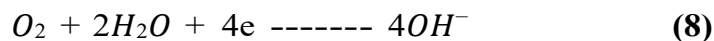
Figura 3

Diagrama de Eh-pH para el sistema Ag-H₂O-CN a 25°



Nota: Reacción de cianuro y plata (Hormann, 2008)

La diferencia con respecto a la cianuración de oro se debe a la formación de iones hidroxilo, por reacciones electroquímicas de reducción de oxígeno, tal como se describe en la ecuación 8, donde se ve que la pérdida de electrones es cuatro y no dos como es el caso de la disolución del oro, también que no se lleva a cabo la formación de peróxido de hidrógeno.



De ambas reacciones para disolución del oro y la plata, se puede decir que la cinética de disolución de la plata en soluciones cianuradas es menor que la correspondiente para el oro, dado que el coeficiente del oxígeno es 0,25 mientras que el correspondiente al oro es de 0,5 (Birich y otros, 2019).

Estudios de investigación han demostrado que, a concentraciones bajas de cianuro de sodio, de 0.0025 moles de soluto por litro de solución, la velocidad para que la plata sea disuelta es casi la mitad de lo que se requiere para la disolución de oro. Por lo contrario, señalan que el exceso de soluto, del orden de 0.1 moles por litro de solución, aumenta la cinética de reacción de disolución de la plata, reduciendo la disolución de oro por la competencia de estas dos especies por cianuro libre (Birich y otros, 2019).

2.2.2. *Minerales Refractarios*

Los minerales valiosos refractarios son aquellos que no pueden ser extraídos por los procesos metalúrgicos convencionales o sus recuperaciones son bajas, menores al 80% de extracción (Parga & Carillo, 1996).

Las causas de refractabilidad son las siguientes:

- ✓ Oclusión de oro en matrices insolubles como la pirita y el cuarzo.
- ✓ Poca solubilidad de minerales como telurios, y maldonitas.
- ✓ Capas de óxido que cubren los elementos valiosos, las cuales disminuyen la disolución aurífera en solución.
- ✓ Disolución de compuestos asociados que consumen reactivo y oxígeno.

Figura 4*Tipos de asociaciones de oro con sulfuros*

Nota: Asociaciones graficadas (Ramírez, 2008).

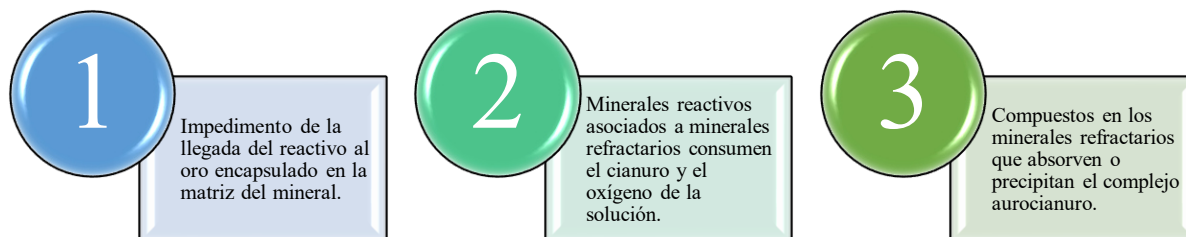
2.2.2.1. Importancia del Pre-tratamiento en Minerales Refractarios

Los minerales refractarios presentan una mineralogía compleja que afecta el proceso metalúrgico. Los elementos valiosos como el oro se encuentran en solución sólida, dicho de otra forma, encapsulado dentro de una matriz de sulfuros de hierro como la pirita y pirrotita u algún otro tipo de mineral, por lo que el reactivo tiene dificultades en lograr la disolución de los elementos

presentes en dichas especies (Azañero y otros, 2009). Las principales consecuencias de este tipo de mineralogía en la operación las podemos observar en la figura 5.

Figura 5

Formas de interferencia del mineral refractario en el proceso de lixiviación



Nota: Datos organizados en un esquema, elaboración propia con información de Azañero y otros (2009).

Los problemas en la lixiviación que se presentan por el oro refractario hacen necesario el pretratamiento oxidativo para disminuir los altos costos que involucraría un proceso hidrometalúrgico en este tipo de mineral (Azañero y otros, 2009). Entre los tratamientos previos a la lixiviación tenemos los mencionados a continuación (Wang y otros, 2021):

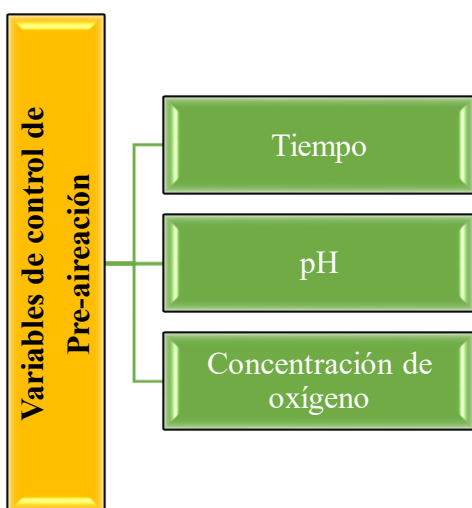
- ✓ Pre-aireación
- ✓ Oxidación con presión y temperaturas elevadas en medio ácido
- ✓ Oxidación con presión y temperaturas elevadas en medio básico
- ✓ Cloración
- ✓ Biolixiviación
- ✓ Tostación de minerales

2.2.2.2. Pre-aireación como Pre-tratamiento en Minerales Refractarios

La pre-aireación es un proceso usado previa a la lixiviación de metales preciosos, para lograr a oxidación de minerales sulfurados como la pirita, donde se forman diversos compuestos como Sulfatos de calcio, Sulfatos de sodio, Hidróxido férrico, Tiosulfato de sodio, Tiosulfato de calcio, Sulfato ferroso, Hidróxido ferroso, entre otros. Para realizar este pretratamiento es necesario mantener parámetros óptimos como los que podemos observar en la figura 6 (Aramburú, 2003).

Figura 6

Variables de control de Pre-aireación



Nota: Variables principales, elaboración propia con información de Aramburú (2003).

Ferrocianuros y tiocianatos que perjudican el proceso pues incrementan el consumo de cianuro, además que generan interferencias en la disolución (Aramburú, 2003).

2.3. Glosario de Términos

- Mineral refractario: Es un mineral que tiene una encapsulación física de partículas de cierto valioso diseminadas.

- Mena: Está constituida por especies mineralógicas valiosas y cuyo aprovechamiento constituye el motivo fundamental de la explotación minera.
- Ganga: Está constituida principalmente de especies terrosas o pétreas, principalmente cuarzo.
- Ley: Contenido de metal valioso en una mena, expresado generalmente en porcentaje o en gramos de metal por tonelada de mena.
- Recuperación: Es la cantidad de metal que se logra obtener mediante un determinado proceso metalúrgico con respecto a la cantidad de metal que entra al proceso.
- Relave: Es la parte sin valor que sale del tratamiento, está constituido principalmente de ganga y lleva consigo algo de mena.
- Preaireación: Es el proceso previo al circuito de cianuración que consiste en oxidar los principales sulfuros de hierro u otros minerales sulfurados.
- Lixiviación: Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis.
- Cianuración: Es el proceso metalúrgico para la extracción de oro, que busca convertir el oro en aniones metálicos complejos de aurocianida, solubles en agua, mediante un proceso denominado lixiviación.
- Solución rica: Solución de cianuro cargada con plata y oro producto de la cianuración de concentrados o minerales con plata y oro. La solución rica es luego enviada al circuito de precipitación de plata y oro.

- Solución pobre: Es la solución acuosa que ha sido procesada por extracción SX, también se denomina refinado.

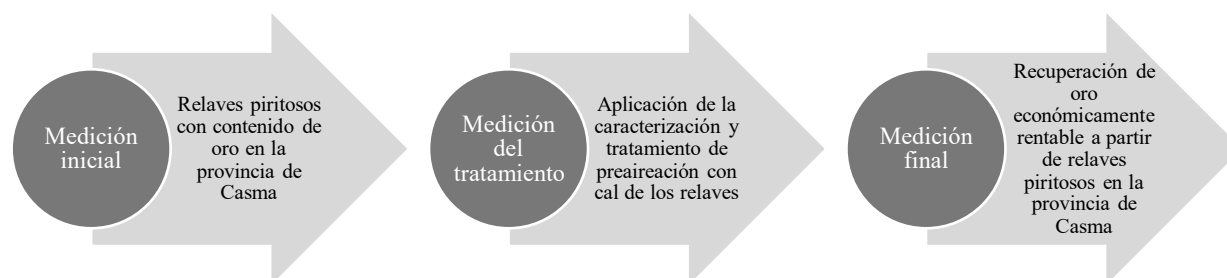
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- ✓ Recopilación de información.
- ✓ Muestreo de relaveras en la provincia de Casma.
- ✓ Análisis químico y caracterización mineralógica de una muestra representativa.
- ✓ Pruebas de moliendabilidad de los relaves.
- ✓ Lixiviación en botella de la muestra de relave a distintas granulometrías.
- ✓ Diseño de pruebas metalúrgicas de preaireación y lixiviación de los relaves piríticos, con el uso de Excel y Minitab.
- ✓ Cinética de lixiviación de los relaves piríticos con pretratamiento, e intercambio de solución.
- ✓ Balances metalúrgicos en hojas de cálculo y análisis estadísticos en Minitab 19.
- ✓ Conclusiones y recomendaciones.

3.2. Tipo y Diseño de Investigación

La presente investigación se basó en el método científico para resolver la problemática de las bajas recuperaciones de oro y el alto consumo de cianuro, empleando el tratamiento de preoxidación con cal, mediante diseños experimentales factoriales. Las variables que se estudiaron son del tipo cualitativo, como es el caso de la caracterización de las especies de minerales presentes en la muestra, y variables de tipo cuantitativas, como la recuperación de oro, tiempo de preaireación y pH de la pulpa. El diseño experimental de la investigación se representa en el siguiente esquema:

Figura 7*Diseño de la investigación*

Nota: Mediciones de la investigación.

