



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Recuperación de oro y plata por electrodeposición de  
soluciones cianuradas de lixiviación de minerales  
oxidados, de baja concentración en la zona de Río Seco –  
Carabaylo**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

**AUTORES**

Jack William ESCOBAR QUISPE

Moises Diego MENDOZA PÉREZ

**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

---

Escobar, J. & Mendoza, M. (2023). *Recuperación de oro y plata por electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales oxidados, de baja concentración en la zona de Río Seco – Carabayllo*. [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

<b>Datos de autor 1</b>	
Nombres y apellidos	Jack William Escobar Quispe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77067785
URL de ORCID	-
<b>Datos de autor 2</b>	
Nombres y apellidos	Moises Diego Mendoza Pérez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77414600
URL de ORCID	-
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-7411-3866">https://orcid.org/0000-0001-7411-3866</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
<b>Miembro del jurado 1</b>	

Nombres y apellidos	Vladimir Alejandro Arias Arce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07009405
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	C.0.4.16. Lixiviación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Edificio: Ingeniería Metalúrgica- Laboratorio Metalúrgico País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Código postal: 15081 Latitud: -12.060588908759044 Longitud: -77.08411378869394
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Agosto 2020 - Marzo 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01</a>  Ingeniería de procesos <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02</a>



«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 05 del mes de Julio del 2023, siendo las 17:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Mg. 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 «**RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA POR ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, DE BAJA CONCENTRACIÓN EN LA ZONA DE RÍO SECO-CARABAYLLO**» presentada por Don: MOISES DIEGO MENDOZA PÉREZ 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:

.....*Quince (15) 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: **Moises Diego Mendoza Pérez**.

Siendo las *18:15* 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, 05 de Julio 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 05 del mes de Julio del 2023, siendo las 17:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Mg. 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 «RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA POR ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, DE BAJA CONCENTRACIÓN EN LA ZONA DE RÍO SECO-CARABAYLLO» presentada por Don: JACK WILLIAM ESCOBAR QUISPE 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:

*Quince (15) 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: **Jack William Escobar Quispe**.

Siendo las *18-15* 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, 05 de Julio 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





**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

**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: «RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA POR ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, DE BAJA CONCENTRACIÓN EN LA ZONA DE RÍO SECO - CARABAYLLO»
7. **AUTOR DEL DOCUMENTO:**  
Bach. MOISES DIEGO MENDOZA PÉREZ
8. **FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**  
25/07/2022
9. **FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**  
25/07/2022
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 (7%)**
13. **FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**  


Rank	Fuente	Porcentaje
1	hdl.handle.net	4 %
2	libdigital.epn.edu.ec	1 %
3	klcc.pub	1 %
4	Miguel Alcañiz Filol. D.	1 %
5	www.dspace.espol.edu	<1 %
14. **OBSERVACIONES**  
Ninguna
15. **CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**  
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
16. **FECHA DEL INFORME**  
Lima, 18 de agosto del 2022



Firmado digitalmente por ORIHUELA SALAZAR Luis Alfredo FAU 20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 18.08.2022 21:04:14 -05:00


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





**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**

**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: «RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA POR ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, DE BAJA CONCENTRACIÓN EN LA ZONA DE RÍO SECO - CARABAYLLO»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**  
Bach. JACK WILLIAM ESCOBAR QUISPE
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**  
25/07/2022
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**  
25/07/2022
- 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 (7%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**  


Rank	Fuente de Internet	Porcentaje
1	hdl.handle.net	4 %
2	libdigital.epn.edu.ec	1 %
3	klcc.pub	1 %
4	Miguel Alcañiz Fillof, D.	1 %
5	www.dipace.espol.edu...	<1 %
- 14. OBSERVACIONES**  
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**  
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**  
Lima, 18 de agosto del 2022



Firmado digitalmente por ORIHUELA  
SALAZAR Luis Alfredo FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 18.08.2022 21:04:40 -05:00

