



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – Región La Libertad

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

Yashira CHUQUIMBALQUI ESPINOZA

John Deivis SUXE VERGARAY

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

Chuquimbalqui, Y. (2025). *Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – Región La Libertad*. [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	Yashira Chuquimbalqui Espinoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76602096
URL de ORCID	No aplica
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	John Deivis Suxe Vergaray
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46158360
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	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Luis Americo Rivera del Valle

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
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	No Aplica
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Laboratorio Metalúrgico País: Perú Departamento: La libertad Provincia: Sánchez Carrión Distrito: Huamachuco Centro poblado: Centro poblado Isabelita Latitud: -7.8158 Longitud: -78.0489
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022-2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Mineralogía https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERA METALÚRGICA**

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 jueves 22 del mes de mayo del 2025, siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios
Dr. LUIS AMÉRICO, Rivera del Valle
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – Región La Libertad» presentada por Doña: YASHIRA CHUQUIMBALQUI ESPINOZA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniera: **METALÚRGICA**.

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

.....SATISFACCIÓN.....

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

.....TRECE (13) APROBADO.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA METALÚRGICA**, a Doña: **Yashira Chuquimbalqui Espinoza**.

Siendo las **19:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 22 de mayo de 2025


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Presidente


Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA 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 jueves 22 del mes de mayo del 2025, siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios

(PRESIDENTE)

Dr. LUIS AMÉRICO, Rivera del Valle

(MIEMBRO)

Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «**Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – Región La Libertad**» presentada por Don: JOHN DEIVIS SUXE VERGARAY, 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 Mancomunada, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

TRECE

(13)

APROBADO

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada 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: **John Deivis Suxe Vergaray**.

Siendo las **19:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 22 de mayo de 2025


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Presidente


Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
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.º000267-2025-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – La Libertad” presentado por los bachilleres **YASHIRA CHUQUIMBALQUI ESPINOZA** y **JOHN DEIVIS SUXE VERGARAY** 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 **17%** 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, 2 de abril de 2025

Firma del Asesor

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURU ROJAS

DNI: 08608364

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
NOMENCLATURA.....	xi
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
CAPÍTULO I: Introducción	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema.....	3
2.1. Descripción de la Problemática	3
2.2. Problemática de la Investigación.....	4
2.2.1. Problema General	4
2.2.2. Problemas Específicos	4
2.3. Justificación de la Investigación.....	4
2.4. Objetivos de la Investigación	5
2.4.1. Objetivos Generales.....	5
2.4.2. Objetivos Específicos	5
2.5. Hipótesis y Variables.....	6
2.5.1. Hipótesis General	6
2.5.2. Hipótesis Específicas	6
2.6. Identificación de Variables.....	7
2.6.1. Operacionalización de Variables	7
CAPÍTULO III: Marco Teórico	8

3.1.	Antecedentes de la Investigación	8
3.2.	Bases Teóricas	12
3.2.1.	Fuentes Auríferas Naturales	12
3.2.2.	Carbón Mineral.....	14
3.2.2.1.	Refractariedad En Minerales Carbonáceos.....	15
3.2.2.2.	Usos del Carbón	17
3.2.3.	Lixiviación.....	18
3.2.3.1.	Lixiviación de Minerales Auríferos.....	18
3.2.3.2.	Lixiviación en Pilas de Oro	20
3.2.3.3.	Cianuración de Oro.....	21
3.2.3.3.1.	Factores que Determinan la Solubilidad de Oro en un Medio Cianurado	23
3.2.4.	Preg-Robbing.....	27
3.2.5.	Blending de Minerales.....	32
3.2.6.	Extracción de Oro a Nivel Internacional	33
3.2.7.	Producción Minera Aurífera Nacional	34
3.2.7.1.	Producción Minera Aurífera Según Empresa	35
3.2.7.2.	Producción Minera Aurífera Según Región	37
3.2.8.	Región de la Libertad (Perú)	38
3.2.8.1.	Etimología de la Palabra La Libertad	38
3.2.8.2.	Ubicación Geográfica	38
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación		41
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación.....	41
4.2.	Unidad de Análisis	42
4.3.	Población de Estudio	42

4.4.	Tamaño de Muestra	42
4.5.	Selección de Muestra.....	43
4.6.	Procedimiento Metodológico de la Investigación	43
CAPÍTULO V: Resultados.....		44
5.1.	Análisis Mineralógico de la Investigación	44
5.1.1.	Microscopia de una muestra con bajo TCM.....	44
5.1.2.	Tipos Geométricos de Entrelazamientos de los Minerales	45
5.1.3.	Microscopia de una muestra con contenido de TCM.....	48
5.1.4.	Tipos Geométricos de Entrelazamientos del lote con alto % TCM	49
5.2.	Pruebas Experimentales.....	52
5.2.1.	Ensayos Químicos de las Muestras de Tres Tajos.....	52
5.2.2.	Pruebas de Cianuración en Columna.....	52
5.2.2.1.	Análisis de la Granulometría y el Tiempo de Lixiviación	53
5.2.2.2.	Resultados de la Lixiviación del Tajo María.....	53
5.2.2.3.	Resultados de la Lixiviación del Tajo Herminia	55
5.2.2.4.	Resultados de la Lixiviación del Tajo Sofía.....	58
5.2.2.5.	Influencia del TCM en la cianuración en columnas	60
5.2.3.	Diseños Experimentales para Determinación del Blending	61
5.2.3.1.	Análisis de la Varianza de la Recuperación de Oro	63
5.2.3.1.1.	Gráfica de Contornos del Blending	64
5.2.3.1.2.	Gráfica de Superficie de Mezcla	65

5.2.3.1.3. Valores Óptimos del Blending de los Tajos .65

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados.....	66
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS.....	80

DEDICATORIA

A nuestras familias por acompañarnos en cada paso de nuestras vidas y a todas las personas que nos apoyaron y creyeron en nosotros.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por su incondicional apoyo a lo largo de nuestra vida y carrera profesional.

A nuestros docentes, por su guía continua y enseñanzas en el proceso de formación como Ingenieros Metalúrgicos.

RESUMEN

La presencia de material carbonáceo en los yacimientos de minerales oxidados en la región La Libertad disminuye la recuperación de Au en el proceso de cianuración en columnas, debido a que genera el efecto preg-robbing. Por tal razón, fue necesario realizar los análisis de microscopia óptica para minerales oxidados con presencia de carbón, así como mineral sin contenido de carbón, logrando identificar la presencia de oro libre en trazas asociadas a las gangas, también, especies sulfuradas de calcopirita y pirita con distribuciones de 0.37% y 0.97%, respectivamente. Teniendo muestras representativas de 3 tajos denominados María, Herminia y Sofía, se realizaron pruebas de cianuración en columna a nivel laboratorio bajo los parámetros de 10.5 de pH, 50 días de lixiviación, a granulometrías de 100% - (4", 2", 1").

Las pruebas de lixiviación en columna del tajo María; de 0.9 g/t de Au y, sin presencia de carbón, alcanzaron una recuperación de 85.66% de Au a una granulometría de 100% - 2" en un periodo de 25 días con un consumo de 0.18 Kg/t de cianuro y 0.16 Kg/t de cal. Por otro lado, Las pruebas de lixiviación del tajo Herminia de 0.52 g/t de Au, y 0.05 % de total mineral carbón (TCM), alcanzaron la recuperación de 75.47% a una granulometría de 100% - 2" en un tiempo de 25 días, con un consumo de 0.10 Kg/t de cianuro y 0.07 Kg/t de cal. Con respecto al tajo Sofía, que, ensayó 0.38 g/t de Au y 0.1% de TCM, logró recuperar 61.5 % de Au; para una granulometría de 100% - 2" y un periodo de 35 días, con un consumo de 0.23 Kg/t de cianuro y 0.269 Kg/t de cal. Se determinó que para mayores niveles de TCM la recuperación de oro disminuye, perjudicando el beneficio de dicho metal en los tajos con altos contenidos de TCM.

En base a los resultados obtenidos de la cianuración de los minerales de los distintos tajos, se elaboró un diseño experimental de mezclas, determinando la óptima

recuperación de 85.2% de Au empleando 50% de tajo María, y 50% del tajo Herminia.

El blending óptimo de la mezcla determinó una recuperación de 86.12% lixiviando en columna 77.78% del mineral de tajo María, y 22.22% del tajo Herminia.

ABSTRACT

The presence of carbonaceous material in the oxidized mineral deposits in the La Libertad region decreases the recovery of Au in the column cyanidation process, due to the preg-robbing effect they generate. For this reason, optical microscopy analyses were carried out for oxidized minerals with the presence of coal, and mineral without coal content, managing to identify the presence of free gold in traces associated with the gangues, also sulfide species of chalcopyrite and pyrite with distributions of 0.37% and 0.97%, respectively. With representative samples from 3 pits called María, Herminia and Sofia, column cyanidation tests were carried out at laboratory level under the parameters of 10.5 pH, 50 days of leaching, at particle sizes of 100% - (4", 2", 1").

Chemical tests of the María pit determined a grade of 0.9 g/t of Au, and no presence of coal. Column leaching tests achieved a recovery of 85.66% Au at a particle size of 100% - 2" in a period of 25 days with a consumption of 0.18 Kg/t of cyanide and 0.16 Kg/t of lime. On the other hand, chemical tests of the ore from the Herminia pit determined 0.52 g/t of Au, and 0.05 % of total carbon mineral (TCM), reaching a recovery of 75.47% at a particle size of 100% - 2" in a time of 25 days, with a consumption of 0.10 Kg/t of cyanide and 0.07 Kg/t of lime. Regarding the mineral from the Sofia pit, 0.38 g/t of Au and 0.1% of TCM were assayed, achieving a recovery of 63.15% of Au with a consumption of 0.23 kg/t of cyanide and 0.269 kg/t of lime using a particle size of 100% - 2" and a period of 35 days. It was determined that for higher concentrations of TCM the recovery of gold decreases, harming the benefit of said metal in the pits with high TCM contents.

Based on the results obtained from the leaching of the minerals from the different pits, an experimental design of mixtures was developed, determining the optimal recovery

of 85.2% of Au using 50% from the Maria pit, and 50% from the Herminia pit. The optimal blending of the mixture determined a recovery of 86.12% by leaching in column 77.78% of the mineral from the María pit, and 22.22% from the Herminia pit.

NOMENCLATURA

%	Porcentaje
g/t	Gramos por tonelada
TCM	Contenido de carbón mineral
”	Pulgadas
Kg	Kilogramo
Kg/t	Kilogramos por tonelada
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de Hidrógeno
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
MC	Media de cuadrados
S	Desviación estándar
R^2	Coefficiente de determinación
PRESS	Suma de los cuadrados de error de predicción
mc	Marcasita
hem	Hematita
py	Pirita
ccp	Calcopirita
Au	Oro
antr	Antracita
GGs	Gangas

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Minerales de oro	12
Tabla 2 Clasificación general del carbón mineral	15
Tabla 3 Usos y productos del carbón mineral	18
Tabla 4 Depósitos carbonáceos de oro con características de preg-robbing	30
Tabla 5 Volumen de la producción minera metálica	35
Tabla 6 Producción minera metálica según empresa (enero)	36
Tabla 7 Producción aurífera nacional (enero)	37
Tabla 8 Volumen porcentual y grados de liberación de la muestra con bajo TCM	44
Tabla 9 Variables mineralógicas de los minerales entrelazados de la muestra con bajo %TCM	45
Tabla 10 Volumen porcentual y grados de liberación de la muestra con contenido de TCM	48
Tabla 11 Variables mineralógicas de los minerales entrelazados de la muestra con alto contenido de TCM	49
Tabla 12 Ensayo químico de los tres tajos	52
Tabla 13 Resultados de la prueba QLT	52
Tabla 14 Lixiviación a 100% - 4" (Tajo María)	53
Tabla 15 Lixiviación a 100% - 2" (Tajo María)	54
Tabla 16 Lixiviación a 100% - 1" (Tajo María)	54
Tabla 17 Lixiviación a 100% - 4" (Tajo Herminia)	56
Tabla 18 Lixiviación a 100% - 2" (Tajo Herminia)	56
Tabla 19 Lixiviación a 100% - 1" (Tajo Herminia)	57
Tabla 20 Lixiviación a 100% - 4" (Tajo Sofia)	58

Tabla 21 Lixiviación a 100% - 2" (Tajo Sofía)	58
Tabla 22 Lixiviación a 100% - 1" (Tajo Sofía)	59
Tabla 23 Diseño factorial del blending de los tajos.....	62
Tabla 24 Parámetros de operación.....	62
Tabla 25 Diseño factorial del blending de los tajos en función de la recuperación de oro	63
Tabla 26 Resumen del modelo para la Rec. Au (%)	63
Tabla 27 Análisis de varianza para Rec. Au (%) (proporciones del componente).....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Procesamiento de mineral de oro e impactos ambientales.....	13
Figura 2 Representación esquemática de tipos de asociaciones de oro con minerales de sulfuro.....	14
Figura 3 Principales causas del comportamiento refractario durante la cianuración y los elementos frecuentemente asociados con tales causas	17
Figura 4 Alternativas de disolución de oro.....	19
Figura 5 Representación de una lixiviación en pilas	20
Figura 6 Diversos tratamientos para minerales de oro	23
Figura 7 Micrografías SEM de un carbón activado comercial y un material carbonoso de un mineral de tendencia Carlin.....	32
Figura 8 Distribución global de 500 yacimientos y ocurrencias de oro de clase mundial (+120 t Au; +4 Moz Au) de todo tipo.....	34
Figura 9 2022-2023: Producción mensual de oro (TMF).....	35
Figura 10 2023: Estructura de la producción de oro por empresas, enero. Reporte: 2022: 214 titulares mineros, 2023: 144 titulares mineros.....	36
Figura 11 Mapa de La Libertad	40
Figura 12 Liberación porcentual de la muestra	45
Figura 13 Liberación porcentual de los minerales entrelazados de la muestra con bajo %TCM	46
Figura 14 Micrografía: Au – py -GGs	47
Figura 15 Micrografía con presencia de py, hm, ccp y GGs	47
Figura 16 Liberación porcentual de la muestra con alto contenido de TCM	49

Figura 17 Liberación porcentual de los minerales entrelazados de la muestra con alto contenido de TCM.....	50
Figura 18 Micrografía con presencia de antr, py y GGs (1).....	51
Figura 19 Micrografía con presencia de antr, py y GGs (2).....	51
Figura 20 Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo María a diferentes granulometrías	55
Figura 21 Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo Herminia a diferentes granulometrías	57
Figura 22 Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo Sofía a diferentes granulometrías	60
Figura 23 Gráfica comparativa de las mejores pruebas de lixiviación de los 3 tajos.....	61
Figura 24 Gráfica de contorno de la Rec. Au (%).....	64
Figura 25 Gráfica de superficie de mezcla de Rec. Au (%)	65

CAPÍTULO I: Introducción

Actualmente, la tecnología utilizada en las pilas de lixiviación de minerales para la obtención de metales valiosos ha experimentado un mayor progreso en los últimos veinte años, enfocándose en el procesamiento de minerales de oro de baja ley (Ilankoon et al., 2018). Para llevar a cabo el proceso de lixiviación en pilas, el atributo primordial de los minerales consiste en que deben tener la capacidad de posibilitar la difusión de las soluciones lixiviantes para alcanzar todas las partículas y lograr disolver el oro, que se encuentra diseminado en el mineral (Azañero et al., 2000).

En ciertos minerales, la existencia de sustancias carbonáceas es la responsable de evitar la posibilidad de llevar a cabo la lixiviación con cianuro de sodio con el fin de recuperar oro. Esto ocurre debido a que el compuesto oro-cianuro que se forma es adsorbido por el carbón orgánico presente en el mineral, provocando un fenómeno conocido como "preg-robbing". Aunque varios minerales pueden desempeñar el papel de adsorbentes, el término "preg-robbing" ha sido principalmente atribuido a la presencia de materiales carbonáceo (Del Águila & Burgos, 2013). Se han creado métodos de procesamiento que emplean la lixiviación con tiosulfato para contrarrestar el efecto mencionado, debido a que este lixivante tiene una baja afinidad hacia el material carbonáceo. Aunque esta alternativa busca evitar el fenómeno de preg-robbing, pero; se sigue utilizando más el cianuro por la mayor estabilidad del complejo de oro-cianuro en comparación con el complejo de oro-tiosulfato (Ghorbani et al., 2016).

Para el procesamiento de estos minerales, se presentan dos opciones adicionales como la biolixiviación, que es más lenta y sensible a las condiciones operativas que la lixiviación convencional, y el "blending" (mezcla) de lotes de minerales, que combina

áreas con bajo contenido de carbón con zonas contaminadas para reducir el efecto del material carbonáceo (Fabian & Velita, 2012).

Por lo anteriormente dicho, la presente investigación plantea optimizar la recuperación de oro en la lixiviación en columna del blending de minerales oxidados con presencia de material carbonáceo, en la región La Libertad.

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

Si bien el método de extracción de oro más importante y empleado en la actualidad es la cianuración, las dificultades en el tratamiento se presentan principalmente por la complejidad mineralógica del depósito. En la región La Libertad, la presencia de material carbonáceo se ha convertido en una limitante para la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación por cianuración, dado que en la extracción de oro de estos minerales ocurre el fenómeno denominado efecto preg-robbing que se define como la adsorción de los complejos de oro-cianuro formados durante la lixiviación, el cual depende principalmente de la naturaleza del mineral. Dicho fenómeno perjudica constantemente la extracción de dicho recurso en estos tipos de depósitos, generando que en ocasiones sea el proceso inviable técnica y económicamente. El problema planteado en la presente investigación son las bajas recuperaciones de oro por el efecto preg-robbing que genera el carbón orgánico, las cuales se ven reflejadas en grandes pérdidas económicas para la empresa, la cual ocurre en lotes de minerales que presentan una cantidad apreciable de TCM, y generalmente estos lotes de minerales no son procesados. Además de ello, se tiene en cuenta que la producción de Au a nivel regional ha sido liderada por la región La Libertad, siendo el soporte económico de numerosas familias. Por lo descrito anteriormente, se pretende disminuir el efecto negativo de los minerales carbonáceos en el proceso de cianuración en columna de los tajos María, Herminia y Sofía, y proponer el blending óptimo de dichos tajos para aumentar la recuperación de Au total.

2.2. Problemática de la Investigación

2.2.1. Problema General

- ¿Cómo se disminuiría la influencia del efecto negativo de los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el TCM óptimo que debe tener el mineral para recuperar eficientemente el oro, empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?
- ¿Cuál es la granulometría más apropiada que debe tener el mineral para recuperar eficientemente del oro, empleando la mezcla de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?
- ¿Cuál es el tiempo de lixiviación necesario para maximizar la recuperación de oro, empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?

2.3. Justificación de la Investigación

La presencia de minerales carbonáceos (TCM) en los yacimientos oxidados genera un fenómeno conocido como prerobbing, que disminuye significativamente la recuperación de oro durante el proceso de lixiviación. Este efecto negativo se traduce en pérdidas económicas para la empresa minera, ya que el oro que no se recupera representa ingresos no percibidos. Si los minerales no tuvieran TCM, se alcanzaría una recuperación óptima de oro, lo que maximizaría la eficiencia técnica y económica del proceso.

La presente investigación busca optimizar la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación en columna aplicado al blending de minerales oxidados con presencia de TCM. Este enfoque permitirá cuantificar y mitigar el impacto del prerobbing, mejorando la recuperación metálica de oro y, por ende, aumentando la rentabilidad de la operación. Asimismo, contribuirá al aprovechamiento eficiente de estos yacimientos, lo que resultará en un incremento de la producción aurífera y los ingresos generados por la actividad minera en la región La Libertad.

2.4. Objetivos de la Investigación

2.4.1. *Objetivos Generales*

- Disminuir el efecto negativo de los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración, empleando la mezcla óptima de los tajos María, Herminia y Sofía, en la región La Libertad, para incrementar la recuperación.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar el contenido de TCM óptimo que debe tener el mineral para recuperar eficientemente el oro, empleando la mezcla de los tajos María, Herminia y Sofía, en la región La Libertad.
- Identificar la granulometría óptima que debe tener el mineral para alcanzar eficiencias de recuperación mayores a los iniciales, asegurando una molienda a un tamaño de partícula óptimo.
- Evaluar el tiempo de cianuración necesario para maximizar la recuperación de oro, estableciendo períodos óptimos, dependiendo del contenido de TCM y las condiciones del mineral de los tajos María, Herminia y Sofía.

- Dar viabilidad económica al beneficio de la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia y Sofía.

2.5. Hipótesis y Variables

2.5.1. Hipótesis General

- Debido al efecto negativo que tienen los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración, se plantea la hipótesis para reducir este efecto empleando una mezcla óptima de los tajos María, Herminia y Sofía, optimizando parámetros como el contenido de TCM, la granulometría y el tiempo de lixiviación, lo que permitirá incrementar la recuperación de oro, en la región La Libertad.