3.3. Unidad de Análisis

La muestra en análisis corresponde a los relaves piritosos de flotación de las plantas concentradoras de la provincia de Casma, lugar donde se recopiló la información necesaria para el planteamiento del problema, así como labores de muestreo con personal calificado y en coordinación con los comuneros de la zona, quienes viven de las labores mineras en los alrededores de la zona.

3.3.1. Casma

3.3.1.1. Etimología de la Palabra Casma

Existen diversos relatos acerca de la procedencia de la palabra Casma, de tal manera que una parte de la literatura, indica que proviene de la palabra quechua kansa que quiere decir algodón, dado que hace muchos años era una planta que generaba una materia prima muy importante para la fabricación de textiles (Zavala y otros, 2009).

3.3.1.2. Ubicación Geográfica

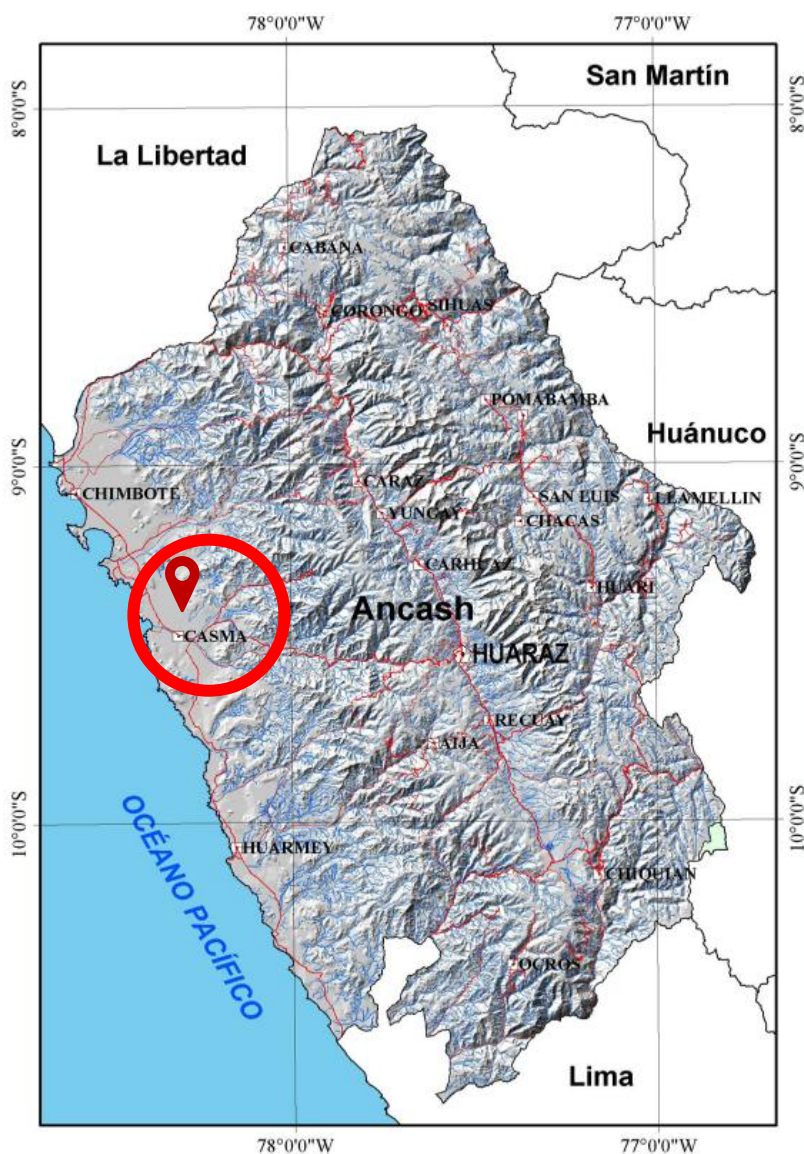
La provincia de Casma se encuentra situada a 375 Km hacia la parte norte de Lima con una altitud media de 36.9 m.s.n.m, y forma parte del departamento de Ancash. Dicha ciudad se abre paso sobre la parte derecha del río Casma, la cual fue fundad un 14 de abril de 1950, llamándose Huarmey. Se encuentra ubicado en las coordenadas 9° 28' 25'' latitud sur y 78° 18' 15'' longitud O de Greenwich (Zavala y otros, 2009).

3.3.1.3. Límites

La provincia de Casma se encuentra limitando con la provincia de Santa por el norte, con Yungay y Huaraz por el este, con Huarmey por el sur, y por el oeste con el océano pacifico. Dicha ciudad se encuentra dividida por cuatro distritos: Casma, Yaután, Buenavista y Comandante Noel (Sánchez y otros, 1995).

3.3.1.4. Acceso

El principal acceso hacia la ciudad de Casma es a través de la Panamericana Norte, situada en el Km 700 de dicha vía. Así también, se mantiene conectado con la capital departamental de Huaraz mediante la carretera Casma – Pariacoto – Huaraz. (Sánchez y otros, 1995).

Figura 8*Mapa de Ancash*

Nota: Se resalta el área de Casma (Zavala y otros, 2009).

Se proyectaron labores de muestreo para extraer muestra de relaves piritosos en puntos estratégicos, en la provincia de Casma, departamento de Ancash. El total de la muestra fue debidamente rotulada, sellada al vacío, y transportada al laboratorio de preparación de muestras.

3.4. Tamaño de muestra

Se recolectaron aproximadamente 200 kg de relave con el uso de una pluma de muestreo, la cual fue necesaria para el desarrollo de la investigación y el almacenamiento correspondiente de una muestra testigo que corrobore los resultados obtenidos. La muestra dirimente se obtuvo luego de homogenizar el total de la muestra, la cual permitió controlar las estratificaciones del material.

3.5. Selección Tamaño de Muestra

Las muestras fueron seleccionadas mediante muestreo manual y sobre 7 puntos estratégicos en la relavera tomados aleatoriamente, con una profundidad de muestreo de 1 metro, empleando métodos de muestreo con sondas tipo pluma. El lote inicial fue homogenizado con el uso de palas, y cuarteo con el equipo Jones. Se empleó el método de muestreo por mallas, para obtener las distintas muestras para el desarrollo de las pruebas.

CAPÍTULO IV: PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1. Mineralogía del Relave

La geología y caracterización de la muestra problema se llevaron a cabo en el laboratorio de GEOEXINPESAC, y para realizar la microscopia óptica de una muestra representativa del lote muestreado de relave piritoso de la provincia de Casma, se elaboró una briqueta debidamente pulida y se observó en el microscopio óptico de luz reflejada, la cual indicó la presencia de partículas finas de oro asociado a pirita. La tabla 2 describe las especies identificadas en el análisis modal.

Tabla 2

Especies mineralógicas del relave

Minerales	Fórmula	Distribución volumétrica	Grados de Liberación
Pirita	FeS ₂	40.46	93.72
Arsenopirita	AsFeS ₂	3.04	90.00
Marcasita	FeS	4.83	97.44
Calcopirita	CuFeS ₂	0.19	33.33
Gangas	GGs	51.48	95.67
		100.00	

Nota: Se presentan las fórmulas y abreviaturas de las especies.

Luego de identificar las principales especies de minerales presentes en la muestra de relave, se contabilizó el número de partículas, determinando la mayor proporción de pirita y gangas, las cuales se encuentran ocupando un volumen porcentual de distribución de 40.46% y 51.48%, respectivamente.

4.1.1. Interpretación de la Distribución de Minerales Observados

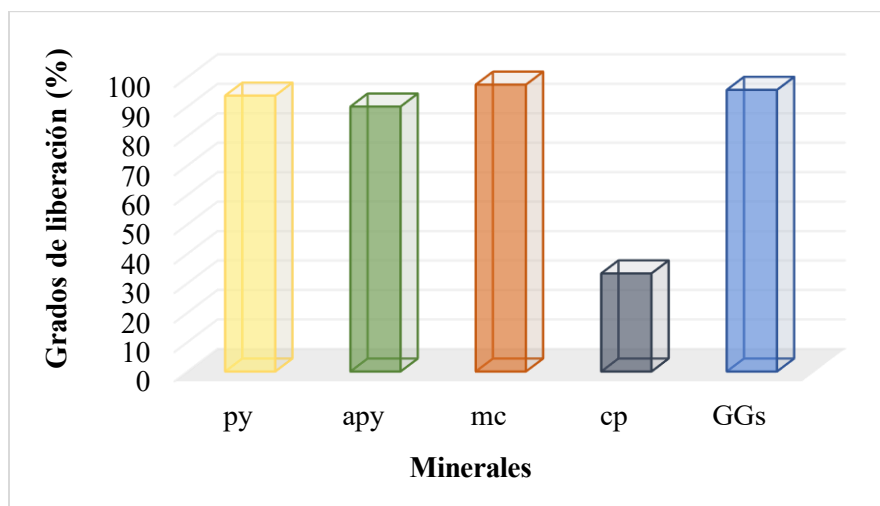
Como se pudo ver en la tabla anterior, la especie sulfurada metálica de mayor distribución en la muestra es la pirita, la cual representa el 40.46% del volumen total de la muestra, encontrándose el 59.54% de las partículas como especies liberadas.

Con respecto a los minerales de arsénico, se pudo identificar a la arsenopirita, la cual se encuentra formando parte del 3.04% del volumen de la muestra, además de esto, presenta un grado de liberación del 90%, por lo que hace suponer que este mineral elevará los consumos de cianuro en la etapa de lixiviación. Esta especie es considerada como cianicida, ya que compite con el oro por la formación de complejos con el cianuro.

Otra especie sulfurada de hierro que se pudo identificar en la muestra es la marcasita. La cual se encuentra ocupando un volumen de 4.83% del total de la muestra, presentando un grado de liberación de 95.14%.

Otra de las especies que son consideradas cianicidas, son las referidas al cobre. Así pues, se pudo identificar la presencia de partículas de calcopirita, representando un volumen de 0.19%, y 3.33% de grado de liberación.

