



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

**Evaluación para la recuperación de oro a partir de los
relaves de amalgamación mediante procesos de
gravimetría y lixiviación de la minería artesanal en la
zona de Huarochirí-Lima**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingenieros Metalúrgicos

AUTORES

Tatiana María COLÁN NISHIMOTO

Ernesto Efrain OCAÑA ESPINOZA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2023



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

Colán, T. & Ocaña, E. (2023). *Evaluación para la recuperación de oro a partir de los relaves de amalgamación mediante procesos de gravimetría y lixiviación de la minería artesanal en la zona de Huarochiri-Lima*. [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	Tatiana María Colán Nishimoto.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41017983
URL de ORCID	-
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Ernesto Efrain Ocaña Espinoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	16021103
URL de ORCID	-
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/0000-0001-7411-3866
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Vladimir Alejandro Arias Arce

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07009405
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Avenida: Av. Venezuela cuadra 34 Latitud: -12.058333 Longitud: -77.083333
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Mineralogía: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Minería, Procesamiento de minerales http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



«Año de la unidad, la paz y el desarrollo»

**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 miércoles 13 del mes de Septiembre del 2023, siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila	(PRESIDENTE)
Mg. VLADIMIR ALEJANDRO Arias Arce	(MIEMBRO)
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA titulada «EVALUACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE LOS RELAVES DE AMALGAMACIÓN MEDIANTE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y LIXIVIACIÓN DE LA MINERÍA ARTESANAL EN LA ZONA DE HUAROCHIRÍ-LIMA» presentada por Don: ERNESTO EFRAIN OCAÑA ESPINOZA 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 preguntas 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:

.....(14) APROBADO.....

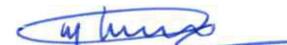
Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Ernesto Efrain Ocaña Espinoza**.

Siendo las...19:25...horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada, firmadas por el Jurado Calificador

Lima, 13 de Septiembre del 2023


Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Mg. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



«Año de la unidad, la paz y el desarrollo»

**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 miércoles 13 del mes de Septiembre del 2023, siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila	(PRESIDENTE)
Mg. VLADIMIR ALEJANDRO Arias Arce	(MIEMBRO)
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA titulada «EVALUACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE LOS RELAVES DE AMALGAMACIÓN MEDIANTE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y LIXIVIACIÓN DE LA MINERÍA ARTESANAL EN LA ZONA DE HUAROCHIRÍ-LIMA» presentada por Doña: TATIANA MARÍA COLÁN NISHIMOTO 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 preguntas 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:

.....(14) **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: **Tatiana María Colán Nishimoto**.

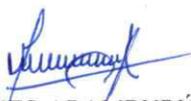
Siendo las.....¹⁹²⁵.....horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada, firmadas por el Jurado Calificador

Lima, 13 de Septiembre del 2023


Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Mg. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



Anexo 2
Informe de Evaluación de Originalidad

- 1. FACULTAD**
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
- 2. ESCUELA**
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- 3. AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
- 4. APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**
Mg. Luis Alfredo Orihuela Salazar.
- 5. OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**
Sra. Carolina Betsabe Carreño Rios
- 6. DOCUMENTO EVALUADO:**
Tesis mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «EVALUACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE LOS RELAVES DE AMALGAMACIÓN MEDIANTE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y LIXIVIACIÓN DE LA MINERÍA ARTESANAL EN LA ZONA DE HUAROCHIRÍ-LIMA»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**
Bach. Ernesto Efrain Ocaña Espinoza
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**
15/11/2021
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**
15/11/2021
- 10. SOFTWARE UTILIZADO**
Turnitin
- 11. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
 - ✓ Excluye textos entrecomillados
 - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
 - ✓ Excluye Bibliografía
 - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
- 12. PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (5%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

✓ hdl.handle.net	1%
✓ cybertesis.unmsm.edu.pe	1%
✓ revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe	1%
✓ www.goodfellow.com	1%
✓ pt.scribd.com	1%
✓ repositorio.unasam.edu.pe	<1%
✓ es.escribd.com	<1%
✓ www.clubensayos.com	<1%
✓ fluidomercurio.blogspot.com	<1%
- 14. OBSERVACIONES**
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**
Lima, 16 de diciembre de 2021



Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 16.12.2021 10:59:33 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA



Anexo 2
Informe de Evaluación de Originalidad

- 1. FACULTAD**
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
- 2. ESCUELA**
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- 3. AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
- 4. APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**
Mg. Luis Alfredo Orihuela Salazar.
- 5. OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**
Sra. Carolina Betsabe Carreño Rios
- 6. DOCUMENTO EVALUADO:**
Tesis mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «EVALUACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE LOS RELAVES DE AMALGAMACIÓN MEDIANTE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y LIXIVIACIÓN DE LA MINERÍA ARTESANAL EN LA ZONA DE HUAROCHIRÍ-LIMA»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**
Bach. Tatiana María Colán Nishimoto
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**
15/11/2021
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**
15/11/2021
- 10. SOFTWARE UTILIZADO**
Turnitin
- 11. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
 - ✓ Excluye textos entrecomillados
 - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
 - ✓ Excluye Bibliografía
 - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
- 12. PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (5%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

✓ hdl.handle.net	1%
✓ cybertesis.unmsm.edu.pe	1%
✓ revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe	1%
✓ www.goodfellow.com	1%
✓ pt.scribd.com	1%
✓ repositorio.unasam.edu.pe	<1%
✓ es.escribd.com	<1%
✓ www.clubensayos.com	<1%
✓ fluidomercurio.blogspot.com	<1%
- 14. OBSERVACIONES**
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**
Lima, 16 de diciembre de 2021



Firmado digitalmente por ORIHUELA SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 16.12.2021 11:02:19 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

DEDICATORIA

A mis padres por ser mi ejemplo de vida, por su esfuerzo y su dedicación. Siempre serán mi motivo de superación.

Tatiana María Colán Nishimoto.

Dedicado a mis padres que me brindaron todo su apoyo incondicional, con gran sacrificio y esfuerzo para que me forjara una vida profesional; y a mi amigo Freddy Callupe, que, en vida sus consejos y acciones fueron determinantes para llevar a cabo este proyecto.

Ernesto Efraín Ocaña Espinoza.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas por la dedicación, y el tiempo prestado a este trabajo.
Y, a todas las personas de diversas formas, nos manifestaron su apoyo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Problemática	2
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Justificación de la Investigación	3
1.3.1. Justificación Tecnológica.....	3
1.4. Alcance de la Investigación	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo Generales.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis	5
1.6.1. Hipótesis General.....	5
1.6.2. Hipótesis Específica.....	5
1.7. Identificación de Variables	5
1.7.1. Operacionalización de Variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes	8
2.2. La Minería en el Mercado Mundial	11
2.3. Actividad Minera	11

2.4.	Metales y sus Usos.....	13
2.5.	La Minería en el Perú.....	15
2.5.1.	Una Transformación Sostenible.....	17
2.5.2.	Tipos de Yacimientos Auríferos	17
2.6.	Concentradores Gravimétricos.....	19
2.7.	Cianuración para la Minería Artesanal	23
2.7.1.	Cianuración del Oro	24
2.7.2.	Fundamento de la Cianuración	27
2.8.	Caracterización Mineralógica del Oro	34
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y MINERALOGÍA DE LA MUESTRA PROBLEMA.....		40
3.1.	Diseño de Investigación	40
3.2.	Tipo de Investigación.....	40
3.3.	Unidad de Análisis	41
3.4.	Material Investigado y Tamaño de Muestra	41
3.5.	Desarrollo Experimental	41
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN		42
4.1.	Caracterización Mineralógica de los Relaves de Amalgamación.....	42
4.2.	Análisis Químico de los Relaves de Amalgamación	48
4.3.	Desarrollo Experimental	48
4.3.1.	Pruebas de Concentración Centrífuga-Gravimétrica	48
4.3.2.	Pruebas de Moliendabilidad del Relave de Concentración Centrífuga-Gravimétrica.....	50

4.3.2.1.	Influencia de la Granulometría en la Lixiviación con Cianuro.	51
4.3.2.2.	Cinética de Lixiviación de Oro	53
4.3.3.	Análisis de la interacción de las variables tiempo y granulometría en la Cianuración de los Relaves de Concentración Centrífuga-gravimétrica	55
4.3.4.	Desarrollo del Diseño Factorial	56
4.3.4.1.	Análisis de Varianza para la Recuperación de Oro.....	57
4.3.4.2.	Ecuación de Regresión para la Recuperación de Oro en Unidades no Codificadas	58
4.3.4.3.	Influencia de la Granulometría en la Lixiviación con Cianuro.	59
4.4.	Evaluación de Costos Asociados al Procesos	61
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		63
CONCLUSIONES		68
RECOMENDACIONES.....		70
REFERENCIAS.....		71
ANEXOS		78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	7
Tabla 2 Clasificación minera según incorporación normativa	16
Tabla 3 Cantidad de oro disuelto en una hora.....	30
Tabla 4 Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro	31
Tabla 5 Principales minerales opacos	36
Tabla 6 Análisis mineralógico de la muestra trabajada	42
Tabla 7 Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados.....	44
Tabla 8 Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y posibilidad de liberación completa.....	45
Tabla 9 Condiciones de operación de equipo concentrador centrifugo gravimétrico Falcon.....	48
Tabla 10 Resultados del balance metalúrgico de concentración centrifuga gravimétrica	49
Tabla 11 Resultados del balance metalúrgico prueba Falcon-concentración gravimétrica segunda pasada.....	49
Tabla 12 Análisis químico de cobre, arsénico y plata	49
Tabla 13 Granulometría de los relaves con respecto al tiempo de molienda en términos de P80 y porcentaje pasante menos Malla 200	50
Tabla 14 Condiciones estándar de la lixiviación	52
Tabla 15 Resumen de pruebas de cianuración con diferentes P80	52
Tabla 16 Resumen de los datos reportados.....	54
Tabla 17 Variables del diseño factorial	55
Tabla 18 Condiciones estándar del proceso de cianuración de los relaves de gravimetría	55

Tabla 19 Elaboración del diseño factorial en Minitab - 19.....	56
Tabla 20 Resumen del resultado de las pruebas de cianuración	57
Tabla 21 Análisis de varianza para la recuperación de oro	58
Tabla 22 Resumen del diseño	58
Tabla 23 Condiciones estándar de la lixiviación	60
Tabla 24 Resumen de pruebas de cianuración con diferentes P80	60
Tabla 25 Resumen de costos.....	62
Tabla 26 Resumen de los datos del diseño factorial.....	66
Tabla 27 Resultados obtenidos de la etapa de cianuración.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Producción de oro.....	14
Figura 2 Perú en el mercado internacional	14
Figura 3 Actividad minera en el Perú	16
Figura 4 Concentrador Falcon Semi Batch.....	21
Figura 5 Falcon C, Concentrador continuo.....	22
Figura 6 Falcon UF Concentrador de partículas ultrafinas	23
Figura 7 Equilibrio CN/HCN en función del pH.....	32
Figura 8 Pirámide de la caracterización geometalúrgica	34
Figura 9 Microscopio óptico de luz reflejada	37
Figura 10 Intercrecimientos mineralógicos	38
Figura 11 Ejemplo de registro de intercrecimientos mineralógicos	39
Figura 12 Fotomicrografía de partículas libres de gangas (GGs) y de óxidos de mercurio (HgO); partículas entrelazadas de pirita (py) con la ganga (GGs), de óxido de mercurio con la ganga (HgO+GGs) y de hematita con la goethita (hm+gt). 200X	46
Figura 13 Fotomicrografía de la misma vista de la anterior, observada en nícoles cruzados; donde el óxido de mercurio (HgO) presenta reflexiones internas de color rojo bermellón. 200X.....	46
Figura 14 Fotomicrografía de las partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y partículas entrelazadas de goethita con la ganga (gt+GGs). Observada en nícoles cruzados. 200X	46
Figura 15 Fotomicrografía de las partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de óxido de mercurio con la ganga (HgO+GGs) y de pirita con la ganga (py+GGs). 500X	46

Figura 16 Fotomicrografía de la misma vista de la anterior, observada en nicoles cruzados, donde se pueden apreciar al óxido de mercurio (HgO) con sus reflexiones internas de color rojo bermellón. 500X	47
Figura 17 Fotomicrografía de la partícula libre de oro (Au), y partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y de gangas (GGs); partícula libre de goethita (gt). 500X	47
Figura 18 Fotomicrografía de la partícula entrelazada de calcopirita con la goethita (cp+gt) y partículas libres de gangas (GGs). 500X	47
Figura 19 Curva de moliendabilidad del P80	51
Figura 20 Gráfico de la relación entre la recuperación de Au y el P80	53
Figura 21 Cinética de la recuperación de Au en función del tiempo	54
Figura 22 Diagrama de Pareto del diseño	59
Figura 23 Gráfico de la relación entre la recuperación de Au y el P80	61
Figura 24 Gráfico de efectos estandarizados	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia.....	79
Anexo 2 Muestra del relave de amalgamación.....	80
Anexo 3 Concentrador Falcon.....	80
Anexo 4 Adicción del mineral.....	80
Anexo 5 Concentrado del Falcon.....	81
Anexo 6 Relave del Falcon.....	81
Anexo 7 Plateo del Concentrado Falcon.....	81
Anexo 8 Lixiviación con cianuro - Agitación en botella.....	82
Anexo 9 Reactivos para cianuración.....	82

NOMENCLATURA

Au	:	Oro.
Apy	:	Arsenopirita.
Cp	:	Calcopirita.
Py	:	Pirita.
Ef	:	Esfalerita.
Gn	:	Galena.
Hm	:	Hematita.
Gt	:	Goethita.
GGs	:	Gangas.
t	:	Tiempo de molienda
mg/lt	:	Miligramos por litro
g	:	gramo.
Kg	:	Kilogramo.
%	:	Porcentaje de recuperación, ley, distribución.
g/TM	:	Gramos por tonelada métrica.
N	:	Número de partículas
%V	:	Porcentaje de volumen
Oz/TC	:	Onzas por toneladas cortas
psi	:	Libra por pulgada cuadrada
μ	:	Micra.
L/S	:	Relación líquido-sólido

GL	:	Grados de libertad
H ^z	:	Unidad de frecuencia, ciclos por segundo
SC	:	Suma de cuadrados
MC	:	Media de cuadrados
EE	:	Error estándar
S	:	Desviación estándar
R ²	:	Coefficiente de determinación
FIV	:	Factor de inflación de la varianza

RESUMEN

La presente tesis está orientada para la recuperación de oro a partir de los relaves de amalgamación ubicados en la zona minera de la provincia de Huarochirí - Lima, mediante dos etapas complementarias: la primera mediante el proceso gravimétrico centrífugo (utilizando el equipo Falcon) y la segunda mediante el proceso de lixiviación del relave generado en la primera etapa.

El resultado del análisis químico de una muestra representativa ensayó una ley de 1.137 Oz-Au/TC, el cual se encontró como libre, además, la caracterización mineralógica de dicha muestra indicó la presencia de: Calcopirita, esfalerita, galena, pirita, arsenopirita, hematita, goethita, óxidos de mercurio, y gangas. En base a la mineralogía de la muestra, se desarrollaron pruebas de concentración centrífuga gravimétrica en 2 etapas, Los resultados del proceso gravimétrico centrífugo en la primera etapa fueron: 11.15% de recuperación de Au, con una ley del concentrado de 375.09 g-Au/TM, y un ratio de 102.13, con una granulometría 55.60% - 200 malla. En una segunda etapa de concentración, se logró recuperar 4.8% de Au con una ley de 104.91 g/TM, y 84.78 de ratio de concentración. El proceso de concentración centrífuga gravimétrica alcanzó una recuperación de 14.84% de oro en ambas etapas

Con los relaves de la mejor prueba de concentración centrífuga gravimétrica, se desarrollaron pruebas de moliendabilidad, determinando la ecuación $P80 = -1.0358(t) + 75.715$. Así también se elaboró un diseño factorial de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas, para evaluar la influencia del P80 en un rango de 57.06 a 70.10 micras, y el tiempo de lixiviación de 24 a 48 horas, determinando que la variable P80 presenta una contribución de 88.95% en la recuperación de oro. En base al diseño factorial, se desarrollaron pruebas de lixiviación en función del tamaño de

partícula, determinando que para un tamaño de 55 micras (P80), se logra recuperar 95.95% de oro, con un consumo de 3.4 Kg/TM de cianuro y 1.7 Kg/TM de cal. Por último, se evaluó la cinética de lixiviación en un período de 24 horas, determinando una recuperación de 94.86 % de oro en el tiempo de 24 horas, presentando el modelo $\%Rec. Au = -0.2037(t)^2 + 9.4545(t) - 13.479$, el cual presenta un coeficiente de correlación de 0.9861.

Palabras claves: Minería artesanal; amalgamación; cianuración; concentración gravimétrica.

ABSTRACT

This thesis is aimed at the recovery of gold from amalgamation tailings located in the mining area of the province of Huarochirí - Lima, through two complementary stages: the first through the centrifugal gravimetric process (using the Falcon equipment) and the second, through the leaching process of the tailings generated in the first stage.

The result of the chemical analysis of a representative sample tested a grade of 1,137 Oz-Au/TC, which was found to be free, in addition, the mineralogical characterization of said sample indicated the presence of: Chalcopyrite, sphalerite, galena, pyrite, arsenopyrite, hematite, goethite, mercury oxides, and gangues. Based on the mineralogy of the sample, gravimetric centrifugal concentration tests were developed in 2 stages. The results of the centrifugal gravimetric process in the first stage were: 11.15% Au recovery, with a concentrate grade of 375.09 g-Au/ TM, and a ratio of 102.13, with a granulometry of 55.60% - 200 mesh. In a second concentration stage, it was possible to recover 4.8% of Au with a law of 104.91 g/TM, and a concentration ratio of 84.78. The gravimetric centrifugal concentration process achieved a recovery of 14.84% gold in both stages.