2.5.2. Hipótesis Específicas

- El contenido de TCM en el mineral influye directamente en la eficiencia de la recuperación de oro, disminuyendo el efecto preg-robbing, al mantenerlo en niveles óptimos durante el proceso de cianuración permitiendo mejorar la recuperación de oro por en la región La Libertad.
- Una granulometría adecuada del mineral mejora la exposición del oro, maximizando su recuperación durante el proceso de cianuración, en la región La Libertad.
- Se plantea un tiempo de lixiviación adecuado, que abarca varios días, optimiza la recuperación de oro al permitir una mayor disolución del metal en minerales con contenido de carbono, en la región La Libertad.

2.6. Identificación de Variables

Las variables a considerarse en el proceso de lixiviación en columna se determinaron mediante pruebas preliminares exploratorias en base a los antecedentes presentados en el capítulo III, las cuáles que fueron evaluadas con diseños experimentales.

Variable independiente

- ✓ % TCM
- ✓ Granulometría.
- ✓ Tiempo

Variable dependiente

- ✓ Porcentaje de recuperación de oro

Variables intervinientes controladas

- ✓ Altura de la pila
- ✓ Tasa de riego
- ✓ Relación L/S
- ✓ Concentración de cianuro
- ✓ pH del sistema

2.6.1. Operacionalización de Variables

Para procesar e identificar la influencia de las variables en el proceso de lixiviación en columna, se aplicará balances metalúrgicos en hojas de cálculo y análisis estadístico en Minitab 19, a fin de evaluar e interpretar las relaciones entre las variables, independientes y dependientes en estudio.

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

Larrabure & Rodríguez (2021), en su artículo de revisión titulado “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” realizaron un análisis exhaustivo acerca del impacto negativo que diversos elementos pueden tener durante el proceso de cianuración en minerales refractarios de oro y plata. Asimismo, se exponen estrategias destinadas a mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación. Los autores resaltan la prevalencia de la cianuración como el enfoque más empleado para la recuperación de oro y plata, pero subrayan que ciertos elementos pueden ocasionar contratiempos cinéticos o termodinámicos que mermen su efectividad. El enfoque de esta revisión se centra en los elementos químicos que potencialmente afectan la cianuración, como el cobre, hierro, arsénico, antimonio y selenio, detallando estrategias para superar dichos obstáculos, tales como pre-oxidación, la selección de eliminación de elementos específicos y la incorporación de agentes oxidantes. Además; se explora el efecto de la adsorción de cianuro en la superficie del mineral, conocida como "preg-robbing", y se proponen soluciones para mitigar su impacto, como la inclusión de carbón activado. En última instancia, los autores concluyen que la optimización del proceso de cianuración requiere una comprensión exhaustiva de las características elementales, mineralógicas y texturales del mineral, junto con la evaluación de posibles soluciones mediante proyectos de investigación y desarrollo. Además, se hace hincapié en la importancia de considerar tanto los aspectos técnicos como los ambientales y sociales en la optimización del proceso de cianuración.

Li et al. (2020), en su revista de investigación titulada “Effect of Acidithiobacillus ferrooxidans and Leptospirillum ferrooxidans on preg-robbing of gold by graphite from thiourea leaching solution” analizaron el impacto de las bacterias Acidithiobacillus ferrooxidans y Leptospirillum ferrooxidans en la disminución de la adsorción de oro por grafito en soluciones de lixiviación de tiourea. A. ferrooxidans, resistente al arsénico, se aisló en una zona cercana a la costa de Xiamen, China, mientras que L. ferrooxidans se obtuvo del Key Lab of Biohydrometallurgy of Ministry of Education, Central South University, Changsha, China. Se investigó la capacidad de la bio-oxidación de minerales auríferos carbonáceos para reducir la absorción de oro, un desafío crucial en minerales auríferos refractarios. Análisis con espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido (SEM) se llevaron a cabo para examinar la estructura de la superficie del grafito y la formación de jarosita. Los resultados indican que la bio-oxidación del grafito con Acidithiobacillus ferrooxidans y Leptospirillum ferrooxidans puede significativamente reducir la absorción de oro en soluciones de lixiviación de tiourea. La capacidad de adsorción del grafito para el oro disminuyó del 35,8% al 16,6% (con Acidithiobacillus ferrooxidans) y al 18,4% (con Leptospirillum ferrooxidans). Estos descubrimientos sugieren que la bio-oxidación podría ser una prometedora alternativa a los enfoques tradicionales de tratamiento de minerales auríferos refractarios.

Owusu et al. (2021), en su trabajo de investigación titulado “Reducing preg-robbing in carbonaceous gold ores using passivative or blanking agents” presentaron un estudio sobre la disminución de la capacidad de captura de oro en minerales de oro carbonáceos mediante el uso de surfactantes (naftaleno sulfonato, dextrina y Triton X-100) como agentes de enmascaramiento. Los resultados demostraron que los surfactantes catiónicos y aniónicos fueron los más efectivos para reducir la capacidad de captura de

oro en los minerales de oro carbonáceos. Específicamente, el surfactante catiónico fue el más efectivo, reduciendo la capacidad de captura de oro en un 90%. El surfactante aniónico también fue efectivo, reduciendo la capacidad de captura de oro en un 80%. En contraste, el surfactante no iónico tuvo poco efecto en la reducción de la capacidad de captura de oro. Además, se observó que el uso de surfactantes podría tener algunos efectos secundarios no deseados, como la disminución de la eficacia de la adsorción de oro. Aunque hubo algunos efectos secundarios, como una reducción del 20% en la adsorción de oro con el surfactante catiónico y del 10% con el surfactante aniónico, estos fueron menores en comparación con la significativa reducción en la captura de oro. En resumen, se concluye que el uso de surfactantes puede ser una estrategia efectiva para reducir la capacidad de captura de oro en minerales de oro carbonáceos.

Cruzado & Quispe (2021), en su tesis “Optimización de la producción de oro, mediante el incremento de la densidad de riego para la lixiviación en una unidad minera en la zona sur del Perú”, investigaron la optimización de la recuperación de oro en un mineral oxidado en la zona sur del Perú; en el departamento y provincia de Tacna, desarrollando pruebas metalúrgicas de lixiviación en columna con una muestra mineral del tajo Checocollo cuya ley de Au fue 0.546 gr/t. Desarrollaron tres pruebas de lixiviación en columnas; en la cual, la primera columna se lixivió conforme a los parámetros de operación de la unidad minera, a una densidad de 11 l/(hr-m²), la segunda columna se incrementó a 15 l/(hr-m²) y la tercera a 20 l/(hr-m²) obteniéndose extracciones de Au de 65.21%, 68.72% y 73.55% respectivamente.

Escamilla (2003), en su investigación técnica “Optimización de Mezclas de Minerales Mediante Programación Lineal en una Mina de Mineral de Fierro a Cielo Abierto”; nos dice cómo se pueden aprovechar al máximo los minerales expuestos en las zonas de explotación, junto con los depositados en las canchas y los terreros en una mina

de mineral de hierro a cielo abierto, efectuando mezclas eficientes mediante volúmenes de mineral para producir lotes diarios de concentrado determinados por medio de programación lineal, con el fin de optimizar el equipo de acarreo, cumplir con los programas de producción y reducir la variabilidad en las características químicas del concentrado.

Izquierdo & Rojas (2016), en la tesis de investigación titulada, “Optimización del blending de minerales en el pad de lixiviación de la mina Lagunas Norte usando parámetros de ley y recuperación usando LINGO (Linear General Optimizer Software)”, realizada en la Universidad Privada del Norte, de la ciudad de Cajamarca, Perú; señala que, el blending de mineral en el pad es un proceso importante y crítico que la mayoría de empresas mineras tiene que afrontar, para tal fin se revisan continuamente los planes de producción haciéndose las correcciones y ajustes necesarios; además para un efectivo control y administración el balance de la calidad y estabilidad de la mezcla, debe llevarse a cabo de forma técnica y con ayuda de la mejor tecnología disponible. Con la aplicación del LINGO se logró maximizar el número de Onzas de Oro puestas en el pad de lixiviación de la Mina Lagunas Norte, con un adicional del orden de 1998.289 onzas, lo cual constituye un incremento de 2.547% en la producción mensual con un valor económico de \$2'629,848.24. Asimismo, se permitió seleccionar con la ayuda del software, las áreas o pilas de mineral a ser mezcladas cumpliendo con las restricciones de ley (≥ 0.4 g/t) y recuperación metalúrgica.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Fuentes Auríferas Naturales

Tabla 1

Minerales de oro

Mineral	Fórmula	% Oro
Oro	Au	100,00% Au
Bezsmertnovita	Au ₄ Cu (Te, Pb)	78,56 % Au
Tetra-auricuprida	AuCu	75,61 % Au
Maldonita	Au ₂ Bi	65,34 % Au
Yuanjiangita	AuSn	62,40 % Au
Petrovskaita	AuAg(S, Se)	58,06 % Au
Auroantimonato	AuSbO ₃	53,71 % Au
Hunchunita	(Au, Ag) ₂ Pb	53,08 % Au
Auricuprida	Cu ₃ Au	50,82 % Au
Bilibinskita	Au ₃ Cu ₂ PbTe ₂	50,06 % Au
Weishanita	(Au, Ag) ₃ Hg ₂	47,90 % Au
Aurostibita	AuSb ₂	44,72 % Au
Calaverita	AuTe ₂	43,56 % Au
Krennerita	AuTe ₂	43,56 % Au
Montbrayita	(Au, Sb) ₂ Te ₃	39,97 % Au
Amalgama de oro	(Au, Ag) Hg	39,36 % Au
Anyuilita	Au(Pb, Sb) ₂	34,64 % Au
Sylvanita	(Au, Ag) ₂ Te ₄	34,36 % Au
Mutmanita	AgAuTe ₂	34,31 % Au
Uytenbogaardita	Ag ₃ AuS ₂	33,69 % Au
Bogdanovita	(Au, Te, Pb) ₃ (Cu, Fe)	33,23 % Au
Fischesserita	Ag ₃ AuSe ₂	29,03 % Au
Kurilita	(Ag, Au) ₂ (Te, Se, S)	27,08 % Au
Penzhinita	(Ag, Cu) ₄ Au(S, Se) ₄	25,94 % Au
Kostovita	CuAuTe ₄	25,55 % Au
Petzita	Ag ₃ AuTe ₂	25,39 % Au
Novodneprita	AuPb ₃	24,06 % Au
Criddleita	TlAg ₂ Au ₃ Sb ₁₀ S ₁₀	23,18 % Au
Nagyagita	AuPb(Sb, Bi)Te ₂₋₃ S ₆	18,60 % Au
Buckhornita	AuPb ₂ BiTe ₂ S ₃	16,81 % Au
Jonassonita	Au(Bi, Pb) ₅ S ₄	14,94 % Au
Museista	Pb ₂ (Pb, Sb) ₂ S ₈ (Te, Au) ₂	10,68 % Au
Skaergaardita	(PdCuFeAuZnPtSnPbTe)	2,27 % Au

Nota: Según la base de datos de mineralogía de Dana (Klein & Hurlbut, 1996).

Es improbable que el oro forme compuestos en la naturaleza como otros metales; se encuentra mayormente en estado nativo o en aleaciones con plata (Ag) y cobre (Cu). En pequeñas cantidades, se encuentra disperso en vetas asociadas con rocas ígneas silíceas, siendo el cuarzo hidrotermal la fuente principal, donde se deposita junto con pirita y otros sulfuros debido a soluciones minerales ascendentes. Los sulfuros que contienen oro se oxidan en la superficie terrestre, liberando el oro y facilitando su extracción. Las vetas expuestas a la intemperie liberan el oro contenido en el manto terrestre o arrastrado desde arroyos cercanos. Debido a su alta gravedad específica, el oro se separa mecánicamente de minerales más ligeros (Ros, 2017).

La clasificación de los depósitos de minerales de oro puede ser comprensible en la figura 1:

Figura 1

Procesamiento de mineral de oro e impactos ambientales

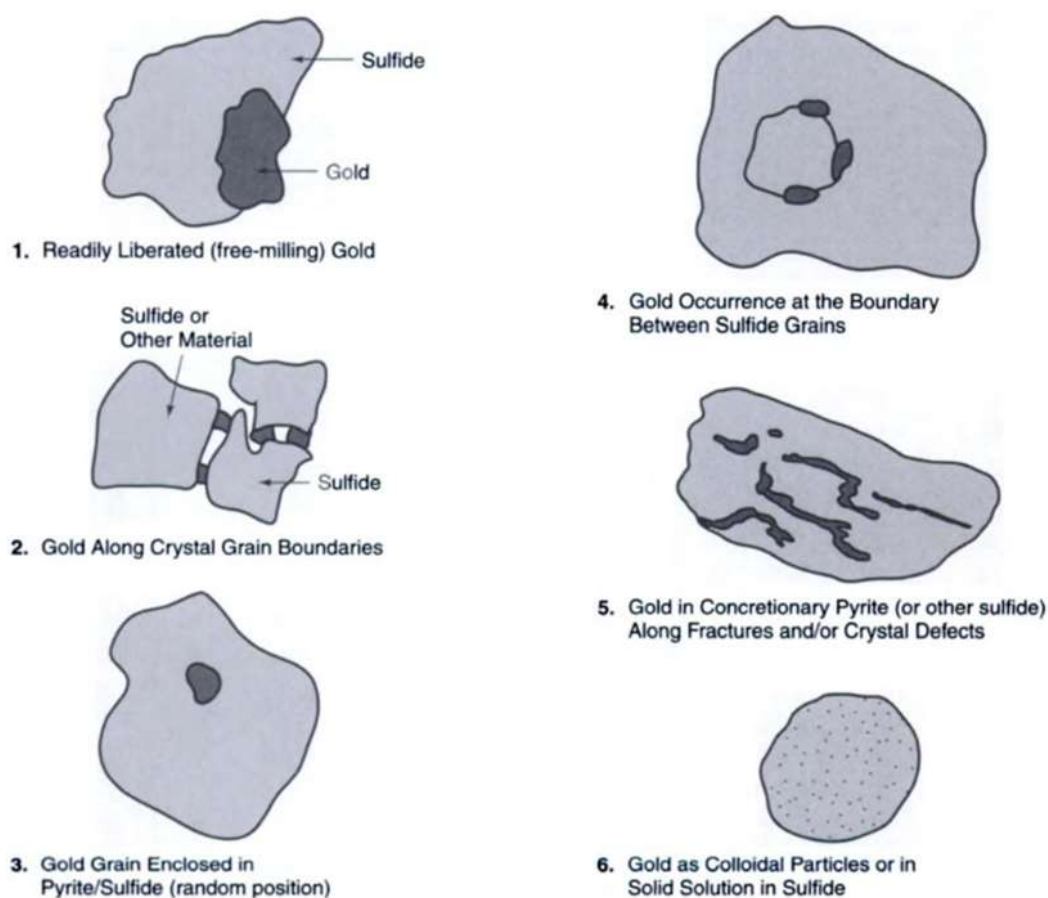


Nota: (Ilyas & Lee, 2018).

Uno de los tipos más importantes de clasificación es el oro asociado a sulfuros, donde se encuentra en forma de partículas libres o dispersas dentro de los sulfuros (Komnitsas & Pooley, 1989).

Figura 2

Representación esquemática de tipos de asociaciones de oro con minerales de sulfuro



Nota: (Marsden & House, 2006).

3.2.2. Carbón Mineral

El carbón, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, es el resultado de procesos naturales de muy larga duración a partir de residuos vegetales (Rojas, 2008). En la tabla 2 se muestra una tipología general, perteneciente a la American Society for Testing and Materials (ASTMD-388-777). Se indican cuatro tipos

básicos, de acuerdo con la composición de los vegetales y las condiciones de presión y temperatura durante los procesos naturales para su transformación (Rojas, 2008).

Tabla 2

Clasificación general del carbón mineral

Tipo	Carbono Fijo (%)	Material Volátil (%)	Contenido Humedad (%)	Poder Calorífico (Btu/lb)	Poder Calorífico (MJ/Kg)	Poder Calorífico Kcal/Kg
Antracita	86-98	1	<15	>14000	>32.6	>7.780
Bituminoso	45-86	32	15-20	10.500-14.000	24.5-32.6	5.800-7.780
Sub bituminoso	35-45	50	20-30	7.800-10.500	18.2-24.5	4.300-7.780
Lignito y Turba	25-35	96	>30	4.000-7.800	9.3-18.2	2.200-4.300

Nota: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019).

La clasificación de ASTM (Estados Unidos) se puede comparar con las clasificaciones de UN-ECE (Naciones Unidas - Comisión Económica Europea) y de DIN (Alemania) que describen un mayor número de tipos de carbón (Rojas, 2008).

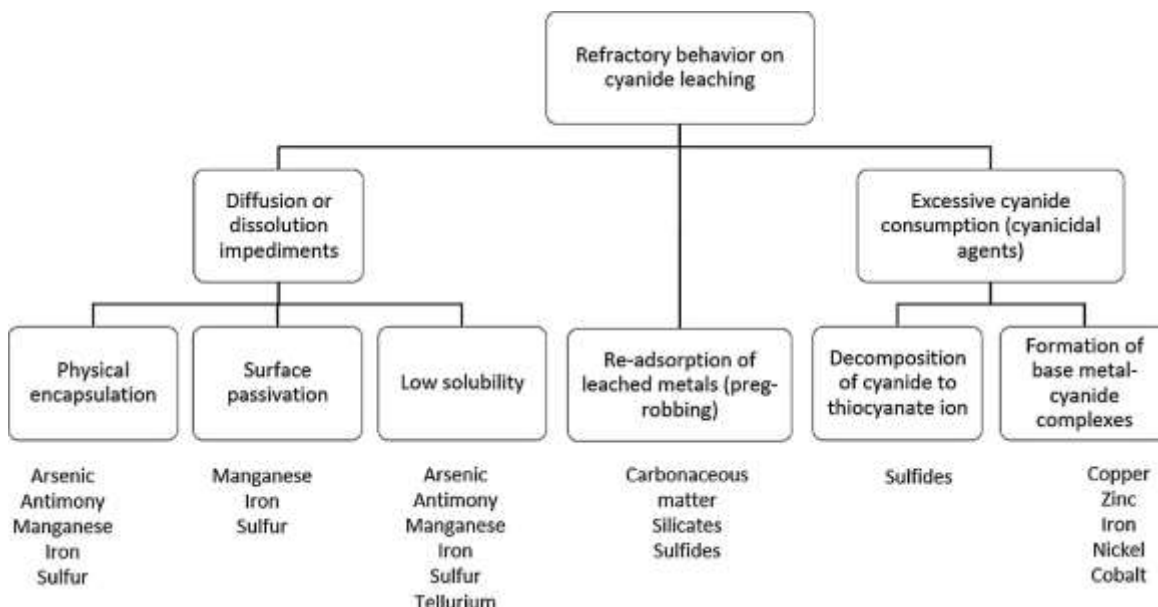
3.2.2.1. Refractariedad En Minerales Carbonáceos

El término "refractario" se puede referir también a minerales cuyas características mineralógicas reducen la eficiencia de los procesos de lixiviación, ya sea porque la cianuración da como resultado una extracción baja de metales preciosos o debido a un consumo excesivo de cianuro (Deschênes, 2016), lo que eventualmente puede hacer que el proceso no sea económicamente viable. Si bien existen diferentes causas específicas que pueden explicar su comportamiento, los minerales refractarios se pueden clasificar en función de cómo afectan los resultados hidrometalúrgicos del proceso. La presencia de ciertas especies ya sea en la superficie o en todo el volumen del mineral puede dar

lugar a los siguientes tipos de comportamiento refractario: (1) reducción de la capacidad del agente lixivante para difundir dentro de la matriz mineral o para disolver los minerales objetivo (Jeffrey & Breuer, 2000), (2) re-adsorción del oro o plata lixiviados sobre la superficie del mineral (ceguera del oro) (Senanayake, 2008; Tremolada et al., 2010), y (3) sobreconsumo de cianuro debido a la presencia de otras especies que pueden ser lixiviadas por el cianuro, compitiendo con los metales preciosos a través de reacciones indeseadas (Portilla et al., 2020; Salas et al., 2020). Dado que la refractariedad está determinada tanto por la mineralogía de la muestra como por sus propiedades texturales, las estrategias de procesamiento mineral para mejorar la eficiencia de un proceso de lixiviación a menudo son específicas para cada mineral. Sin embargo, es importante destacar que cada elemento químico tiene un comportamiento específico hacia la lixiviación, lo que podría ser importante analizar para tener un conjunto inicial de estrategias para mejorar la eficiencia de la lixiviación. Estos comportamientos se muestran esquemáticamente en la figura 3, junto con ejemplos de elementos específicos que se sabe que los causan. Ciertos elementos están asociados a más de uno de estos comportamientos (Lunt & Weeks, 2016), y por lo tanto es importante mencionar el efecto de tales elementos por separado, lo cual se hace en esta revisión.