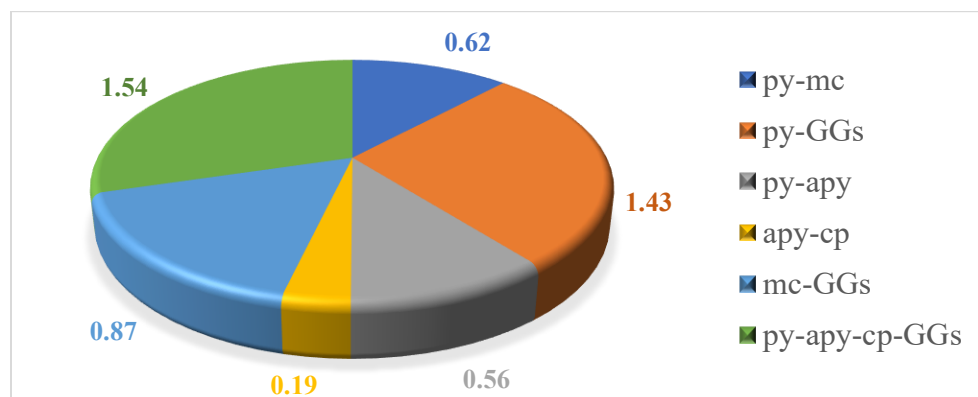
Las gangas se encuentran formando parte del 51.48% del volumen total de la muestra, la cual presenta 95.67% de grado de liberación. La figura 9 representa el gráfico de barras de los grados de liberación de las especies.

Figura 9*Liberación de las especies mineralógicas*

Nota: Gráfico de barras de los grados de liberación.

4.1.2. Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación

El análisis modal identificó la presencia de enlaces mixtos como los que se encuentra formando la pirita con marcasita, arsenopirita y gangas. También se pudo observar enlace de arsenopirita con calcopirita, y marcasita con gangas. Con respecto a enlaces ternarios se pudo observar a py-apy-cp-ggs. Las partículas libres representan un 94.80% del total de la muestra. El gráfico circular de la figura 10 representa la distribución de enlaces identificados en el análisis modal. La tabla 3 describe las posibilidades de liberación y la distribución de los enlaces observados.

Figura 10*Volumen de los enlaces**Nota:* Gráfico circular de los enlaces.**Tabla 3***Volumen y liberación de las especies mineralógicas*

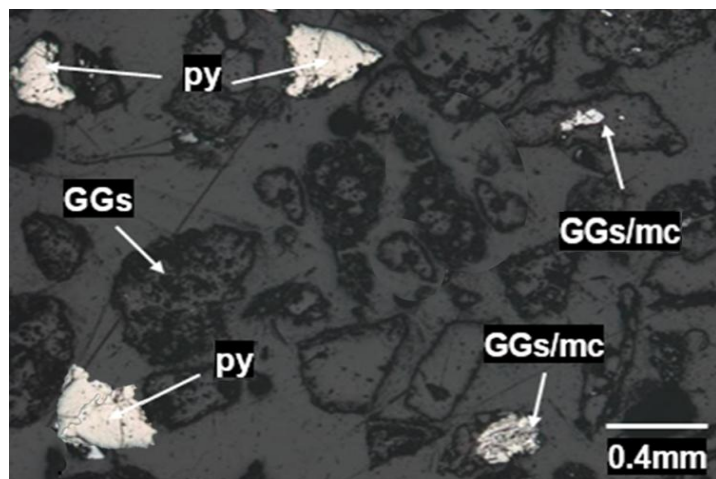
Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación
Partículas libres		1530	94.80	
py-mc	2aII	3	0.19	Muy difícil a imposible
	3aIII	4	0.24	Moderadamente fácil a difícil
	3bI	3	0.19	Imposible
py-GGs	1eII	6	0.37	Muy difícil a imposible
	4bII	4	0.25	Moderadamente difícil
	2cIV	5	0.31	Muy difícil a imposible
	3bII	5	0.31	Imposible
	2bIV	3	0.19	Muy difícil
py-apy	3dIII	2	0.12	Muy difícil a imposible
	1eII	4	0.25	Muy difícil a imposible
	2cIV	3	0.19	Muy difícil a imposible
apy-cp	3aII	3	0.18	Moderadamente fácil a difícil
mc-GGs	2aIV	3	0.19	Muy difícil a imposible
	1bIII	6	0.37	Moderadamente fácil
	4cII	5	0.31	Muy difícil a imposible
py-apy-cp-GGs	1eIII	4	0.25	Muy difícil a imposible
	3bII	6	0.37	Imposible
	3bI	2	0.12	Imposible
	2bI	7	0.43	Muy difícil
	4cI	6	0.37	Muy difícil a imposible
TOTAL		1614	100.00	

Nota: Gráfico circular de los enlaces.

Las figuras 11, 12 y 13 describen las principales especies que se observaron en el análisis modal, para mayor detalle se debe realizar una microscopía eléctrica de barrido.

Figura 11

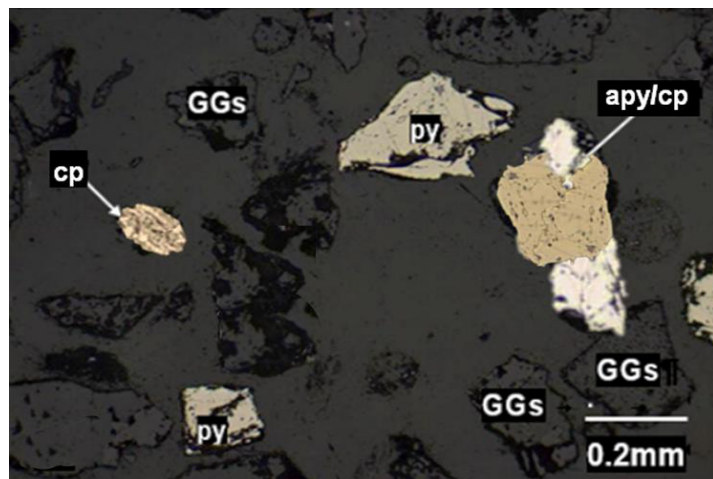
Partículas mixtas de marcasita- gangas y pirita-gangas



Nota: El oro se encuentra asociado a la matriz sulfurada.

Figura 12

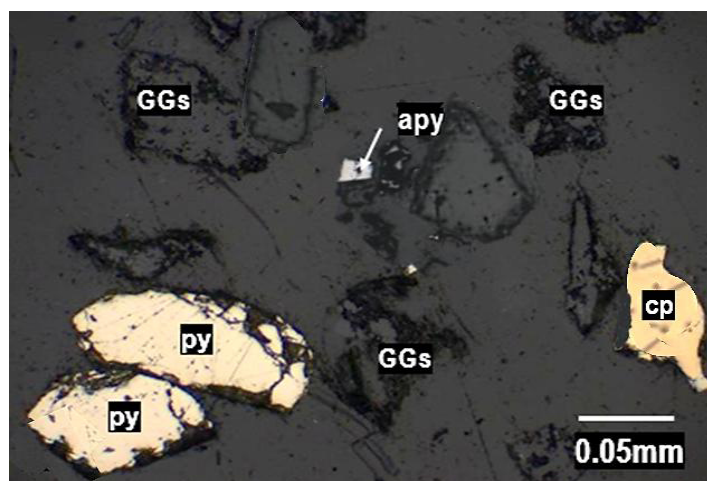
Partículas mixtas de pirita-calcopirita-arsenopirita-gangas



Nota: El oro se encuentra asociado a la matriz sulfurada.

Figura 13

Partículas libres de pirita, calcopirita y arsenopirita



Nota: El oro se encuentra asociado a la matriz sulfurada.

Tabla 4

Volumen y liberación de los enlaces

MINERALES			PIRITA		ARSENOPIRITA		MARCASITA		CALCOPIRITA		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas Libres	1530.00		612.00		45.00		76.00		1.00		796.00	
% Volumen Partículas libres		94.80		37.92		2.79		4.71		0.06		49.32
TOT.PARTICULAS ENTRELAZADAS	NUMERO PARTICUL.	VOLUMEN PORCENTUAL	PIRITA		ARSENOPIRITA		MARCASITA		CALCOPIRITA		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
py-mc	10.00	0.62	10.00	0.62				0.00				
py-GGs	23.00	1.43	11.00	0.68							12.00	0.74
py-apy	9.00	0.56	9.00	0.56								
apy-cp	3.00	0.19			2.00	0.12			1.00	0.06		
mc-GGs	14.00	0.87					2.00	0.12			12.00	0.74
py-apy-cp-GGs	25.00	1.55	11.00	0.68	2.00	0.12			1.00	0.06	11.00	0.68
TOTAL ENTREL.	84.00	5.20	41.00	2.54	4.00	0.25	2.00	0.12	2.00	0.12	35.00	2.17
TOT.LIB+ENLZ	1614.00	100.00	653.00		49.00		78.00		3.00		831.00	
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00		40.46		3.04		4.83		0.19		51.49
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			93.72		91.84		97.44		33.33		95.79	
Símbolos: N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.												
%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.												

Nota: Esta tabla presenta el conteo de partículas y su distribución volumétrica de las especies.

4.2. Pruebas de Moliendabilidad del Relave

Con una muestra representativa del relave aurífero con una granulometría de 68.7% - 200 Malla se realizaron pruebas de moliendabilidad para determinar la respuesta de la reducción del tamaño de partícula con respecto al tiempo de molienda. Dichas pruebas se realizaron en el laboratorio IMJEZCU SAC, empleando un molino con bolas de 1/8 pulgada y 45 rpm. Las condiciones de operación del molino se describen en la tabla 5, y los resultados de las pruebas de molienda en la tabla 6. La figura 14 representa la curva de moliendabilidad para la muestra de relave.