Grindability tests were developed with the tailings from the best centrifugal gravimetric concentration test, determining the equation $P80 = -1.0358(t) + 75.715$. Thus, a factorial design of 2 factors, 2 levels and 2 replicates was also elaborated, to evaluate the influence of P80 in a range of 57.06 to 70.10 microns, and the leaching time of 24 to 48 hours, determining that the variable P80 presents a 88.95% contribution in gold recovery. Based on the factorial design, leaching tests were developed depending on the particle size, determining that for a size of 55 microns (P80), it is possible to recover 95.95% of gold, with a consumption of 3.4 Kg/MT of cyanide and 1.7 Kg/TM of lime. Finally, the leaching kinetics was evaluated in a 24-hour period, determining a recovery of 94.86% gold in 24-hour time, presenting the %Rec model. $Au = -0.2037(t)^2 + 9.4545(t) - 13.479$, which presents a correlation coefficient of 0.9861.

Keywords: Artisanal mining; amalgamation; cyanidation; gravimetric concentration.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Nuestro país es conocido internacionalmente por tener una gran variedad de recursos minerales, por lo general la atención académica, de investigación e inversión, gira entorno a la evaluación y facilitación de los negocios de empresas transnacionales, dejando de lado tanto a la pequeña minería, como a la artesanal. Ello se debe a que comúnmente estos últimos son asociados a una gran informalidad, sin reparar que para ellos los costos de inversión y de producción, el tamaño de concesión, la fuerza laboral, entre otros, son aspectos de difícil gestión. Como sabemos, a largo plazo, esa situación de informalidad produce una explotación irracional de los recursos naturales, además de generar la ubicación de centros poblados desordenados y hacinados alrededor de los puntos de actividad de la minera artesanal.

El caso que más se identifica con esta informalidad, lo encontramos en la actual industria metalúrgica del Au, puesto que este metal representa un rápido acceso a la riqueza, en especial para las comunidades rurales. Esta actividad de extracción de Au de manera artesanal podría ser optimizada para maximizar los beneficios y permitir mejoras. Sin embargo, la minería artesanal al explotar casi exclusivamente el Au por amalgamación con escasa formación técnica y educación ambiental no solo ejerce un inapropiado manejo del Hg, sino también que los procesos de concentración que emplean no generen los resultados económicos proyectados para un corto plazo.

Por las razones mencionadas anteriormente es que se propone evaluar los procesos gravimétricos y lixiviación para recuperar Au, a partir de relaves de amalgamación de la minería artesanal en la provincia de Huarochirí –región Lima.

1.1. Situación Problemática

En el distrito de Huarochirí, región Lima, se procesan minerales oxidados con presencia de Au libre mediante el proceso de amalgamación, la cual presenta bajas recuperaciones con respecto al metal de interés comercial. Para determinar la cantidad de Au en los relaves de amalgamación, se envió una muestra representativa al laboratorio de análisis químico, el cual reportó una ley de 1.137 Oz-Au/TC. Estos relaves son vendidos a un valor de 1000 \$/TM en la provincia de Huarochirí, el cual no corresponde a su precio real, debido a la falta de difusión de tecnologías de recuperación de metales preciosos, las cuales se vienen desarrollando en las últimas décadas. Es por ello que el presente estudio de investigación propone la recuperación de los valores metálicos de Au en los relaves, mediante procesos centrífugos gravimétricos (concentrador Falcon) y cianuración. De esta manera, se pretende ofrecer soluciones a las mineras artesanales, con la finalidad de aumentar la recuperación de Au, y por consecuencia, la rentabilidad del proceso.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

- ¿De qué manera podemos recuperar oro a partir de los relaves de amalgamación empleando la concentración centrífuga – gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, a nivel de laboratorio, de la minería artesanal en la zona de Huarochirí?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué forma podemos determinar las especies de minerales, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y

entrelazadas presentes en los relaves de amalgamación de la provincia de Huarochirí?

- ¿Con qué parámetros podemos recuperar oro mediante el proceso de concentración centrífuga gravimétrica de los relaves de amalgamación, a nivel de laboratorio en la provincia de Huarochirí?
- ¿Cómo recuperamos oro mediante la cianuración de los relaves de concentración centrífuga gravimétrica?

1.3. Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica dado que los procesos de concentración centrífuga gravimétrica, y cianuración de los relaves centrífugos gravimétricos, permitirán la recuperación de oro en los relaves de amalgamación de la zona de Huarochirí, aumentando la rentabilidad de los pequeños mineros artesanales, y el desarrollo socioeconómico de las comunidades involucradas en dichas actividades de beneficio.

1.3.1. Justificación Tecnológica

La presente investigación se justifica tecnológicamente porque la concentración centrífuga – gravimétrica, y la cianuración de los relaves de concentración, permitirá recuperar oro con el uso de tecnologías que generan menos impacto ambiental al procesar relaves de amalgamación con respecto a las técnicas convencionales.

1.4. Alcance de la Investigación

El proyecto propuesto tiene repercusión directa para la gestión de explotación de oro en los relaves de amalgamación de la zona de Huarochirí. Así también, intenta sensibilizar el uso de

tecnologías que generen una mayor recuperación del metal de interés comercial y un menor impacto ambiental, mejorando de esta forma, las condiciones del ciclo productivo de este sector minero.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo Generales

- Aplicar el proceso de concentración centrifuga gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración a nivel de laboratorio, para recuperar oro de los relaves de amalgamación de la minería artesanal en la zona de Huarochirí.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las especies mineralógicas presentes, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazadas, mediante microscopia óptica de los relaves de amalgamación, en la provincia de Huarochirí.
- Realizar pruebas de concentración centrifuga gravimétrica de los relaves de amalgamación a nivel de laboratorio, para la recuperación de oro en la provincia de Huarochirí.
- Realizar pruebas de cianuración de los relaves de concentración centrifuga gravimétrica, para recuperar oro a nivel de laboratorio

1.6. Hipótesis

1.6.1. *Hipótesis General*

- La concentración centrifuga gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, a nivel de laboratorio, permitirá recuperar Au a partir de los relaves de amalgamación de la minería artesanal en la zona de Huarochirí.

1.6.2. *Hipótesis Específica*

- La microscopia óptica de los relaves de amalgamación permitirá identificar las especies de minerales involucrados, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazadas, en la provincia de Huarochirí.
- La concentración centrifuga gravimétrica permitirá recuperar oro de los relaves de amalgamación a nivel de laboratorio, en la provincia de Huarochirí.

La cianuración de los relaves de la concentración centrifuga gravimétrica, permitirá aumentar la recuperación de oro, a nivel de laboratorio.

1.7. Identificación de Variables

Las variables por considerarse en el proceso de concentración centrifuga gravimétrica son:

Variable independiente

- Granulometría.

Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de oro.

Variables intervinientes controladas

- Fuerza de gravedad.
- Densidad de pulpa.

- Presión del flujo de agua.

Las variables por considerarse en el proceso de cianuración de los relaves de concentración centrifuga gravimétrica son:

Variable independiente

- Granulometría
- Tiempo de cianuración

Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de oro.

Variables intervinientes controladas

- Nivel de alcalinidad (pH)
- Concentración de cianuro
- Relación Sólido/ Líquido

1.7.1. Operacionalización de Variables

Con el objetivo de relacionar las variables que intervinieron en los procesos de concentración centrifuga gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, se emplearon balances de masa en hojas de cálculo y análisis estadístico en Minitab 19.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente		
Granulometría	Porcentaje	Tamiz de abertura de 74 micras
Tiempo de cianuración	Horas	Tiempo
Variable Dependiente		
Porcentaje de recuperación de oro	Porcentaje (%)	Ensayos químicos

Nota: Considerando las unidades respectivas para cada una de las variables.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

(Aramburú y otros, 2016) en el artículo de investigación “Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia”, estudiaron la concentración centrifuga gravimétrica de una muestra procedente de los mineros artesanales de la zona de Lomas en equipó Falcon, en el departamento de Piura. Los autores caracterizaron mineralógicamente la muestra empleando microscopia óptica de luz reflejada, determinando la presencia de especies del tipo oro, electrum, pirita, arsenopirita, hematina, goethita y gangas, así también, direccionaron pruebas metalúrgicas de concentración centrifuga gravimétrica en equipo Falcon a nivel de laboratorio, evaluando la variable de fuerza de gravedad. Los mejores resultados que sustentaron bajo la tecnología descrita, es de 19.5%, así también los relaves del proceso fueron remolidos y cianurados, para lograr la mejor recuperación de 97.56% de oro, con consumo de cianuro de 1.64 Kg/TM y cal de 9.44 Kg/TM, en el tiempo de 24 horas.

(Curo & Valvidia, 2016) en su tesis “Recuperación de oro y mercurio por concentrador centrifugo de los relaves de amalgamación en la zona de 9 de Septiembre - distrito de Huaypetue - región de Madre de Dios”, plantean la recuperación del metal valioso mediante el proceso de concentración centrifuga gravimétrica en Falcon L-40. Sustentaron que la caracterización de la muestra fue realizada mediante microscopia óptica, e indicaron la presencia de especies de minerales como oro, electrum, pirita, arsenopirita, hematita, magnetita, goethita y gangas. Así también los autores obtuvieron como mejor resultado, 45.55 % de recuperación de oro bajo las condiciones de operación: fuerza de gravedad 40 G's, caudal de alimentación 0.23 L/Seg, porcentaje de solidos de 40 % y presión de 4 PSI.

(Gallegos, 2018) en su tesis “Estudio técnico para la recuperación de Oro a partir de minerales de desmonte y relaves de Quimbalete por el proceso de Vat Leaching”, sustentó la investigación de oro de tamaño de 15 a 25 micrones y que, para 36 horas de cianuración, logró obtener una recuperación del oro de 86 -85.50%, valor que alcanzó con un consumo de cianuro de 3.90 Kg/TM, 95 micrones de tamaño de partícula y 36 horas de cianuración. El autor concluyó que bajo las condiciones la lixiviación Vat Leaching, se lograba extracciones del orden del 85% de oro.

(Rojas & Villanueva, 2018), en su tesis “Evaluación técnica y económica para la recuperación de oro de la cancha de relaves de la empresa minera Río Chicama S.A.C. Sayapullo, La Libertad”, estudiaron una muestra de relave procedente de la empresa minera Río Chicama SAC, la cual se encuentra ubicada en el departamento de La Libertad. Los autores plantearon los objetivos de caracterizar la muestra de relaves para evaluar las alternativas de proceso de beneficio. Demostraron que los valores de oro variaron entre 1.00 g/TM hasta los 3.10 g/TM, así también sustentaron que los valores de plata variaron entre los .85 g/TM hasta 23.64 g/TM, los cuales están asociados con Arsénico a un 0.16%, con Antimonio a un 9 % y con Zinc a un 0.62 %. Las mejores pruebas que demostraron fueron con una concentración gravimétrica en mesa Wifley, la cual logró recuperar 37.97% de oro, seguido de la cianuración de los relaves, la cual llegó a recuperar 46.15%. Los mejores resultados que alcanzaron fueron para una recuperación de 84 % de oro.

(Torkaman & Veiga, 2023) en su artículo científico “Comparing cyanidation with amalgamation of a Colombian artisanal gold mining sample: Suggestion of a simplified zinc precipitation process”, destacan la ineficiencia de las prácticas de amalgamación de mineral, para lo cual propusieron un proceso de lixiviación con cianuro y precipitación con polvo de zinc a partir de una muestra de 20 kg de la mina La María, región de Providencia, Antioquia, con una ley de

oro de cabeza de $48,87 \pm 6,52$ g Au/t, 0.41 % de cobre y 95 ppm de plata, logrando recuperar 84% del oro en un periodo de 24 horas con una concentración de 1 g/L de cianuro, y más del 99% del oro se precipitó con polvo de zinc en dos horas. Así también, afirmaron que las pruebas de amalgamación en laboratorio que replicaron bajo las condiciones de operación en mina lograron recuperar menos del 19 % de oro. Los autores señalan que, por lo general, el proceso de cianuración se lleva a cabo de manera deficiente y, en muchos casos, el manejo inadecuado de los relaves genera impactos ambientales significativos.

(Sousa y otros, 2010) en el artículo “Strategies for reducing the environmental impact of reprocessing mercury-contaminated tailings in the artisanal and small-scale gold mining sector: insights from Tapajos River Basin, Brazil”, describieron que en la localidad de Garimpo Ouro Roxo, los mineros están utilizando actualmente la amalgamación y la cianuración en la lixiviación en cuba, logrando recuperar el 50% del oro y dura 20 días (por tanque), consumiendo alrededor de 3300 kg NaCN/mes. Los autores desarrollaron un nuevo proceso en una planta piloto en esta área, que involucra concentración por gravedad seguida de cianuración en un molino de bolas, en un tiempo de 24 horas, logrando recuperar 98% de oro del concentrado. Los resultados que presentaron demostraron que la cianuración intensiva en un molino de bolas reduce considerablemente el tiempo de lixiviación.

(Vieira, 2006) en su artículo de investigación “Mercury-free gold mining technologies: possibilities for adoption in the Guianas”, describieron los modelos más adecuados para la industria de la minería aurífera de pequeña escala en las Guayanas, cuando se refirieron al Knelson de 7,5 pulgadas y el Falcon B6, la cual sostienen, son equipos básicos por lotes capaces de procesar 0,64 tph y 0,5 tph, respectivamente. Afirman que los concentradores centrífugas son muy costosas y requieren mano de obra calificada y la disponibilidad de agua limpia para lograr la separación

deseada. El objetivo del autor fue promover la tecnología libre de mercurio y monitorear el mercurio en el medio ambiente.

2.2. La Minería en el Mercado Mundial

La minería es una actividad extractiva cuyo desarrollo sirve de apoyo para la gran parte de la industria manufacturera. Además, es considerada como una importante fuente de desarrollo económico para los países de procedencia, muchas veces subdesarrollados (Gamu y otros, 2015).

La minería es una actividad ligada al sector económico y medio ambiental. Ello se debe a que, por un lado, la minería atrae inversiones extranjeras, produciendo positivamente un mayor ingreso de divisas y valores de exportación para el Estado receptor de la inversión. A su vez, como sabemos este panorama se ve reflejado en bolsas mundiales por el impacto de las cotizaciones de los metales, lo que afecta al tipo de cambio y estabilidad de nuestra moneda nacional (Kesler, 2015).

Desde otro punto de vista, la minería viene a ser la raíz de pasivos ambientales y desacuerdos sociales, precisamente por la naturaleza y desarrollo de las gestiones empresariales de mineras que colisiona con los derechos de terceros (Eberhard, 2016).

2.3. Actividad Minera

La actividad minera se basa en la recuperación selectiva de recursos minerales y otros materiales de la corteza terrestre, que por lo general implica la excavación y la extracción física de grandes cantidades de dichos materiales para recobrar tan solo volúmenes pequeños del producto mineral o metal esperado (Valero & Valeria, 2012).

El mineral es la sustancia de origen natural caracterizada por una composición química definida con propiedades presumibles y constantes. El recurso mineral es un volumen determinado de la corteza terrestre con una concentración prominente de un mineral. Cambiará al estado de reserva o yacimiento si dicho mineral o su contenido –es decir, un metal–, se puede obtener con tecnología de la época y a un costo económico que genere rentabilidad razonable para los objetivos de la minera metálica (Kesler, 2015).

Existe una gran variedad de materiales que se obtienen, las mismas que están clasificadas de la siguiente forma (Tamayo y otros, 2017):

a) Metales

Incluyen los metales:

- Preciosos: Au, Ag, y metales del grupo del Pt;
- Básicos: Cu, Pb, Sn, y Zn;
- Siderúrgicos: Fe, Ni, Co, Ti, V, y Cr;
- Ligeros: Mg, y Al;
- Nucleares: U, Ra, y Th; y,
- Especiales: Li, Ge, Ga, o el As.

Incluyen minerales industriales: K, S, cuarzo, sal común, amianto, talco, feldespato, y fosfatos.

Incluyen materiales de construcción: arena, grava, áridos, arcillas para ladrillos, caliza, y esquistos –para la fabricación de cemento–. En este grupo, también se incluyen: piedras pulidas – como granito, travertino, o mármol– y pizarra.

b) Gemas: Diamantes, esmeraldas, zafiros, y rubíes.

- c) Combustibles: Carbón, lignito, turba, petróleo, y gas –generalmente estos últimos no se consideran productos mineros–. Cabe señalar, que con frecuencia el uranio se incluye dentro de esta clasificación.

2.4. Metales y sus Usos

Los principales usos que se les da en el mundo vienen a ser las aplicadas en la elaboración de productos industriales y productos médicos. El metal materia de nuestra investigación, el Au, está destinado principalmente como (Rankin, 2011):

- Activo refugio: en tiempos de incertidumbre, se le coloca capital en vez de arriesgarlo en acciones y bonos volátiles, ya que suele mantener su valor en el mercado, por eso se vuelve muy atractivo durante las recesiones;
- Joyería: el más conocido;
- Equipo médico: dispositivos láser, y en algunos medicamentos en la modalidad de sales de Au –tratamiento para la artritis reumatoide–.
- Equipo de cómputos, y dispositivos electrónicos;
- Industria automotriz y vehículos en general –contactos de los *airbags*–.
- Detectores de emisiones contaminantes de carbono en las industrias y en la exploración espacial.