Figura 3

Principales causas del comportamiento refractario durante la cianuración y los elementos frecuentemente asociados con tales causas



Nota: (Larrabure & Rodríguez, 2021).

3.2.2.2. Usos del Carbón

- **Antracita:** También llamado carbón duro o carbón de piedra, posee un alto contenido de carbono (86% al 98%), bajo contenido de material volátil y poder calorífico superior a 32,6 MJ/kg (14.000 BTU/lb). Es utilizado como insumo en la industria siderúrgica, industria carboquímica y potencialmente en plantas carboeléctricas. Una perspectiva interesante es el uso de este tipo de carbón para la producción de hidrógeno, el cual puede ser aprovechado en celdas de combustible (Rojas, 2008).
- **Carbón bituminoso:** Este tipo de carbón posee un menor contenido de carbono y menor poder calorífico que el carbón antracita. Por su uso se le conoce como carbón coquizable, es utilizado en procesos siderúrgicos, generación de vapor y producción de energía térmica (Borie, 2014).

- **Carbón subbituminoso:** Con menor poder calorífico que los carbones bituminosos, posee una composición en carbono entre 35% y 45% y un elevado contenido de material volátil. Es utilizado en la producción de energía eléctrica y energía térmica (Rojas, 2008).
- **Lignito y turba.** Son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil, lo cual hace que posean un bajo poder calorífico. Son usados para calefacción, energía eléctrica y generadores de vapor de agua (Ahtiainen et al., 2018).

En la tabla 3 se indican los usos actuales y potenciales para el carbón mineral en el Perú.

Tabla 3

Usos y productos del carbón mineral

Industria/Servicio	Sector	Productos
Siderúrgica	Minero-metalúrgico	Hierro esponja
Ladrillera	No metálicos	Ladrillos
Cementera	Industria no metálicos	Cemento
Eléctrica	Energético	Electricidad
Hotelera	Servicios, poblacional	Briquetas
Carboquímica	Químico-industrial	Gas de síntesis
Agroindustria	Agrario	Fertilizantes
Energética	Combustibles	Hidrógeno
Química	Energético	Sustituto de gas natural

Nota: (Rojas, 2008).

3.2.3. Lixiviación

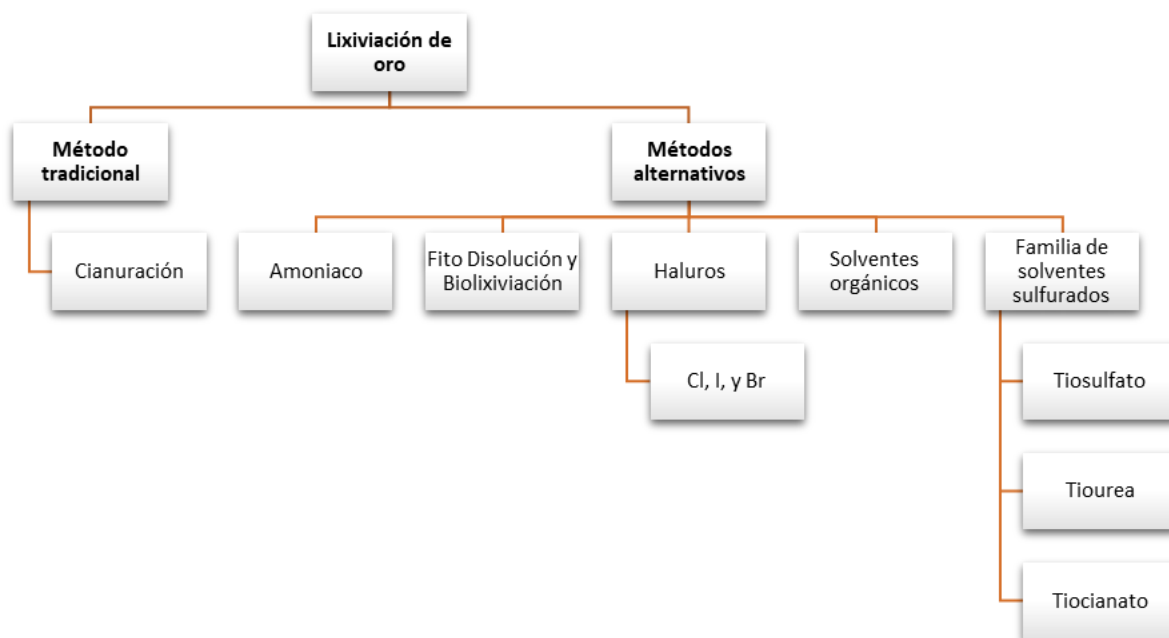
3.2.3.1. Lixiviación de Minerales Auríferos

En el proceso de lixiviación, el oro se disuelve en un líquido, específicamente en una solución acuosa, y esto se logra mediante la presencia de un agente complejante y un

agente oxidante para alcanzar velocidades de lixiviación adecuadas. La estabilidad del oro se ve afectada únicamente en presencia de ciertos asociados, como iones de cianuro, cloruro, tiourea y tiosulfato, los cuales forman complejos estables, tal como se ha mencionado previamente (Marsden & House, 2006). Dentro de los procedimientos de disolución del oro, se identifican los métodos tradicionales y alternativos, los cuales se representan esquemáticamente en la figura 4. La lixiviación industrial se lleva a cabo en minerales oxidados, mezclas de óxidos, minerales sulfurados, concentrados obtenidos mediante flotación, aglomeraciones de transformaciones y minerales que contienen metales preciosos en su forma nativa, con el objetivo de extraer estos metales valiosos (Marsden & House, 2006).

Figura 4

Alternativas de disolución de oro



Nota: (Perea, 2016).

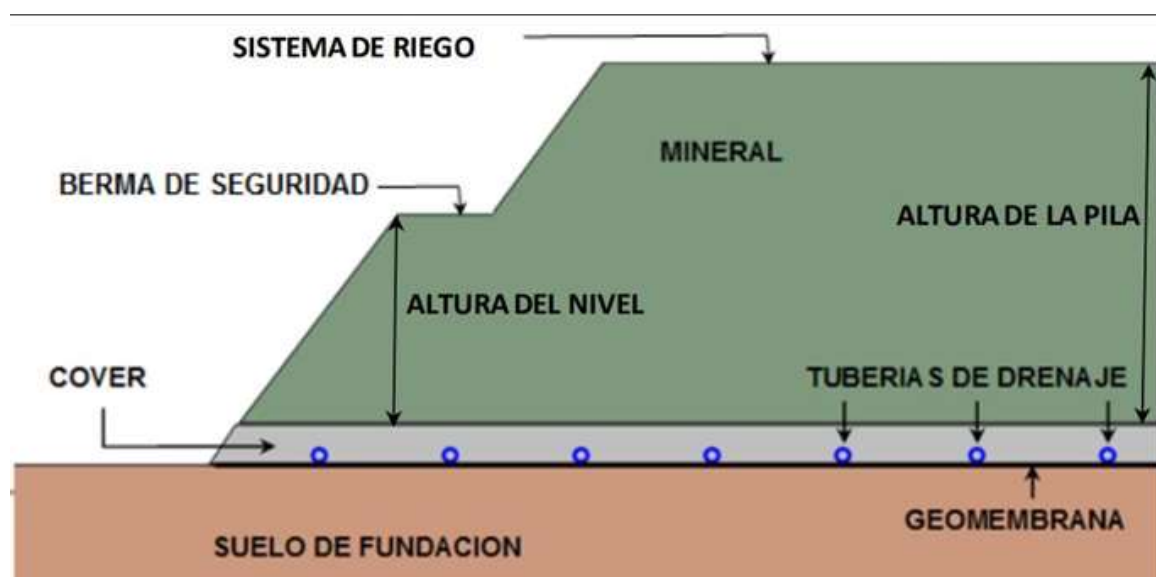
3.2.3.2. Lixiviación en Pilas de Oro

La lixiviación en pilas es uno de varios métodos de proceso alternativos para tratar minerales de metales preciosos y se selecciona principalmente para aprovechar su bajo costo de capital en relación con otros métodos. La lixiviación en pilas implica apilar el mineral que contiene metales en una pila sobre una membrana impermeable, regar el mineral durante un período prolongado con una solución química para disolver los metales buscados y recolectar el lixivante a medida que se filtra (Manning & Kappes, 2016).

La lixiviación en pilas guarda similitudes con la lixiviación en vertederos, pero se diferencia en que la cantidad de mineral es mayor, y en muchos casos, el mineral resulta estéril en la fase de concentración. El tiempo de proceso varía, siendo de varios meses según el tipo de mineral, contenido del elemento de interés y tamaño de las partículas a lixiviar (Gaviria et al., 2007).

Figura 5

Representación de una lixiviación en pilas

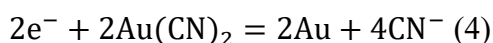
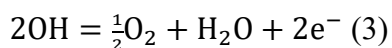
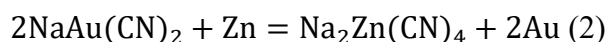
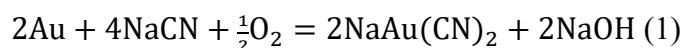


Nota: (López, 2012).

3.2.3.3. Cianuración de Oro

El proceso de cianuración se ha convertido en uno de los enfoques más comunes para la recuperación de oro a partir de minerales. Se basa en las propiedades únicas del oro: no se oxida a temperaturas normales y no se disuelve en ácidos comunes como sulfúrico, clorhídrico o nítrico, pero es soluble en agua regia, que es una combinación de ácido nítrico y clorhídrico. Sin embargo, la característica fundamental aquí es que el oro es soluble en soluciones diluidas de cianuro. Es por ello que, el cianuro se emplea como agente lixivante en el proceso de cianuración para permitir la extracción de oro mediante este método hidrometalúrgico (Deschênes, 2016).

De manera tradicional, los minerales de oro son procesados mediante una solución de cianuro alcalino diluido junto con oxígeno, lo que permite disolver el oro. Posteriormente, el oro disuelto se recupera mediante un tratamiento con polvo de zinc, este proceso es reconocido como el método McArthur-Forrest-Merrill Crowe (Hedley & Tabachnick, 1968). Además del tratamiento con polvo de zinc, el oro disuelto también se recupera por electrodeposición (ecuaciones 3 y 4) en cátodos de lana de acero (Nicol et al., 1983).



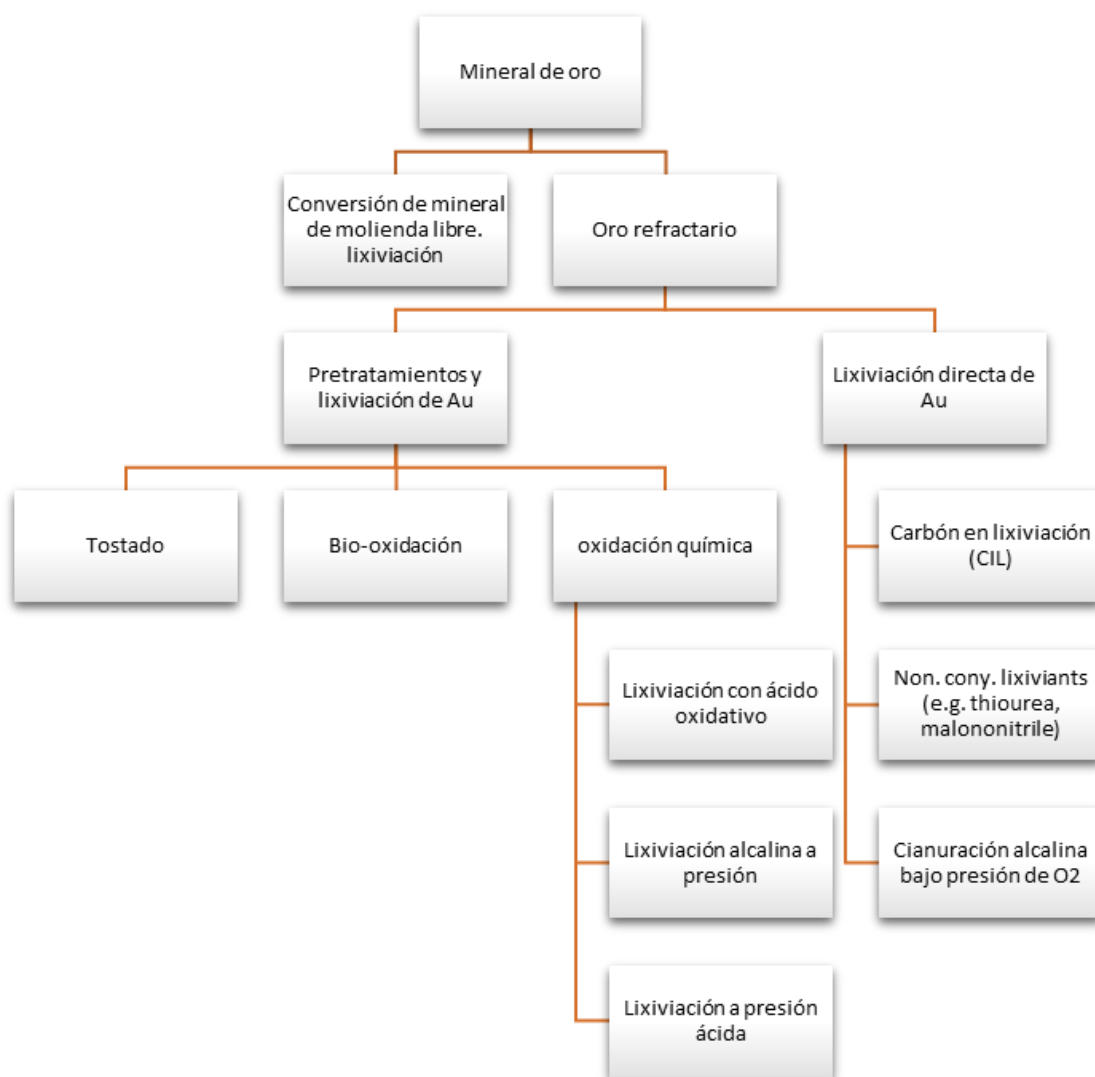
El proceso de cianuración es ampliamente utilizado por las compañías mineras para extraer mineral de oro de baja ley, y ha demostrado ser altamente eficiente y rentable. Ha sido aplicado con éxito en la lixiviación de oro de diversos minerales y concentrados

durante mucho tiempo de manera convencional. La cianuración ha sido utilizada desde finales del siglo XIX, habiendo obtenido su patente en el Reino Unido en 1887. Sin embargo, se descubrió la acción del cianuro de potasio como complejante del oro ya desde 1793 (Hofmann, 2008).

Solo los minerales de oro que pueden ser fácilmente molidos son adecuados para la cianuración alcalina directa. Por otro lado, los minerales de oro refractario requieren un pretratamiento para eliminar su propiedad refractaria, y una vez realizado esto, la cianuración alcalina se vuelve viable para la lixiviación de oro. Actualmente, se están llevando a cabo investigaciones para encontrar métodos de lixiviación directa de oro a partir de minerales refractarios. En la figura 6 es una representación visual que muestra diversos enfoques y tratamientos empleados en la minería de minerales de oro. Estos esfuerzos de investigación buscan comprender mejor las propiedades de los minerales refractarios y encontrar soluciones óptimas para liberar el oro contenido en ellos (Hofmann, 2008).

Figura 6

Diversos tratamientos para minerales de oro



Nota: (Haque, 1987).

3.2.3.3.1. Factores que Determinan la Solubilidad de Oro en un Medio

Cianurado

La eficiencia de la disolución de metales preciosos en una solución cianurada depende las siguientes variables:

a. Concentración de cianuro

La velocidad de disolución de los metales nobles en un medio cianurado está directamente relacionada con la concentración de este reactivo. A medida que aumenta la concentración de cianuro, la velocidad de disolución de los metales nobles experimenta un crecimiento progresivo, incrementándose hasta alcanzar un punto máximo. No obstante, es esencial destacar que una vez que se sobrepasa dicho límite, la velocidad de disolución comienza a decrecer ligeramente, estabilizándose en un nivel cercano a la constancia. Este fenómeno intrigante sugiere que existe un equilibrio delicado entre la concentración de cianuro y la disolución de los metales nobles (Mendo, 2016). En el proceso de lixiviación con cianuro, la estequiometría de la reacción muestra que se requieren 2 moles de cianuro de sodio para disolver un mol de oro. Debido a que ninguna reacción es completamente eficiente, es necesario usar un exceso de cianuro. Sin embargo, otros elementos presentes en el mineral pueden competir por la formación de complejos con el cianuro, lo que se conoce como elementos o compuestos cianicidas. Para controlar la concentración de cianuro a nivel industrial, se mide mediante titulación con nitrato de plata y yoduro de potasio, y la concentración de cianuro debe ser mayor a 0.05 para asegurar la presencia de estos iones en la solución. Además, los datos de consumo para procesos industriales rentables oscilan entre 2 y 4 kg/t y pueden ser aún mayores si el contenido de metales preciosos es elevado (De la Torre & Guevara, 2006).

b. Oxigenación del medio

Una de las variables que limitan la solubilidad de los metales preciosos en el proceso de lixiviación es la baja solubilidad del oxígeno en agua, que es de unos 8,2 mg/l a 25°C. Para contrarrestar esta baja solubilidad del oxígeno, se han desarrollado dos métodos para asegurar la presencia de oxígeno en el sistema: un método de lixiviación

con cianuro presurizado y un método de lixiviación con dosificación de oxidantes como peróxido de hidrógeno, lanzas de oxígeno, ozono, etc. cualquier otra fuente que proporciona la cantidad requerida de este elemento para la reacción (Marsden & House, 2006).

c. Nivel de alcalinidad de la pulpa

Se conoce que a partir de un nivel de alcalinidad ≥ 9.5 se forman los complejos de cianuro con los metales preciosos, pero a su vez se produce la reacción del cianuro con agua, la cual genera el gas cianhídrico, que es altamente toxico y hace imposible realizar el proceso de manera eficiente. Por consecuencia el diagrama de Pourbaix demuestra que la lixiviación con cianuro es más eficiente a un pH por encima de 10.5. Investigadores han demostrado que por encima de valores de pH = 11, la velocidad de disolución de las especies en interés decrece notoriamente, viéndose más afectada para pH mayores a 12 (Marsden & House, 2006). Para modificar el nivel de alcalinidad en el proceso de lixiviación por lo general se utiliza cal o hidróxido de sodio, y depende de las especies que puedan solubilizarse en el sistema o la cantidad de finos presentes en la mena (De la Torre & Guevara, 2006).

d. Temperatura del medio

La velocidad de disolución de los metales preciosos en el tiempo aumenta a temperaturas altas, dado que al elevar la temperatura se produce la excitación de las moléculas que forman parte del sistema cianurado. Así mismos trabajos de investigación demostraron que la temperatura óptima a la cual se produce una mayor cinética de lixiviación es de 85°C, y por encima de este valor de temperatura, la cinética decrece. En los procesos industriales debido a los altos costo que generan elevar la temperatura de la

pulpa y las consecuencias que estas puede generar, se hace inviable económicamente, por lo que generalmente se opera a temperatura ambiente (Marsden & House, 2006).

e. Revoluciones por minuto del sistema

El aumento de la velocidad de agitación del sistema genera la reducción de las capas que envuelven a la molécula, favoreciendo el contacto del agente lixivante con los elementos del sistema. Como consecuencia un aumento en las revoluciones de agitación en el sistema aumenta la cinética de solubilidad de las especies en interés. De igual manera, este valor presenta un valor máximo, y por encima de este, no representa un cambio significativo. Los procesos de lixiviación emplean sistemas mecánicos o neumáticos para generar la agitación de la pulpa (De la Torre & Guevara, 2006).

f. Tamaño de partícula

Las partículas de los metales preciosos deben de estar liberadas para que puedan entra en contacto con el agente lixivante, el aire y agua, de tal manera que se pueda formar el complejo. Este factor depende de la posibilidad de liberación de las especies y de la molienda del mineral. En algunos casos es imposible liberar a las especies de interés y repercute en los indicadores de recuperación de los metales, llamándosele a este tipo de especies minerales refractarios. La sobremolienda de los minerales está sujeta a evaluación de dentro de un proceso de beneficio, dado que el esfuerzo realizado para liberar especies valiosas trae como consecuencia la reducción de partículas indeseables a un tamaño bastante fino, compitiendo por la reacción con cianuro con las demás especies del sistema (Marsden & House, 2006).

g. Porcentaje de sólidos en pulpa

Se determinó que el porcentaje de sólidos debe estar entre el 35% a 50%, dependiendo del tamaño de las partículas, gravedad específica y la distribución y tipo de las especies de minerales, las cuales son responsables de la viscosidad de la pulpa. Es conocido que, para un bajo porcentaje de sólidos en pulpa, existe mayor posibilidad del contacto del metal valioso con el agente lixivante y, por lo contrario, una mayor cantidad de sólidos en pulpa hace necesario que el sistema permanezca más tiempo en contacto, lo que se conoce como el tiempo de residencia (Marsden & House, 2006).

h. Especies mineralógicas involucradas

La distribución de las especies de minerales y posibilidades de su liberación es uno de los principales factores y determina la posibilidad de los minerales a ser lixiviados. No todas las menas con contenido de metales valiosos pueden ser liberados, dado que como ya se dijo anteriormente, existen las especies refractarias, cuya recuperación es menor al 80 % y muchos de los yacimientos de este tipo son inviables económicamente. Otro factor determinante es conocer las especies que forman parte de la mena, las cuales presentarán un tipo de reacción específica dentro del proceso, así podemos detallar la influencia de las principales especies asociadas a metales preciosos (Marsden & House, 2006).