Tabla 5

Condiciones del proceso de molienda

Peso de mineral(g)	1000
Relación S/L	2
RPM	45
Tiempo (minutos)	2, 4, 6 y 8

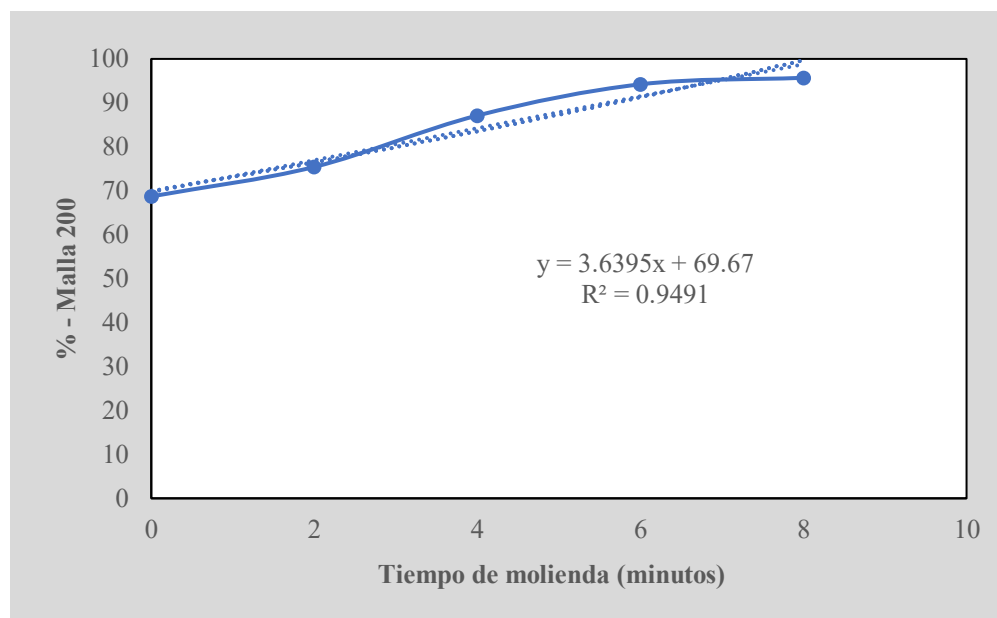
Nota: Parámetros operativos.

Tabla 6

Granulometría en función del tiempo

Tiempo	Granulometría (% - 200 Malla)
0	68.7
2	75.42
4	87.11
6	94.21
8	95.7

Nota: Los datos son representados en porcentaje (%).

Figura 14*Moliendabilidad del relave*

Nota: Curva y ecuación de la moliendabilidad.

4.3. Lixiviación en Botella a Diferentes Granulometrías

Una muestra representativa de relave se lixivió con cianuro a distintas granulometrías en un periodo de 24 horas, estableciendo los mejores resultados para un tamaño de 95% - 200 Malla. Las condiciones del proceso de lixiviación se denotan en la tabla 7, y los resultados en la tabla 8, 9, 10 y 11. Así también el gráfico de barras comparativo demuestra la repuesta de la granulometría con respecto a la recuperación de Au.

Tabla 7*Condiciones del proceso de lixiviación*

Peso de mineral	200
Relación L/S	3
Granulometría	85%, 90%, 95% y 100% - 200M
Tiempo (horas)	24
Concentración de cianuro	2000 ppm
pH	10.5

Nota: Parámetros operativos.**Tabla 8***Lixiviación a 85%-200 malla*

Componentes	Peso o Volumen	Ley	Contenido fino	Recuperación (%)
	(ml) o (g)	Au (g/TM) o (mg/lt)	Au	Au
Cabeza	200.00			
Solución rica	600.00	1.54	924.00	56.97
Relave	200.00	3.49	698.00	43.03
Cabeza calculada	8.11 g/TM			

Nota: Las unidades son gramos (g), gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).**Consumo de cianuro:** 12.23 Kg/TM**Tabla 9***Lixiviación a 90%-200 malla*

Componentes	Peso o Volumen	Ley	Contenido fino	Recuperación (%)
	(ml) o (g)	Au (g/TM) o (mg/lt)	Au	Au
Cabeza	200.00			
Solución rica	600.00	1.64	984.00	59.13
Relave	200.00	3.40	680.00	40.87
Cabeza calculada	8.32 g/TM			

Nota: Las unidades son gramos (g), gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).**Consumo de cianuro:** 13.42 Kg/TM

Tabla 10*Lixiviación a 95%-200 malla*

Componentes	Peso o Volumen	Ley	Contenido fino	Recuperación (%)
	(ml) o (g)	Au (g/TM) o (mg/lit)	Au	Au
Cabeza	200.00			
Solución rica	600.00	1.84	1104.00	66.35
Relave	200.00	2.80	560.00	33.65
Cabeza calculada	8.32 g/TM			

Nota: Las unidades son gramos (g), gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).

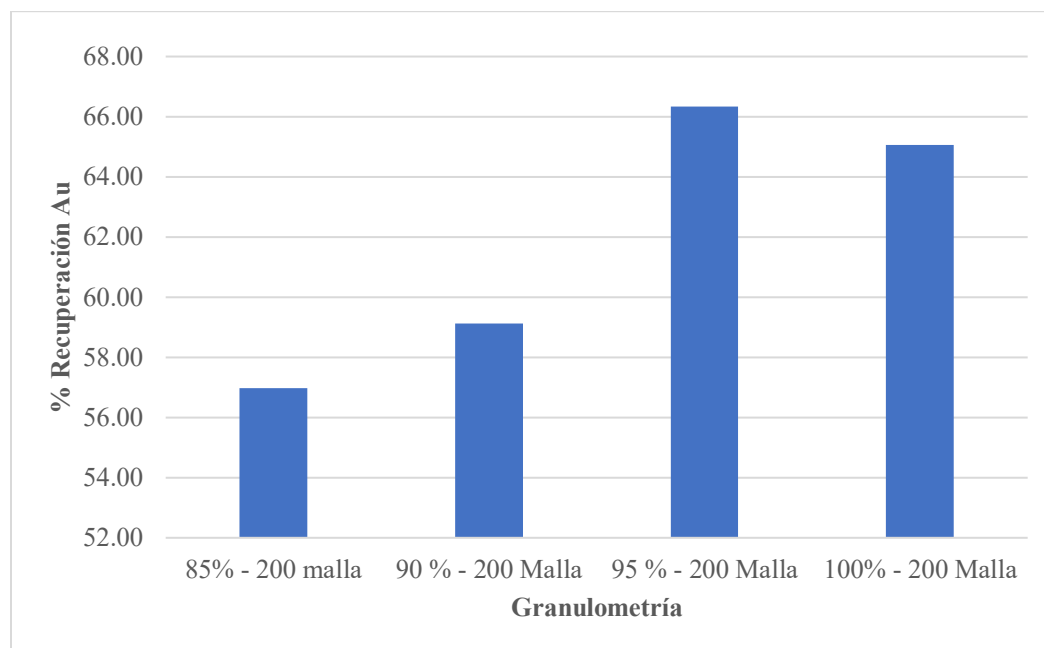
Consumo de cianuro: 14.56 Kg/TM

Tabla 11*Lixiviación a 100%-200 malla*

Componentes	Peso o Volumen	Ley	Contenido fino	Recuperación (%)
	(ml) o (g)	Au (g/TM) o (mg/lit)	Au	Au
Cabeza	200.00			
Solución rica	600.00	1.80	1080.00	65.06
Relave	200.00	2.90	580.00	34.94
Cabeza calculada	8.30 g/TM			

Nota: Las unidades son gramos (g), gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).

Consumo de cianuro: 14.95 Kg/TM

Figura 15*Recuperación de Au vs granulometría*

Nota: Gráfico de barras que compara las recuperaciones.

4.4. Tratamiento de Preaireación de los Relaves

Con la finalidad de reducir el consumo de reactivo y mejora la recuperación de oro, se realizó un tratamiento de preoxidación de la pulpa conocido como preaireación con cal, para lo cual, se elaboró un diseño experimental factorial, que determinó la contribución del tiempo de preaireación y alcalinidad de la pulpa (pH), sobre la recuperación de oro y el consumo de cianuro, bajo las condiciones de operación de la tabla 12. Los valores mínimos y máximos de las variables se describen en la tabla 13, y el arreglo experimental en la tabla 14.

Tabla 12*Condiciones del tratamiento de preaireación*

Peso de mineral	2000
Relación L/S	3
Granulometría	95% - 200M
RPM	800

Nota: Parámetros operativos.**Tabla 13***Variables del tratamiento de preaireación*

Variable	Mínimo	Máximo
Tiempo de preaireación (horas)	5	10
Alcalinidad de la pulpa (pH)	10.5	12

Nota: Se presentan los valores mínimos y máximos de las variables consideradas.**Tabla 14***Diseño factorial del tratamiento de preaireación*

OrdenEst	PtCentral	Tiempo (horas)	pH
1	1	5	10.5
2	1	10	10.5
3	1	5	12
4	1	10	12
5	1	5	10.5
6	1	10	10.5
7	1	5	12
8	1	10	12

Nota: Se muestra el orden de las pruebas, generado en Minitab 19, el diseño factorial es de dos factores, dos niveles y dos réplicas.

4.4.1. Desarrollo del Esquema de Pruebas

En base a la plantilla del diseño factorial, se desarrollaron pruebas metalúrgicas de preaireación con cal, y lixiviación con cianuro sin intercambio de solución, en el laboratorio de pruebas metalúrgicas IMJEZCU SAC, teniendo en cuenta las variables independientes y dependientes, así como las variables constantes que intervienen en el proceso. Los resultados de las pruebas se reportan en los balances de materia de la tabla 15.

Tabla 15

Pruebas de preaireación y lixiviación

N° de prueba	Componente	Peso o volumen (ml o g)	Ley Au (g/TM) o (mg/lt)	Contenido fino Au	Recuperación (%) Au	Cabeza calculada (g/TM)
	Cabeza	200.00				
1	Solución rica	600.00	1.91	1146.00	67.17	8.53
	Relave	200.00	2.80	560.00	32.83	
2	Solución rica	600.00	2.01	1206.00	72.30	8.34
	Relave	200.00	2.31	462.00	27.70	
3	Solución rica	600.00	1.94	1164.00	69.20	8.41
	Relave	200.00	2.59	518.00	30.80	
4	Solución rica	600.00	2.02	1212.00	73.45	8.25
	Relave	200.00	2.19	438.00	26.55	
5	Solución rica	600.00	1.87	1122.00	67.43	8.32
	Relave	200.00	2.71	542.00	32.57	
6	Solución rica	600.00	1.92	1152.00	71.91	8.01
	Relave	200.00	2.25	450.00	28.09	
7	Solución rica	600.00	1.89	1134.00	68.98	8.22
	Relave	200.00	2.55	510.00	31.02	
8	Solución rica	600.00	1.99	1194.00	72.28	8.26
	Relave	200.00	2.29	458.00	27.72	

Nota: El pH de la lixiviación es 12 y la concentración de cianuro inicial fue de 5000 ppm. Las unidades son gramos (g), gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).