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

## ÍNDICE

RESUMEN .....	VII
CAPÍTULO I: Introducción .....	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema .....	2
2.1.    Descripción del Problema .....	2
2.2.    Justificación de la Investigación .....	2
2.3.    Objetivos .....	3
2.3.A.  Objetivos Generales .....	3
2.3.B.  Objetivos Específicos .....	3
2.4.    Hipótesis y Variables .....	4
2.4.A.  Hipótesis General .....	4
2.4.B.  Hipótesis Específicas .....	4
2.4.C.  Identificación de Variables .....	4
2.4.D.  Operacionalización de Variables .....	6
2.5.    Matriz de Consistencia .....	7
CAPÍTULO III: Marco Teórico .....	8
3.1.    Antecedentes .....	8
3.2.    Ubicación de Carabayllo .....	11
3.2.1.  Ubicación Geográfica de la minería artesanal en Carabayllo .....	11
3.2.2.  Accesibilidad – Río Seco .....	11
3.3.    Tratamiento por Lixiviación con Cianuro en Menas de Oro y Plata .....	12
3.3.1.  Factores que Afectan al Proceso de Lixiviación con Cianuro .....	17

3.3.1.1.	Concentración de Cianuro.....	18
3.3.1.2.	Concentración de Oxígeno.....	19
3.3.1.3.	pH Y Alcalinidad.....	20
3.3.1.4.	Temperatura.....	20
3.3.1.5.	Agitación.....	22
3.3.1.6.	Granulometría del Mineral.....	22
3.3.1.7.	Dilución de Pulpa.....	23
3.3.1.8.	Naturaleza del Mineral.....	23
3.4.	Electrometalurgia.....	23
3.4.1.	Proceso Electroquímico.....	24
3.4.1.1.	Ley de Faraday.....	25
3.4.1.2.	Equivalente Electroquímico.....	26
3.4.1.3.	Eficiencia de Corriente.....	26
3.4.2.	Termodinámica del Proceso Electroquímico.....	27
3.4.2.1.	Potencial de Electrodo.....	28
3.4.2.2.	Electrodos de Referencia.....	29
3.4.2.3.	Escala Normal de Potenciales.....	29
3.4.3.	Aspectos Cinéticos del Proceso Electroquímico.....	29
3.4.3.1.	Densidad de Corriente.....	29
3.5.	Producción Nacional de Oro y Plata con Impacto del Covid19.....	30
3.5.1.	Producción Nacional de Oro con Impacto del Covid19.....	31
3.5.2.	Producción Nacional de Plata con Impacto del Covid19.....	33
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación y Mineralogía de la Muestra Problema ....		35

4.1.	Tipo y Diseño de Investigación.....	35
4.2.	Unidad de Análisis .....	35
4.3.	Muestra de Estudio.....	35
4.4.	Tamaño de Muestra.....	36
4.5.	Procedimiento Metodológico de la Investigación .....	36
4.6.	Equipos y Materiales.....	36
4.6.1.	Equipos.....	37
4.6.2.	Materiales.....	37
4.7.	Análisis Mineralógico de la Investigación.....	38
CAPÍTULO V: Pruebas Experimentales .....		42
5.1.	Pruebas de Moliendabilidad del Mineral .....	42
5.2.	Pruebas de Cianuración del Mineral de Cabeza.....	43
5.2.1.	Condiciones del Proceso de Cianuración.....	44
5.2.2.	Resultados de la Cianuración a 6 Horas.....	44
5.2.3.	Resultados de la Cianuración a 12 Horas.....	45
5.2.4.	Resultados de la Cianuración a 18 Horas.....	45
5.2.5.	Resultados de la Cianuración a 24 Horas.....	46
5.3.	Pruebas de Electrodeposición de Soluciones Cianuradas .....	47
5.3.1.	Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°1 .....	48
5.3.1.1.	Balance Metalúrgico de Electroobtención de Oro Prueba 1	49
5.3.2.	Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°2 .....	50
5.3.2.1.	Balance Metalúrgico de Electroobtención de Oro Prueba 2	51
5.3.3.	Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°2 .....	51