3.2.4. Preg-Robbing

En el caso de ciertos minerales, la recuperación de oro mediante cianuración se ve limitada por la presencia de materia carbonácea natural, que adsorbe el oro de la solución cianurada alcalina a menos que se tomen medidas para evitar que esta reacción de adsorción ocurra. A menudo, a estos minerales se les llama minerales con tendencia al

robo de oro durante la cianuración (preg-robbing). Aunque podrían denominarse minerales carbonáceos refractarios, ya que la recuperación de oro se dificulta debido a las pérdidas por adsorción que ocurren, esto podría confundirse con casos de encapsulación de oro dentro de materiales carbonáceos como el querógeno (hidrocarburos sólidos formados a partir de depósitos de esporas, polen o algas).

Smith utilizó por primera vez el término "preg-robbing" en 1968 y luego fue utilizado por otros (Hausen & Bucknam, Study of preg-robbing in the cyanidation of carbonaceous gold ores from Carlin, Nevada, 1985). Ahora es de uso común en la industria del oro. La tendencia al preg-robbing de oro es un fenómeno importante que inhibe la recuperación de oro debido a la presencia de esta materia carbonácea natural. Este comportamiento se detectó por primera vez en 1911 por Cowes, quien encontró que las pérdidas de oro en los relaves de la operación Waihi-Paerola en Nueva Zelanda se debían a la presencia de carbono natural en el mineral (Mendo, 2016). Además, cabe mencionar que una amplia variedad de otros minerales, incluidos los minerales de sulfuro de cobre, arcillas y silicatos, pueden adsorber oro dependiendo de su área y características superficiales. La mineralogía asociada con minerales carbonáceos de oro puede variar considerablemente (Afenya, 1991). Los componentes con tendencia al robo del mineral son generalmente materiales carbonáceos como astillas de madera, carbono no carbonatado u otros componentes, en particular carbono elemental nativo (Ros, 2017). En algunos casos, la materia carbonácea adsorbe el complejo de aurocianuro solubilizado de las soluciones de lixiviación y arrastra el oro con los relaves, lo que conduce a una baja recuperación de oro. Esto puede ser un problema muy grave, ya que una pequeña cantidad de materia carbonácea puede adsorber prácticamente todo el oro solubilizado debido a su pequeño tamaño de partícula y porosidad (Sitando et al., 2019). Además, el oro puede estar oculto por la materia carbonácea, lo que impide el acceso de la solución (Borie, 2014). El

contenido de carbono generalmente varía significativamente, incluso en el mismo depósito de mineral. Los datos de algunos estudios muestran minerales con un contenido de carbono de menos del 1% a más del 8% para depósitos en la tendencia de Carlin (Afenya, 1991). Las pérdidas de oro debido al robo de oro durante la cianuración de minerales carbonáceos pueden variar desde menos del 20% hasta un 90%. El material carbonáceo se encuentra en muchos depósitos de todo el mundo, como se muestra en la tabla 4 (Mudd, 2007). Son componentes habituales de rocas metasedimentarias que a menudo están difundidos dentro de la matriz mineral (Beysaac et al., 2002). El material carbonáceo proviene de la transformación metamórfica en estado sólido del material orgánico que originalmente estuvo en contacto con la roca. Esta transformación se llama grafitización y depende de la temperatura, presión y tipo de precursor de carbono (Ballester et al., 2000). El material carbonáceo natural se encuentra en muchos depósitos de oro diseminados en sedimentos, como el famoso depósito Carlin (noreste de Nevada, EE. UU.). En la figura 7 se muestran dos micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), una de un carbón activado comercial y otra de un material carbonáceo de un mineral del depósito Carlin. La micrografía A-SEM muestra una superficie uniformemente macroporosa para un carbón activado comercial. La micrografía B-SEM muestra una estructura porosa amorfa para el material carbonáceo aislado del mineral. Este material carbonáceo (CM) tenía un contenido de carbono del 40%, un área superficial de $42.7 \text{ m}^2/\text{g CM}$ y una capacidad constante de adsorción de oro de 2200 mg Au/kg CM . Este tipo de carbono es responsable de la retención de oro durante la lixiviación con cianuro (Sitando et al., 2019). Además del depósito Carlin (EE. UU.), otros ejemplos destacados de minerales carbonáceos son el depósito Ashanti (Ghana), Witwatersrand (Sudáfrica), Muruntau (oeste de Uzbekistán), Kumtor (Kirguistán) y Macraes (Nueva Zelanda); (Zadra et al., 1952). También existen varios depósitos en

Australia Occidental (Mendo, 2016). Hay nuevos depósitos tanto en etapas de exploración como de explotación ubicados en Argentina, Perú, Malasia, Australia, Laos, Alaska, EE. UU., Rusia, Venezuela, extremo Oriente de Rusia y Níger (Abotsi & Osseo, 1986; Craig & Rimstidt, 1998; Hausen, 2000; Mudd, 2007; Perea, 2016; Poblete, 2019). La presencia de materia carbonácea en un mineral no necesariamente resulta en una baja recuperación de oro, parece que el carbono puede existir en diferentes formas en el mineral, lo que muestra diferentes afinidades por el complejo aurocianuro. Se cree que el carbono nativo en un mineral carbonáceo se comporta de manera similar al carbón activado cuando está en contacto con soluciones de aurocianuro (Montague, 2014). Para ayudar a los geólogos a clasificar los depósitos minerales, se ha utilizado ampliamente el análisis de robo de oro durante la cianuración para caracterizar el comportamiento de robo de oro de los minerales. La espectroscopía Raman se ha utilizado con éxito para caracterizar y predecir el comportamiento de robo de oro en minerales refractarios carbonáceos (Haque, 1987).

Tabla 4

Depósitos carbonáceos de oro con características de preg-robbing

Ubicación	Ciudades		
África	Agnes, South Africa	Evander Gold Mine, South Africa	Sheba, South Africa
	Ashanti, Ghana	New Consort, South Africa	Sansu, Ghana
	Athens, Uvuma, Zimbabwe	New Machavie, South Africa	Tarwa, Ghana
	Barbrook Mine, South Africa	President Brand, South Africa	Twangiza, Uganda
	Beatrix Gold Mine, South Africa	Prestea, Ghana	West Rand Black Reef, South Africa
	Bibiani, Ghana	Randfontein Cooke, South Africa	Worcester, Barberton, South Africa
	Bogosu, Ghana	Renco, Zimbabwe	

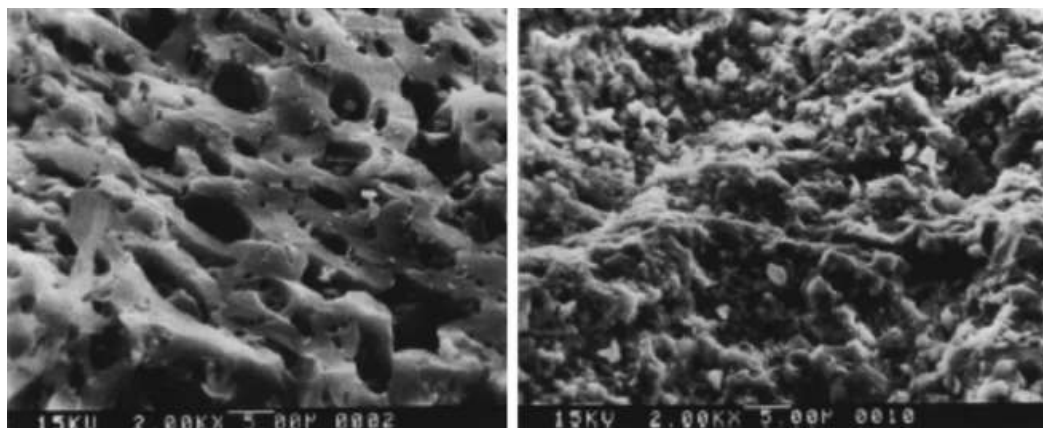
	Crown Mines, South Africa	Samira, Niger	
América del norte	Alligator Ridge, NV, USA	Getchell, NV, USA	Mercur, UT, USA
	Atlas Gold Bar, NV, USA	Gold Acres, NV, USA	Mother Lode, Canada
	Betz, NV, USA	Gold Quarry, Carlin, NV, USA	Ochali, BC, Canada
	Big Springs, NV, USA	Goldstrike, NV, USA	Post, NV, USA
	California Mother Lode, CA, USA	Gordon Lake, Canada	Queen Charlotte Island, BC, Canada
	Carlin Gold Mine, NV, USA	Jerrit Canyon, NV, USA	Royal Mountain King, CA, USA
	Cortez Gold Mines, NV, USA	Kerr-Addison, Canada	Turf, NV, USA
	Deep Star, NV, USA	McDermott, Ontario, Canada	Turquoise Ridge, NV, USA
	Donlin Creek, Alaska, USA	McIntyre Porcupine, Canada	Zortman, MO, USA
	Enfield Bell, NV, USA	McLaughlin, CA, USA	
	Eskay Creek, NV, USA	Maggie Creek, NV, USA	
Australia/ Asia	Bakyrchik, Kazakhstan	Kelian, Indonesia	Penjom Mine, Malaysia
	Cosmo Howley, Australia	Kumtor, Kyrgyzstan	Porgera, Papua New Guinea
	Fosterville Gold Project, Australia	Macraes, New Zealand	Stawell Gold Mine, Australia
	Fortnum, Australia	Moline, Australia	Tanami, Australia
	Gympie, Australia	Muruntau, Uzbekistan	Temora, Australia
	Hedges, Australia	Nimary, Australia	Waihi/Paeroa, New Zealand
	Jundee, Australia	Paddington, Australia	
América Central/Sur	Alto Chicama, Perú	Morro do Ouro, Brasil	Rosario Dominicana, Dominican Republic
	Esquel Gold, Argentina	Morro Velho, Brasil	San Nicolas, Perú
	Las Cristinas, Venezuela	Pueblo Viejo, Dominican Republic	Santa Barbara, Huancavelica, Perú
En otra parte	Kyuchus, Russia	Salsigne, Orleans, France	Nezhdaninskoye, Russia

Natalinsk, former USSR	Ternei District, Primorski Krai, Russia
---------------------------	---

Nota: (Reza, 1999).

Figura 7

Micrografías SEM de un carbón activado comercial y un material carbonoso de un mineral de tendencia Carlin



Nota: (Rojas, 2008).

3.2.5. *Blending de Minerales*

El blending de minerales es un proceso que consiste en mezclar diferentes tipos de minerales para obtener una composición óptima que cumpla con los requisitos de ley y recuperación metalúrgica. El blending de minerales se suele aplicar en el pad de lixiviación, que es una superficie donde se deposita el mineral para extraer el metal mediante la aplicación de una solución ácida. El blending de minerales puede ayudar a maximizar la producción y el beneficio económico de la operación minera (Izquierdo & Rojas, 2016).

El blending de minerales puede tener otros beneficios, como:

- Reducir la variabilidad de la ley y la recuperación del mineral, lo que permite una mejor planificación y control de la producción (Izquierdo & Rojas, 2016).

- Aprovechar al máximo los recursos minerales disponibles, optimizando el uso de las reservas y minimizando el desperdicio (Carhuamaca, 2018).
- Mejorar la calidad y el valor de los concentrados de mineral, ajustando la composición de la mezcla según las especificaciones del mercado o del cliente (Carhuamaca, 2018).
- Disminuir los costos operativos y de transporte, al reducir el volumen y el peso de los materiales a procesar o a enviar (Obregon, 2016).

3.2.6. Extracción de Oro a Nivel Internacional

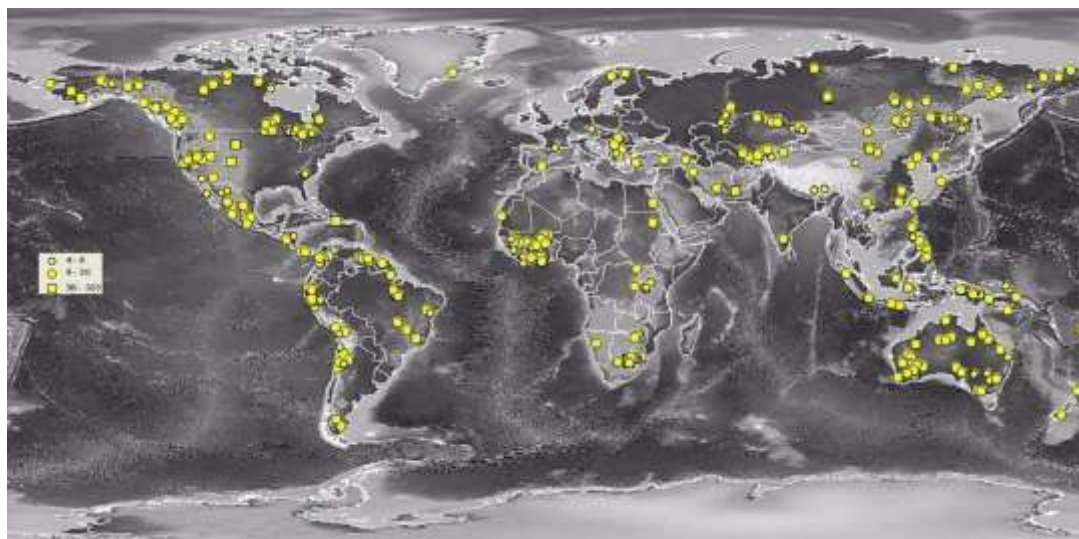
El oro es un metal conocido en todos los continentes poblados (ver figura 12). Los países más extensos, como Rusia, Canadá, EE. UU., Australia, Brasil y China, también son los principales productores de oro, albergando este metal en diversas provincias y cinturones metalogénicos. Debido a su gran área, Rusia presenta un ambiente metalogénico diverso, con oro extraído de placeres y rocas de diferentes edades y tipos. En las últimas décadas, las compañías mineras internacionales han establecido un estándar para las minas de clase mundial, buscando una producción de alrededor de 200,000 onzas por año durante 20 años y una tasa interna de retorno (TIR) superior al 15%. Esto implica que los depósitos mineros de este tipo deben contener más de 120 toneladas (más de 4 millones de onzas) de oro en sus reservas/recursos previos a la extracción.

A nivel global, existen aproximadamente 500 depósitos de oro de este tipo y diversas ocurrencias, de los cuales 47 (aproximadamente el 10%) se encuentran en Rusia, proporcional a su extensión territorial. Los depósitos de oro con más de 120 toneladas incluyen supergigantes como Muruntau en Uzbekistán, que posee una dotación de hasta más de 6000 toneladas (200 millones de onzas) de oro. Obviamente, estos depósitos

supergigantes tienen el potencial de producir mucho más oro que las minas de oro consideradas "ordinarias" de clase mundial. En conjunto, las operaciones en los 10 supergigantes más grandes del mundo representaron aproximadamente 400 toneladas (13 millones de onzas), lo que corresponde al 12% de la producción mundial de oro en 2021. En 2021, cuatro operaciones mineras de depósitos o campamentos supergigantes del mundo produjeron >30 tpa (~1 Moz) de oro (Yakubchuk, 2023).

Figura 8

Distribución global de 500 yacimientos y ocurrencias de oro de clase mundial (+120 t Au; +4 Moz Au) de todo tipo



Nota: (Yakubchuk, 2023).

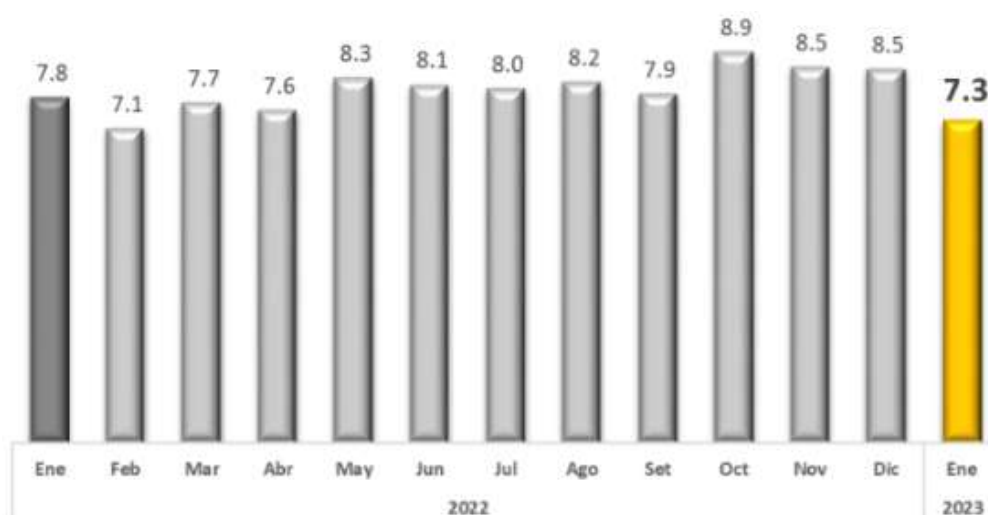
3.2.7. Producción Minera Aurífera Nacional

La producción de oro en el país durante enero de 2023 alcanzó un total de 7 319 401 gramos finos, lo que representa una reducción del 6.8% en comparación con el mismo mes de 2022, cuando se registraron 7 849 500 gramos finos.

Esta disminución se debió principalmente a una menor producción reportada por Compañía Minera Poderosa S.A., que experimentó una baja del 6.9%.