4.5. Análisis de Varianza para la Recuperación de Oro

Los resultados de recuperación de oro como consecuencia del desarrollo de pruebas metalúrgicas de preaireación y lixiviación, se analizaron con respecto a su varianza, y los resultados se describen a continuación en la tabla 16. Así también en la tabla 17 se denota los coeficientes de correlación que representa la confiabilidad del modelo que relaciona las variables en estudio. Además de estos parámetros estadísticos, el análisis estadístico en Minitab 19 representa los coeficientes de codificación en la tabla 18. Finalmente, la gráfica de Pareto de la figura 16, representa la contribución de las variables independientes sobre las variables respuesta.

Tabla 16

ANOVA para la recuperación de oro

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	40.5817	98.00%	40.5817	13.5272	65.29	0.001
Lineal	2	40.0509	96.72%	40.0509	20.0255	96.66	0
Tiempo (horas)	1	36.8033	88.87%	36.8033	36.8033	177.64	0
pH	1	3.2476	7.84%	3.2476	3.2476	15.68	0.017
Interacciones	1	0.5307	1.28%	0.5307	0.5307	2.56	0.185
Tiempo (horas)*pH	1	0.5307	1.28%	0.5307	0.5307	2.56	0.185
Error	4	0.8287	2.00%	0.8287	0.2072		
Total	7	41.4104	100.00%				

Nota: El grado de libertad se halla con la fórmula $2^k - 1$ y la contribución es individual para cada fuente.

Tabla 17*Resumen del modelo de la recuperación de oro*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.455171	98.00%	96.50%	3.31488	92.00%	44.56	14.96

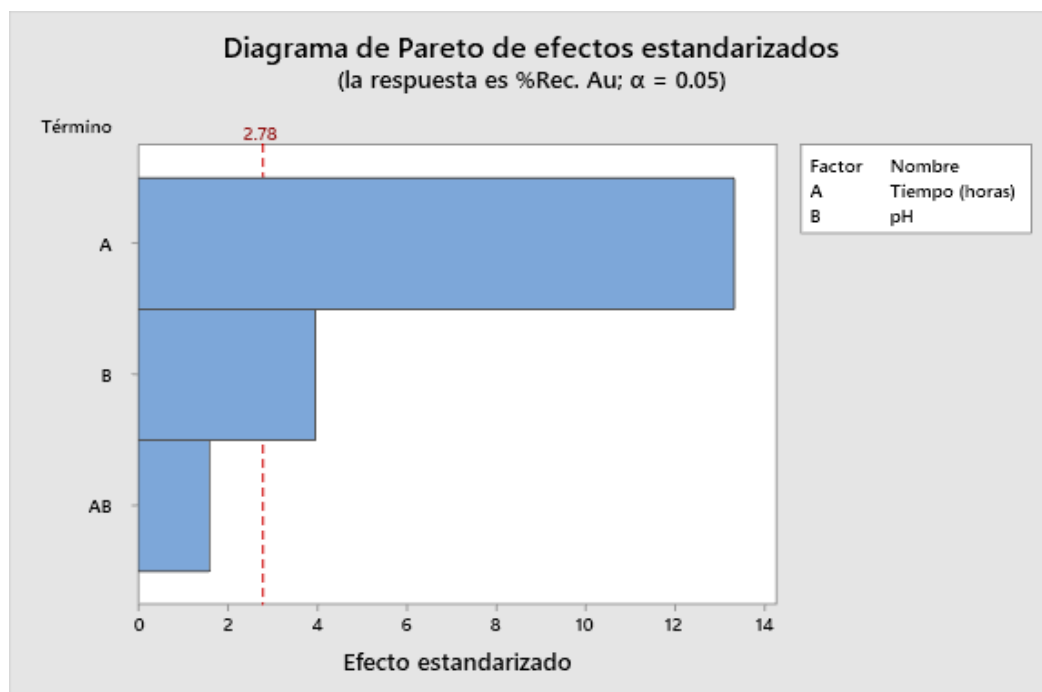
Nota: Datos estadísticos destacados.**Tabla 18***Coeficientes de codificación de la recuperación de oro*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante		70.341	0.161	(69.894; 70.788)	437.1	0	
Tiempo (horas)	4.29	2.145	0.161	(1.698; 2.592)	13.33	0	1
pH	1.274	0.637	0.161	(0.190; 1.084)	3.96	0.017	1
Tiempo (horas)*pH	-0.515	-0.258	0.161	(-0.704; 0.189)	-1.6	0.185	1

Nota: Codificación de las variables.

Figura 16

Pareto de la recuperación de Au



Nota: Gráfico de barras que compara el efecto de las variables.

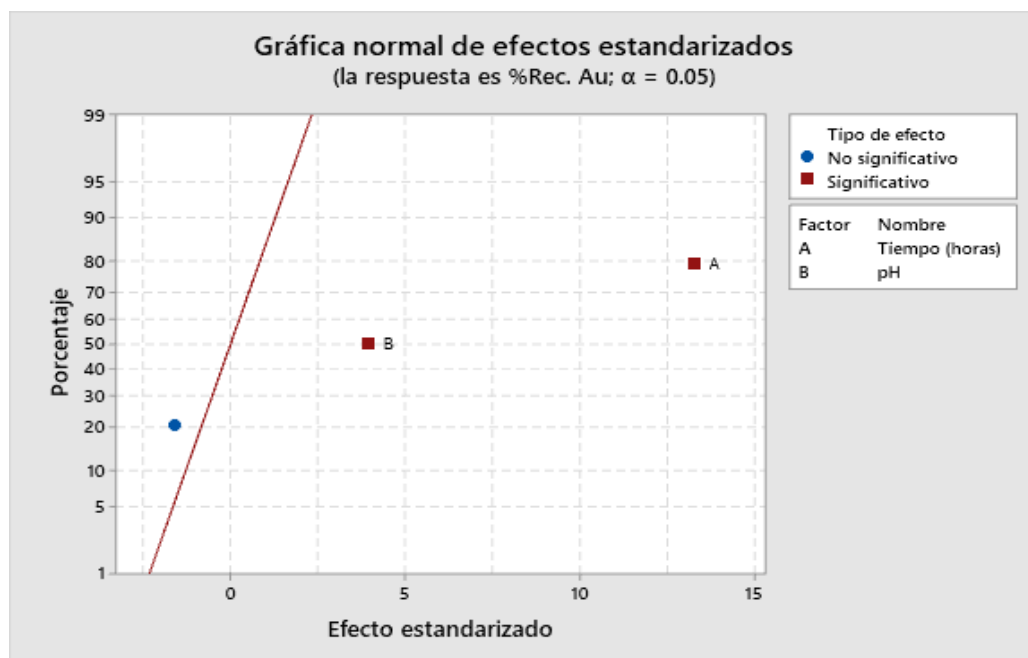
4.5.1. Ecuación de Regresión para la Recuperación de Oro

Se presenta a continuación un modelo matemático para la recuperación de oro en función del tiempo de preaireación y la alcalinidad de la pulpa. Así también se presenta la gráfica de normal de efectos estandarizados, en la figura 17.

$$\% \text{Rec. Au} = 42.76 + 2.403 \text{ Tiempo (hora)} + 1.880 \text{ pH} - 0.1374 \text{ Tiempo (horas)} * \text{pH}$$

Figura 17

Gráfica normal de la recuperación de Au



Nota: Las variables se representan con puntos.

4.6. Análisis de Varianza para el Consumo de Cianuro

A continuación, se describe en la tabla 19 el análisis de la varianza para el consumo de cianuro demuestra que el tiempo de preaireación es determinante sobre el consumo de cianuro, el cual presenta una contribución de 96.52%. Así también, en la tabla 20 se denotan los coeficientes de correlación como resultado del desarrollo de las pruebas de preaireación con cal, y lixiviación de los relaves, el cual presenta un coeficiente de correlación predictivo de 86.26%, reafirmando la confiabilidad del modelo para el consumo de cianuro. Por último, la tabla 21 se presenta los coeficientes de codificación, y en la figura 18 se representa el diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Tabla 19*ANOVA para el consumo de cianuro*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	15.3816	96.57%	15.3816	5.1272	37.5	0.002
Lineal	2	15.3771	96.54%	15.3771	7.6886	56.23	0.001
Tiempo (horas)	1	15.3735	96.52%	15.3735	15.3735	112.43	0
pH	1	0.0036	0.02%	0.0036	0.0036	0.03	0.879
Interacciones	1	0.0045	0.03%	0.0045	0.0045	0.03	0.865
Tiempo (horas)*pH	1	0.0045	0.03%	0.0045	0.0045	0.03	0.865
Error	4	0.547	3.43%	0.547	0.1367		
Total	7	15.9286	100.00%				

Nota: Se destaca de la tabla el dato de contribución de las variables.

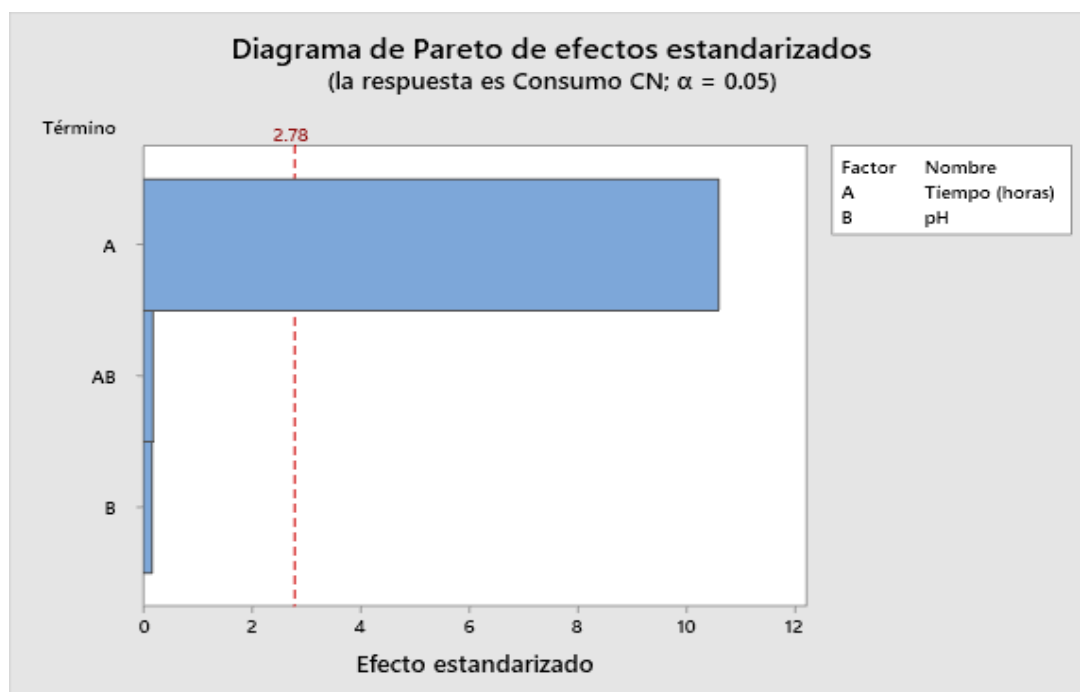
Tabla 20*Resumen del modelo del consumo de cianuro*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.36978	96.57%	93.99%	2.1878	86.26%	41.24	11.64

Nota: Datos estadísticos destacados.