Los principales países compradores de oro son China, India, y Estados Unidos de América (Van y otros, 2016).

Figura 1*Producción de oro*

Unidades mineras	Junio				I Semestre			
	2022	2023	Var. % 23/22	Var. % 23/19	2022	2023	Var. % 23/22	Var. % 23/19
Total	262	260	-0,5	-25,7	1 508	1 462	-3,1	-29,7
Compañía Minera Poderosa	27	20	-27,3	16,5	146	125	-14,5	-6,0
Minera Yanacocha	25	24	-3,1	-53,2	133	121	-9,2	-56,9
Buenaventura	18	15	-18,7	-41,1	121	83	-31,5	-41,6
Minera Aurífera Retamas	17	16	-4,8	43,8	105	93	-11,6	11,0
Pan American	17	19	7,0	-21,3	105	116	10,4	-17,3
Hochschild	10	12	13,2	-31,9	78	65	-16,7	-42,4
Consortio Minero Horizonte	18	16	-13,8	3,4	87	98	12,8	17,9
Gold Fields La Cima	14	9	-36,2	-45,4	63	74	16,4	-11,0
Minera Boroó Misquichilca	10	8	-14,2	-58,0	45	48	6,5	-56,5
Artesanales	3	2	-44,3	-96,0	17	8	-54,5	-96,9
Madre De Dios	1	1	-51,7	-96,4	7	3	-61,4	-97,5
Puno	1	0	-42,0	-97,3	5	2	-53,1	-97,8
Arequipa	1	0	-42,1	-90,6	4	2	-50,2	-92,7
Piura	0	0	-12,1	-93,7	1	1	-32,8	-95,3
Otros	102	120	18,3	6,0	608	632	4,0	-4,7

Nota: Unidades en miles de onzas Troy finas (Banco Central de Reserva del Perú, 2023)

Figura 2*Perú en el mercado internacional*

PRODUCTO	LATINOAMÉRICA	MUNDO
Cobre	2	2
Oro	2	11
Plata	2	3
Zinc	1	2
Plomo	1	4
Estaño	1	3
Molibdeno	2	4
Arsenico	1	1
Indio	1	7
Andalucita / kyanita y minerales relacionados	1	4
Selenio	1	10

Nota: Los números representan la posición del país (U.S. Geological Survey, 2022)

2.5. La Minería en el Perú

La informalidad predomina en la economía del Perú, se estima que, a diciembre de 2019, se alcanzó el 66.4%, como tasa de informalidad. Desde un enfoque estructural, otras investigaciones económicas mencionan la presencia de una economía sumergida, que incluye la informalidad como una gran grieta, y la producción y distribución de bienes y servicios de manera clandestina. Por ello, dicha economía sumergida es vista como un problema crónico en nuestro país, porque constituye entre el 40% y el 60% del PBI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2020).

En este entorno propagado de informalidad, también se reproduce una de las actividades extractivas más importantes, y nos referimos a la minería. Si bien se ha encontrado vigente por años en su modalidad artesanal, en las últimas décadas su práctica se ha incrementado a causa de los altos niveles de pobreza y de la demanda de Au y otros minerales a nivel internacional (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2020).

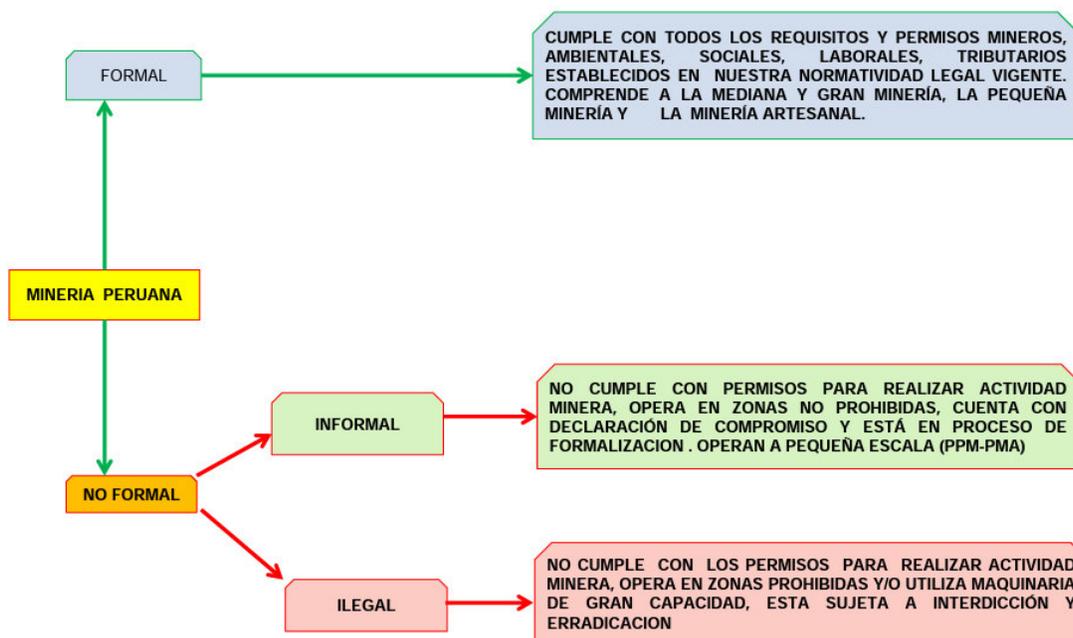
Recordemos que, hacia la década de 1990, la neo liberalización económica trajo la desregulación de la actividad minera para atraer capitales extranjeros con la simplificación y flexibilizaron de los requisitos para la autorización de concesiones. Así, se inició una etapa de expansión productiva y de inversiones en el Perú, y al mismo tiempo empeoraron los conflictos sociales en zonas aledañas a las operaciones mineras (Wiener, 2019).

En vista que la mayor parte de Au peruano se obtenía por minería informal, por aquella época el Ministerio de Energía y Minas denominó a este tipo de actividad –que aún no se encontraba regulada y estaba proliferada– como producción aluvial y lavaderos. A partir de 2002, el marco legal minero la define como Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE) (Tamayo y

otros, 2017). En general las actividades mineras a pequeña escala pueden ser formales y no formales que abarcan a los ilegales e informales, las cuales se describen en la figura 3.

Figura 3

Actividad minera en el Perú



Nota: Datos organizados en un organigrama (Vargas, 2013)

Tabla 2

Clasificación minera según incorporación normativa

Clasificación	Extensión de la concesión	Capacidad productiva	Entidad competente
Pequeño productor minero	Hasta 2000 ha.	Hasta 350 TDM	Dirección Regional de Energía y Minas (GORE)
Productor minero artesanal	Hasta 1000 ha.	Hasta 25 TDM	

Nota: Las unidades son ha (hectáreas) y TDM (Tonelada métrica día) (Congreso de la República, 2002).

Las tres principales deficiencias que encontramos en la mencionada regulación fueron que (Tamayo y otros, 2017):

- No existe distinción entre minería aluvial y filoniana.
- Tampoco hay diferenciación entre informalidad e ilegalidad, ni alguna mención expresa que las determine como tal.
- La Ley no impulsa la formalización a la MAPE.

2.5.1. Una Transformación Sostenible

La transformación sostenible en la minería artesanal, en especial la de pequeña escala, empieza a ser posible si se difunde instrucciones técnicas que sean sencillas y estén al alcance para su ejecución. La minería artesanal produce alrededor del 30% de las exportaciones nacionales de Au. Esta labor se veía empañado por la falta de instrucción técnica, y la pérdida de Au en el relave de amalgamación que afecta su recuperación (Zvarivadza, 2018).

Concretamente será sustentable de la mano con el desarrollo de capacidades de los mineros que consientan utilizar métodos para recuperación óptima de Au, con una mejor disposición a financiamientos, alicientes y mejora en la responsabilidad de los mercados (Hinton y otros, 2003).

2.5.2. Tipos de Yacimientos Auríferos

a) Yacimientos primarios

- Segregaciones magmáticas: Conocidas como orto magmáticos, compuesto por la consolidación de magmas fundidos-cristalización fraccionada-.

- Depósitos pirometasomáticos: formadas a grandes temperaturas y altas presiones en las rocas invadidas, muy cerca de la unión de intrusivos ígneos, por fluidos térmicos que provienen de las rocas invasoras.
- Depósitos hipertermales: depósitos y filones formados por fluidos térmicos a temperaturas y presiones altas y grandes profundidades.

b) Yacimientos secundarios:

- Depósitos geotermales: presenta mineralización como: vetas, diseminado, con Py-Apy-Cp y *stockwork*.
- Depósitos sedimentarios: se dice de los placeres de Au, formados por procesos de degradación. Cabe precisar que, el contenido de Au en las aguas termales es mayor que cualquier otra agua.
- Depósitos epitermales: formadas a temperaturas y presiones relativamente bajas, como: filones y depósitos formados por fluidos térmicos de poca profundidad.
- Depósitos diseminados: este tipo de yacimientos son de reciente explotación. Consta de diseminados de Au en granos muy finos en calizas, limosas y dolomitas carbonáceas. Aquí el Au es en su mayoría sub-microscópico, y viene acompañado de Py, sílice y otros sulfuros.
- Au como subproducto: el Au es el menor constituyente de la mena, y se puede recuperar durante la fundición y refinación de los concentrados de los metales base. El contenido de Au en estas menas es bajo (Carlotto y otros, 2009).

2.6. Concentradores Gravimétricos

a) Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es muy usada en la pequeña minería aurífera. Los equipos concentran las partículas pesadas en minerales que provienen de circuitos de molienda, o en arenas de los depósitos aluviales. Su diseño permite que solo materiales muy pesados –como el Au– se retengan en la canastilla de concentración. Mediante la rotación a gran velocidad se produce una fuerza centrífuga que incrementa el peso relativo de los diferentes minerales. Se aplica presión de agua –lecho fluidizado– para la competencia de fuerzas (Vilcapoma & Chavez, 2012).

b) Concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos son insuperables para la recuperación de Au finísimo y laminado, y operan con un principio básico: un recipiente que rota efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo. Los concentradores centrífugos más utilizados se basan en lo mismo con la diferencia de su diseño técnico. Las marcas más conocidas son *Knelson*, y *Falcon*, además algunos de fabricación brasilera que no llegan a ser tan eficientes como los primeros. Mediante las centrífugas, se pueden alcanzar altos factores de enriquecimiento, lo cual facilita que se funda el concentrado directamente. Estos concentradores también son utilizados en los circuitos de molienda para recuperar el Au liberado (Nayak y otros, 2021).

Ventajas

- Alto grado de enriquecimiento.
- Buena recuperación de Au fino, ultrafino y laminado.

Desventajas

- Equipos relativamente costosos.
- Requieren agua limpia a presión constante.
- Requieren alimentación muy clasificada.
- Baja recuperación de sulfuros auríferos.

Cabe precisar que el concentrador *Falcon* es una de las tecnologías modernas para la concentración de metales pesados, por tener un control variable de la fuerza de gravedad y bajo consumo de agua de proceso (Hinojosa, 2016). Este concentrador se utiliza para separar un gran número de materiales –minerales de Fe, sulfuros, carbón, tantalio, metales nativos como Au, Ag, Ni, Cu, Zn, Sn, entre otros–. Con ellos, los parámetros operacionales son: el porcentaje de sólidos en la alimentación; granulometría de la mena; y, el tiempo de operación. Su geometría del rotor es un factor crítico en el desempeño del equipamiento: dependiendo del tipo de mena aurífera –con mayor o menor densidad–, habría un rotor con geometría apropiada (Farajzadeh & Chelgani, 2022).

Tal como se señala en Futura Technologies, *Falcon* cuenta con 3 series de equipos, diseñados para las distintas aplicaciones que requieran las plantas de procesamiento (Farajzadeh & Chelgani, 2022):

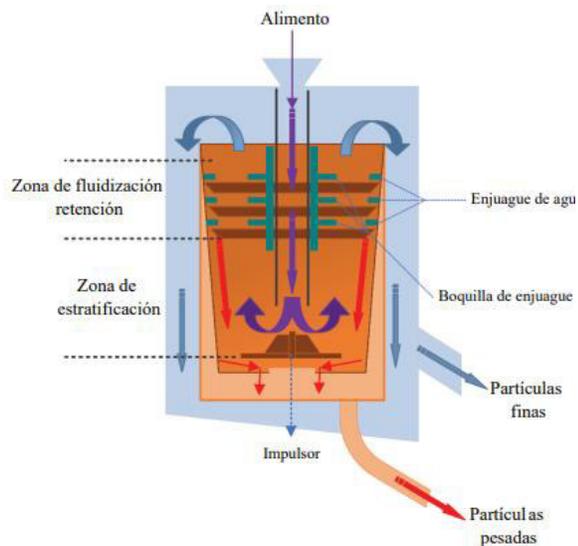
i. *Falcon* SB, concentrador automático Semi-Batch

Concentrador con frecuencia variable, puede operar en un rango de frecuencia que varías desde los 50 hasta 200 G's, y procesar hasta 400 t/h según el modelo. Diseñado para la recuperación de metales preciosos que se encuentren libres –Au, Ag, Pt, etc., entre otros–, después del circuito de molienda, además de la recuperación de Au grueso y fino de la alimentación de

ciclón, y en la recuperación de Au para depósitos aluviales y plantas de agregados. Su razón de concentración es de 1,000 a 1.

Figura 4

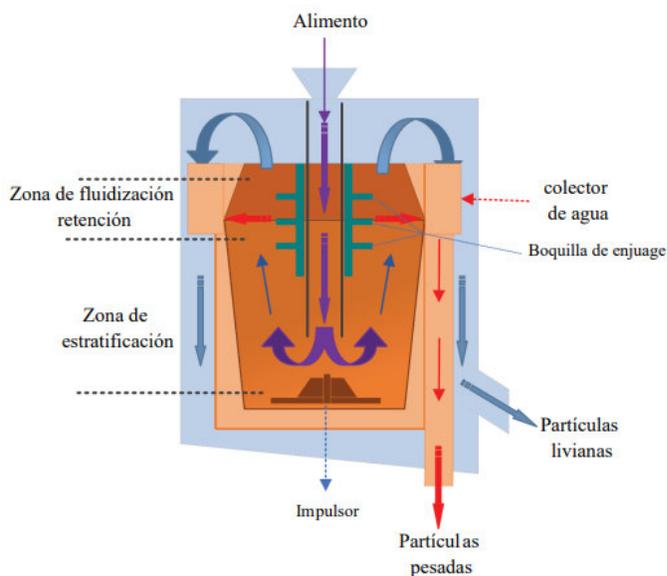
Concentrador Falcon Semi Batch



Nota: Se indican las partes del equipo (Farajzadeh & Chelgani, 2022)

ii. *Falcon C*, concentrador continuo

Con una fuerza de hasta 300 G's, el concentrador C puede recuperar partículas de 10 micrones. Está diseñado para la concentración primaria de tantalio, tungsteno, Sn, Cr, Co, Fe, carbón oxidado fino, U, y otros minerales. Llega a procesar hasta 100 t/h, y es capaz de pre-concentrar entre el 2% y 40% de la masa.

Figura 5*Falcon C, Concentrador continuo*

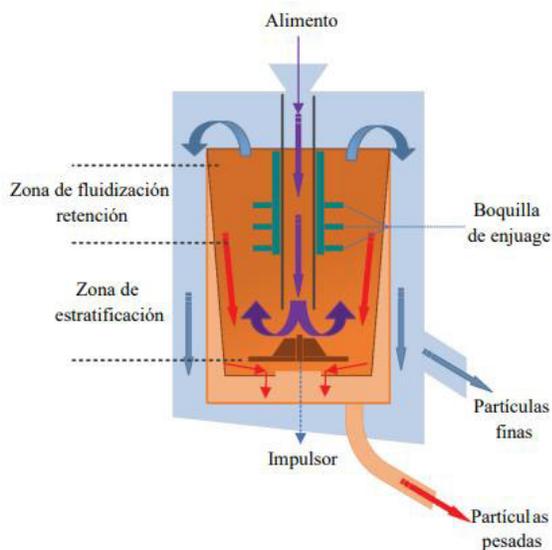
Nota: Parte interior del equipo (Farajzadeh & Chelgani, 2022)

iii. *Falcon UF*, concentrador de partículas ultrafinas

Son capaces de llegar hasta 600 G's y recuperar partículas muy finas hasta de 3 micrones. Está diseñado para recuperar partículas ultrafinas que normalmente no son recuperadas mediante los procesos convencionales de concentración. Además, se usa para recuperar estaño, tantalio, tungsteno, entre otros.

Figura 6

Falcon UF Concentrador de partículas ultrafinas



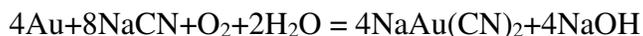
Nota: Se indican las partes del equipo (Farajzadeh & Chelgani, 2022)

2.7. Cianuración para la Minería Artesanal

La cianuración es una tecnología para la recuperación de Au primario, utilizada desde hace más de 100 años en la mediana, y grande minería; en la pequeña minería, su empleo es limitado (Ray y otros, 2022). A causa de que algunos materiales auríferos –Au refractario o fino– no pueden ser concentrados por ningún método gravimétrico, la cianuración se ha difundido recientemente en la pequeña minería aurífera de los países andinos (Veiga y otros, 2014). Su utilización artesanal causa un grave impacto ambiental, porque como sabemos el CN es altamente tóxico, aunque el cianuro es biodegradable (Veiga y otros, 2014).