Tabla 5*Volumen de la producción minera metálica*

Período	Cobre TMF	Oro g finos	Zinc TMF	Plata kg finos	Plomo TMF	Hierro TMF	Estaño TMF	Molibdeno TMF
2020	2,150,126	88,053,944	1,334,570	2,723,879	241,548	8,893,972	20,647	32,185
2021	2,326,035	97,492,951	1,533,135	3,333,632	264,427	12,149,274	26,995	34,148
2022	2,438,631	96,733,064	1,369,532	3,079,790	255,333	12,936,826	28,231	31,588
Ene. 2023	198,621	7,319,401	99,269	205,489	19,316	1,206,172	905	2,395
Variación interanual / Enero								
Ene. 2022	199,255	7,849,500	106,614	256,519	20,700	795,348	2,410	2,733
Ene. 2023	198,621	7,319,401	99,269	205,489	19,316	1,206,172	905	2,395
Var. %	-0.3%	-6.8%	-6.9%	-19.9%	-6.7%	51.7%	-62.5%	-12.4%

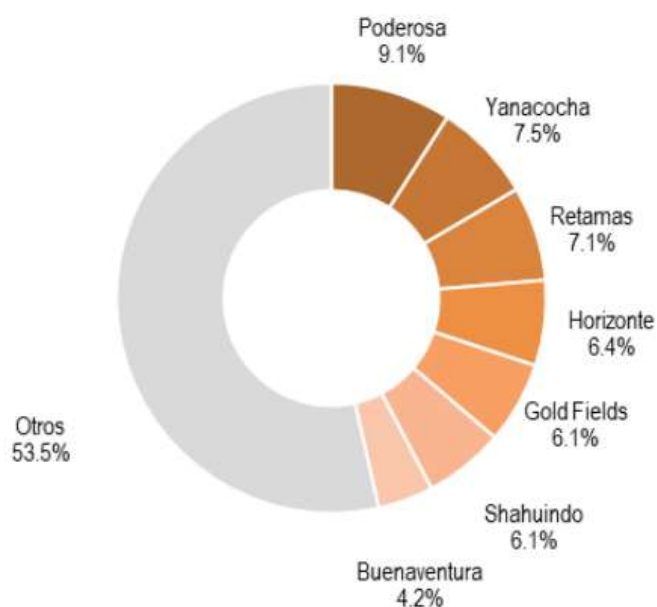
Nota: (Ministerio de Energía y Minas, 2023).**Figura 9***2022-2023: Producción mensual de oro (TMF)**Nota:* (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

3.2.7.1. Producción Minera Aurífera Según Empresa

En cuanto a los titulares mineros, La Compañía Minera Poderosa S.A. se destacó en la primera posición con una participación del 9.1% en la producción de oro. Por su parte, Minera Yanacocha S.R.L. y Minera Aurífera Retamas S.A. ocuparon el segundo y tercer lugar, respectivamente, con una contribución del 7.5% y 7.1% cada una (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

Tabla 6*Producción minera metálica según empresa (enero)*

PRODUCTO / EMPRESA	2022	2023	Var. %	Part. %
ORO (g finos)	7,849,500	7,319,401	-6.8%	100.0%
COMPAÑÍA MINERA PODEROSA S.A.	715,068	665,377	-6.9%	9.1%
MINERA YANACOCOA S.R.L.	714,786	546,445	-23.6%	7.5%
MINERA AURIFERA RETAMAS S.A.	515,279	519,625	0.8%	7.1%
CONSORCIO MINERO HORIZONTE S.R.L.	381,919	470,573	23.2%	6.4%
GOLD FIELDS LA CIMA S.A.	320,855	449,846	40.2%	6.1%
SHAHUINDO S.A.C.	387,857	442,994	14.2%	6.1%
COMPAÑÍA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	347,920	306,783	-11.8%	4.2%
COMPAÑÍA MINERA ARES S.A.C.	445,968	303,238	-32.0%	4.1%
MINSUR S.A.	163,883	265,018	61.7%	3.6%
MINERA VETA DORADA S.A.C.	245,711	246,828	0.5%	3.4%
OTROS (2022: 204 titulares mineros, 2023: 134 titulares mineros)	3,610,254	3,102,674	-14.1%	42.4%

Nota: (Ministerio de Energía y Minas, 2023).**Figura 10***2023: Estructura de la producción de oro por empresas, enero. Reporte: 2022: 214**titulares mineros, 2023: 144 titulares mineros**Nota:* (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

3.2.7.2. Producción Minera Aurífera Según Región

En el análisis de la distribución a nivel de departamentos, resulta relevante señalar que La Libertad sobresalió notablemente al ocupar el primer puesto en el ranking, aportando una significativa contribución del 32.7% del total. Esta posición líder sugiere que dicho departamento ha experimentado un crecimiento destacado o ha ejercido una influencia considerable en el contexto del estudio o análisis en cuestión.

En el segundo lugar de la distribución departamental se encontró Arequipa, con una proporción del 21.6%. Esta cifra indica que Arequipa también ha tenido un impacto relevante, aunque menor que La Libertad, en el tema o fenómeno objeto de estudio. Mientras tanto, en la tercera posición del ranking se ubicó Cajamarca, con una contribución del 21.2%. Esta cifra es cercana a la de Arequipa, lo que sugiere que ambos departamentos poseen una importancia similar en el contexto analizado.

Es importante destacar que estos porcentajes reflejan únicamente una instantánea de la distribución en el momento en que se realizó el análisis y que los resultados podrían variar en función de diversos factores cambiantes a lo largo del tiempo (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

Tabla 7

Producción aurífera nacional (enero)

PRODUCTO / REGIÓN	2022	2023	Var. %	Part. %
ORO* / G FINOS	7,849,500	7,319,401	-6.8%	100.0%
LA LIBERTAD	2,364,673	2,394,552	1.3%	32.7%
AREQUIPA	1,509,262	1,581,200	4.8%	21.6%
CAJAMARCA	1,698,077	1,552,376	-8.6%	21.2%
AYACUCHO	838,149	543,155	-35.2%	7.4%
CUSCO	373,345	466,895	25.1%	6.4%
TACNA	174,300	277,346	59.1%	3.8%
PUNO	282,874	131,571	-53.5%	1.8%
LIMA	88,577	99,351	12.2%	1.4%
PASCO	182,581	78,684	-56.9%	1.1%
HUANCAVELICA	46,231	53,540	15.8%	0.7%

ICA	50,370	48,919	-2.9%	0.7%
MADRE DE DIOS	133,729	44,426	-66.8%	0.6%
ÁNCASH	49,125	33,163	-32.5%	0.5%
MOQUEGUA	9,908	9,785	-1.2%	0.1%
APURÍMAC	42,608	2,508	-94.1%	0.03%
PIURA	5,690	1,932	-66.0%	0.03%

Nota: (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

3.2.8. Región de la Libertad (Perú)

La Libertad es uno de los veinticuatro departamentos que conforman la República del Perú, junto con la provincia constitucional del Callao. Su ciudad más poblada y capital es Trujillo. Cuenta con dos sitios reconocidos como patrimonio de la humanidad por la Unesco: el parque nacional del Río Abiseo en 1983 y Chan Chan en 1986. A nivel nacional, se destaca como líder en el sector agroexportador y en la producción de oro (Elías, 2019).

3.2.8.1. Etimología de la Palabra La Libertad

El nombre "La Libertad" fue oficialmente asignado por medio de una ley el 9 de marzo de 1825, en reconocimiento de ser el primer lugar donde se proclamó la independencia del país, y por haber servido como refugio para los patriotas en dos ocasiones distintas. La capital del departamento fue el punto de inicio de la destacada campaña del Libertador. Antes de esta designación, se conocía como el departamento de Trujillo (Alva, 2004).

3.2.8.2. Ubicación Geográfica

El departamento de La Libertad se encuentra en la parte noroccidental del territorio peruano. Limita al norte con los departamentos de Lambayeque, Cajamarca y Amazonas, al este con el departamento de San Martín, al sur con los departamentos de

Huánuco y Ancash, y al oeste con el Océano Pacífico, también conocido como Mar de Grau.

El departamento en cuestión cuenta con una extensión territorial considerable que abarca un área de superficie terrestre continental que equivale a 25,569.67 kilómetros cuadrados. Esta dimensión territorial representa aproximadamente el 2.7% de la extensión total del país en el que se encuentra ubicado. Estos datos revelan la importancia geográfica del departamento en el contexto nacional y su relevante contribución al tamaño total del país. Es importante mencionar que la superficie terrestre no es el único elemento que conforma el territorio departamental, ya que también se debe considerar la presencia de áreas marítimas. En este sentido, el territorio del departamento se extiende más allá de la línea costera, abarcando una porción de superficie marina que se extiende hasta una distancia de 200 millas mar adentro. Esta zona marítima se conoce como el mar territorial y es parte integral del territorio departamental. La inclusión del mar territorial dentro del territorio departamental agrega un aspecto relevante a su dimensión y configuración geográfica. Esto puede tener implicaciones significativas en términos de recursos naturales, conservación marina, actividades económicas relacionadas con el mar, y también en aspectos legales y de soberanía. En términos de uso y planificación del territorio, es esencial considerar tanto la superficie terrestre continental como la extensión marítima en las políticas y estrategias de desarrollo del departamento. Asimismo, esto puede influir en la cooperación y coordinación con otras autoridades nacionales o regionales que tienen competencias sobre las aguas marinas adyacentes (Elías, 2019).

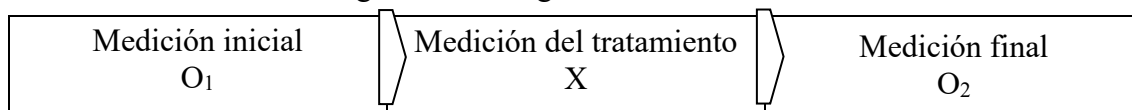
Figura 11*Mapa de La Libertad**Nota:* (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

Esta investigación se basa en un enfoque cuantitativo y deductivo, utilizando un diseño experimental puro con un nivel de investigación aplicada. En este proceso, se manipulan las variables de granulometría, tiempo de lixiviación y contenido de carbón, aplicando los principios del método científico. Se aprovechan los conocimientos previos relacionados con la caracterización del mineral, procesos de lixiviación de minerales y análisis estadístico de datos con el objetivo de identificar la influencia del TCM en la cianuración en columna, en la región La Libertad.

El diseño de investigación es el siguiente:



Donde:

O₁: Bajas recuperaciones de oro en el proceso de cianuración en columna de los tajos María, Herminia y Sofía.

X: Aplicación del blending de los tajos y llevar a cabo las pruebas metalúrgicas de cianuración en columna, a nivel de laboratorio.

O₂: Disminución de la influencia del TCM en la recuperación de Au por cianuración en columna de los tajos María, Herminia y Sofía.

4.2. Unidad de Análisis

En la presente investigación la unidad de análisis corresponde a los minerales oxidados de la región La Libertad, los mismos que fueron evaluados por sectores en función al contenido de carbón que presentaron.

El área de estudio que corresponde al proyecto está situada en el departamento de La Libertad, con una altitud media de 1824 m.s.n.m. y ubicado en el noroeste del país. Limita por el norte con el departamento de Lambayeque, el departamento de Cajamarca y el departamento de Amazonas; por el este con el departamento de San Martín, por el sureste con el departamento de Huánuco, por el sur con el departamento de Áncash y por el oeste con el Océano Pacífico.

4.3. Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación le corresponde al mineral de cabeza de tres tajos con diferente contenido de carbón, muestreado en una planta de lixiviación en PADS en la región de La Libertad.

Los estudios del proyecto de investigación y el desarrollo de las pruebas metalúrgicas se realizaron en los laboratorios de METALANDIN S.A.C, y la caracterización del mineral, se realizó en el laboratorio de GEOXINPESAC.

4.4. Tamaño de Muestra

Se planificó utilizar una cantidad estimada de 1000 Kg de muestra para llevar a cabo los estudios pertinentes, de los cuales se reservó el 50 % como muestra de control.

4.5. Selección de Muestra

Se recolectó el material en lonas y luego se procedió a homogeneizarlo utilizando el método de roleo. Posteriormente, se dividió en muestras representativas que se emplearían en las pruebas de laboratorio.

4.6. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Información bibliográfica sobre la problemática de la investigación.
- Obtener muestras representativas en los yacimientos de minerales oxidados con presencia de carbón orgánico en la región La Libertad.
- Se enviarán muestras representativas de los lotes muestreados para el reporte de ley de oro y el porcentaje de carbón.
- Se enviarán muestras representativas de mineral de cabeza al laboratorio de microscopia óptica de luz reflejada.
- Desarrollar pruebas de cianuración en columna con muestras representativas de los tajos María, Herminia, y Sofía, a nivel de laboratorio.
- Determinación del blending de minerales oxidados con presencia de carbón orgánico para poder recuperar oro en el lote contaminado, empleando diseños experimentales de mezclas.

CAPÍTULO V: Resultados

5.1. Análisis Mineralógico de la Investigación

En lo que respecta a la mineralogía, se aplicó el método de microscopía óptica de luz reflejada, realizando un análisis independiente de los lotes con bajo contenido de carbón y viceversa, esto permitió un estudio detallado de la composición mineralógica y la obtención de microscópicas.

5.1.1. Microscopia de una muestra con bajo TCM

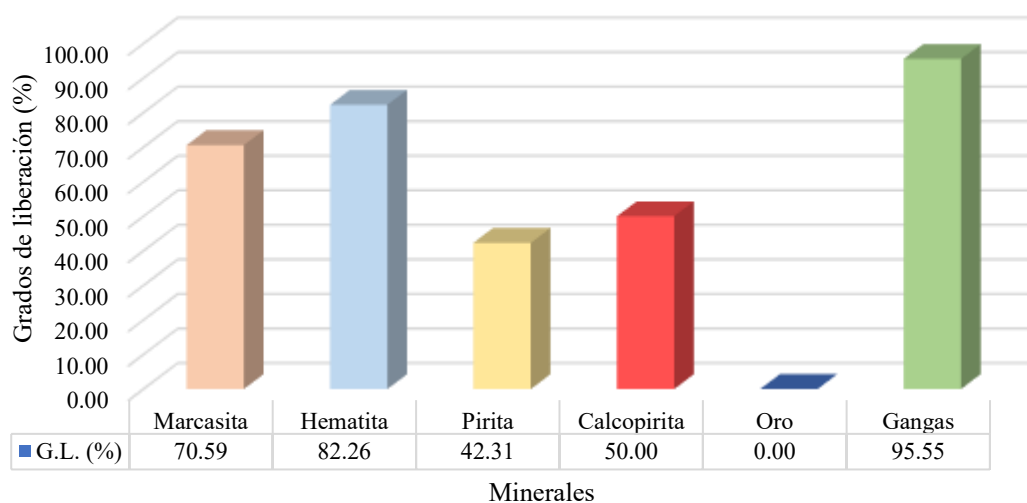
Con una muestra representativa del lote con bajo contenido de carbón, se preparó una briqueta con una muestra de 80 % - 200 malla, que fue observada en el microscopio óptico de luz polarizante, identificando la presencia de oro libre en trazas, además de especies sulfuradas como la calcopirita con una distribución volumétrica de 0.37%, y 50% como especie liberada. El total de las especies identificadas en el microscopio óptico, distribución en volumen, y grado de liberación, se representan en la tabla 8.

Tabla 8

Volumen porcentual y grados de liberación de la muestra con bajo TCM

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Marcasita	0.63	70.59
Hematita	2.30	82.26
Pirita	0.97	42.31
Calcopirita	0.37	50.00
Oro	0.18	-
Gangas	95.55	95.55
Total	100.00	

Nota: Los valores se representan en porcentaje (%).

Figura 12*Liberación porcentual de la muestra*

Nota: Los valores se representan en porcentaje (%).

5.1.2. Tipos Geométricos de Entrelazamientos de los Minerales

De un total de 2693 partículas, 2611 se identificaron como especies libres, y 82 partículas formando enlaces mixtos, entre ellos, se logró identificar partículas de oro enlazado con la pirita y gangas. El total de los enlaces identificados y sus posibilidades de liberación se describen en la tabla 9. así también, las figuras 14 y 15 representan las principales micrografías que se obtuvieron como resultado de la microscopia.

Tabla 9*Variables mineralógicas de los minerales entrelazados de la muestra con bajo %TCM*

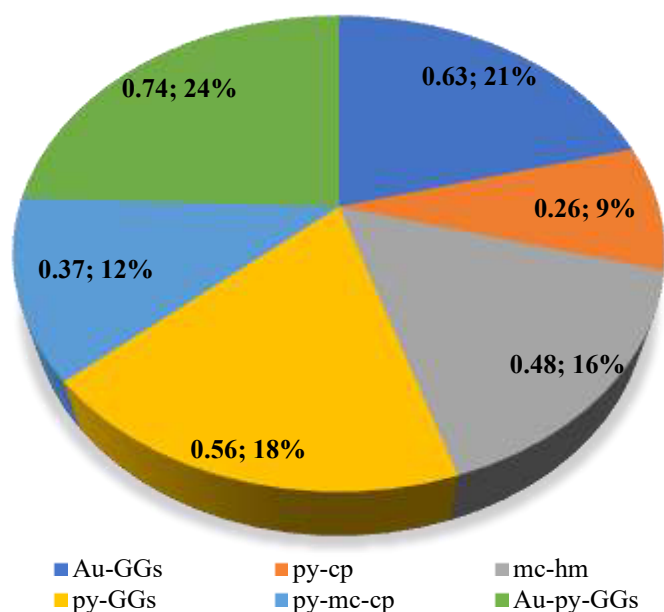
Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		2611	96.96	
Au-GGs	1bIII	8	0.23	Moderadamente fácil
	1eIII	5	0.29	Muy difícil a imposible
	3aIV	4	0.11	Moderadamente fácil a difícil
py-cp	3aIII	5	0.06	Moderadamente fácil a difícil

	1bIII	2	0.20	Moderadamente fácil
	1bIV	6	0.18	Moderadamente fácil
mc-hm	2aII	7	0.30	Muy difícil a imposible
	3aIII	5	0.22	Moderadamente fácil a difícil
py-GGs	1bIII	6	0.24	Moderadamente fácil
	1bIV	4	0.10	Moderadamente fácil
	3aII	5	0.19	Moderadamente fácil
py-mc-cp	1eIII	2	0.07	Muy difícil a imposible
	3aIV	3	0.11	Moderadamente fácil a difícil
	3aIII	6	0.21	Moderadamente fácil a difícil
Au-py-GGs	1eIII	4	0.16	Muy difícil a imposible
	2aII	10	0.37	Muy difícil a imposible
Total		2693	100.00	

Nota: Los valores de distribución se representan en porcentaje (%).

Figura 13

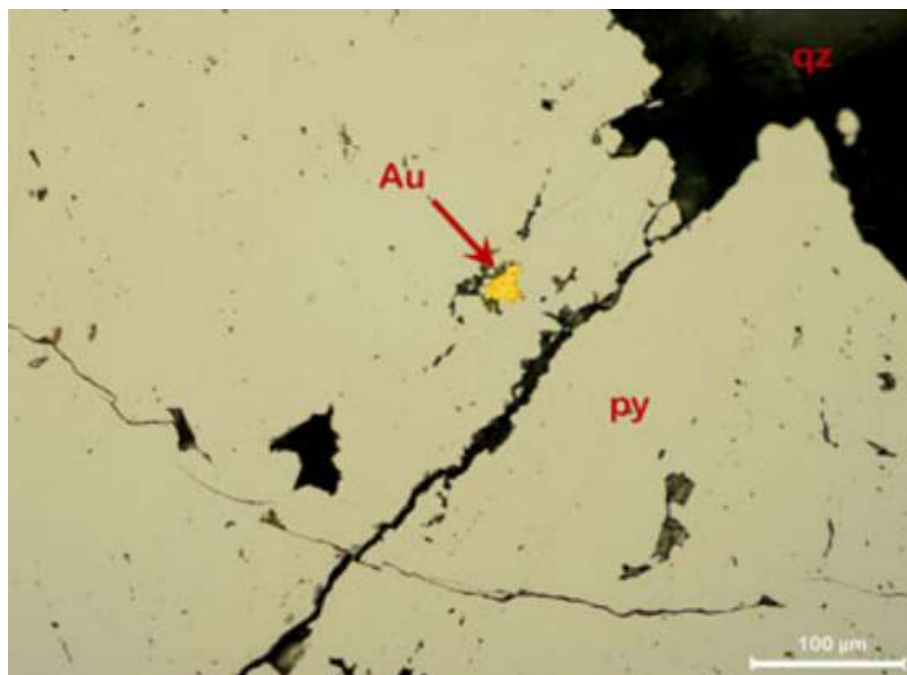
Liberación porcentual de los minerales entrelazados de la muestra con bajo %TCM



Nota: Los valores de distribución se representan en porcentaje (%).

Figura 14

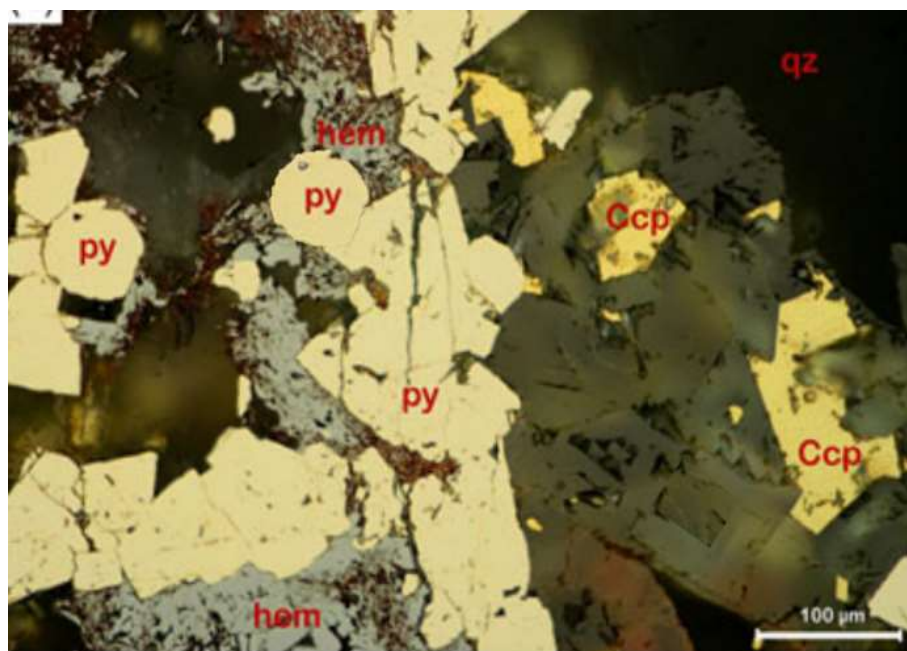
Micrografía: Au – py -GGs



Nota: Partícula libre de Au de 100 μm enlazada con py y GGs

Figura 15

Micrografía con presencia de py, hm, ccp y GGs



Nota: Partículas mixtas de Ccp – py - ggs

5.1.3. Microscopia de una muestra con contenido de TCM

Con una muestra representativa de aproximadamente 200 g a 80% - 200 Malla de un lote con 0.50 % TCM, se preparó una briqueta y se observó al microscopio óptico de luz reflejada, logrando identificar la presencia de oro libre en trazas y la presencia de carbón tipo antracita con una distribución de 0.10% y totalmente libre, además de especies sulfuradas como la calcopirita con una distribución volumétrica de 0.58%, y 36.36% como especie liberada. El total de los minerales identificados en el microscopio óptico, distribución en volumen, y grado de liberación, se representan en la tabla 10.