Tabla 21*Coefficientes de codificación del consumo de cianuro*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante		9.644	0.131	(9.281; 10.007)	73.76	0	
Tiempo (horas)	-2.772	-1.386	0.131	(-1.749; -1.023)	-10.6	0	1
pH	0.042	0.021	0.131	(-0.342; 0.384)	0.16	0.879	1
Tiempo (horas)*pH	-0.047	-0.024	0.131	(-0.387; 0.339)	-0.18	0.865	1

Nota: Codificación de las variables.**Figura 18***Pareto del consumo de cianuro**Nota:* Gráfico de barras que compara el efecto de las variables.

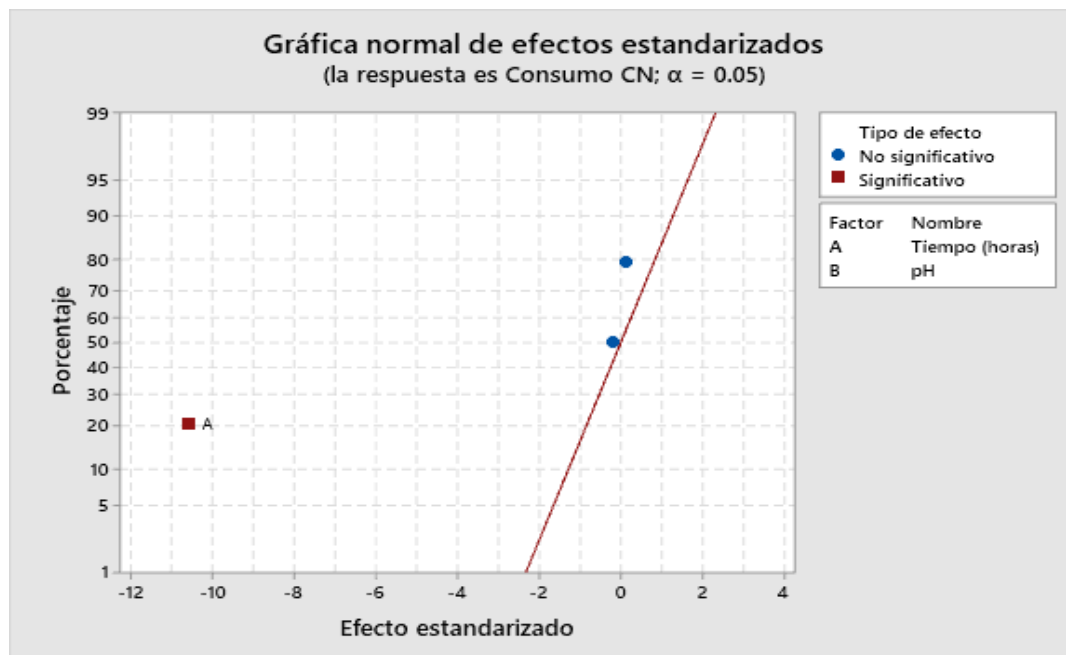
4.6.1. Ecuación de Regresión para el Consumo de Cianuro

Se presenta a continuación un modelo matemático que predice el consumo de cianuro en el proceso de lixiviación de relaves con pretratamiento de aireación con cal, en función de las variables independientes que intervinieron en el proceso. Así también la figura 19 presenta la gráfica normal de efectos estandarizados, la cual demuestra que el tiempo de preaireación es determinante para el consumo de cianuro en el proceso de lixiviación.

$$\text{Consumo CN} = 12.42 - 0.412 \text{ Tiempo (horas)} + 0.123 \text{ pH} - 0.0127 \text{ Tiempo (horas)} * \text{pH}$$

Figura 19

Gráfica normal de la recuperación de Au



Nota: Las variables se representan con puntos.

4.7. Cinética de Lixiviación de Relaves Preaireados, con Intercambio de Solución

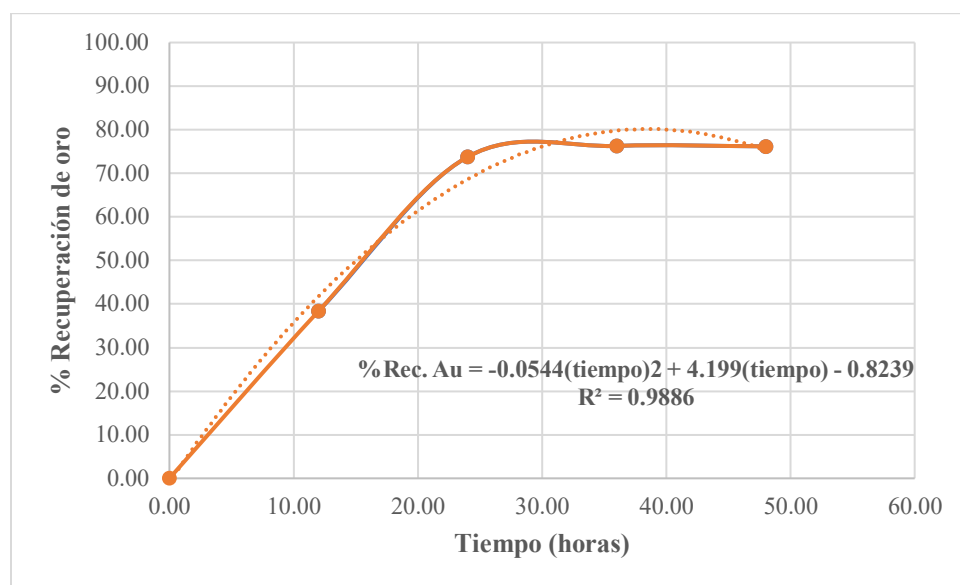
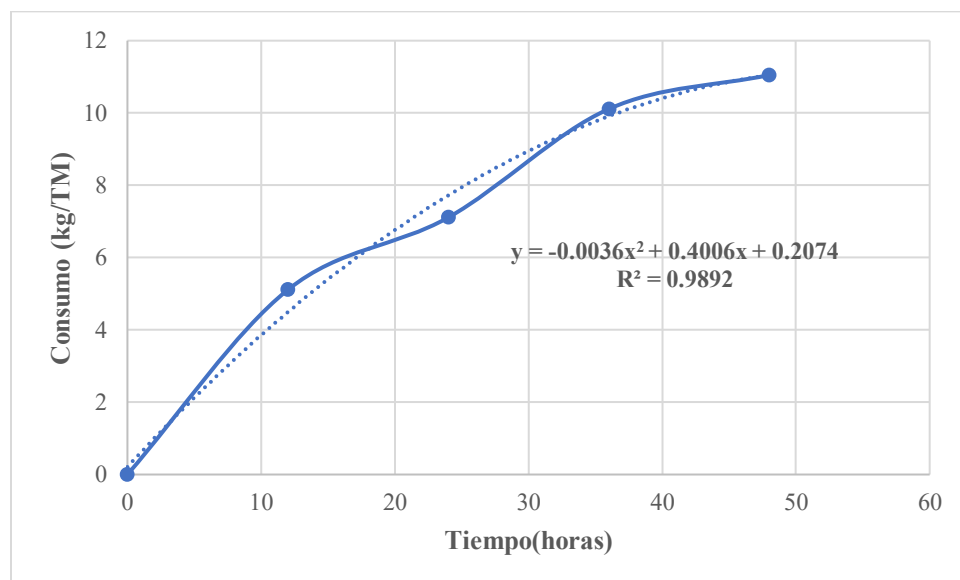
Con los mejores resultados de la preaireación con cal, se realizaron pruebas de cinética de lixiviación con cianuro en botella, para tiempos de 12, 24, 36 y 48 horas de proceso, con intercambio de solución. Los resultados de las pruebas hidrometalúrgicas se describen en la tabla 22, y las gráficas de las figuras 20 y 21, representan la disolución de oro y el consumo de cianuro, en el tiempo.

Tabla 22

Resumen de los datos reportados en la lixiviación

Tiempo(horas)	Componentes	Ley	Metálico	Recuperación (%)	CN (Kg/TM)
		Au (g/TM)	Au	Au	
12	sol. Rica	1.06	636.00	38.36	5.11
	relave	5.11	1022.00	61.64	
24	sol. Rica	2.05	1230.00	73.74	7.11
	relave	2.19	438.00	26.26	
36	sol. Rica	2.09	1254.00	76.28	10.11
	relave	1.95	390.00	23.72	
48	sol. Rica	2.10	1260.00	76.18	11.05
	relave	1.97	394.00	23.82	

Nota: Las unidades de los datos son gramos por toneladas métricas (g/TM) y porcentaje (%).

Figura 20*Cinética de recuperación de oro**Nota:* Curva de la recuperación en función del tiempo.**Figura 21***Consumo de cianuro en el tiempo**Nota:* Curva del consumo en función del tiempo.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. Análisis e Interpretación de Resultados

La geología y caracterización de la muestra problema se llevaron a cabo en el laboratorio de GEOEXINPESAC y las pruebas metalúrgicas de concentración centrífuga-gravimétrica y flotación de minerales en la empresa IMJEZCU SAC.