2.7.1. *Cianuración del Oro*

Bajo condiciones normales, las reacciones químicas que se producen durante la disolución del Au con CN han sido establecidas de manera definida. La ecuación general de la disolución es la siguiente (Deschênes, 2016):



En condiciones simples, el Au se disuelve con facilidad y las únicas condiciones requeridas son: a) el Au debe estar libre y limpio; b) que en la solución de CN no haya impurezas que puedan inhibir la reacción; y c) durante el todo el proceso de la reacción, se abastezca adecuadamente de oxígeno a la solución (Deschênes, 2016).

Está comprobado que muchos minerales de Au se comportan conforme a esa reacción química, y que las dificultades en la extracción del Au son más mecánicas que químicas. No obstante, otros minerales se encuentran con diversos problemas químicos a causa de varios constituyentes que tiene la mena aurífera –minerales silíceos, cuarzos y carbonatos de metales alcalinos–, los mismos que son relativamente inertes a las soluciones de CN. Esa presencia de minerales es la reiterada causa de dificultad en la cianuración, ya que su contenido a pesar de ser menor de 0.01%, es perjudicial en la disolución y precipitación del Au (Deschênes, 2016).

A continuación, detallamos la acción del CN sobre los minerales presentes en las menas auríferas (Deschênes y otros, 2002):

a) Cobre

Para una muestra con presencia de calcosina, enargita, bornita, covelina, azurita, malaquita, cuprita, tenorita, y Cu metálico, son atacados deprisa por el CN. La presencia de estas especies compite con el metal precioso por la formación de complejos.

Cabe señalar que la Cp, tetraedrita y crisocola son atacadas con mayor dificultad por el CN. En caso existan cantidades que excedan de hasta en 2%, antes de la cianuración se tendrá que remover el Cu por flotación selectiva o por lixiviación.

Para el Cu metálico, la relación del CN consumido al Cu disuelto varía de 1,84:1. Para la enargita y Cp, las razones son: 2,75:1 y de 2,44:1, respectivamente.

De otro lado, con el fin de disminuir el consumo de CN en los casos de minerales de Cu se tendrán que emplear soluciones diluidas en una concentración de 0,005-0,01% de NaCN. Si se desea acrecentar la velocidad de disolución del Au en minerales de Cu, se sugiere usar sales de Hg, y amoníaco (Li y otros, 2010; Hedjazi & Monhemius, 2018).

b) Antimonio

La antimonita reacciona ligeramente con el CN cuando la alcalinidad de la solución se mantiene cerca del punto neutral. La antimonita en soluciones altamente alcalinas forma sulfuros alcalinos que consumen CN, teniendo como resultado la formación de sulfocianatos. Los sulfuros alcalinos agotan también oxígeno, por ello con frecuencia las soluciones deberían aerearse en presencia de sales de Pb. De esa forma se evita la disolución del Au, y la disminución de su extracción (Larrabure & Rodríguez, 2021).

c) Arsénico

Similarmente, la Apy se comporta como la antimonita, al igual que el oropimente, y el rejalgar (Deschênes y otros, 2002).

d) Carbón

En proporciones que van de unos pocos céntimos por ciento a cientos, a veces muchos minerales contienen materias carbonaceas –grafito, pizarra carbonacea o esquisto grafitico–. En ciertas formas, esas materias no representan problema en la cianuración, más en otras es un activo

precipitante del Au en soluciones de CN. Si se desea evitar la reprecipitación del Au de la solución de CN, antes de la cianuración, los materiales carbonaceos deben eliminarse por flotación o por tostación (Deschênes y otros, 2002).

e) Plomo

Las soluciones de CN no atacan a la galena (Deschênes y otros, 2002).

f) Mercurio

Se disuelve de manera lenta mediante soluciones de CN con formación de cianuro mercúrico, por ser este un fuerte disolvente de Au en ausencia de oxígeno. El CN no afecta al cinabrio (Deschênes y otros, 2002).

g) Zinc

En el caso de la blenda, el ataque del CN es bastante lento. Aunque el Zn forma cianógenos complejos, y a diferencia del causado por los minerales de Cu, su efecto sobre la disolución del Au es mucho menos marcado (Deschênes y otros, 2002).

h) Cobalto y níquel

Estos minerales son cianicidas. Una pequeña cantidad de Ni en una solución en Au, para la precipitación de este es altamente perjudicial. Pese a ello, supuestamente tiene poco efecto sobre su disolución (Deschênes y otros, 2002).

i) Hierro

El CN no ataca el Fe metálico, más bien actúa como desoxidante de la solución de CN cuando es finamente dividido. Tampoco la Py es atacada en estado original, sin embargo, sus productos de descomposición oxidada solo de manera parcial –sulfatos ferroso, y férrico– son fuertes cianicidas. Asimismo, normalmente la marcasita no es atacada por el CN, aunque se descompone más fácilmente que la Py, y sus resultantes son fuertes cianicidas.

La pirrotita –mineral agente reductor de los minerales sulfurosos de Fe– tiene fácil descomposición, que usualmente su presencia en la mena aurífera causa un considerable consumo de CN. Casi todas las menas auríferas, contienen minerales de Fe. En general, el equipo de las plantas de cianuración está constituido en gran parte de Fe y acero. Las soluciones de CN causan muy poco efecto sobre el Fe metálico y la mayoría de sus minerales, de lo contrario, la cianuración del Au no se podría poner en práctica. No obstante, los cianuros, fácilmente reaccionan a las sales solubles de Fe (Deschênes y otros, 2002).

j) Telururos

Estos minerales se disuelven lentamente por las soluciones de CN, en especial cuando se muelen a proporciones muy finas. Su descomposición es promovida por una alta alcalinidad y aereación. Ampliamente, el peróxido de Na reduce el tiempo de tratamiento requerido para la máxima extracción del Au (Deschênes y otros, 2002).

En solución neutral, el cianógeno de Br rápidamente daña los telururos de metales preciosos. De no conseguir una buena extracción del Au, los telururos se tendrán que someter una tostación antes de la cianuración (Larrabure & Rodríguez, 2021).

2.7.2. Fundamento de la Cianuración

El Na y el Ca son los cianuros más notables que se usan: el primero se consigue en diferentes concentraciones desde el 85 hasta el 98% de NaCN; y el segundo se expende bajo una forma impura por contener el equivalente del 50% de NaCN. La solución de CN alcalino en agua se hidroliza de la siguiente manera (Deschênes, 2016):



En las soluciones de cianuros comerciales en agua, la extensión hasta donde prosigue la hidrólisis dependerá de la cantidad de álcali libre en el CN. Si se puede apreciar el álcali libre, la descomposición del CN podría ser muy leve. En falta de álcali libre apreciable, la hidrólisis podría retardarse con CaO. Con la adición de CaO a la pulpa de CN, no solo se evita pérdidas de CN por hidrólisis, también se evita la liberación de ácido cianhídrico ya que neutraliza cualquier constituyente ácido del mineral (Deschênes y otros, 2002).

El ácido carbónico descompone las soluciones de cianuros alcalinos, conforme a la siguiente reacción química (Nava y otros, 2007):



Aunque podría no ser así, si se adiciona con CaO u otros álcalis.

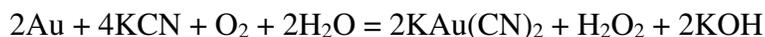
a) Disolución de los metales preciosos

La reacción química para la disolución de Au metálico en una solución diluida de CN es:



Normalmente, el Au no se disuelve sin aereación intensa. De allí que, se haya propuesto las siguientes reacciones químicas para disolver el Au en soluciones diluidas de CN (Deschênes y otros, 2002):

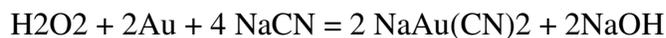
- i. El oxígeno necesario para la disolución del Au se obtuvo del aire disuelto en la solución. Revela la reacción del proceso de esta forma:



- ii. La disolución del Au en soluciones de CN se generó hidrógeno gaseoso sin necesidad del oxígeno. La reacción quedó registrada así:



- iii. La disolución podría ocurrir en dos etapas, conforme a las siguientes reacciones:



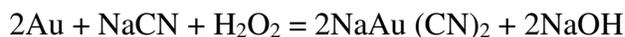
Ambas reacciones se pueden mantener debido a que sus constantes de equilibrio son propicias en condiciones normales.

- iv. Mediante cálculos termodinámicos, las energías libres para que se formen los complejos iónicos $\text{Au}(\text{CN})$ y $\text{Ag}(\text{CN})$. Por ello, se reafirma la teoría que Elsner y la de Bodlander habían propuesto; en tanto que la de Janin, fue descartada termodinámicamente.

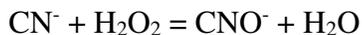
- v. La cinética del proceso de disolución, que fue de índole electroquímica, en tal sentido la reacción general es la siguiente:



Está demostrado que la disolución del Au con los cianuros más el peróxido de hidrógeno sin el uso de oxígeno es un proceso lento, debido a la reacción:



Por otro lado, con la presencia en gran cantidad de H_2O_2 se reprime la disolución, ya que se oxida al ion CN^- a ion cianato. Este no posee poder disolvente. La reacción que aplica para oxidación es la siguiente:



b) Efecto del tamaño de la partícula en la velocidad de disolución del oro

Cuando se presenta Au grueso libre en la mena, por lo general se recupera con JIGs, trampas, entre otros, previo a cianurar, puesto que las partículas gruesas pueden no lograr disolverse en el tiempo asignado a la cianuración. Bajo condiciones ideales con respecto a la aereación y agitación, la velocidad máxima de disolución del Au llegaría a: 3.25 mg/cm²/hora (Marsden & House, 2006).

c) Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución del oro

Las soluciones de CN, la rapidez de disolución sufre gran aumento cuando pasa de soluciones concentradas a diluidas. Asimismo, demostró que ese máximo se alcanza a una concentración de 0,25% de KCN en solución, o un equivalente de 0,19% de NaCN (Dai & Jeffrey, 2006).

Tabla 3

Cantidad de oro disuelto en una hora

NaCN en solución % mg/cm ²	Au disuelto en 1 hora
0,500	2,943
0,250	3,007
0,100	2,986
0,050	3,251
0,025	2,513
0.010	0,338

Nota: Unidades en porcentaje (%) y miligramos por centímetro cuadrado (Misari, 2010).

d) Efecto del oxígeno sobre la disolución del oro

Para la disolución del Au bajo condiciones normales de cianuración, necesita de oxígeno u otro agente oxidante –permanganato de K, peróxido de Na, Br y cloro–. Si bien estos últimos

fueron usados con relativo éxito, por sus costos y complicaciones, dejaron de usarse. La velocidad de disolución del Au en soluciones era 0,10% de NaCN, siempre y cuando se emplearan nitrógeno, oxígeno y mezclas de ambos. Sus pruebas fueron realizadas sobre 100 c.c. de solución de CN a 250 °C, y con iguales volúmenes de gas para cada ensayo. Los resultados de la velocidad de disolución del Au—en el curso de los primeros 30 min de cada prueba— fueron registrados de la siguiente forma (Dai & Jeffrey, 2006; Misari, 2010; Pasapera, 2023).

Tabla 4

Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro

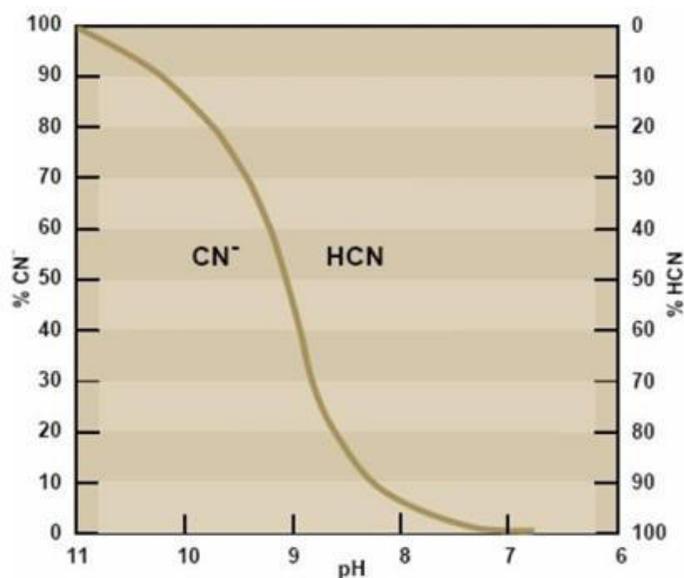
Oxígeno % mg/cm ² /hora	Disolución del oro
0	0,04
9,6	1,03
20,9	2,36
60,1	7,62
99,5	12,62

Nota: Unidades en porcentaje (%) y miligramos por centímetro cuadrado (Misari, 2010).

e) Efecto de la alcalinidad sobre la disolución del oro

A fin de minimizar el CN destruido, se agrega CaO a la solución para conservar un actitud alcalina protectora: desde 0.25 a 1.00 kilos por tonelada de solución. El efecto de la CaO beneficia la aceleración de la sedimentación que muestra la pulpa en el espesador, asimismo precipitan algunas sustancias nada deseables. Para que la CaO inicie su acción protectora, normalmente es añadida en el molino de bolas con mineral, en seco o como leche de CaO (Misari, 2010).

Se aconseja un minucioso muestreo de las soluciones en distintos puntos determinados con anterioridad del circuito: de esta forma, se puede controlar la CaO y el CN con el objetivo de tener seguridad que la fuerza mínima solicitada se va a mantener (Dai & Jeffrey, 2006).

Figura 7*Equilibrio CN/HCN en función del pH*

Nota: Cinética del equilibrio (Cáceres, 2001).

Siempre y cuando se haya extraído el Au por medio de procesos hidrometalúrgicos de los efluentes residuales, se pueden presentar diferentes tipos de compuestos de CN: CN libre; CN débilmente complejado; y, CN fuertemente complejado. Todos juntos forman el conocido CN total (Anculle & Puma, 2015).

Cuando hay abundantes iones de hidrogeno, casi todo el CN libre se encuentra presente como HCN, a casi un valor de pH de 8 o menos, lo cual permite que el HCN pueda volatizarse y esparcirse en el aire. Si ese valor es superior a 10.5, quiere decir que los iones de hidrogeno son pocos, además casi todo el CN libre está presente bajo la forma de CN. Cuando se encuentran normalizadas las condiciones de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN, el valor de pH es casi igual a 9.4 (Anculle & Puma, 2015).

Las funciones del hidróxido de Ca en la cianuración son las siguientes (Zegarra, 2014):

- Prevenir pérdidas de CN por hidrólisis.
- Evitar pérdidas de CN por acción del anhídrido carbónico presente en el aire.
- Que los componentes ácidos se neutralicen –las sales ferrosas, las férricas y, el sulfato de Mg– en agua del ingenio, antes de ser agregado al circuito de para cianurar.
- Que los bicarbonatos del agua del ingenio se descompongan, antes de usarlos en la cianuración.
- Que la acidez de los constituyentes de la mena sea neutralizada.
- Que los componentes ácidos de la descomposición provenientes de los diferentes minerales de la mena en disolución de CN se neutralicen.
- Facilitar que las partículas finas se asienten, a fin de separar de la mena cianurada solución rica clara.
- La mejora de la extracción de las menas que contienen telururos, Ag roja, o rosicler que se van a descomponer con mayor rapidez a una alcalinidad mayor.

Para neutralizar la acidez de la mena y hacer frente a los efectos perjudiciales de los cianicidas, además del uso de soda caustica o CaO, se emplea la CaO por su bajo costo. En términos de kilogramos de óxido de Ca por tonelada de mena tratada, la cantidad de CaO que se agrega lleva el nombre de alcalinidad protectora. Un pequeño aumento de CaO protege al NaCN de la hidrólisis, de lo contrario podría retardar la velocidad de disolución del Au, en especial si se trabaja con menas sulfurosas. Por ello, la alcalinidad se debe controlar minuciosamente; y se aconseja mantenerla lo más bajo posible para conseguir una buena recuperación (Anculle & Puma, 2015).

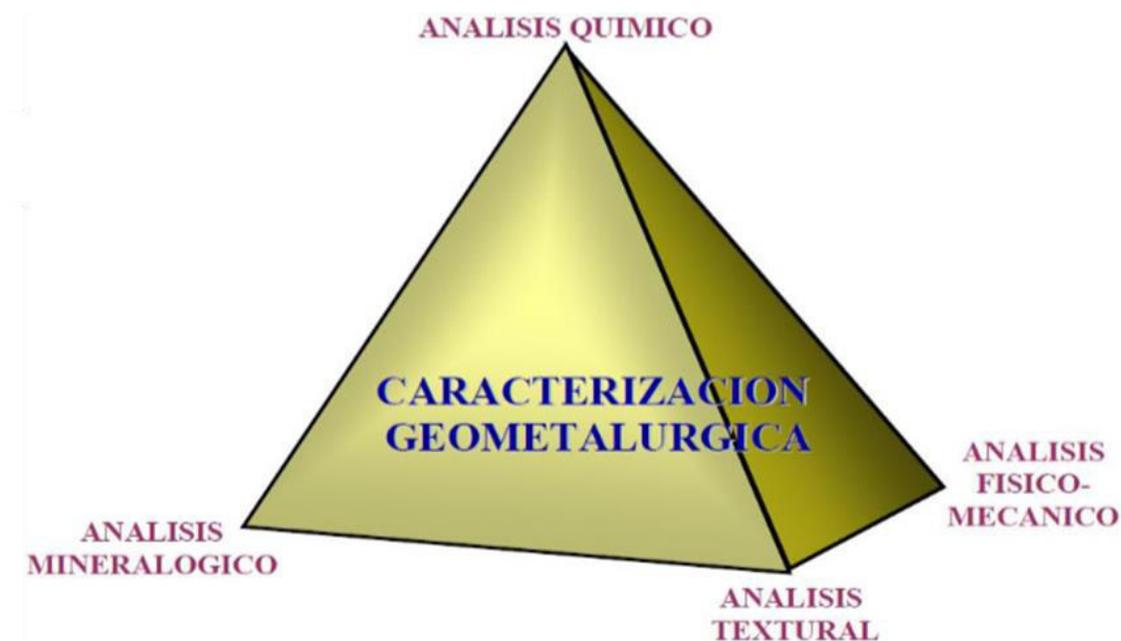
2.8. Caracterización Mineralógica del Oro

La caracterización mineralógica nos permite conocer los minerales presentes en la mena, sus asociaciones con otros minerales, sus grados de liberación y, por ende, la información necesaria para establecer los procesos metalúrgicos óptimos para la extracción de minerales de interés, lo cual es el objetivo principal en los procesamientos de beneficio (Tabares, 2020).