Tabla 10

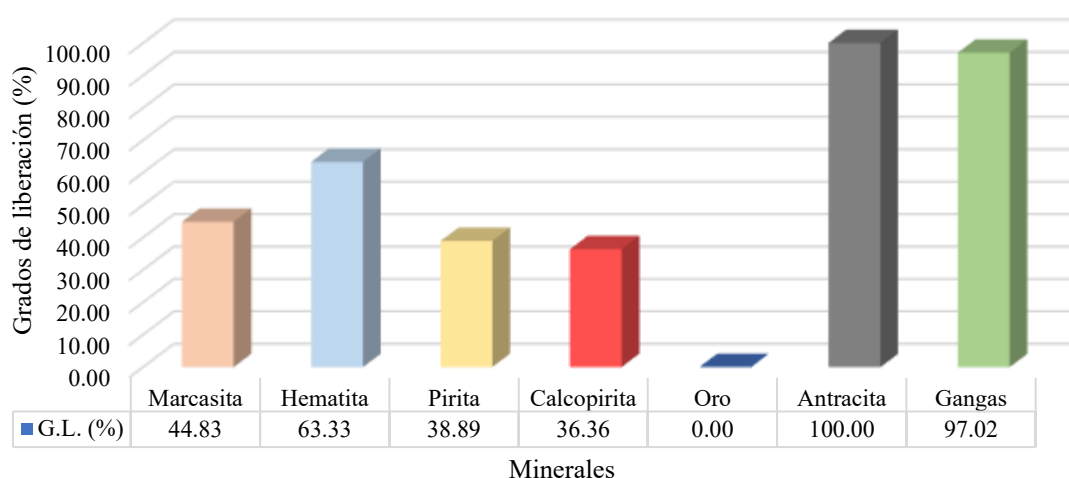
Volumen porcentual y grados de liberación de la muestra con contenido de TCM

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Marcasita	1.56	44.83
Hematita	3.21	63.33
Pirita	0.96	38.89
Calcopirita	0.58	36.36
Oro	Trazas	-
Antracita	0.10	100.00
Gangas	93.37	97.02
Total	100.00	

Nota: Los valores se representan en porcentaje (%).

Figura 16

Liberación porcentual de la muestra con alto contenido de TCM



Nota: Los valores se representan en porcentaje (%).

5.1.4. Tipos Geométricos de Entrelazamientos del lote con alto % TCM

Se contabilizaron 1870 partículas, de las cuales 1756 se identificaron como libres, y 114 formando enlaces mixtos. Entre las partículas mixtas se logró observar al Au formando enlaces mixtos con las gangas y antracita, así también, el total de los enlaces identificados y sus posibilidades de liberación se describen en la tabla 11, y las figuras 18 y 19 representan las principales micrografías que se obtuvieron como resultado de la microscopia.

Tabla 11

Variables mineralógicas de los minerales entrelazados de la muestra con alto contenido de TCM

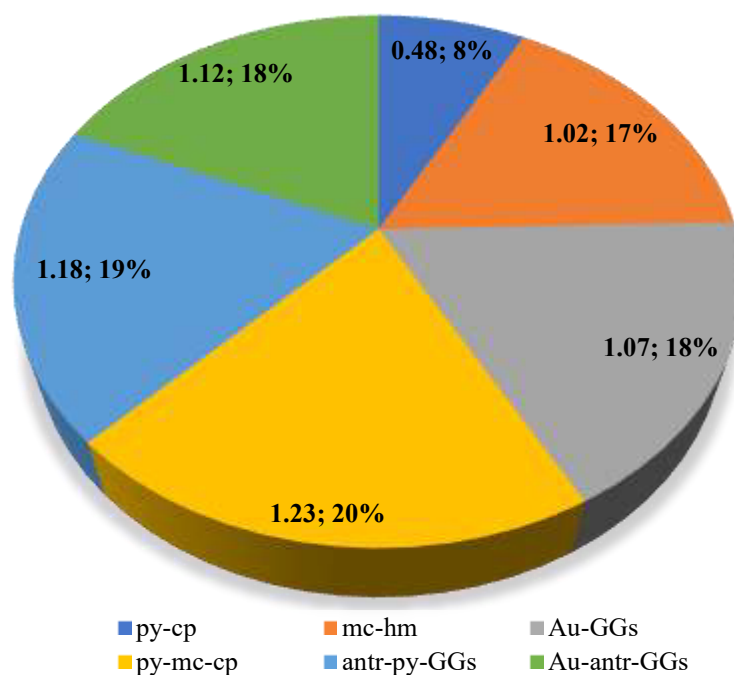
Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1756	93.90	
py-cp	1bIII	3	0.12	Moderadamente fácil

	1eIII	6	0.36	Muy difícil a imposible
	3aIV	5	0.30	Moderadamente fácil a difícil
mc-hm	1bIV	7	0.36	Moderadamente fácil
	2aII	7	0.36	Muy difícil a imposible
	3aII	8	0.35	Moderadamente fácil
Au-GGs	1eIII	9	0.41	Muy difícil a imposible
	3aIV	3	0.31	Moderadamente fácil a difícil
	1bIV	6	0.33	Moderadamente fácil
py-mc-cp	3aIV	9	0.49	Moderadamente fácil a difícil
	3aII	8	0.41	Moderadamente fácil
antr-py-GGs	1bIV	11	0.56	Moderadamente fácil
	2aII	11	0.62	Muy difícil a imposible
Au-antr-GGs	3aIII	11	0.48	Moderadamente fácil a difícil
	2aII	10	0.64	Muy difícil a imposible
TOTAL		1870	100.00	

Nota: Los valores de distribución se representan en porcentaje (%).

Figura 17

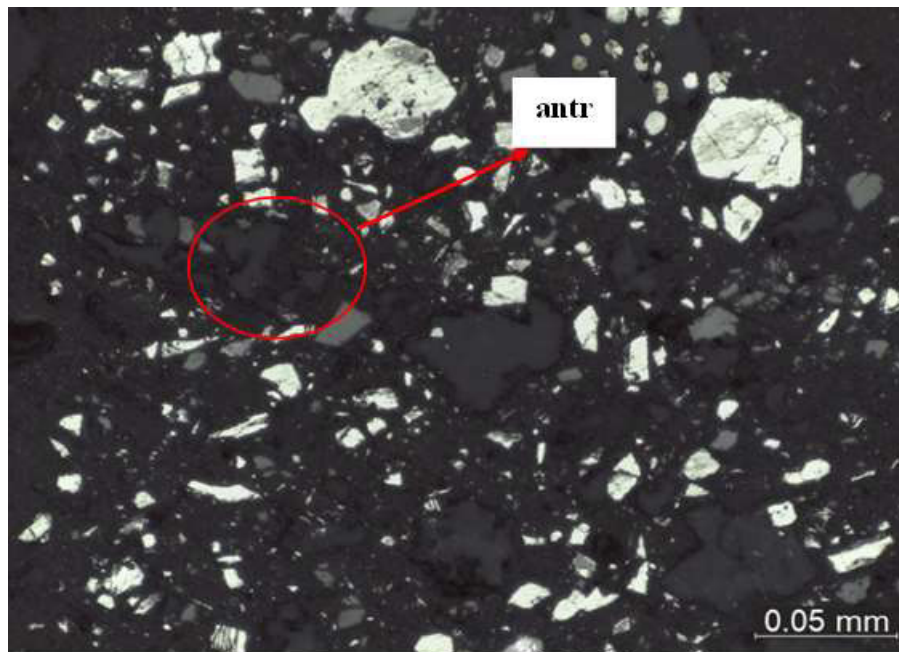
Liberación porcentual de los minerales entrelazados de la muestra con alto contenido de TCM



Nota: Los valores de distribución se representan en porcentaje (%).

Figura 18

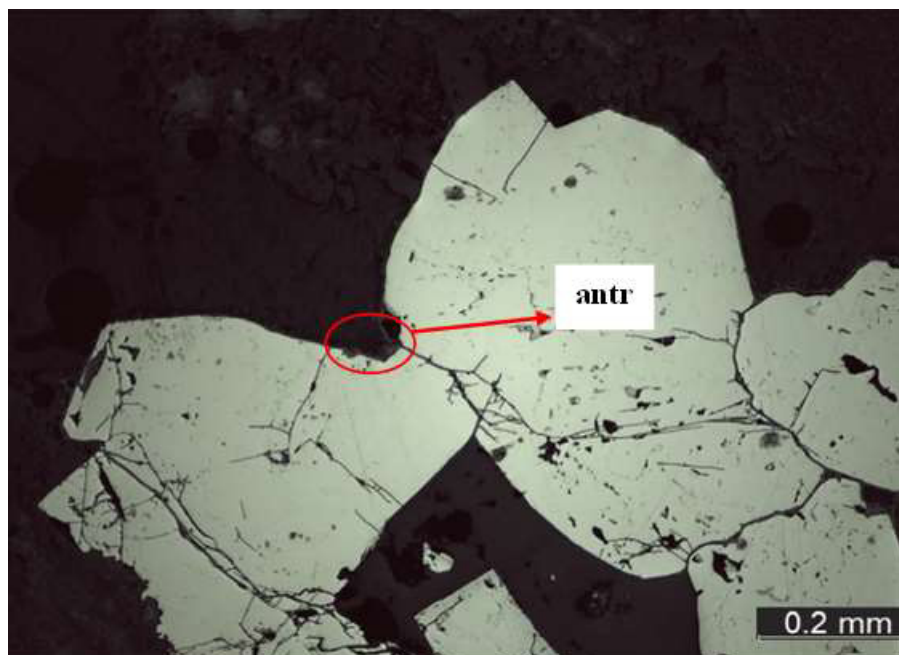
Micrografía con presencia de antr, py y GGs (1)



Nota: Partículas de carbón antracítico de 0.05 mm

Figura 19

Micrografía con presencia de antr, py y GGs (2)



Nota: Partículas de carbón antracítico asociado a Py y ggs

5.2. Pruebas Experimentales

5.2.1. Ensayos Químicos de las Muestras de Tres Tajos

La extracción de minerales carbonáceos depende del tipo de mineral que contiene el metal valioso y se ve afectada por el contenido de carbón orgánico (TCM), que causa preg-robbing al adsorber el oro disuelto. Por ello, se enviaron muestras de tres tajos al laboratorio, el cual reportó las leyes de oro, carbón, Ag, Cu y As, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Ensayo químico de los tres tajos

Muestra	% TCM	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	As(%)
Tajo María	Menor a L.D	0.91	0.54	0.02	0.01
Tajo Herminia	0.05	0.52	0.22	0.01	0.01
Tajo Sofía	0.1	0.38	0.18	0.01	0.04

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y gramos por toneladas (g/t).

5.2.2. Pruebas de Cianuración en Columna

En base a la caracterización y los ensayos químicos de las muestras de los 3 tajos en estudio se desarrollaron pruebas de lixiviación en columna, evaluando la granulometría y tiempo de lixiviación en una primera etapa. Para ello, se realizaron pruebas QLT, cuyos resultados se representan en la tabla 13.

Tabla 13

Resultados de la prueba QLT

Muestra	Au cianurable (%)
Tajo María	95.8
Tajo Herminia	92.4
Tajo Sofía	78.4

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%).

5.2.2.1. Análisis de la Granulometría y el Tiempo de Lixiviación

Las pruebas de lixiviación se realizaron en una columna de 1 m de altura y 15 cm de diámetro, con muestras representativas de los 3 tajos a granulometrías de 100% - 4“, 100%- 2”, y 100% - 1”, 100 ppm de cianuro libre, una relación sólido/líquido de 1, pH de 10.5, una tasa de riego de 4 l/h/m², y 50 días de tiempo de lixiviación. El control de la recuperación en el tiempo a distintas granulometrías se realizó con el muestreo de alícuotas de la solución rica y los ensayos químicos correspondientes, cada 5 días de proceso.

5.2.2.2. Resultados de la Lixiviación del Tajo María

Se realizaron pruebas de lixiviación en columna con 17.42 Kg de muestra representativa del tajo María y 17 litros de solución cianurada al 0.01%. La lixiviación del mineral de cabeza a una granulometría de 100% - 4” alcanzó una recuperación de 62.89% en un periodo de 25 días, y 66.14% de recuperación total de dicho metal en un periodo 35 días, con un consumo de 0.18 Kg/t de cianuro, y 0.16 Kg/t de cal. El total de los resultados obtenidos se describen en la tabla 14.

Tabla 14

Lixiviación a 100% - 4" (Tajo María)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.03	0.51	3.25	0.09	0.09
10	0.08	1.36	8.67	0.1	0.11
15	0.25	4.25	27.11	0.11	0.12
20	0.41	6.97	44.46	0.13	0.14
25	0.58	9.86	62.89	0.14	0.15
30	0.6	10.2	65.06	0.17	0.15
35	0.61	10.37	66.14	0.18	0.15
40	0.61	10.37	66.14	0.18	0.16

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

La lixiviación de 17.2 Kg de mineral de cabeza a 100 % - 2" alcanzó una recuperación de 82.36% de Au en un periodo de 20 días, y una recuperación total de 85.66% de dicho metal en un periodo de 30 días, con un consumo de 0.21 Kg/t de cianuro, y 0.16 Kg de cal. El total de los resultados obtenidos se describen en la tabla 15.

Tabla 15

Lixiviación a 100% - 2" (Tajo María)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.04	0.68	4.39	0.1	0.1
10	0.19	3.23	20.87	.0.13	0.15
15	0.54	9.18	59.30	0.14	0.15
20	0.75	12.75	82.36	0.15	0.16
25	0.78	13.26	83.47	0.18	0.16
30	0.77	13.09	84.56	0.2	0.16
35	0.78	13.26	85.66	0.21	0.16
40	0.78	13.26	85.66	0.21	0.16

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Los resultados de la lixiviación de 17.4 Kg de mineral de cabeza a una granulometría de 100% - 1", determino una recuperación de 81.42 % en un tiempo de 25 días, y una recuperación total de 84.67% en el tiempo de 35 días. El total de los resultados de la cinética se describen en la tabla 16.

Tabla 16

Lixiviación a 100% - 1" (Tajo María)

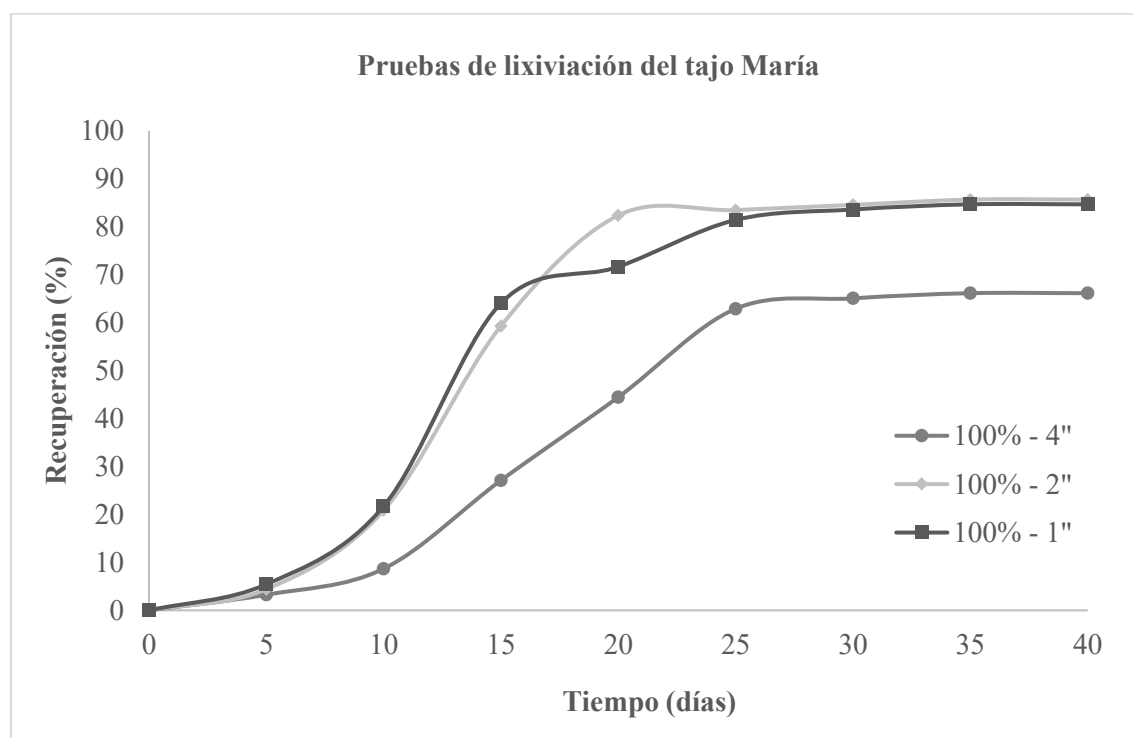
Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.05	0.85	5.43	0.11	0.1
10	0.2	3.4	21.71	.0.14	0.2
15	0.59	10.03	64.05	0.16	0.21
20	0.66	11.22	71.65	0.17	0.24
25	0.75	12.75	81.42	0.18	0.25
30	0.77	13.09	83.59	0.22	0.26

35	0.78	13.26	84.67	0.23	0.26
40	0.78	13.26	84.67	0.23	0.26

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Figura 20

Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo María a diferentes granulometrías



Nota: Las curvas representan la cinética de la lixiviación.

5.2.2.3. Resultados de la Lixiviación del Tajo Herminia

Se lixivio 17.12 Kg de mineral de cabeza con 0.05 % de TCM del tajo Herminia a una granulometría de 100% - 4", alcanzando una recuperación violenta de 61.57 % de Au en un periodo de 25 días, y una recuperación máxima de 65.54 % en un periodo de 65 días, con un consumo de 0.09 Kg/ de cianuro de sodio, y 0.26 Kg/t de cal. El total de los resultados de a cinética de lixiviación se describen en la tabla 17.

Tabla 17*Lixiviación a 100% - 4" (Tajo Herminia)*

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.04	0.68	7.94	0.02	0.1
10	0.08	1.36	15.89	0.04	0.15
15	0.15	2.55	29.79	0.06	0.17
20	0.27	4.59	53.62	0.07	0.24
25	0.31	5.27	61.57	0.09	0.25
30	0.32	5.44	63.55	0.09	0.25
35	0.33	5.61	65.54	0.09	0.25
40	0.33	5.61	65.54	0.09	0.26

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Las pruebas de lixiviación en columna del mineral a 100% - 2" determinaron la recuperación máxima de 75.47 % en un periodo de 25 días con un consumo de 0.1 Kg/t de cianuro, y 0.07 Kg/t de cal. El total de los resultados de la cinética se denotan en la tabla 18.

Tabla 18*Lixiviación a 100% - 2" (Tajo Herminia)*

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.05	0.85	9.93	0.05	0.02
10	0.11	1.87	21.85	0.07	0.03
15	0.25	4.25	49.65	0.08	0.04
20	0.35	5.95	69.51	0.09	0.05
25	0.38	6.46	72.18	0.1	0.07
30	0.37	6.29	73.48	0.11	0.9
35	0.38	6.46	75.47	0.11	0.1
40	0.38	6.46	75.47	0.11	0.1

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

La lixiviación del mineral a una granulometría de 100% - 1", alcanzó una recuperación máxima de 75.47% en un tiempo de 25 días, con un consumo de 0.17 Kg/t,

y 0.12 Kg/t de cal. Los resultados del balance metalúrgico de cinética de lixiviación, se representa en la tabla 19.