El contenido de oro no es apreciable mediante inspección visual con un plato de lavar minerales conocido como poruña, apreciándose a simple vista mayor cantidad de pirita. Además de esto, dichos relaves piritosos en la provincia de Casma fueron parte de los relaves de proceso final de una planta concentradora que explotaba cobre y oro libre. Por esta razón, es que se decide mandar analizar una muestra representativa para determinar que especies comerciales podrían ser aprovechables. Además de los ensayos químicos la caracterización mineralógica demostró que la pirita presenta pequeñas partículas de oro entrelazadas, estas partículas fueron determinadas en cantidades mínimas, por lo que se reportó como trazas. La ley de cabeza de 8.23 g/TM, no reflejó los datos de la caracterización, por lo que hizo suponer que la mayor cantidad de oro presente en la muestra de relave se encontraba como pequeñas inclusiones dentro de la pirita y posiblemente asociado a otros sulfuros. La microscopía óptica también identificó la presencia de minerales cianicidas en pequeñas proporciones, como la calcopirita y arsenopirita, lo que se vio reflejado por el alto consumo de cianuro en la primera prueba de lixiviación de los relaves sin pretratamiento. Los resultados de las pruebas de lixiviación con cianuro de los relaves sin tratamiento demostraron tener una baja recuperación de oro con un alto consumo de cianuro, y fue necesario realizar las pruebas a distintas granulometrías para identificar el tamaño de partícula del material que mejor obedece al proceso de lixiviación. Dichas pruebas determinaron que a partir del 95% - 200 Malla

de granulometría, el material logra recuperaciones superiores al 65%, no existiendo una diferencia notoria entre las respuestas para los tamaños de 95%, y 100% - 200 Malla. Los resultados se aprecian en la tabla 23.

Tabla 23

Resumen de los datos reportados de la lixiviación según la granulometría

Granulometría	Recuperación Au (%)	Consumo (Kg/TM)
85 % - 200 Malla	56.97	12.23
90 % - 200 Malla	59.13	13.42
95 % - 200 Malla	66.35	14.56
100 % - 200 Malla	65.06	14.95

Nota: Las unidades de los datos son kilogramos por toneladas métricas (kg/TM) y porcentaje (%).

En cada una de las pruebas preliminares de lixiviación se pudo observar el alto consumo de cianuro, generado principalmente por la presencia de cianicidas y la materia casi en su totalidad sulfurada, es por ello que se elaboró pruebas experimentales pretratamiento con cal, con la finalidad de oxidar la superficie de las partículas sulfurados para que el reactivo sea capaz de formar complejos con el oro, además de esto, reducir el consumo de cianuro es clave para la rentabilidad del proceso. Para ello se elaboró un diseño experimental factorial de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas empleando software estadístico Minitab 19, con la finalidad de determinar la contribución de las variables del pretratamiento, como alcalinidad de la pulpa (pH), y tiempo de preaireación sobre la recuperación de oro y el consumo de cianuro.

El desarrollo del diseño experimental corroboró la hipótesis de que la preaireación aumenta significativamente la recuperación de los valores metálicos de oro, y reduce considerablemente el consumo de reactivo empleado. Así también el paquete estadístico y sus aplicaciones nos indicaron que el tiempo de preaireación es más determinante para valores de pH entre 10.5 y 12, de tal manera que se obtuvieron los mejores resultados de recuperación de oro, para un relave con preaireación de 10 horas a un pH de 12. Los resultados del desarrollo del diseño se muestran a continuación en la tabla 24.

Tabla 24

Diseño factorial de la investigación

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Tiempo	pH	%Rec. Au	Consumo CN
1	1	1	1	5	10.5	67.17	10.50
2	2	1	1	10	10.5	72.30	8.30
3	3	1	1	5	12	69.20	11.20
4	4	1	1	10	12	73.45	8.40
5	5	1	1	5	10.5	67.43	11.47
6	6	1	1	10	10.5	71.91	8.22
7	7	1	1	5	12	68.98	10.95
8	8	1	1	10	12	72.28	8.11

Nota: Se muestra el orden de las pruebas.

Las pruebas del diseño experimental se desarrollaron sin intercambio de solución, es decir, que luego de ser preaireado, la pulpa fue alimento de las pruebas de cianuración en botella, por lo que hizo suponer que al realizar un intercambio de solución luego de la preaireación, este respondería más eficientemente en la lixiviación. Esto se debe a la saturación de la solución de preaireación,

por iones disueltos, que perjudican la disolución del metal valioso. Es por esto que se realizó una prueba de cinética de lixiviación con material preaireado y con intercambio de solución. Los resultados indicaron una mejora tanto para la recuperación de oro, y la disminución en el consumo de cianuro. Tal y como se indicó en los resultados de la tabla 24.

5.2. Prueba de Hipótesis

La prueba de hipótesis es un procedimiento estadístico que permite tomar decisiones sobre una población, basado en los resultados obtenidos de una muestra experimental. Su objetivo es verificar si la evidencia experimental respalda o no una hipótesis formulada previamente, a través de la comparación entre una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_1).

5.2.1. Prueba de Hipótesis General

H_0 (Hipótesis Nula): La preaireación de los relaves piritosos con contenido de oro no mejora significativamente la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma.

H_1 (Hipótesis Alternativa): La preaireación de los relaves piritosos con contenido de oro mejora significativamente la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma.

A partir del diseño experimental factorial realizado, se observó que la recuperación de oro aumentó desde valores inferiores al 60% (lixiviación sin preaireación) hasta recuperaciones superiores al 73% (con preaireación de 10 horas a pH 12). Asimismo, el consumo de cianuro disminuyó de más de 14.5 kg/TM a aproximadamente 8.3 kg/TM. El análisis estadístico demostró que el tiempo de

preaireación es la variable más influyente, con una contribución del 88.87% en la recuperación de oro, y el modelo generado obtuvo una confiabilidad de 92%.

Dado que los resultados experimentales respaldan la mejora significativa de la recuperación de oro y la reducción del consumo de cianuro gracias al pretratamiento de preaireación, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

5.2.2. Prueba de Hipótesis Específica 1

H_0 : La microscopia óptica de los relaves piritosos no permite identificar adecuadamente las especies minerales involucradas ni determinar el grado de liberación necesario para la recuperación de oro en la provincia de Casma.

H_1 : La microscopia óptica de los relaves piritosos permite identificar adecuadamente las especies minerales involucradas y determinar el grado de liberación necesario para la recuperación de oro en la provincia de Casma.

La microscopia óptica permitió identificar la pirita como mineral predominante (40.46%), así como otras especies sulfuradas, y determinó un grado de liberación de 93.72%. Además, se identificó un tipo de oro refractario.

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

5.2.3. Prueba de Hipótesis Específica 2

H_0 : La preaireación de los relaves piritosos no permite oxidar los principales sulfuros con contenido de oro en la provincia de Casma.

H_1 : La preaireación de los relaves piritosos permite oxidar los principales sulfuros con contenido de oro en la provincia de Casma.

El análisis del proceso de preaireación demostró que la oxidación superficial de los sulfuros redujo el consumo de cianuro y mejoró la recuperación de oro, evidenciando la oxidación exitosa de las especies sulfuradas.

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

5.2.4. Prueba de Hipótesis Específica 3

H₀: La lixiviación con cianuro de los relaves piritosos pre oxidados no permite recuperar significativamente oro en la provincia de Casma.

H₁: La lixiviación con cianuro de los relaves piritosos pre oxidados permite recuperar significativamente oro en la provincia de Casma.

La recuperación de oro se incrementó a más del 73% tras la preaireación, validando la eficiencia del pretratamiento aplicado.

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

5.3. Discusión de Resultados

Al comparar los resultados obtenidos con los de la investigación realizada por (Aguilar, 2021), se puede decir que la diferencia radica en la caracterización mineralógica, dado que es fundamental conocer las especies involucradas en el proceso. Así también, el autor evaluó la dosificación de aire como variable independiente, concluyendo que la recuperación de oro aumentó con 0.14 m³/h de aire insuflado, logrando incrementar la recuperación en 4%. Con respecto a la recuperación de oro, si bien es cierto que aumenta notoriamente con la preaireación, el proceso de lixiviación logró recuperaciones menores al 30%, por lo que hace inviable técnica y económicamente su procesamiento.

El trabajo realizado por (Carhuamaca & Cristobal, 2013) presenta resultados similares a los obtenidos. Una de ellas es que dicho autor caracterizó la muestra que investigó, con la cual determinó la presencia de sulfuros como pirita, pirrotita, marcasita, calcopirita, pirargirita, arsenopirita, esfalerita, y en base a ensayos químicos determinó una ley promedio de 4 a 5 g/TM de oro. El autor realizó pruebas de lixiviación sin tratamiento, logrando recuperar hasta un máximo de 77.58% del metal valioso. En esta primera etapa, el autor logró recuperar 12.52 % más de oro sin pretratamiento alguno. En las pruebas de preaireación que realizó, logró la mejor recuperación de 89.55% de oro, resultado que demuestra una mejor performance metalúrgica que el trabajo realizado. Con respecto a las variables en estudio, evaluó, además del pH y el tiempo de preaireación, el flujo de aire inyectado.