Los estudios mineralógicos son un complemento ideal a las caracterizaciones geoquímicas, fisicoquímicas y metalúrgicas del mineral, puesto que nos dan un panorama general del proceso y permite realizar diagramas de flujo sin cuellos de botella. Podremos predecir si los minerales presentes afectarán los procesos de concentración, como el no tener la liberación adecuada en la molienda para la concentración del material valioso (Cañola, Gallego, & Bolívar, 2015).

Figura 8

Pirámide de la caracterización geometalúrgica



Nota: Pirámide de análisis (Canchaya, s.f.).

Para la realización de la caracterización de minerales es usada comúnmente la microscopía óptica con luz reflejada, la cual es ideal para estudiar minerales que no permiten el paso de la luz, conocidos como minerales opacos (Chirif, 2010).

Tabla 5*Principales minerales opacos*

Clase	Grupo	Especie	Abreviatura
ENs		Oro	Au
		Plata	Ag
		Cobre	Cu
		Arsénico	As
		Antimonio	Sb
		Bismuto	Bi
		Grafito	gf
SULs		Argentita	arg
		Calcosita	cc
		Digenita	dg
		Bornita	bn
		Calcopirita	cp
		Galena	gn
		Esfalerita	ef
		Pirrotita	po
		Pentlandita	pnt
		Covelita	cv
		Rejalgar	rij
		Oropimente	orp
		Estibinita	stb
		Bismutinita	bmt
		Pirita	py
		Bravoita	bv
		Marcasita	mc
Arsenopirita	apy		
Molibdenita	mb		
SFSs	PGRs	Pearcita	prc
		Polibasita	plb
	PRJs	Proustita	pro
		Pirargirita	pgt
	CGRs	Tetraedrita	tet
		Tennantita	ten
	SFSsSb	Bournonita	bnn
		Boulangierita	blg
		Jamesonita	jm
		Enargita	en
Luzonita	luz		
OXs		Cuprita	cup
		Tenorita	tn
		Magnetita	mt
		Hematita	hm
		Ilmenita	il
		Rutilo	rt
		Pirolusita	prl
		Casiterita	cst
Cromita	crm		
WFTs		Wolframita	Wfm

Nota: Nombres y abreviaturas de las especies (Chirif, 2010).

Para la realización de la caracterización mineralógica aurífera se utiliza un microscopio de polarización de luz reflejada, la cual tiene un sistema iluminador vertical a la sección de pulido. Este, en el caso particular del campo oscuro, posee un mecanismo lumínico que no atraviesa el objetivo, sino que los rayos inciden en la muestra oblicuamente para luego reflejar estos y magnificar la estructura de origen (Mejia, 2019).

Figura 9

Microscopio óptico de luz reflejada



Nota: Equipo para análisis (Mejia, 2019).

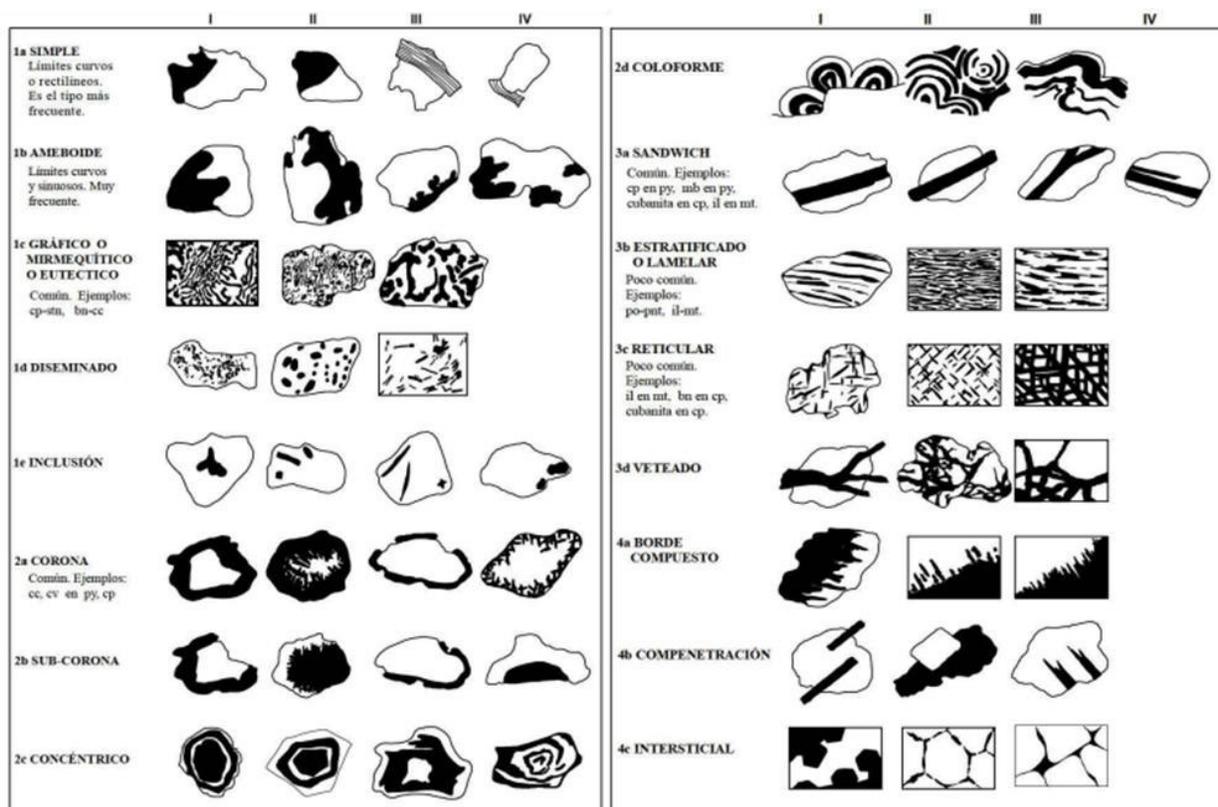
Las propiedades que se pueden conocer con esta técnica son el color, la reflectancia, birreflectancia, el pleocroísmo, la anisotropía y las reflexiones internas, lo que nos permite identificar los minerales presentes en las muestras.

Luego de la identificación es posible determinar las asociaciones mineralógicas presentes con el estudio de intercrecimientos, siendo este el principal estudio para establecer un correcto procesamiento metalúrgico. (Chirif, 2010)

En las siguientes imágenes se observará el formato de registro de intercrecimientos.

Figura 10

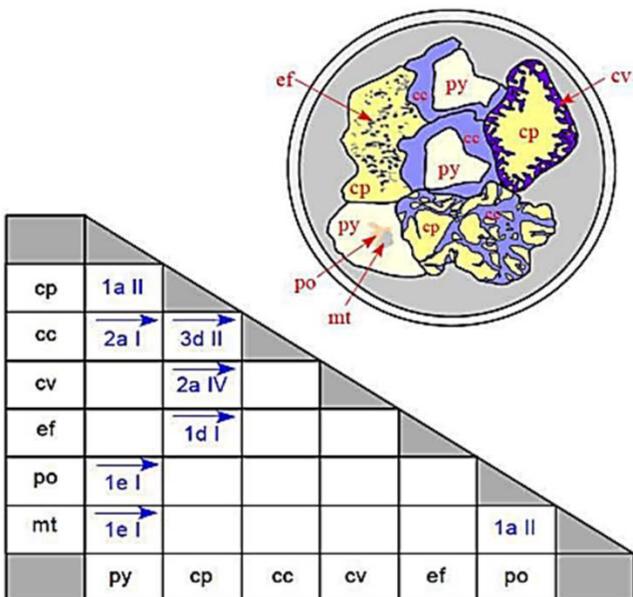
Intercrecimientos mineralógicos



Nota: Clasificados según su forma (Chirif, 2010).

Figura 11

Ejemplo de registro de intercrecimientos mineralógicos

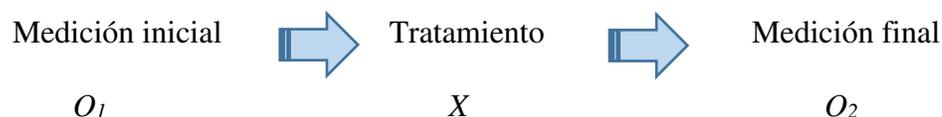


Nota: Se presentan las abreviaturas de las especies (Chirif, 2010).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y MINERALOGÍA DE LA MUESTRA PROBLEMA

3.1. Diseño de Investigación

En el trabajo que se detalla a continuación se emplearon diseños experimentales factoriales, cuyos parámetros de operación se sustentaron bajo los principios teóricos de concentración centrifuga gravimétrica y experimentación, en base al método científico. Los conocimientos teóricos de caracterización mineralógica, así como los procesos de gravimetría mejorada y cianuración fueron aplicados para resolver la problemática en estudio.



O_1 : Relaves de amalgamación con alto contenido de oro y plata.

X : Aplicación de concentración gravimétrica y cianuración de los relaves.

O_2 : recuperación de oro y plata

3.2. Tipo de Investigación

La presente tesis es de tipo cuantitativo, dado que se usaron indicadores numéricos, así como también se analizaron las variables independientes y dependientes del problema en estudio. De igual forma, se puede decir que presenta un enfoque cualitativo, dado que la caracterización de minerales se basa en la descripción de las especies identificadas.

3.3. Unidad de Análisis

El material de estudio corresponde a los relaves de amalgamación procedentes de la minería informal de la provincia de Huarochirí, lugar donde se recopiló la información de la problemática en estudio, la cual se encuentra ubicada en situada en la parte centro-oriental del departamento de Lima.

3.4. Material Investigado y Tamaño de Muestra

La población de estudio corresponde a 30 Kg de relaves de amalgamación, la cual fue muestreada representativamente de un lote de mayor cantidad, la cual corresponde a un sector de pequeños mineros que se benefician de los minerales con contenido de metales preciosos, en la provincia de Huarochirí.

3.5. Desarrollo Experimental

- Adquisición de una muestra representativa sobre el relave de amalgamación.
- Ensayos químicos de la muestra.
- Microscopía óptica de la muestra.
- Pruebas de concentración centrifuga gravimétrica a nivel laboratorio.
- Cianuración de los relaves de la concentración centrifuga gravimétrica empleando diseños experimentales factoriales.
- Cianuración a distintas granulometrías de los relaves de gravimetría.
- Pruebas de cinética de cianuración de oro

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Caracterización Mineralógica de los Relaves de Amalgamación

Se muestreo aproximadamente 30 kg de relave de amalgamación con contenido de Au de las mineras artesanales ubicadas en la provincia de Huarochirí, departamento de Lima, que luego de ser debidamente almacenado y rotulado fue enviado al laboratorio químico metalúrgico.

Se cuarteo el total del lote muestreado con la finalidad de tener una muestra testigo, así mismo, se envió una muestra representativa de 500 gramos al laboratorio de microscopía óptica, la cual permitió determinar los minerales presentes en la muestra, distribución volumétrica y grados de liberación, tal como se observa en la tabla 6.

Tabla 6

Análisis mineralógico de la muestra trabajada

MINERALES	FÓRMULA	ABREVIATURA	VOLUMEN (%)	GRADO DE LIBERACION (%)
Oro	Au	Au	0.14	66.67
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp	0.17	26.32
Esfalerita	ZnS	Ef	Trazas	0
Galena	PbS	Gn	0.74	78.43
Pirita	FeS ₂	Py	0.68	81.08
Arsenopirita	FeAsS	Apy	6.01	61.16
Hematita	Fe ₂ O ₃	Hm	6.9	63.91
Goethita	FeO.OH	Gt	1.98	0
Óxido de mercurio	HgO	HgO	83.18	87.32
Gangas		GGs	100,00	

Nota: Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC

Según el informe de caracterización, el Au ocupa el 0.14% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 66.67% se halla libre, permaneciendo aún entrelazada el 33.33% restante. El

motivo por lo que no se liberó totalmente, se debe a que están inmersos en diferentes tipos geométricos de entrelazamientos. Así mismo, la inspección visual de la muestra evidenció que el Hg se encuentra como óxido de Hg, ya que se observaron particulados con reflejos internos rojizos.

También se pudo observar que la pirita, arsenopirita y calcopirita, se encuentran como partículas libres y entrelazados. Por último, observo las gangas tipos silicatos y carbonatos.

Tabla 7

Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados

MINERALES			ORO		CALCOPIRITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		HEMATITA		GEOTHITA		HgO		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas Libres	1787.00		2.00		1.00		16.00		12.00		80.00		96.00		0.00		1580.00	
% Volumen Part. Libres		82.15		0.09		0.05		0.74		0.55		3.68		4.41		0.00		72.63
TOT.PARTICULAS ENTRELAZADAS	NÚMERO PARTICUL.	VOLUMEN PORCENTUAL	ORO		CALCOPIRITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		HEMATITA		GEOTHITA		HgO		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
cp-GGs	4.00	0.18			2.80	0.13											1.20	0.06
py-gt	4.00	0.18					1.20	0.06					2.80	0.13				
py-GGs	12.00	0.55					2.80	0.13									9.20	0.42
apy-GGs	8.00	0.37							2.80	0.13							5.20	0.24
hm-gt	20.00	0.92									10.00	0.46	10.00	0.46				
hm-GGs	76.00	3.49									36.00	1.65					40.00	1.84
gt-HgO	4.00	0.18											3.60	0.17	0.40	0.02		
gt-GGS	84.00	3.86											28.60	1.31			55.40	2.55
HgO-GGs	136.00	6.25													41.20	1.89	94.80	4.36
Au-HgO-GGs	8.00	0.39	1.00	0.05											1.00	0.05	6.40	0.29
py-HgO-GGs	4.00	0.18					0.40	0.02							0.40	0.02	3.20	0.15
hm-gt-GGs	28.00	1.29									4.80	0.22	9.20	0.42			14.00	0.64
TOTAL ENTREL.	388.00	17.85	1.00	0.05	2.80	0.13	4.40	0.20	2.80	0.13	50.80	2.34	54.20	2.49	43.00	1.98	229.40	10.55
TOT.LIB+ENLZ	2175.00	100.00	3.00		3.80		20.40		14.80		130.80		150.20		43.00		1809.40	
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00		0.14		0.17		0.94		0.68		6.01		6.90		1.98		83.18
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			66.67		26.32		78.43		81.08		61.16		63.91		0.00		87.32	
Símbolos:	N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																	
	%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																	

Nota: Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC

Tabla 8

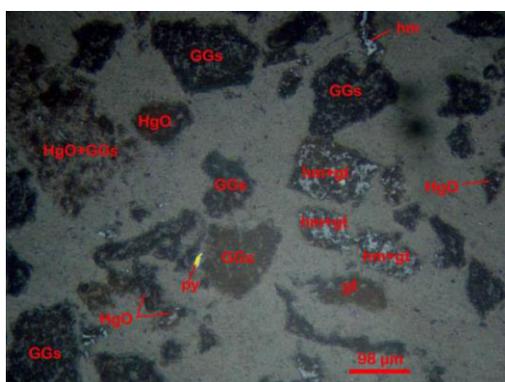
Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y posibilidad de liberación completa

MINERALES ENTRELAZADOS	TIPO ENTR.	NRO. PART.	DIST. PORC.	POSIBILIDADES DE LIBERACIÓN COMPLETA
Partículas Libres		1787	82.16	
cp-GGs	1bII	4	0.18	Moderadamente fácil
py-gt	1cIII	4	0.18	Imposible
py-GGs	1aII	4	0.18	Fácil
	1bIV	4	0.18	Moderadamente fácil
	2bII	4	0.18	Muy difícil
apy-GGs	1cIII	8	0.37	Imposible
hm-gt	1cIII	20	0.92	Imposible
hm-GGs	1aII	4	0.18	Fácil
	1bI	4	0.18	Moderadamente fácil
	1bII	12	0.55	Moderadamente fácil
	1bIV	24	1.10	Moderadamente fácil
	1cIII	4	0.18	Imposible
	1dII	4	0.18	Imposible
	1eI	4	0.18	Muy difícil a imposible
	1eII	8	0.37	Muy difícil a imposible
	2bI	12	0.55	Muy difícil
gt-HgO	1aI	4	0.18	Fácil
gt-GGs	1aII	8	0.37	Fácil
	1aIII	4	0.18	Fácil
	1bII	28	1.29	Moderadamente fácil
	1bIV	4	0.18	Moderadamente fácil
	1cIII	8	0.37	Imposible
	1eI	4	0.18	Muy difícil a imposible
	2aI	4	0.18	Muy difícil a imposible
	3aI	4	0.18	Moderadamente fácil a difícil
	3aIII	4	0.18	Moderadamente fácil a difícil
	3dII	8	0.37	Muy difícil a imposible
	4cI	8	0.37	Muy difícil a imposible
HgO-GGs	1bII	48	2.21	Moderadamente fácil
	1bIV	8	0.37	Moderadamente fácil
	1cIII	4	0.18	Imposible
	1dI	72	3.31	Imposible
	1dIII	4	0.18	Imposible
Au-HgO-GGs	1dII	4	0.18	Imposible
	4cI	4	0.18	Muy difícil a imposible
py-HgO-GGs	1bIV	4	0.18	Moderadamente fácil
hm-gt-GGs	1bII	12	0.55	Moderadamente fácil
	1bIV	16	0.74	Moderadamente fácil
TOTAL		2175	100.00	