Tabla 19

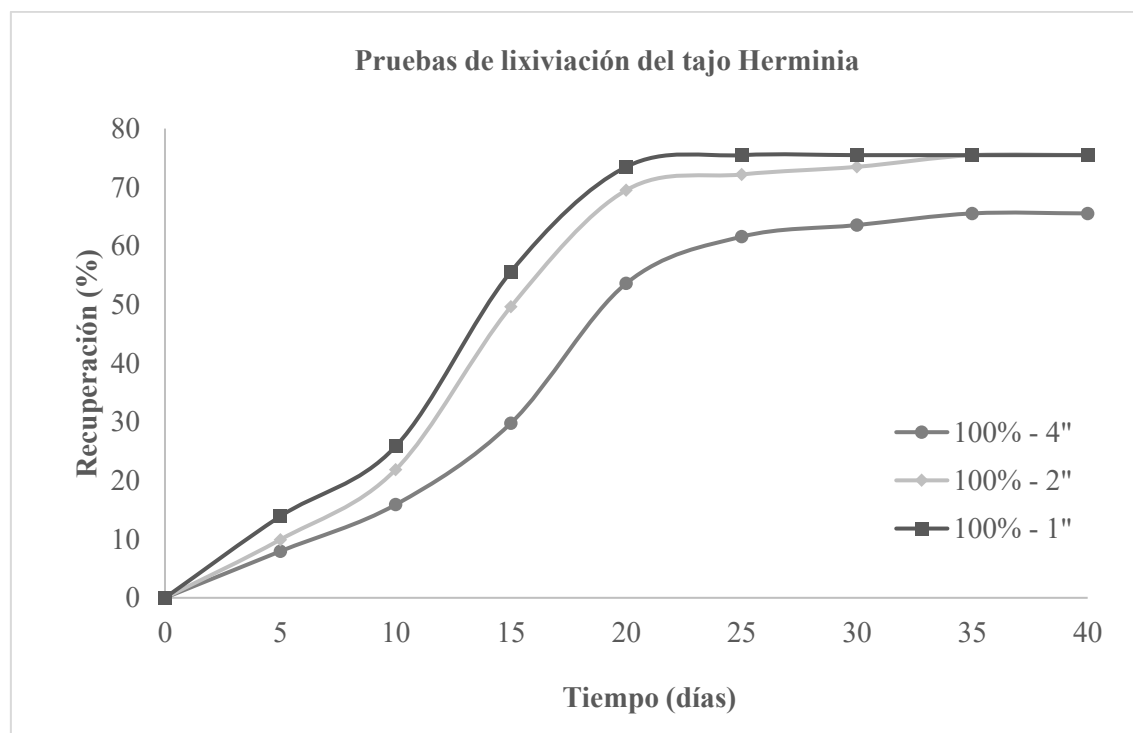
Lixiviación a 100% - 1" (Tajo Herminia)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.07	1.19	13.90	0.08	0.05
10	0.13	2.21	25.82	0.09	0.06
15	0.28	4.76	55.61	0.12	0.09
20	0.37	6.29	73.48	0.15	0.1
25	0.38	6.46	75.47	0.17	0.12
30	0.38	6.46	75.47	0.18	0.14
35	0.38	6.46	75.47	0.18	0.14
40	0.38	6.46	75.47	0.18	0.14

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Figura 21

Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo Herminia a diferentes granulometrías



Nota: Las curvas representan la cinética de la lixiviación.

5.2.2.4. Resultados de la Lixiviación del Tajo Sofía

La lixiviación del mineral de 0.1 % de TCM del tajo Sofía, a una granulometría de 100 % - 4", alcanzó una recuperación máxima de 53.18% de Au en un periodo de 35 días, con un consumo de 0.23 Kg/t de cianuro, y 0.25 Kg/t de cal. El total de los resultados se describen en la tabla 20.

Tabla 20

Lixiviación a 100% - 4" (Tajo Sofía)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.01	0.17	3.32	0.1	0.1
10	0.03	0.51	9.97	0.12	0.15
15	0.05	0.85	16.62	0.15	0.17
20	0.1	1.7	33.24	0.2	0.24
25	0.12	2.04	39.88	0.22	0.25
30	0.15	2.55	49.85	0.23	0.25
35	0.16	2.72	53.18	0.23	0.25
40	0.16	2.72	53.18	0.23	0.26

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

A una granulometría de 100% - 2", la lixiviación alcanzó una recuperación máxima de 63.15% de Au en un periodo de 35 días, empleando 0.23 Kg/t de cianuro y 0.25 Kg/t de cal. El total de los resultados se describen en la tabla 21.

Tabla 21

Lixiviación a 100% - 2" (Tajo Sofía)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.02	0.34	6.65	0.1	0.1
10	0.05	0.85	16.62	0.12	0.15
15	0.08	1.36	26.59	0.15	0.17
20	0.14	2.38	46.53	0.2	0.24
25	0.16	2.72	53.18	0.22	0.25
30	0.18	3.06	59.82	0.23	0.25

35	0.19	3.23	63.15	0.23	0.25
40	0.19	3.23	63.15	0.23	0.26

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Las pruebas de lixiviación del mineral a una granulometría de 100%-1” determinaron la máxima recuperación de 63.15 % de Au en un periodo de 25 días, la cual se mantuvo constante hasta el día 40. Se reportó un consumo de 0.23 Kg/t de cianuro de sodio, y 0.26 Kg/t de cal, al finalizar la prueba, tal y como se describe en la tabla 22.

Tabla 22

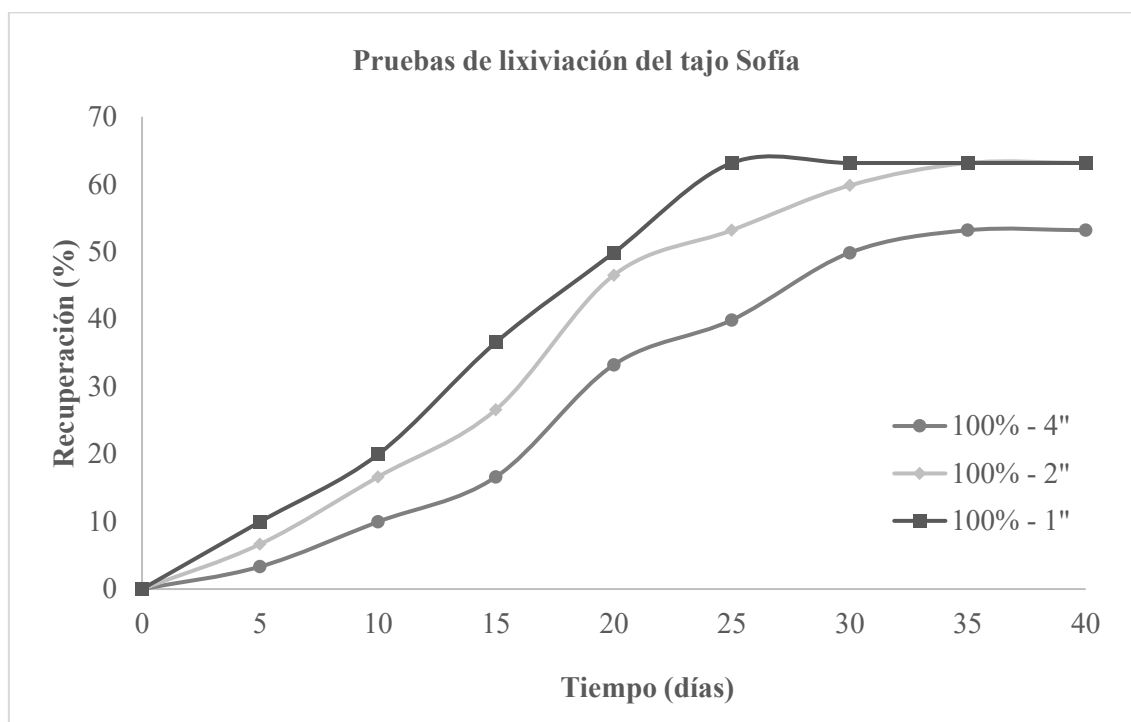
Lixiviación a 100% - 1" (Tajo Sofia)

Tiempo (días)	Ley	Metálico (mg)	Recuperación (%)	Cianuro	Cal
5	0.03	0.51	9.97	0.1	0.1
10	0.06	1.02	19.94	0.12	0.15
15	0.11	1.87	36.56	0.15	0.17
20	0.15	2.55	49.85	0.2	0.24
25	0.19	3.23	63.15	0.22	0.25
30	0.19	3.23	63.15	0.23	0.25
35	0.19	3.23	63.15	0.23	0.25
40	0.19	3.23	63.15	0.23	0.26

Nota: Las variables están representadas en porcentaje (%) y miligramos (mg).

Figura 22

Gráfica comparativa de la lixiviación del tajo Sofia a diferentes granulometrias



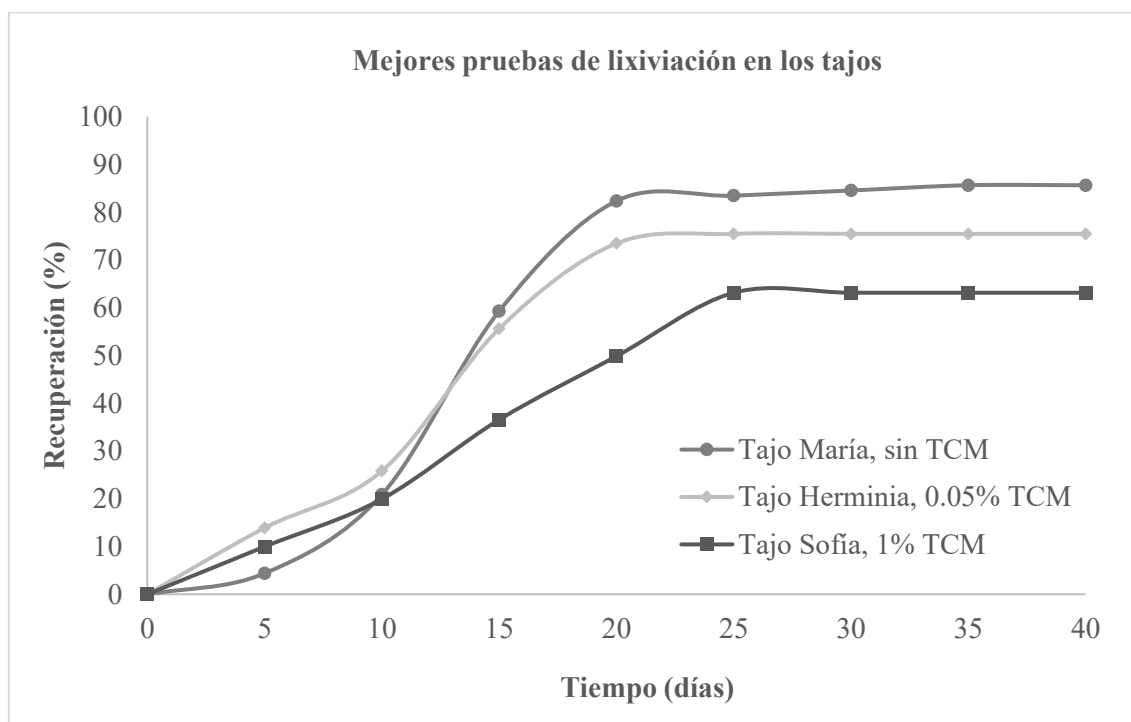
Nota: Las curvas representan la cinética de la lixiviación.

5.2.2.5. Influencia del TCM en la cianuración en columnas

En la figura 23 se puede observar las mejores recuperaciones de Au obtenidas por la cianuración en columnas de los tajos estudiados, demostrando que la recuperación de dicho metal se ve mermada con mayores concentraciones de TCM, por lo cual la operación se ve obligada a no procesar estos tipos de depósitos.

Figura 23

Gráfica comparativa de las mejores pruebas de lixiviación de los 3 tajos



Nota: Las curvas representan la cinética de la lixiviación.

5.2.3. Diseños Experimentales para Determinación del Blending

Se elaboró un diseño experimental para los 3 tajos estudiados, con la finalidad de recuperar los valores de oro en los minerales con contenido de carbón sin verse afectado la mayor recuperación de un mineral. Para ello, se determinó en las pruebas anteriores, que a mayor contenido de carbón la recuperación de Au disminuye, así también se determinó que el tamaño de partícula que permite la mayor recuperación es de 100% - 2", y 35 días de lixiviación. Se empleó el programa Minitab 19 y la opción diseño de mezclas para desarrollar un conjunto de experimentos donde se evaluó la respuesta metalúrgica de las distintas combinaciones de los tres tajos. El diseño desarrollado fue de vértices extremos con 3 componentes, y de segundo grado con réplica. El diseño de pruebas de lixiviación se representa en la tabla 23.

Tabla 23*Diseño factorial del blending de los tajos*

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Tajo María	Tajo Herminia	Tajo Sofía
1	1	1	1	0	0	1
2	2	1	1	1	0	0
3	3	1	1	0	1	0
4	4	2	1	0	0.5	0.5
5	5	2	1	0.5	0	0.5
6	6	2	1	0.5	0.5	0
7	7	1	1	0	0	1
8	8	1	1	1	0	0
9	9	1	1	0	1	0
10	10	2	1	0	0.5	0.5
11	11	2	1	0.5	0	0.5
12	12	2	1	0.5	0.5	0

Nota: Se presenta el orden de las combinaciones de variables.

La variable respuesta fue la recuperación de oro, y se empleó los datos preexistentes de las pruebas anteriores que corresponden a las pruebas 1, 2 y 3. Así también los parámetros de operación empleados en el desarrollo del diseño experimental de lixiviación, se detallan en la tabla 24, y los resultados de las pruebas experimentales se describen en la tabla 25.

Tabla 24*Parámetros de operación*

Parámetro	Valor
Peso mineral (Kg)	17
Solución (l)	17
NaCN (kg/t)	0.1
Cal (Kg/t)	0.1
Tasa de riego	4 l/h/m ²
Granulometría	100% - 2 ^{mm}
Tiempo (días)	35
pH	10.5

Nota: Parámetros a considerar en las pruebas.

Tabla 25

Diseño factorial del blending de los tajos en función de la recuperación de oro

OrdenEst	Tajo María	Tajo Herminia	Tajo Sofía	Rec. Au (%)
1	0	0	1	63.15
2	1	0	0	85.66
3	0	1	0	75.47
4	0	0.5	0.5	64.7
5	0.5	0	0.5	73.7
6	0.5	0.5	0	84.12
7	0	0	1	64.3
8	1	0	0	84.76
9	0	1	0	74.1
10	0	0.5	0.5	66.9
11	0.5	0	0.5	75.9
12	0.5	0.5	0	85.2

Nota: Se presenta el orden de las combinaciones de variables.

5.2.3.1. Análisis de la Varianza de la Recuperación de Oro

El ANOVA para la recuperación de oro determinó un valor p de 0.742 para la interacción de los tajos María y Sofía, con lo que demuestra que el material carbonáceo del tajo Sofía perjudica la recuperación de los valores del blending. Por otro lado, la interacción de los tajos María y Herminia presentan un valor P de 0.003, siendo la interacción de estos tajos la más significativa con respecto a la recuperación de oro, tal y como se describe en la tabla 26.

El resumen del modelo presentó un coeficiente de correlación del 99.10%, con lo cual demuestra la confiabilidad del análisis de los datos. El valor de los coeficientes de correlación se denotan la tabla 27.

Tabla 26

Resumen del modelo para la Rec. Au (%)

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
1.11265	99.10%	98.35%	29.7116	96.40%

Nota: Datos estadísticos destacables.

Tabla 27

Análisis de varianza para Rec. Au (%) (proporciones del componente)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	818.476	818.476	163.695	132.23	0.000
Lineal	2	764.892	461.740	230.870	186.49	0.000
Cuadrático	3	53.584	53.584	17.861	14.43	0.004
Tajo María*Tajo Herminia	1	36.537	28.985	28.985	23.41	0.003
Tajo María*Tajo Sofía	1	1.132	0.147	0.147	0.12	0.742
Tajo Herminia*Tajo Sofía	1	15.916	15.916	15.916	12.86	0.012
Error residual	6	7.428	7.428	1.238		
Total	11	825.904				

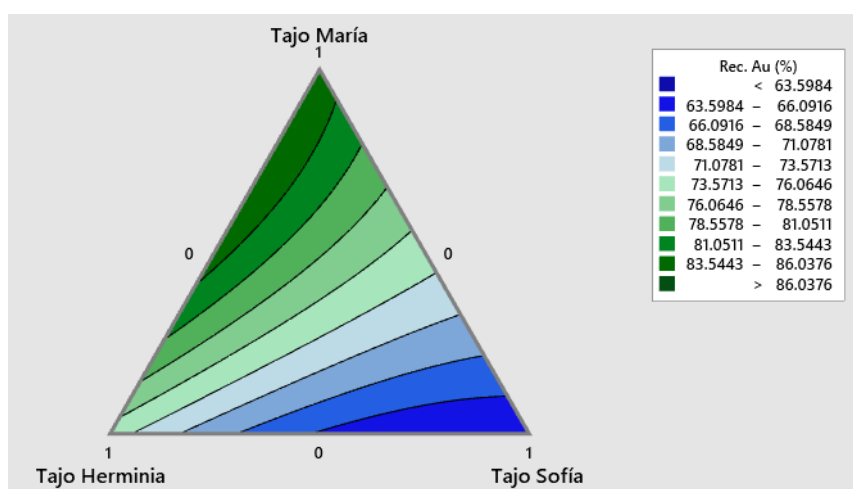
Nota: Datos estadísticos destacables.

5.2.3.1.1. Gráfica de Contornos del Blending

Se modificó los niveles para poder identificar claramente el área óptima que nos permita la mayor recuperación. El grafico de contornos de la figura 24 demuestra claramente que el área verde oscura logra mayores valores de recuperación de oro, por lo que se hace necesario trabajar con los parámetros de dicha área.

Figura 24

Gráfica de contorno de la Rec. Au (%)



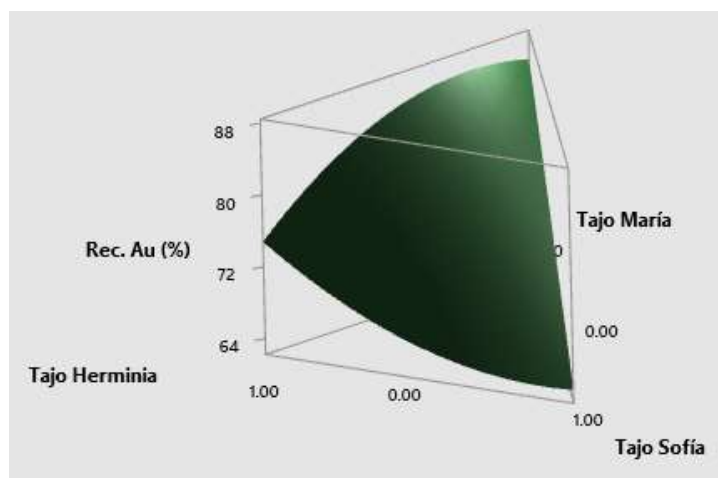
Nota: Los colores indican un rango.

5.2.3.1.2. *Gráfica de Superficie de Mezcla*

En el gráfico superficie respuesta de la figura 25 se puede observar que los mayores valores de recuperación de oro corresponden al tajo María, por otro lado, demuestra los menores valores de recuperación de oro para el tajo Sofía.

Figura 25

Gráfica de superficie de mezcla de Rec. Au (%)



Nota: Gráfica tridimensional.

5.2.3.1.3. *Valores Óptimos del Blending de los Tajos*

El optimizador de respuestas del software estadístico se programó con un nivel inferior de 0, y con el objetivo de maximizar la recuperación de oro del blending. Para ello el objetivo quede determinado como el mayor valor de recuperación de 85.66 % de Au.

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

En esta investigación se da a conocer los efectos negativos que genera la presencia de TCM en el proceso de cianuración en columna de una operación minera en la Región La Libertad, para ello, fue necesario caracterizar mineralógicamente los distintos lotes de minerales que son procesados, los cuales fueron realizados mediante la técnica de microscopia óptica de luz reflejada. Los lotes de minerales que fueron evaluados fueron denominados María, Herminia y Sofía. Con respecto al tajo María, los ensayos químicos determinaron que corresponde a un lote de mineral libre de TCM, además de ello, se pudo determinar la mayor recuperación de 85.66% de Au en la cianuración en columna a nivel de laboratorio, en un tiempo de 35 días, con un consumo de 0.21 Kg-CN⁻/TM, y 0.16 Kg-cal/TM. Estos resultados se alcanzaron para una granulometría del mineral de 100% - 2", y las pruebas a 100 % - 1" reflejaron una disminución en la recuperación de Au, alcanzando un valor máximo de 84.67% de recuperación, con un consumo de 0.23 Kg-CN⁻/TM y 0.26 Kg-cal/TM, deduciéndose por el aumento de consumo de reactivos, que para granulometrías más finas se pueden estar liberando especies cianicidas, las cuales limitan el proceso para dichas condiciones.

Un tajo denominado Herminia ensayo 0.05 % de TCM, y alcanzó una recuperación máxima de 75.47% de Au en un tiempo de 25 días con un consumo de 0.11 Kg- CN⁻/TM y 0.10 Kg.Cal/TM, a una granulometría de 100% - 2". Las pruebas de cianuración en columna para una granulometría de 100% - 1" de dicho tajo, reportó los mismos valores de recuperación, es decir, alcanzó un máximo de 75.47% de recuperación de Au, además de ello, aumentó ligeramente el consumo de cianuro y cal, el cual se debe a la formación de partículas finas que perjudican la recuperación del metal valioso.