CONCLUSIONES

- ✓ Las pruebas de lixiviación con cianuro en botella determinaron que para una granulometría de 95% - 200 Malla, se logró recuperar 66.35% de oro, con un consumo de 14.56 Kg/TM de cianuro. Bajo los mismos parámetros de operación, pero con tratamiento de preaireación sin intercambio de solución se logró recuperar un 73.45% de oro con un consumo de cianuro de 8.4 kg/TM. Aumentando la recuperación en 7.1% y reduciendo el consumo de cianuro en 6.16 kg/TM. Mientras que con el tratamiento de preaireación con intercambio de solución se logró recuperar 76.28% de oro con un consumo de cianuro de 8.5 kg/TM. Aumentando la recuperación en un 9.93% y reduciendo el consumo de cianuro en 6.06 kg/TM
- ✓ El diseño experimental para el desarrollo de las pruebas de preaireación y lixiviación con cianuro, determinaron que el tiempo de preaireación es la variable de mayor contribución tanto para la recuperación de oro como para el consumo de reactivo, con valores de 88.87% y 96.52%
- ✓ El software estadístico indicó que el modelo: $\% \text{ Rec. Au (\%)} = 42.76 + 2.403(t) + 1.880(\text{pH}) - 0.1374(t) * \text{Ph}$, se ajusta al diseño de pruebas realizadas con respecto a la recuperación de oro, donde (t) es el tiempo de preaireación, y (pH) la alcalinidad en el proceso de preaireación. La ecuación presenta una confiabilidad pronosticada de 92%.
- ✓ La ecuación que deduce el consumo de cianuro es: $\text{CN(Kg/TM)} = 12.42 - 0.412(t) + 0.123(\text{pH}) - 0.0127(t)(\text{pH})$, la cual presenta una confiabilidad de 96.52%

- ✓ Los mejores valores de recuperación de oro se obtuvieron con 10 horas de tratamiento del relave con cal suficiente para alcalinizar la pulpa a 12, luego de intercambiar la solución para lixiviar, alcanza una recuperación de 76.28% de oro en 36 horas de proceso.
- ✓ A pesar de que el aumento en la recuperación de oro y la reducción en el consumo de cianuro justificarían una implementación de este proceso por la alta rentabilidad económica que generaría, no se ha implementado porque la planta de procesamiento metalúrgico obedece a la categoría de pequeña minería y no cuenta actualmente con el capital económico para implementar dicho proceso.

RECOMENDACIONES

- ✓ En base a los resultados obtenidos, se recomienda realizar pruebas de preaireación y lixiviación de relaves, a escala piloto.
- ✓ Evaluar reactivos sustitutos del cianuro para la etapa de lixiviación, como el Tiosulfato, Tiocianato o Reactivos comerciales específicos como CNLITE, Sandioss, Reactivo BK517. También como ayuda a la reacción se podría utilizar el Peróxido de hidrógeno.
- ✓ Realizar bajo los mismos parámetros de molienda y manteniendo el pH y tiempo de lixiviación, pruebas metalúrgicas con estos reactivos alternativos para determinar si alguno resulta más óptimo en la recuperación de oro.
- ✓ Dada la ley de 8.23 g/TM de oro y con una recuperación de 76.28% con este proceso, considerando el valor económico actual del oro que ronda los 4000 dólares la onza, el beneficio económico para la planta sería de 880 dólares por tonelada métrica aproximadamente. Lo cual hace muy atractivo y rentable el procesamiento de su relave y se recomienda que se implemente dicho proceso.
- ✓ Realizar pruebas de pretratamiento de relaves con bacterias, la cual se presenta como un método atractivo para estos tipos de materiales.
- ✓ Mantener la aeración durante todo el proceso, no solo como una etapa de pre-aireación.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, B. (2021). *Aplicación de pre-aireación en lixiviación con cianuro de sodio en el mineral de interés de la mina “Cristhian David”, Pasaje-El Oro* [Tesis de licenciatura, Universidad del Azuay].

Andrade, L., & Hodouin, D. (2005). A lumped kinetic model for gold ore cyanidation. *Hydrometallurgy*, 79(3–4), 121–137. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.001>

Aramburú, V. (2003). Modelo de la preaireación en concentrado de oro pirítico, para la optimización del proceso de cianuración. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 6(12), 7–15. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v6i12.739>

Aramburú, V. (2003). *Modelo de la pre-aireación en concentrados de oro pirítico, para la optimización del proceso de cianuración utilizando el programa estadístico Statgraphic Plus* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Azañero, A., Núñez, P., Aramburú, V., León, E., Quiñones, L., Cabrera, M., Puente, L., Díaz, C., Cerrón, J., & Juan, A. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 12(24), 49–55. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v12i24.356>

Birich, A., Stopic, S., & Friedrich, B. (2019). Kinetic investigation and dissolution behavior of cyanide alternative gold leaching reagents. *Scientific Reports*, 9, 7191. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>

Botz, M., & Akcil, A. (2016). Cyanide treatment: Physical, chemical, and biological processes. En M. Adams (Ed.), *Gold ore processing: Project development and operations* (2.a ed., pp. 619–645). Elsevier.

Carhuamaca, W., & Cristobal, B. (2013). *Recuperación del oro mediante la pre-aireación en concentrados de oro pirítico en la empresa Analytica Mineral Services S.A.C – Chala - Arequipa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Coello, C. (2017). *Diseño de pretratamiento alcalino para proceso de cianuración de oro desde concentrados de flotación de menas refractarias* [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

Dai, X., Simons, A., & Breuer, P. (2012). A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. *Minerals Engineering*, 25(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.002>

De la Torre, E., & Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro*. Quito.

De la Torre, E., Gámez, S., & Pazmiño, E. (2018). Improvements to the cyanidation process for precious metal recovery from WPCBs. En M. Kaya (Ed.), *Waste electrical and electronic equipment recycling* (pp. 115–137). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102057-9.00005-6>

Higuera, O., Tristancho, J., & Florez, L. (2007). Comportamiento anódico de la plata en soluciones cianuradas libres de oxígeno. *Scientia et Technica*, 13(36). <https://repositorio.utp.edu.co/handle/11059/1256>

Hormann, P. (2008). *Aplicación del amoníaco como lixiviante ecológico de minerales auroargentíferos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

Ilyas, S., & Lee, J.-C. (2018). *Gold metallurgy and the environment* (1.a ed.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9781315150475>

Larrabure, G., & Rodríguez, J. (2021). A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process. *Minerals Engineering*, 173, 107194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194>

Li, H., & Wang, J. (2022). Evaluation of a green-sustainable industrialized cleaner utilization for refractory cyanide tailings containing sulfur. *Science of The Total Environment*, 827, 154359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154359>

Manning, T., & Kappes, D. (2016). Heap leaching of gold and silver ores. En M. Adams (Ed.), *Gold ore processing: Project development and operations* (2.a ed., pp. 413–428). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00025-6>

Marsden, J., & House, L. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2.a ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Parga, J., & Carillo, F. (1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, 32(4), 254–261. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7707279>

Ramírez, J. (2008). *Evaluación metalúrgica de minerales auríferos provenientes del yacimiento Angostura*. California, Santander.

Sánchez, A., Molina, O., & Gutiérrez, R. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Chimbote, Casma y Culebras* (Boletín INGEMMET N° 62). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima.

Srithammavut, W. (2008). *Modeling of gold cyanidation* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Lappeenranta].

Wang, H., Dowd, P., & Xu, C. (2021). Modelling pyrite oxidation in a refractory gold ore stockpile to estimate the gold recovery via direct cyanide leaching – A case study. *Minerals Engineering*, 173, 107177. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107177>

Yannopoulos, J. (2012). *The extractive metallurgy of gold*. Van Nostrand Reinhold.

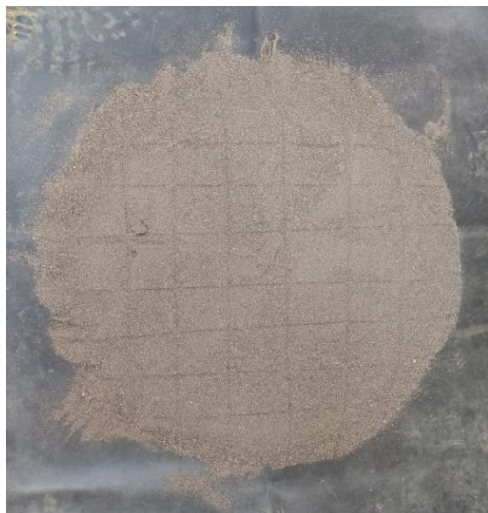
Yilmaz, E., Yazici, E., Celep, O., & Deveci, H. (2019). Atıklardan siyanürün geri kazanımı: SART Prosesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 600–615. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.452203>

Zavala, B., Valderrama, P. P., Luque, G., & Barrantes, R. (2009). *Riesgos geológicos en la región Ancash* (Boletín INGEMMET N° 38). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima.

ANEXOS

Anexo 1

Cuarteo del relave



Nota: Mediante el método Damero.

Anexo 2

Molienda del relave



Nota: Empleando un molino de bolas.

Anexo 3

Matriz de consistencia

ESTUDIO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE RELAVES PIRITOSOS DE FLOTACIÓN MEDIANTE PREOXIDACIÓN POR AIREACIÓN Y CIANURACIÓN EN LA PROVINCIA DE CASMA - ANCASH			
Problema general	Objetivo general	Hipótesis	
		Hipótesis general	Variables
¿De qué forma podemos recuperar los valores de oro contenido en los relaves piritosos de las plantas concentradoras de flotación en la provincia de Casma?	Recuperar el oro presente en los relaves piritosos mediante el tratamiento de preaireación y el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma.	La preaireación de los relaves piritosos con contenido de oro, permitirá recuperar oro mediante el proceso de lixiviación con cianuro en la provincia de Casma.	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable independiente
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	- Tiempo de Pre-aireación - pH de Pre-aireación
¿Cómo podemos identificar las especies de minerales y los grados de liberación presentes en los relaves piritosos con contenido de oro en la provincia de Casma?	Caracterizar la muestra de los relaves piritosos y determinar los grados de liberación adecuado para la extracción de oro en la provincia de Casma.	La microscopía óptica de los relaves piritosos permitirá identificar especies de minerales involucradas y determinar el grado de liberación adecuado para recuperar oro en la provincia de Casma.	Variable dependiente Porcentaje de recuperación de oro
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Variables intervinientes controladas - Fuerza de cianuro - Consumo de óxido de calcio (cal) - Oxígeno disuelto en pulpa - Velocidad de agitación - Relación L/S
¿Qué tratamiento de oxidación permitirá modificar la matriz sulfurada y favorecer la extracción de oro?	Oxidar la matriz sulfurada como pretratamiento para la lixiviación con cianuro.	La preaireación de los relaves piritosos en la provincia de Casma permitirá oxidar los principales sulfuros con contenido de oro.	
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	
¿Cuáles son las condiciones de la cianuración de oro en relaves piritosos previo tratamiento de oxidación, en la provincia de Casma?	Determinar el tiempo y las condiciones del proceso de cianuración previa oxidación.	La lixiviación con cianuro de los relaves piritosos pre oxidados permitirá recuperar oro, en la provincia de Casma.	