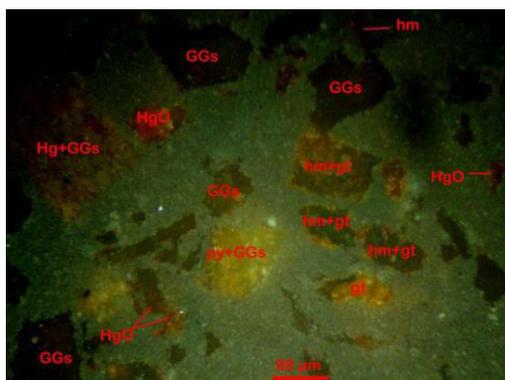
Nota: Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC

Figura 12

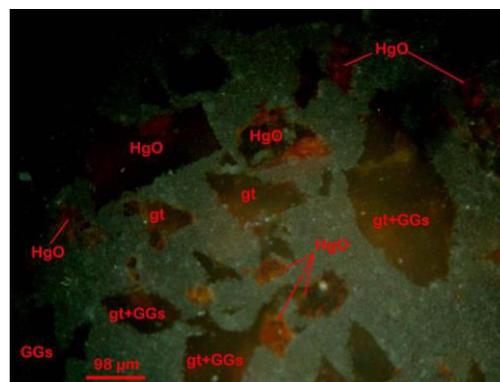
Fotomicrografía de partículas libres de gangas (GGs) y de óxidos de mercurio (HgO); partículas entrelazadas de pirita (py) con la ganga (GGs), de óxido de mercurio con la ganga (HgO+GGs) y de hematita con la goethita (hm+gt). 200X

**Figura 14**

Fotomicrografía de las partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y partículas entrelazadas de goethita con la ganga (gt+GGs). Observada en nícoles cruzados. 200X

**Figura 13**

Fotomicrografía de la misma vista de la anterior, observada en nícoles cruzados; donde el óxido de mercurio (HgO) presenta reflexiones internas de color rojo bermellón. 200X

**Figura 15**

Fotomicrografía de las partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de óxido de mercurio con la ganga (HgO+GGs) y de pirita con la ganga (py+GGs). 500X

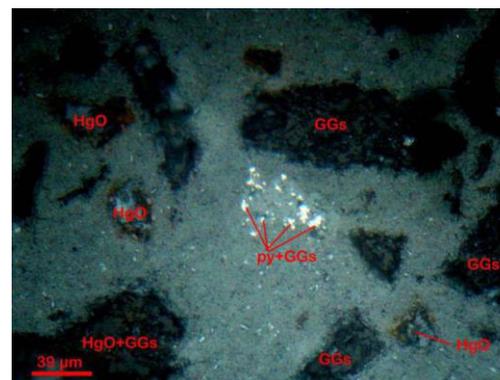
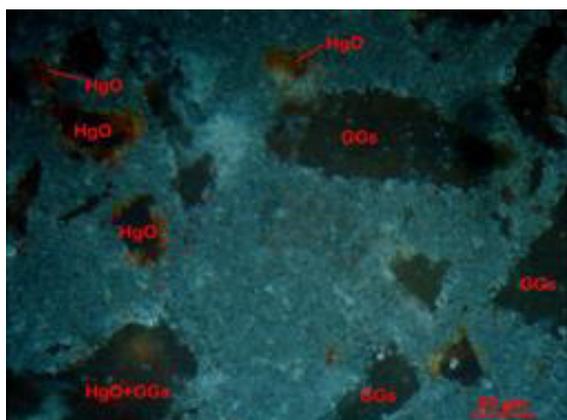
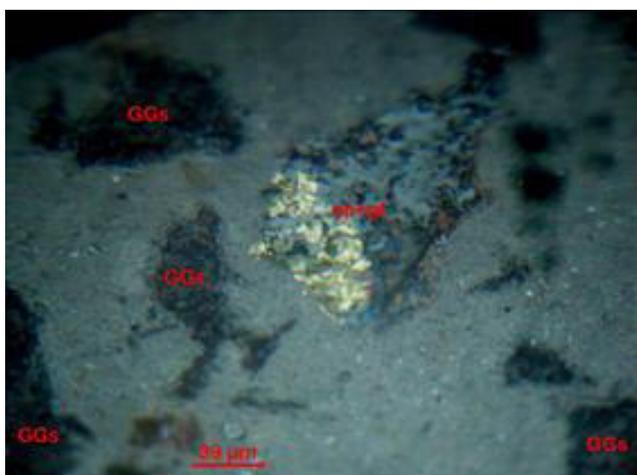


Figura 16

Fotomicrografía de la misma vista de la anterior, observada en nicoles cruzados, donde se pueden apreciar al óxido de mercurio (HgO) con sus reflexiones internas de color rojo bermellón. 500X

**Figura 18**

Fotomicrografía de la partícula entrelazada de calcopirita con la goethita (cp+gt) y partículas libres de gangas (GGs). 500X



libres de gangas (GGs). 500X

Figura 17

Fotomicrografía de la partícula libre de oro (Au), y partículas libres de óxido de mercurio (HgO) y de gangas (GGs); partícula libre de goethita (gt). 500X



Nota: Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC

4.2. Análisis Químico de los Relaves de Amalgamación

Con una muestra representativa de la muestra en investigación, se determinó la ley de oro, cobre mediante el método de ensayo al fuego, cuyo resultado fue de 1.137 Oz/TC.

4.3. Desarrollo Experimental

4.3.1. Pruebas de Concentración Centrífuga-Gravimétrica

En base a las características de los relaves de amalgamación, se realizaron pruebas de concentración centrífuga gravimétrica en un equipo Falcon a nivel de laboratorio, la cual fue operada bajo las condiciones que se describen en la tabla 9. Así mismo se presentan los resultados de la prueba más representativa, la cual fue realizada a una granulometría de 55.60% - 200 malla, y en 2 etapas, en los balances de las tablas 10 y 11. Los resultados de la concentración centrífuga gravimétrica determinaron una recuperación total de oro de 14.84 %.

Tabla 9

Condiciones de operación de equipo concentrador centrifugo gravimétrico Falcon

Peso de muestra	6000.00 g
Granulometría	55.60 % - 200 Malla
Presión de agua	3 PSI
Revolución del cono	60 Hz

Nota: Variables constantes del proceso de concentración.

Tabla 10

Resultados del balance metalúrgico de concentración centrifuga gravimétrica

Componentes	Peso(g)	Leyes Laboratorio (g/TM)	Contenido Fino (mg)	% Recuperación
		Au	Au	Au
Cabeza	6000			100
Concentrado FALCON	58.75	375.09	22.04	11.15
Relave	5941.25	29.55	175.56	88.85
Cabeza calculada		32.93		

Nota: Resultados obtenidos de la primera prueba de concentración.

Tabla 11

Resultados del balance metalúrgico prueba Falcon-concentración gravimétrica segunda pasada

Componentes	Peso(g)	Leyes Laboratorio (g/TM)	Contenido Fino (mg)	% Recuperación
		Au	Au	Au
Cabeza	5941.25			100
Concentrado FALCON	70.08	104.91	7.35	4.8
Relave	5871.17	24.82	145.72	95.2
Cabeza calculada		25.77		

Nota: Resultados obtenidos de la concentración de los relaves de la primera pasada

Así también una muestra representativa del relave se analizó por cobre, arsénico y plata, con la finalidad de determinar la ley de metales que competirán por la disolución con cianuro. Los resultados del ensayo químico se describen en la tabla 12.

Tabla 12

Análisis químico de cobre, arsénico y plata

Cu (%)	As (%)	Ag (Oz/TC)
0.22	0.69	4.46

Nota: Información proporcionada por H&F LABORATORIOS SAC

Estos datos nos demostraron que no existiría inconveniente al momento de realizar la lixiviación.

4.3.2. Pruebas de Moliendabilidad del Relave de Concentración Centrífuga-Gravimétrica

Se desarrollaron pruebas de moliendabilidad de los relaves de la concentración centrífuga gravimétrica, la cual reporto una granulometría de 57.21% - 200 Malla (P80 = 85.22 μ). Las pruebas se desarrollaron en un molino de bolas, muestreando una cantidad de 1000 g para cada prueba de molienda (4 pruebas), determinando el tiempo necesario para reducir la granulometría del relave.

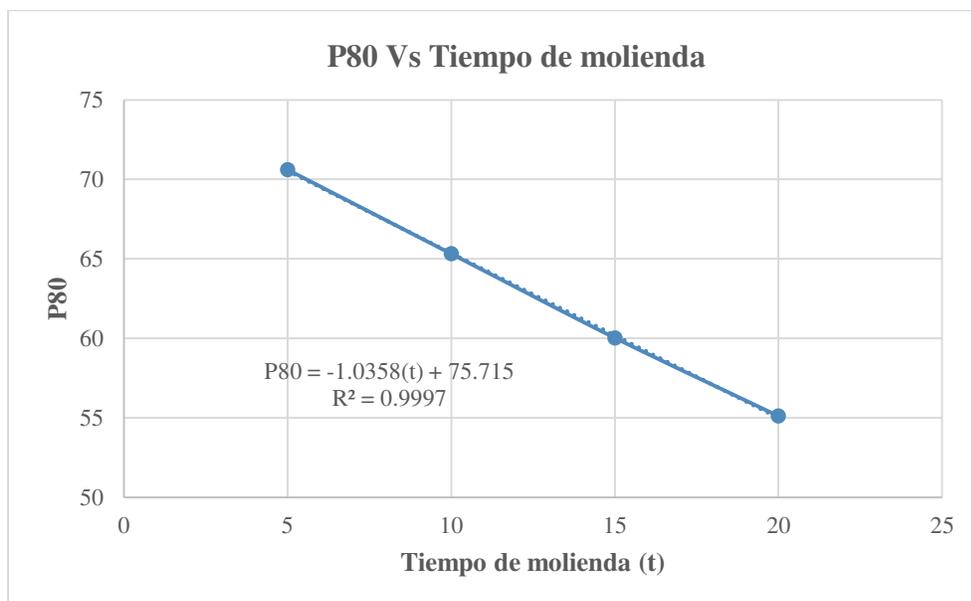
En la tabla 13 se describe la reducción de tamaño en función del tiempo de molienda y se muestra la relación entre el P80 y el tiempo de molienda en la gráfica de la figura 19.

Tabla 13

Granulometría de los relaves con respecto al tiempo de molienda en términos de P80 y porcentaje pasante menos Malla 200

Tiempo (minutos)	P80 (μ)
0	85.22 (57.21% - 200 Malla)
5	70,61 (85.44% - 200 Malla)
10	65,32 (90.11% - 200 Malla)
15	60.03 (95.17% - 200 Malla)
20	55,11 (100% - 200 Malla)

Nota: El P80 se representa en micras.

Figura 19*Curva de moliendabilidad del P80*

Nota: Curva obtenida a partir de los datos de la tabla 13.

4.3.2.1. Influencia de la Granulometría en la Lixiviación con Cianuro

Se realizaron pruebas de cianuración en botella de los relaves de preconcentración, a distintas granulometrías y en un tiempo de 24 horas, con la finalidad de determinar el tiempo de molienda en el cual se obtiene la máxima recuperación de Au. Las condiciones de operación se describen en la tabla 14, así también los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en la tabla 15.

Tabla 14*Condiciones estándar de la lixiviación*

Peso mineral	250 g
Relación L/S	2.4/1
pH	11
Volumen agua	600 ml
P80(micras)	70, 65, 60 y 55
Tiempo (horas)	24

Nota: Variables constantes de cianuración en botella para la muestra en estudio

Tabla 15*Resumen de pruebas de cianuración con diferentes P80*

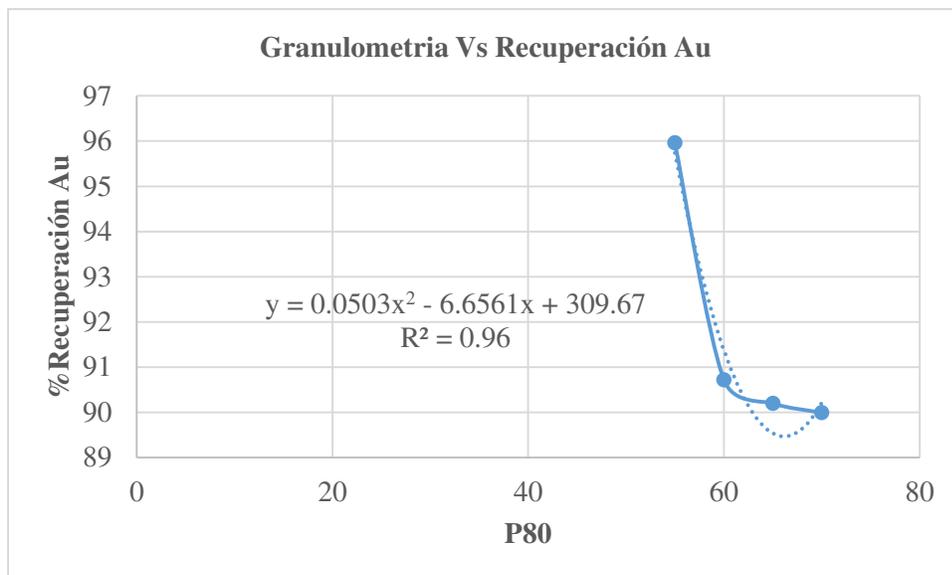
P80 (micras)	COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN	LEY	CONTENIDO FINO	RECUPERACIÓN (%)	CN (Kg/TM)	Cal (Kg/TM)
		(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Au (mg)	Au		
70	Solución Rica	600	14.27	8.56	89.98	2.0	1.32
	Relave	250	3.81	0.95	10.02		
65	Solución Rica	600	13.62	8.17	90.20	2.5	1.48
	Relave	250	3.55	0.89	9.80		
60	Solución Rica	600	12.59	8.63	90.72	3.2	1.68
	Relave	250	3.09	0.88	9.28		
55	Solución Rica	600	12.56	7.54	95.95	3.4	1.70
	Relave	250	1.27	0.32	4.05		

Nota: La recuperación de oro se presenta en porcentaje (%)

La grafica de la figura 20 representa la recuperación de oro en función al tamaño de partícula en términos de P80.

Figura 20

Gráfico de la relación entre la recuperación de Au y el P80



Nota: Gráfico obtenido mediante hojas de cálculo en Excel

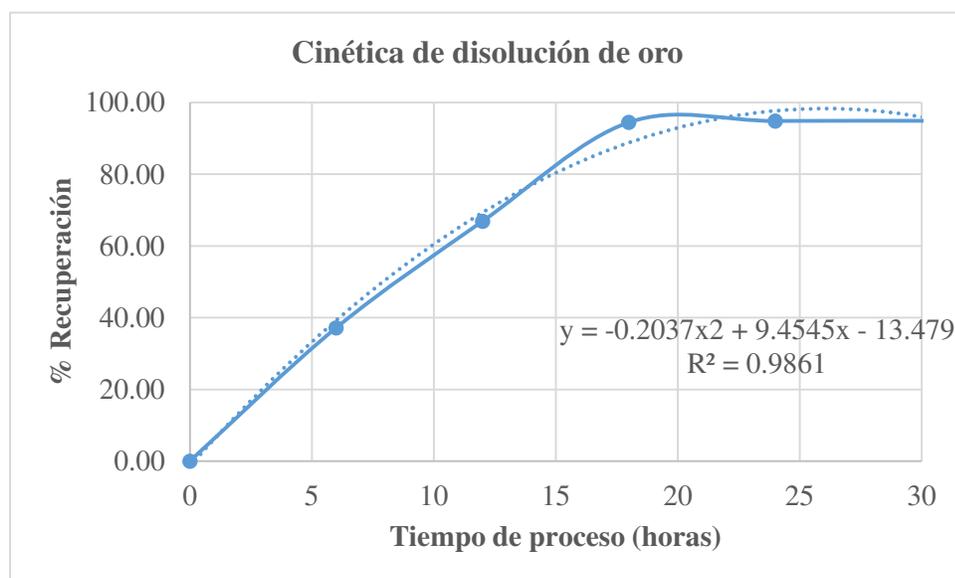
4.3.2.2. Cinética de Lixiviación de Oro

Habiendo determinado la granulometría de lixiviación, se evaluó la cinética de disolución de oro en botella para un periodo de 24 horas, bajo las mismas condiciones de operación, y a un P80 de 55 micras. Los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en la tabla 16, y la gráfica de la figura 21 representa la función disolución de oro en el tiempo.