El tercer tajo que fue evaluado denominado Sofia, ensayo 0.1% de TCM, y alcanzó una recuperación máxima de 63.15 % de Au en tiempo de 35 días con un consumo de 0.23 Kg- CN/TM y 0.26 Kg-Cal /TM, para una granulometría de 100% - 2". Con respecto a las pruebas de cianuración en columna para una granulometría más fina, no representó aumento alguno en la recuperación del metal valioso, además de presentar valores similares de consumo de cianuro y cal, con valores de 0.22 Kg/TM y 0.25 Kg/TM, respectivamente.

Se pudo determinar que, para los tres tajos estudiados, la granulometría de 100% - 2" lograron los mayores valores de recuperación de oro en un tiempo de 35 días para los tajos María y Sofia, y 25 días para el tajo Herminia. La recuperación de oro en un material libre de TCM no presenta algún tipo de complejidad, además de esto la microscopia óptica de la muestra fue suficiente para poder identificar la presencia de TCM, y oro libre asociado a pequeñas cantidades de sulfuros que no representaron un mayor problema tanto en la recuperación como el consumo.

Uno de los procesos que permitirían reducir el impacto negativo del carbón es el uso de surfactantes como naftaleno sulfonato, dextrina y Triton X-100, esta tecnología podría ser una estrategia efectiva para reducir la capacidad de captura de oro en minerales carbonáceos, tal como lo proponen **Owusu et al. (2021)**, el cual corresponde a una propuesta distinta con respecto al presente trabajo, el cual propone el blending para controlar el efecto pre-robbing en los lotes con alto contenido de TCM.

Con respecto al trabajo presentado por **Li et al. (2020)**, que aborda el tratamiento de minerales con contenido de carbón tipo grafito mediante biometalurgia, demostraron ventajas significativas desde el punto de vista económico, además de ser procesos considerados limpios o naturales. La principal diferencia con respecto a nuestro estudio radica en el enfoque adoptado, ya que este se centra en optimizar la recuperación de oro

mediante el diseño experimental de mezclas y la cianuración en columna de minerales carbonáceos. Cabe destacar que, a pesar de las diferencias metodológicas, nuestro trabajo logró mayores recuperaciones de oro en comparación con los resultados obtenidos por los autores mencionados.

En comparación con el trabajo realizado por **Cruzado & Quispe (2021)**, los cuales sustentaron que el incremento de la tasa de riego de solución permitió optimizar la tasa de recuperación de oro. A diferencia de dicha investigación, sustentaron pruebas de lixiviación para minerales oxidados libres de TCM, aun así, lograron recuperar menos oro que en el presente trabajo, en el cual se puede deducir que la caracterización de la muestra es necesario para determinar que componentes puedan estar mermando la recuperación de Au, el cual puede ser consecuencia de la permeabilidad de la muestra aurífera, liberación del metal valioso, minerales cianicidas, entre otros. Con respecto al método para determinación del blending de minerales fue sustentado por (Escamilla, 2003), quien propuso el método de programación lineal como el más adecuado para determinar una mezcla de distintos lotes de mineral, el cual presenta la diferencia principal con respecto al método empleado, el cual demuestra que es posible determinar mezclas óptimas por distintos métodos, sin embargo el enfoque de la investigación de dicho autor fue para mineral de Fe y concentrados.

CONCLUSIONES

- La cianuración en columna de los minerales de los tajos María, Herminia y Sofía permitió determinar que la recuperación de oro disminuye a medida que aumenta el contenido de TCM en los minerales, lo que afecta negativamente la eficiencia del proceso.
- Mediante microscopía óptica, se analizó una muestra libre de carbón, identificando la presencia de oro en trazas en las gangas, así como especies sulfuradas como calcopirita y pirita, con distribuciones volumétricas de 0.37% y 0.97%, respectivamente.
- La cianuración en columna del mineral del tajo María alcanzó una recuperación máxima de 85.66% de Au en un tiempo de 35 días, a una granulometría de 100 % - 2", con un consumo de 0.21 Kg/t de cianuro y 0.16 Kg/t de cal, el mineral de este tajo no presentó carbón y ensayó una ley de 0.9 g/t.
- La cianuración en columna del tajo Herminia, logró una recuperación máxima de 75.47% de Au en un periodo de 25 días, a una granulometría de 100% - 2", con un consumo de 0.1 Kg/t de cianuro y 0.07 Kg/t de cal, ensayando 0.52 g/t de Au, y 0.05 % TCM.
- Con respecto al mineral del tajo Sofía, se alcanzó una recuperación máxima de 63.15 % de Au, en un tiempo de 35 días a una granulometría de 100 % - 2", con un consumo de 0.23 Kg/t de cianuro y 0.269 Kg/t de cal. El mineral ensayó 0.38 g/t de Au y 0.1% de TCM.
- Se determinó una mezcla óptima de 77.78% del tajo María y 22.22% del tajo Herminia, para alcanzar una recuperación de 86.12% de Au, la cual pretende aprovechar los recursos metálicos de los tajos con alto TCM.

- El uso exclusivo del tajo Sofía, con mayor TCM, genera una pérdida de \$70,037.5017 en comparación con la mezcla óptima. Esto destaca la importancia de aplicar el blending para maximizar la rentabilidad del proceso.

RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas metalúrgicas de cianuración a nivel de pilotaje, además, evaluar los parámetros obtenidos bajo condiciones de operación in situ.
- Realizar pruebas de curado con hipoclorito de sodio a distintos valores de alcalinidad, antes de la cianuración en columna, debido a que dicho reactivo pasiva la actividad química del carbón orgánico.
- Realizar pruebas metalúrgicas de cianuración en columna con densidades de riego mayores a 10 L/h/m².
- Realizar microscopía electrónica de la muestra, para identificar la totalidad de las especies involucradas.
- Desarrollar el análisis granulométrico para obtener el porcentaje en las mallas más finas.
- Realizar la simulación del proceso de cianuración con un software especializado, considerando variables clave como pH, tiempo, granulometría y TCM, escalando a condiciones piloto y validando con los resultados experimentales para optimizar la recuperación de oro.
- Desarrollar la matriz de identificación de peligros y evaluación de riesgos asociados al proceso de cianuración en columnas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abotsi, G., & Osseo, K. (1986). Surface chemistry of carbonaceous gold ores I. Characterization of the carbonaceous matter and adsorption behavior in aurocyanide solution. *International Journal of Mineral Processing*, 18(3-4), 217-236. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516\(86\)90019-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516(86)90019-0)
- Afenya, P. (1991). Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 4(7-11), 1043-1055. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7)
- Ahtiainen, R., Lundström, M., & Liipo, J. (2018). Preg-robbing verification and prevention in gold chloride-bromide leaching. *Minerals Engineering*, 128, 153-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.037>
- Ahumada, D. (2019). *Procedimiento de lixiviación en minerales oxidados con alto porcentaje de arcillas*. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Federico Santa Maria, Viña del Mar. <https://repositorio.usm.cl/>
- Alva, L. (2004). *Bolívar en La Libertad*. (U. A. Bolívar, Ed.) Sucre: Colección Bicentenario.
<https://www4.congreso.gob.pe/congresista/2001/lalva/publicacion/BolivarenLaLibertad1.pdf>
- Azañero, A., Nuñez, P., Vega, V., Caballero, M., & Vidarte, J. (2000). Cómo mejorar la extracción de oro en lixiviación en montón. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 3(5), 15–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v3i5.3058>
- Ballester, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (2000). *Metalurgia Extractiva. Volumen 1: Fundamentos*. Madrid: Editorial Sintesis.

- Beysaas, O., Goffé, B., & Rouzand, N. (2002). Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9), 859-871. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2002.00408.x>
- Borie, C. (2014). Columnas de Lixiviación, una excelente herramienta para evaluar la movilidad de los contaminantes provenientes de botaderos y suelos afectados por la actividad minera . *EAGQ labs*. <https://agqlabs.cl/wp-content/uploads/Columnas-de-lixiviacion-y-contaminantes-provenientes-de-la-actividad-minera.pdf>
- Carhuamaca, B. (2018). *Evaluación metalúrgica al blending de minerales para la recuperación del cobre, plomo y zinc en la uea Chungar, Volcan compañía minera s.a.a. - Pasco - 2018*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco.
- Craig, J., & Rimstidt, D. (1998). Gold production history of the United States. *Ore Geology Reviews*, 13(6), 407-464. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)00009-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)00009-2)
- Cruzado, E., & Quispe, M. (2021). *Optimización de la producción de oro, mediante el incremento de la densidad de riego para la lixiviación en una unidad minera en la zona sur del Perú*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- De la Torre, E., & Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro*. Quito.
- Del Águila, J., & Burgos, J. (2013). *Diseño de un proceso para recuperar metales preciosos de minerales carbonaceos*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

https://web.archive.org/web/20180504142611id_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3730/1/aguila_aj.pdf

- Deschênes, G. (2016). Chapter 26 - Advances in the Cyanidation of Gold. *Gold Ore Processing (Second Edition)*, 429-445.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00026-8>
- Elías, C. (2019). *Impactos del Fenómeno El Niño (FEN) en las regiones de Piura, Lambayeque y La Libertad*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.
- Escamilla, M. (2003). Optimización de mezclas de minerales mediante programación lineal en una mina de mineral de fierro a cielo abierto. *Conciencia Tecnológica*(22).
- Fabian, E., & Velita, L. (2012). *Biolixiviación comparativa de minerales sulfurados compuestos conteniendo enargita, covelita y chalcocita empleando microorganismos mesofílicos y termofílicos en Yanacocha*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Repositorio insitucional de la UNCP.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/542/TIMM_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gaviria, A., Restrepo, O., & Bustamante, O. (2007). *Programa de la asignatura: Hidrometalurgia aplicada línea de metales preciosos*. Notas de clase, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Ghorbani, Y., Franzidis, J., & Petersen, J. (2016). Heap Leaching Technology—Current State, Innovations, and Future Directions: A Review. *An International Journal*, 37(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>

- Haque, K. (1987). Gold Leaching from Refractory Ores—Literature Survey. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 2(3), 235-253. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/08827508708952607>
- Hausen, D. (2000). Characterizing the textural features of gold ores for optimizing gold extraction. *JOM*, 52(14–16). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11837-000-0123-z>
- Hausen, D., & Bucknam, C. (1985). Study of preg-robbing in the cyanidation of carbonaceous gold ores from Carlin, Nevada. *J-GLOBAL*, 833 - 856.
- Hedley, N., & Tabachnick, H. (1968). *Chemistry of Cyanidation*. (A. C. Company, Ed.) American Cyanamid Company.
- Hofmann, P. (2008). *Aplicación del amoníaco como lixiviante ecológico de minerales auroargentíferos*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000629646>
- Ilankoon, I., Tang, Y., Ghorbani, Y., Northey, S., Yellishetty, M., Deng, X., & McBride, D. (2018). The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*, 125, 206-222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.006>
- Ilyas, S., & Lee, J.-c. (2018). *Gold Metallurgy and the Environment* (1 ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315150475>
- Izquierdo, G., & Rojas, V. (2016). *Optimización del blending de minerales en el pad de lixiviación de la mina Lagunas Norte usando parámetros de ley y recuperación usando LINGO (Linear General Optimizer Software)*. Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte, Cajamarca.

- Jeffrey, M., & Breuer, P. (2000). The cyanide leaching of gold in solutions containing sulfide. *Minerals Engineering*, 13(10-11), 1097-1106.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00093-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00093-5)
- Klein, C., & Hurlbut, C. (1996). *Manual de mineralogía* (4 ed.). New York: Editorial Reverté S.A.
- Komnitsas, C., & Pooley, F. (1989). Mineralogical characteristics and treatment of refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 2(4), 449-457.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(89\)90080-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(89)90080-0)
- 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/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194>
- Li, Q., Shen, H., Xu, R., Zhang, Y., Yang, Y., Xu, B., Jiang, T., & Yin, H. (2020). Effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans* on pre-robbing of gold by graphite from thiourea leaching solution. *Journal of Cleaner Production*, 261(121122).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121122>
- López, E. (2012). *Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de Lixiviación*. Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago.
- Lunt, D., & Weeks, T. (2016). Chapter 7 - Process Flowsheet Selection. *Gold Ore Processing (Second Edition)*, 113-129.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00007-4>
- Manning, T., & Kappes, D. (2016). Chapter 25 - Heap Leaching of Gold and Silver Ores. *Gold Ore Processing (Second Edition)*, 413-428.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00025-6>

- Marsden, J., & House, L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2 ed.). Colorado: The Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Mendo, D. (2016). *Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación. Cachachi – Cajamarca 2016*. Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Boletín Estadístico Minero, Edición N° 01-2023*. Boletín, Ministerio de Energía y Minas, Perú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4249258/BEM%2001-2023.pdf?v=1688863802>
- Montague, E. (2014). *Manual of Cyanidation*. Auburn, United States of America: McGraw-Hill. <https://www.iberlibro.com/primer-edicion/Manual-Cyanidation-Hamilton-Edward-Montague-McGraw-Hill/13066530892/bd>
- Mudd, G. (2007). Gold mining in Australia: linking historical trends and environmental and resource sustainability. *Environmental Science & Policy*, 10(7-8), 629-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.04.006>
- Nicol, M., Paul, R., & Filmer, A. (1983). *The recovery of gold from concentrated aurocyanide solutions*. Atlanta: 3rd International Symposium on Hydrometallurgy (Extractive and Process Metallurgy Program Committee of the Metallurgical Society of AIME and the Mineral Processing Division of SME-AIME held at the 112th AIME Annual Meeting).
- Obregon, C. (2016). *Optimización del Blending con aplicaciones de programación lineal para el incremento del valor económico del Mineral en la Unidad Minera Catalina Huanca*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

- Owusu, C., Mensah, S., Ackah, K., & Amankwah, R. (2021). Reducing preg-robbing in carbonaceous gold ores using passivative or blanking agents. *Minerals Engineering*, 170(106990).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106990>
- Perea, C. (2016). *Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro utilizando solventes orgánicos, Medellín, Colombia*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Poblete, R. (2019). *Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel planta piloto*. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago.
- Portilla, R., He, C., Jacome, M., Visurraga, K., Chirif, H., Teplyakow, A., & Rodríguez, J. (2020). Acidic pretreatment of a copper-silver ore and its beneficial effect on cyanide leaching. *Minerals Engineering*, 149(106233).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106233>
- Reza, M. (1999). Economic prosperity of the gold-mining industry in Australia and the consequent gold tax. *Accounting, Business & Financial History*, 9(3), 307-323.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/095852099330232>
- Rojas, M. (2008). Perspectivas de procesamiento y uso del carbón mineral peruano. *Science and technology*, 26, 231-250.
<https://doi.org/https://doi.org/10.26439/ing.ind2008.n026.642>
- Ros, A. (2017). *Recopilación sobre la Metalurgia del oro*. Cartagena: Murcia.
- Salas, D., Pareja, G., Tello, J., & Rodriguez, J. (2020). Leaching of a pyrite-based ore containing copper using sulfuric acid and hydrogen peroxide. *International Journal of Industrial Chemistry*, 11, 195-201.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40090-020-00212-2>

- Senanayake, G. (2008). A review of effects of silver, lead, sulfide and carbonaceous matter on gold cyanidation and mechanistic interpretation. *Hydrometallurgy*, 90(1), 46-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.09.013>
- Sitando, O., Senanayake, G., Dai, X., & Breuer, P. (2019). The adsorption of gold(I) on minerals and activated carbon (preg-robbing) in non-ammoniacal thiosulfate solutions - effect of calcium thiosulfate, silver(I), copper(I) and polythionate ions. *Hydrometallurgy*, 184, 206-217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.10.016>
- Tremolada, J., Dzioba, R., Bernardo, A., & Menéndez, J. (2010). The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching conditions. *International Journal of Mineral Processing*, 94(1-2), 67-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.001>
- Türk, T. (2015). Optimization of arsenic removal from pyrite ash by NaOH leaching using central composite design. *Desalination and Water Treatment*, 57(18), 8575-8582. <https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/19443994.2015.1021841>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2019). *Plan de expansión de referencia generación Generación - Transmisión 2005 - 2019*. Informe, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá.
- Yakubchuk, A. (2023). Russian gold mining: 1991 to 2021 and beyond. *Ore Geology Reviews*, 153(105287). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105287>
- Zadra, J., Engel, A., & Heinen, H. (1952). *Process for recovering gold and silver from activated carbon by leaching and electrolysis*. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

“Influencia del carbón mineral en la recuperación de oro a partir de minerales mixtos en columnas de lixiviación, Huamachuco – Región La Libertad”			
Problema general	Objetivo general	Hipótesis	
		Hipótesis general	Variables de la hipótesis general
¿Cómo se disminuiría la influencia del efecto negativo de los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?	Disminuir el efecto negativo de los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración, empleando la mezcla óptima de los tajos María, Herminia y Sofía, en la región La Libertad, para incrementar la recuperación.	Debido al efecto negativo que tienen los minerales carbonáceos en la recuperación de oro por cianuración, se plantea la hipótesis de reducir este efecto empleando una mezcla óptima de los tajos María, Herminia y Sofía, optimizando parámetros como el contenido de TCM, la granulometría y el tiempo de lixiviación, lo que permitirá incrementar la recuperación de oro, en la región La Libertad.	Porcentaje de carbón Tiempo de cianuración Granulometría
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	Porcentaje de carbón Grado de liberación Granulometría Tiempo de cianuración Proporción de tajos
¿Cuál es el TCM óptimo que debe tener el mineral o la mezcla para recuperar eficientemente del oro, empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?	Determinar el contenido de TCM óptimo que debe tener el mineral para recuperar eficientemente el oro, empleando la mezcla de los tajos María, Herminia y Sofía, en la región La Libertad.	El contenido de TCM en el mineral influye directamente en la eficiencia de la recuperación de oro, disminuyendo el efecto preg-robbing, al mantenerlo en niveles óptimos durante el proceso de cianuración permitiendo mejorar la recuperación de oro por en la región La Libertad.	
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	
¿Cuál es la granulometría más apropiada que debe tener el mineral para recuperar eficientemente del oro, empleando la mezcla de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?	Identificar la granulometría óptima que debe tener el mineral para alcanzar eficiencias de recuperación mayores a los iniciales, asegurando una molienda a un tamaño de partícula óptimo".	Una granulometría adecuada del mineral mejora la exposición del oro, maximizando su recuperación durante el proceso de cianuración, en la región La Libertad.	
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	
¿Cuál es el tiempo de lixiviación necesario para maximizar la recuperación de oro, empleando la mezcla de minerales de los tajos María, Herminia, y Sofía, en la región La Libertad?	Evaluar el tiempo de cianuración necesario para maximizar la recuperación de oro, estableciendo períodos óptimos, dependiendo del contenido de TCM y las condiciones del mineral de los tajos María, Herminia y Sofía.	Se plantea un tiempo de lixiviación adecuado, que abarca varios días, optimiza la recuperación de oro al permitir una mayor disolución del metal en minerales con contenido de carbono, en la región La Libertad. con contenido de carbón, en la región La Libertad.	

Nota: Esquema resumen de la investigación planteada.

Anexo 2

Operacionalización de variables

Variables		Definición	Dimensiones
Variable Independiente:		✓ Compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre	✓ A valores mayores a 0.10% TCM afecta significativamente a la recuperación.
✓	Porcentaje de carbón	✓ Las partículas de los metales preciosos deben estar liberadas para que puedan entrar en contacto con el agente lixivante.	✓ Se trabajan a distintas granulometrías de 1", 2" y 4".
✓	Granulometría	✓ Cantidad de días del proceso de cianuración en columnas.	✓ 50 días de lixiviación para obtener una recuperación óptima.
✓	Tiempo	✓ Relación porcentual entre distintos tipos de tajos en una operación minera.	✓ Se trabajo con tres tajos: María, Herminia y Sofía.
✓	Proporción de tajos	✓ Cantidad de Au recuperado en solución	✓ Asociado a la mejor extracción en el tajo
Variable dependiente:			
✓	Porcentaje de recuperación de oro		

Nota: Esquema resumen de la investigación planteada.

Anexo 3*Diferencia de ingresos según la implementación blending*

Variable	Cianuración del tajo Herminia	Cianuración del tajo Herminia en el blending
Base	10000 t	10000 t
Tajo	Herminia	Blending
Ley ensayada	0.52 g/t	0.52 g/t
Recuperación Lixiviación	75.47%	85.66%
Recuperación Adsorción	99.87%	99.87%
Onzas de Oro recuperado	120.6	143.02
Precio Au	3,288.30\$/Oz	3,288.30\$/Oz
% Pagable	95	95
Ingreso	376,740.531 \$	446,778.0327 \$

Nota: En base al precio actualizado del oro según KITCO.