Tabla 16*Resumen de los datos reportados*

Tiempo (h)	Componentes	Peso(g) ó Volumen(ml)	Ley (mg/lt o g/TM)	Metálico	Recuperación (%)	Reactivos (kg/TM)	
			Au	Au	Au	CN	Cal
6	Sol. Rica	600	5.06	30.36	37.17	1.17	0.82
	Relave	250	20.53	51.33	62.83		
12	Sol. Rica	600	8.94	53.64	66.89	2.24	1.45
	Relave	250	10.62	26.55	33.11		
18	Sol. Rica	600	12.94	77.64	94.46	3.17	1.69
	Relave	250	1.82	4.55	5.54		
24	Sol. Rica	600	12.99	77.94	94.86	3.70	1.80
	Relave	250	1.69	4.23	5.14		

Nota: Recuperación de oro en función del tiempo del proceso

Figura 21*Cinética de la recuperación de Au en función del tiempo*

Nota: Gráfico obtenido mediante hojas de cálculo en Excel

4.3.3. *Análisis de la interacción de las variables tiempo y granulometría en la Cianuración de los Relaves de Concentración Centrífuga-gravimétrica*

Se elaboró un diseño experimental factorial con la finalidad de determinar la contribución del P80 y el tiempo de cianuración, para determinar la interacción de las variables y la disolución de oro en periodos de 24 a 48 horas. Los valores de las variables se describen a continuación en la tabla 17, y las condiciones estándar de operación en la tabla 18.

Tabla 17

Variables del diseño factorial

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
P80 (micras)	57.06	70.10
Tiempo (horas)	24	48

Nota: Los datos corresponden a los valores mínimos y máximos de las variables en estudio.

Tabla 18

Condiciones estándar del proceso de cianuración de los relaves de gravimetría

Peso mineral	250 g
Relación L/S	2.4/1
pH	11
Volumen agua	600 ml

Nota: Variables constantes de cianuración en botella para la muestra en estudio.

El diseño experimental y el resultado de las variables respuestas se desarrollaron empleando el software estadístico Minitab 19, así como se detalla en la tabla 19.

Tabla 19*Elaboración del diseño factorial en Minitab - 19*

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	P80 (micras)	Tiempo (horas)
1	1	1	1	57.06	24
2	2	1	1	70.10	24
3	3	1	1	57.06	48
4	4	1	1	70.10	48
5	5	1	1	57.06	24
6	6	1	1	70.10	24
7	7	1	1	57.06	48
8	8	1	1	70.10	48

Nota: Orden de las pruebas realizadas y valores asumidas de las variables independientes

4.3.4. Desarrollo del Diseño Factorial

En base a la plantilla del diseño factorial, se desarrollaron pruebas de cianuración en el laboratorio de pruebas metalúrgicas en Lima, teniendo en cuenta las variables independientes y dependientes, así como aquella que consideraron como constantes del proceso. Los resultados de las pruebas se reportan en la tabla 20.

Tabla 20

Resumen del resultado de las pruebas de cianuración

ORDEN	COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN	LEY	CONTENIDO FINO	RECUPERACIÓN (%)
		(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/l)	Au (mg)	Au
1	Solución Rica	600	12.54	7.52	93.80
	Relave	250	1.99	0.50	6.20
2	Solución Rica	600	11.94	7.16	88.78
	Relave	250	3.62	0.91	11.22
3	Solución Rica	600	12.94	7.76	94.46
	Relave	250	1.82	0.46	5.54
4	Solución Rica	600	12.14	7.28	91.46
	Relave	250	2.72	0.68	8.54
5	Solución Rica	600	12.74	7.64	94.67
	Relave	250	1.72	0.43	5.33
6	Solución Rica	600	11.54	6.92	89.30
	Relave	250	3.32	0.83	10.70
7	Solución Rica	600	12.84	7.70	94.13
	Relave	250	1.92	0.48	5.87
8	Solución Rica	600	12.04	7.22	90.28
	Relave	250	3.11	0.78	9.72

Nota: Los resultados obtenidos están en orden con respecto al diseño de la tabla 19.

4.3.4.1. Análisis de Varianza para la Recuperación de Oro

En la tabla 21 se muestra el análisis de la varianza para la recuperación de oro, así también se presentan los coeficientes de correlación en la tabla 22.

Tabla 21

Análisis de varianza para la recuperación de oro

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	40.505	96.97%	40.505	13.5016	42.72	0.002
Lineal	2	38.938	93.22%	38.490	19.2452	60.89	0.001
P80	1	37.152	88.95%	37.152	37.1522	117.54	0.000
Tiempo	1	1.786	4.28%	1.338	1.3382	4.23	0.109
Interacciones	1	1.566	3.75%	1.566	1.5665	4.96	0.090
P80*Tiempo	1	1.566	3.75%	1.566	1.5665	4.96	0.090
Error	4	1.264	3.03%	1.264	0.3161		
Total	7	41.769	100.00%				

Nota: Valores de contribución de las variables en el proceso de cianuración

Tabla 22

Resumen del diseño

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
0.562205	96.97%	94.70%	5.0572	87.89%

Nota: Se representan los valores de los coeficientes de correlación del modelo matemático

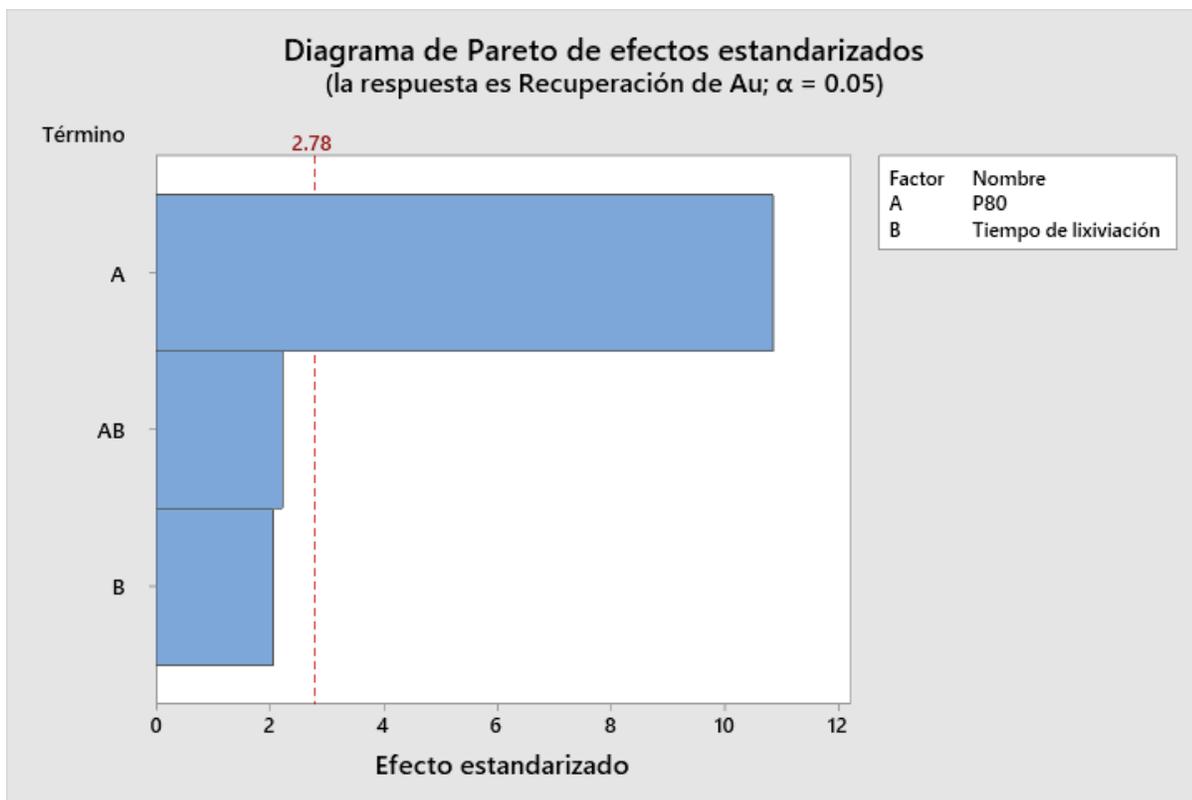
4.3.4.2. Ecuación de Regresión para la Recuperación de Oro en Unidades no Codificadas

Se presenta un modelo matemático para la recuperación de oro en función de las variables independientes que intervinieron en la cianuración de la muestra de relave de concentración. Para poder interpretar la influencia de las variables de P80 y tiempo en la recuperación de oro, se presenta el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados en la figura 22.

$$\text{Recup Au (\%)} = 124.66 - 0.5342(\text{P80}) - 0.320(\text{Tiempo}) + 0.00566(\text{P80} \times \text{Tiempo})$$

Figura 22

Diagrama de Pareto del diseño



Nota: El efecto estandarizado de cada variable representa la influencia de las variables en estudio.

4.3.4.3. Influencia de la Granulometría en la Lixiviación con Cianuro

Se realizaron pruebas de cianuración en botella de los relaves de preconcentración, a distintas granulometrías y en un tiempo de 24 horas, tal como lo indica las condiciones de operación descritas en la tabla 23. Así mismo los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en la tabla 24.

Tabla 23*Condiciones estándar de la lixiviación*

Peso mineral	250 g
Relación L/S	2.4/1
pH	11
Volumen agua	600 ml
P80(micras)	70, 65, 60 y 55
Tiempo (horas)	24

Nota: Variables constantes de cianuración en botella para la muestra en estudio

Tabla 24*Resumen de pruebas de cianuración con diferentes P80*

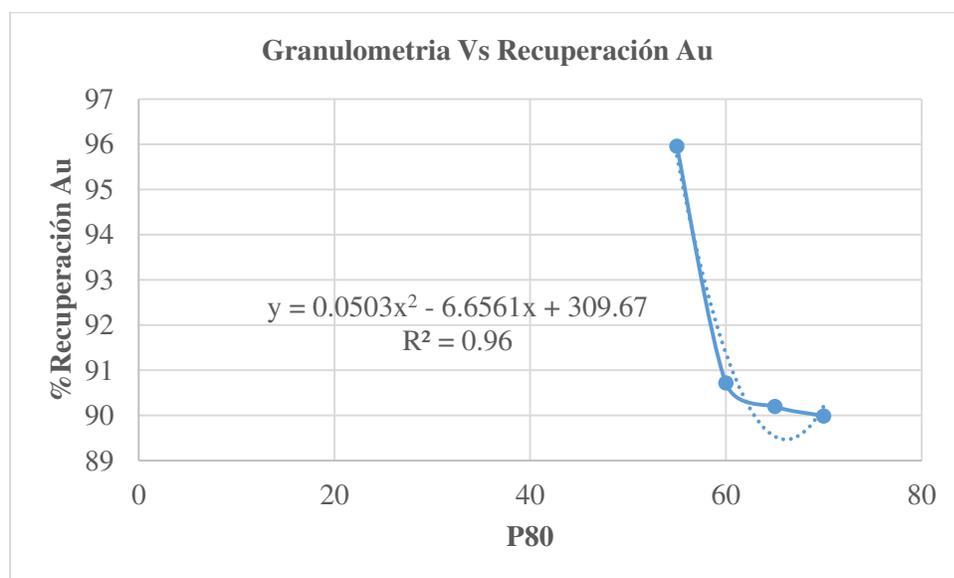
P80 (micras)	COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN	LEY	CONTENIDO FINO	RECUPERACIÓN (%)	CN (Kg/TM)	Cal (Kg/TM)
		(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Au (mg)	Au		
70	Solución Rica	600	14.27	8.56	89.98	2.0	1.32
	Relave	250	3.81	0.95	10.02		
65	Solución Rica	600	13.62	8.17	90.20	2.5	1.48
	Relave	250	3.55	0.89	9.80		
60	Solución Rica	600	12.59	8.63	90.72	3.2	1.68
	Relave	250	3.09	0.88	9.28		
55	Solución Rica	600	12.56	7.54	95.95	3.4	1.70
	Relave	250	1.27	0.32	4.05		

Nota: La recuperación de oro se presenta en porcentaje (%)

La grafica de la figura 23 representa la recuperación de oro en función al tamaño de partícula en términos de P80.

Figura 23

Gráfico de la relación entre la recuperación de Au y el P80



Nota: Se presenta la ecuación en función de las variables.

4.4. Evaluación de Costos Asociados al Procesos

A continuación, se resumen los costos asociados para procesar una tonelada métrica de relave de amalgamación, con una ley de Au 35.34 g/TM y 95.95% de recuperación en el proceso de lixiviación. En las actividades mineras auríferas de la provincia de Huarochirí, los relaves de amalgamación son vendidos a una precio mucho menor al 50% de su valor de oro recuperable.

Considerando el precio del oro: 1948.50 \$/onza

Tabla 25*Resumen de costos*

Ítem	Valor
Oro recuperado por lixiviación	36.82 g
Oro metálico recuperado	36.72 g
Valor del oro recuperado	\$ 2237.70
Oro pagable	\$ 2125.82
Costos por tonelada métrica	
Producción	\$ 40
Logística	\$ 15
Imprevistos	\$ 100
Total	\$ 155
Margen por tonelada	\$1970.82

Nota: Los datos son presentados en gramos y dólares.

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El trabajo realizado por Aramburú y otros, presentan similitud en cuanto a la metodología de procesos que se emplea. A diferencia del trabajo que se presentó, dicho autor evaluó la influencia de la fuerza de gravedad en el proceso de concentración centrifuga gravimétrica, para lo cual, los autores desarrollaron pruebas a 40, 50, 60, 70 y 80 H'z, logrando recuperaciones de hasta 19.54 a 60 H'z. En esta etapa del proceso se puede afirmar que dicho trabajo logró recuperaciones bajas, pero mayores que las recuperaciones que obtuvimos, las cuales se realizaron bajo los mismos parámetros que sostuvieron dichos autores en su artículo de investigación. Otra diferencia fundamental, se debe al análisis del mercurio en los distintos componentes de concentración centrifuga gravimétrica, y la lixiviación con cianuro. El análisis con respecto a la cianuración de los relaves de concentración se debe a que desarrollaron las pruebas con una mayor relación liquido/sólido. Los autores trabajaron con una relación de 2 a 1, para 300 g de mineral. Con respecto a la recuperación de oro, los autores alcanzaron altas recuperaciones, mayores al 95%.

El trabajo realizado por (Cura y Valdivia, 2016), presenta el desarrollo de pruebas de concentración centrifuga gravimétrica en Falcon L-40, logrando recuperar, 45.55 % de oro, valor alcanzado que es más del doble del valor que se alcanzó, así también, emplearon condiciones de operación distintas a las empleadas. Una de las diferencias más notorias, es la fuerza de gravedad de 40 H'z, y 4 PSI de presión de agua.

Con respecto a un trabajo de tesis realizado por (Gallegos, 2018), el cual difiere de nuestro trabajo de investigación, dado que solo emplea el proceso de lixiviación con cianuro para recuperar oro a partir de relaves de amalgama. Otra diferencia que se puede apreciar es que autor demuestra

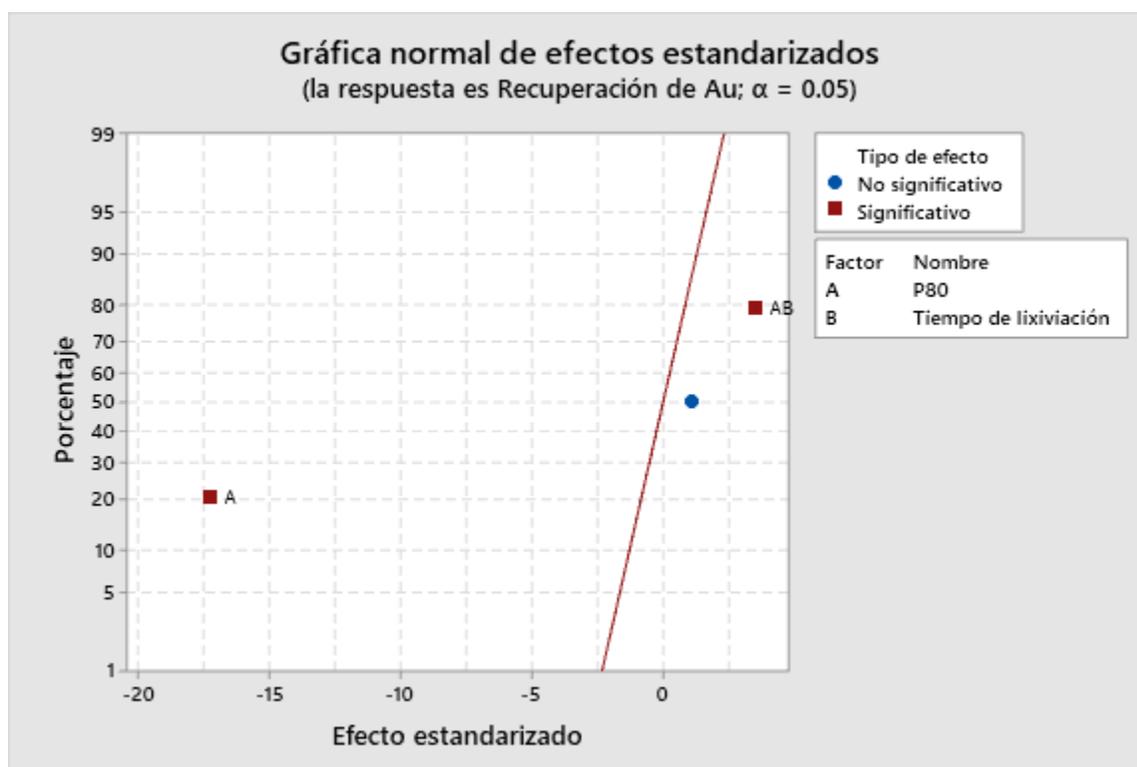
la presencia de oro de tamaño fino, de 15 a 25 micrones, por lo que hace suponer que no empleo la concentración gravimétrica. Cabe resaltar, que el trabajo realizado por dicho autor, empleo una muestra de relave de amalgamación de poco más de 21 g/TM.

Como resultado de la caracterización mineralógica, se decidió evaluar el proceso de concentración centrífuga –gravimétrica en quipo Falcon de laboratorio, con la finalidad de recuperar oro de tamaño grueso. Los resultados obtuvieron una calidad de oro en el concentrado, de grado comercial. Las dos etapas del proceso de concentración que se hizo tuvieron lugar dado que, al inspeccionar visualmente la muestra de relave de la primera pasada, mostró unas partículas finas de oro, por lo que fue necesario, realizar una segunda etapa de concentración. Se puede decir que generalmente en una primera etapa de concentración de relaves de amalgama, logra recuperaciones bajas, pero se hace necesario dado que logra concentrar el oro asociado al mercurio de tamaño visible.

Con respecto a la cianuración de los relaves de concentración, en primer lugar, se decidió elaborar un diseño factorial, el cual fue empleado para evaluar la contribución de las variables de tamaño de partícula y tiempo de cianuración, evaluando en un rango de tamaño de 55 a 70 micras de P80, y de 24 a 48 horas de proceso. Lo que demostró que, para ese periodo de tiempo de lixiviación de la muestra, es determinante la granulometría para la recuperación, tal como lo demuestra la gráfica de efector normales estandarizados.

Figura 24

Gráfico de efectos estandarizados



Nota: Gráfico obtenido mediante uso del software Minitab 19.

Los mejores resultados que se obtuvieron como desarrollo del diseño factorial, fueron realizados con un tamaño de 57.06 micras de P80 y en un tiempo de 24 horas, logrando recuperar 94.67 % de oro, tal como lo demuestra la tabla 26.

Tabla 26*Resumen de los datos del diseño factorial*

OrdenEst	P80	Tiempo	% Rec. Oro
	(micras)	(horas)	
1	57.06	24	93.80
2	70.10	24	88.78
3	57.06	48	94.46
4	70.10	48	91.46
5	57.06	24	94.67
6	70.10	24	89.30
7	57.06	48	94.13
8	70.10	48	90.28

Nota: Orden del resumen de pruebas del diseño factorial

Se proyectó la evaluación más detallada de la influencia del tamaño de partícula, con la finalidad de determinar el P80 del relave. Resultados que se denotan en la tabla 27.

Tras efectuar las pruebas metalúrgicas de lixiviación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 27*Resultados obtenidos de la etapa de cianuración*

Tiempo de molienda	P80	Granulometría -200 mallas	Consumo cianuro (Kg/TM)	Consumo de cal (Kg/TM)	% Recuperación
5 minutos	70	84.79%	2.0	1.32	89.98
10 minutos	65	88.00%	2.5	1.48	90.20
15 minutos	60	91.30%	3.2	1.68	90.72
20 minutos	55	94.60%	3.4	1.70	95.95

Nota: Porcentaje de recuperación de oro en función del tamaño de partícula

De acuerdo con el balance metalúrgico, finalmente las recuperaciones de Au en el proceso de cianuración del relave producto de la amalgamación fueron: 88.98%, para 5 minutos de molienda; 90.20%, para 10 minutos de molienda; 90.72% para 15 minutos de molienda; y, 95.95% para 20 minutos de molienda, siendo este último el mejor resultado obtenido.

CONCLUSIONES

- El resultado de la caracterización de la muestra de relave indicó un tipo de oro electrum que tiene una distribución volumétrica de 0.14% y 66.67% de grados de liberación, así mismo se observaron la presencia de especies mineralógicas como: Calcopirita, esfalerita, galena, pirita, arsenopirita, hematita, goethita, óxidos de mercurio y gangas.
- Los tipos geométricos de entrelazamientos de las especies mineralógicas observados en la caracterización indicaron que los enlaces referidos al electrum son posibles de liberar.
- El ensayo al fuego de una muestra representativa de relave de amalgamación ensayo químicamente 1.137 oz/TC de oro.
- La prueba más representativa de preconcentración centrífuga – gravimétrica en equipo Falcon logró recuperar 14.84 % de oro, con un ratio de 102.13 y 84.78, para la primera y segunda pasada, con una calidad de hasta 375.09 g/TM en la primera pasada y 104.91 g/TM de Au en la segunda pasada, las cuales se obtuvieron a nivel de laboratorio. Este valor indica que el concentrado es comerciable.
- Las pruebas de reducción de tamaño en términos de P80 con respecto al tiempo de molienda determinaron que esta variable obedece a la ecuación: $P80 = -1.0358(t) + 75.715$, con un coeficiente de correlación de 0.9997, donde (t) representa el tiempo de molienda en minutos.
- El análisis de las influencias de las variables, granulometría y tiempo de cianuración en función a la variable respuesta de recuperación (%Au), determinaron que, para

un periodo de cianuración de 24 a 48 horas, con un tamaño de partícula P80 de 57.06 a 70.10 micras, la granulometría presenta una contribución de 88.95%.

- Las pruebas más representativas de cianuración en botella para determinar el P80 de trabajo, indicó que, a un P80 de 55 micras, se logra recuperar 95.95% de oro, con un consumo de 3.4 Kg/TM de cianuro y 1.7 Kg/TM de cal. Así también, se determinó el modelo $\% \text{Recuperación Au} = 0.0503(\text{P80})^2 - 6.6561(\text{P80}) + 309.67$, responde a la recuperación de oro en términos de P80, presentando un coeficiente de correlación de 0.96.
- Las pruebas de cinética de disolución de oro determinaron una recuperación de 94.86 % de oro en el tiempo de 24 horas, alcanzando una cinética violenta a las 18 horas de proceso, donde se logró recuperar 94.46% de oro. Así también se determinó el modelo $\% \text{Rec. Au} = -0.2037(t)^2 + 9.4545(t) - 13.479$, **el cual presenta un coeficiente de correlación de 0.9861, y responde a las pruebas de disolución de oro en el tiempo.**
- Se concluye que, según los resultados obtenidos, el proceso de amalgamación podría ser reemplazado por un proceso de pre-concentración centrífuga gravimétrica en *Falcon* seguido de cianuración.

RECOMENDACIONES

A continuación, planteamos las siguientes recomendaciones:

- Realizar pruebas a nivel pilotaje escalando las variables que se obtuvieron a nivel de laboratorio.
- Evaluar la recuperación de oro mediante la cianuración de los relaves del proceso de amalgamación, así como la evaluación económica del proceso recomendado.
- Realizar la evaluación con lixiviantes alternativos al cianuro, dado que, en los últimos años, se han desarrollado reactivos como Sandioss, Jinchan, Lv Jin, entre otros.
- Identificar otros elementos valiosos, que podrían ser materia de estudio para el avance de la industria metalúrgica, además de que podría generar a largo plazo un atractivo económico.
- Optimizar el proceso y simular en software para obtener más información en el procesamiento de estos relaves.

REFERENCIAS

- Anculle, F., & Puma, S. (2015). *Aplicación del método de oxidación química con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para la reducción del cianuro presente en los efluentes de la planta de beneficio Sotrami S.A.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Aramburú, V., Azañero, Á., Calderón, J., Gagliuffi, P., Avilés, P., Julca, D., Ortiz, J., Rivera, J., Arauzo, L., & Gutiérrez, L. (2016). Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la región Casma. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 19(38), 171-177.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13584>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2023). N° 59: Actividad Económica - Junio 2023. *Notas de estudios*. www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Notas-Estudios/2023/nota-de-estudios-59-2023.pdf
- Cáceres, G. (2001). Impacto Ambiental de la minería del Oro. *Revista Metalúrgica UTO*, 22.
https://doi.org/http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932001000200004&lng=en&nrm=iso#f3
- Cañola, C., Gallego, A., & Bolívar, W. (2015). Caracterización mineralógica y mineralogía de procesos aplicada a la mina de veta “la esperanza”, ubicada en la vereda Cedeño parte alta del municipio de Támesis, Antioquia. *Revista Colombiana de Materiales*(6), 54-68.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rcm.22874>

- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., & Cueva, E. (2009). Domonios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Sociedad Geológica del Perú*, 103, 1-89.
- Chirif, L. (2010). *Microscopía Óptica de Minerales*. INGEMMET, Lima.
- Congreso de la República. (2002). *Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minería Artesana (Ley N° 27651)*. Ministerio del Ambiente.
- Curo, J., & Valvidia, E. (2016). *Recuperación de oro y mercurio por concentrador centrifugo de los relaves de amalgación en la zona de 9 de setiembre - distrito de Huaypetue - región de Madre de Dios*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco.
- Dai, X., & Jeffrey, M. (2006). The effect of sulfide minerals on the leaching of gold in aerated cyanide solutions. *Hydrometallurgy*, 84(3-4), 118-125.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.005>
- 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>
- Deschênes, G., Pratt, A., Riveros, P., & M., F. (2002). Reactions of gold and sulfide minerals in cyanide media. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 19, 169-177.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF03403265>
- Eberhard, W. (2016). Social licencing in mining—between ethical dilemmas and economic risk management. *Mineral Economics*, 29, 97-104.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13563-016-0089-0>

- Farajzadeh, S., & Chelgani, C. (2022). Gravity separation by falcon concentrator- an over review. *Separation Science and Technology*, 57(13). <https://doi.org/https://doi.org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/01496395.2022.2028836>
- Gallegos, M. (2018). *Estudio técnico para la recuperación de Oro a partir de minerales de desmonte y relaves de Quimbalete por el proceso de Vat Leaching*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Gamu, J., Le Billon, P., & Spiegel, S. (2015). Extractive industries and poverty: A review of recent findings and linkage mechanisms. *The Extractive Industries and Society*, 2(1), 162-176. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.11.001>
- Hedjazi, F., & Monhemius, J. (2018). Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores. *Minerals Engineering*, 126, 123-129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.005>
- Hinojosa, O. (2016). Concentración gravimétrica de menas auríferas. *Rev. Met UTO*(38), 38-50. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932016000100006&Ing=es&nrm=iso
- Hinton, J., Veiga, M., & Veiga, T. (2003). Clean artisanal gold mining: a utopian approach? *Journal of Cleaner Production*, 11(2), 99-115. [https://doi.org/https://doi.org.unmsm.lookproxy.com/10.1016/S0959-6526\(02\)00031-8](https://doi.org/https://doi.org.unmsm.lookproxy.com/10.1016/S0959-6526(02)00031-8)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Informe Técnico: Comportamiento de los indicadores de mercado laboral a Nivel Nacional. Anual: enero – diciembre 2019*. Lima. INEI.
- Kesler, S. (2015). *Mineral Resources, Economics and the Environment 2nd Edición*. Ann Arbor: Cambridge University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9781139871426>

- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194>
- Li, Q., Jiang, T., Yang, Y., Li, G., Guo, Y., & Qiu, G. (2010). Co-intensification of cyanide leaching gold by mercury ions and oxidant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(8), 1521-1526. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60332-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60332-0)
- Marsden, J., & House, L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction: Second Edition*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Mejia, A. (2019). *Microscopía óptica con el criterio grado de liberación como una herramienta importante para la toma de decisiones en procesamiento de minerales, minera Constanca - Hudbay*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro (Vol. 2)*. Lima, Perú: San Marcos EIRL.
- Nava, F., Elorza, E., Pérez, R., & Uribe, A. (2007). Chemical analysis of cyanide in cyanidation process: Review of methods. *Revista De Metalurgia*, 43(1), 20-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/revmetalm.2007.v43.i1.48>
- Nayak, A., Jena, M., & Mandre, N. (2021). Application of Enhanced Gravity Separators for Fine Particle. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7, 315-339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40831-021-00343-5>
- Pasapera, R. (2023). *Optimización de los parámetros de lixiviación de un mineral del yacimiento Callanquitas ubicado en el distrito Huaranchal, provincia Otuzco, departamento La Libertad*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Piura, Piura.

<https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12676/4368/IQUI-PAS-MON-2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rankin, W. (2011). *Minerals, Metals and Sustainability: Meeting Future Material Needs*. Florida: CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00549.x>

Ray, D., Baniyadi, M., Graves, J., Greenwood, A., & Farnaud, S. (2022). Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(2), 597-612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40831-022-00499-8>

Rojas, A., & Villanueva, Y. (2018). *Evaluación técnica y económica para la recuperación de oro de la Cancha de Relaves de la empresa Minera Rio Chicama S.A.C. Sayapullo, La Libertad*. Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Cajamarca.

Sousa, R., Veiga, M., Klein, B., Telmer, K., Gunson, A., & Bernaudat, L. (2010). Strategies for reducing the environmental impact of reprocessing mercury-contaminated tailings in the artisanal and small-scale gold mining sector: insights from Tapajos River Basin, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1757-1766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.016>

Tabares, L. (2020). *Caracterización mineralógica y química orientada a geometalurgia de los depósitos auríferos de un sector del Distrito Minero de La Llanada – Departamento de Nariño (Colombia)*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <file:///C:/Users/ELIZA/Desktop/caracterizacion%20de%20oro.pdf>

Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Zurita, V. (2017). *La industria de la minería en el Perú: 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país*. Lima: Osinergmin.

- Torkaman, P., & Veiga, M. (2023). Comparing cyanidation with amalgamation of a Colombian artisanal gold mining sample: Suggestion of a simplified zinc precipitation process. *The Extractive Industries and Society*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101208>
- U.S. Geological Survey. (2022). *Mineral Commodity Summaries*. U.S. Geological Survey.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2022>
- Valero, A., & Valeria, A. (2012). From Grave to Cradle. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 43-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00529.x>
- Van, T., Lahiani, A., & Heller, D. (2016). Is gold a hedge against inflation? New evidence from a nonlinear ARDL approach. *Economic Modelling*, 54, 54-66.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.econmod.2015.12.013>
- Vargas, V. (2013). *Actividad minera en el Perú (Definiciones)*. Presentación, Ministerio de Energía y Minas, Lima.
- Veiga, M., Angeloci, G., Hitch, M., & Velasquez, P. (2014). Processing centres in artisanal gold mining. *Journal of Cleaner Production*, 64, 535-544.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.015>
- Vieira, R. (2006). Mercury-free gold mining technologies: possibilities for adoption in the Guianas. *Journal of Cleaner Production*, 14(3-4), 448-454.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.007>
- Vilcapoma, J., & Chavez, Z. (2012). *Prueba sexperimentales a nivel de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de minerales de oro en la planta concentradora "Caselita" en Condorama - Cuzco*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

Wiener, L. (2019). *La gobernanza de la minería en pequeña escala en el Perú*. Lima: CooperAcción.

Zegarra, J. (2014). *Optimización en la recuperación de oro y plata aplicando sales solubles en la Empresa Minera Laytaruma S.A.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

Zvarivadza, T. (2018). Artisanal and Small-Scale Mining as a challenge and possible contributor to Sustainable Development. *Resources Policy*, 56, 49-58.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.009>

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

TEMA: "EVALUACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE LOS RELAVES DE AMALGAMACIÓN MEDIANTE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y LIXIVIACIÓN DE LA MINERÍA ARTESANAL EN LA ZONA DE HUAROCHIRÍ – LIMA"				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Hipótesis	
			Variables de la hipótesis general	
			Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera podemos recuperar oro a partir de los relaves de amalgamación empleando la concentración centrífuga – gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, a nivel de laboratorio, de la minería artesanal en la zona de Huarochirí?	Aplicar el proceso de concentración centrífuga gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, a nivel de laboratorio, para recuperar oro de los relaves de amalgamación de la minería artesanal en la zona de Huarochirí	La concentración centrífuga gravimétrica, y cianuración de los relaves de concentración, a nivel de laboratorio, permitirá recuperar Au a partir de los relaves de amalgamación de la minería artesanal en la zona de Huarochirí	Recuperación de oro	Se reportan en términos porcentuales de oro, como resultado de los ensayos químicos de los componentes.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué forma podemos determinar las especies de minerales, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazadas presentes en los relaves de amalgamación de la provincia de Huarochirí?	Determinar las especies mineralógicas presentes, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazadas, mediante microscopía óptica de los relaves de amalgamación, en la provincia de Huarochirí.	La microscopía óptica de los relaves de amalgamación permitirá identificar las especies de minerales involucrados, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazadas, en la provincia de Huarochirí.	Especies y enlaces presentes	Observación al microscopio óptico
			Distribución volumétrica	Distribución de las especies de minerales en porcentaje.
			Grados de liberación	Estos datos se observan en el microscopio y se reportan en micrómetros(μm).
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera podemos recuperar oro empleando la concentración centrífuga gravimétrica de los relaves de amalgamación, a nivel de laboratorio en la provincia de Huarochirí?	Realizar pruebas de concentración centrífuga gravimétrica de los relaves de amalgamación, a nivel de laboratorio, para la recuperación de oro en la provincia de Huarochirí.	La concentración centrífuga gravimétrica permitirá recuperar oro de los relaves de amalgamación, a nivel de laboratorio, en la provincia de Huarochirí.	Tamaño de partícula	El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas.
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo recuperamos oro mediante la cianuración de los relaves de concentración centrífuga gravimétrica?	Realizar pruebas de cianuración de los relaves de concentración centrífuga gravimétrica, para recuperar oro a nivel de laboratorio.	La cianuración de los relaves de la concentración centrífuga gravimétrica, permitirá aumentar la recuperación de oro, a nivel de laboratorio.	Tamaño de partícula	El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas.

Nota: Resumen del proyecto de investigación

Anexo 2

Muestra del relave de amalgamación



Nota: Briqueta de la muestra

Anexo 3

Concentrador Falcon

**Anexo 4**

Adicción del mineral



Anexo 5*Concentrado del Falcon***Anexo 6***Relave del Falcon***Anexo 7***Plateo del Concentrado Falcon*

Nota: Conjunto de fotos de la concentración centrífugo-gravimétrica.

Anexo 8

*Lixiviación con cianuro - Agitación en
botella*



Nota: Par de fotos de la cianuración.

Anexo 9

Reactivos para cianuración