5.3.3.1. Balance Metalúrgico de Electroobtención de Oro Prueba 3	53
5.4. Eficiencia final del proceso – Extracción total.....	54
CAPÍTULO VI: Interpretación de los Resultados Obtenidos.....	56
CAPÍTULO VII: Conclusiones y Recomendaciones.....	58
7.1. Conclusiones .....	58
7.2. Recomendaciones.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS .....	67

## **DEDICATORIA**

A Dios, fuente de sabiduría y guía en cada paso de mi camino, a mi familia por su amor incondicional, a mis profesores por su sabiduría compartida que fortalecieron mi crecimiento académico y amigos por su apoyo constante. Su influencia y aliento son la fuerza detrás de este trabajo.

Jack Escobar

El desarrollo de este proyecto de investigación es dedicado a nuestro creador que en todo momento nos dio fuerzas para salir adelante, a mis padres por su apoyo incondicional, que a pesar de buenos y malos momentos siempre están presente.

Diego Mendoza

### **AGRADECIMIENTOS**

Un especial agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, decana de américa, que nos brindó las condiciones necesarias para el desarrollo del proyecto, así como a nuestro asesor el Dr. Vidal Aramburú Rojas quien supo guiarnos en cada etapa de la investigación, a cada uno de los docentes y personal administrativo de la E.P Ingeniería Metalúrgica.



## RESUMEN

En esta investigación, se realizaron pruebas metalúrgicas de lixiviación y electrodeposición de soluciones de baja concentración, de una muestra problema de la zona de Río Seco en el distrito de Carabayllo. El lote muestreado fue reducido de tamaño hasta obtener una granulometría de 100%-10 Malla, se tomaron muestras representativas del lote para realizar pruebas de moliendabilidad, determinando que después de 30 minutos de molienda, el material alcanzó una granulometría de 81.15 % - 200 Malla. Posteriormente; se realizó la caracterización mineralógica empleando el método de microscopía óptica de luz reflejada, como resultado se observó la presencia de oro fino en forma de electrum y especies mineralógicas cianicidas como la calcopirita, covelita y piritita.

Al mineral de cabeza se realizó el ensayo químico por vía seca obteniendo los siguientes resultados: 17.51 g/TM de Au y 52.7 g/TM de Ag.

En base a la caracterización y los ensayos químicos de la muestra se realizaron pruebas de lixiviación por agitación en botella, determinando que después de 24 horas de proceso, se logra recuperar 95.92% de Au y 86.55% de Ag, con leyes de 8.69 mg/L de Au y 22.56 mg/L de Ag en solución.

A partir de las soluciones de lixiviación se realizaron pruebas de electrodeposición estudiando la influencia de las variables de intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico en la recuperación de Au y Ag. Alcanzando la mayor recuperación de 75.04% de Au y 68.80% para la Ag, trabajando a 7.95 A, y 3.50 V.

Concluyendo que se logra recuperar Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición sustituyendo el uso de carbón activado, en la zona de Río Seco - Carabayllo.

**NOMENCLATURA**

%	Porcentaje
A	Amperios
mol L <sup>-1</sup>	Mol por litro
V	Voltaje
A/m <sup>2</sup>	Amperio por metro cuadrado
Km	Kilometro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
Eh	Potencial de oxidación
pH	Variación de hidrógeno
° C	Grados centígrados
Atm	Atmósfera
P	Presión
mg/L	Miligramos por litro
µm	Micrómetros
ΔG	Variación de energía libre de Gibbs
ΔE	Variación de energía
Ec	Eficiencia de corriente
Ea	Potencial anódico
ΔΦ	Potencial absoluto
Eth	Potencial termodinámico
I	Intensidad de corriente

amperes/dm <sup>2</sup>	Amperios por decímetro cuadrado
F	Constante de Faraday
n	Valencia del ion metálico
mF	Metal depositado
EEQ	Equivalente electroquímico
mV	Milivoltios
oX	Oxidación
e <sup>-</sup>	Electrones
η	Sobrepotencial
Ei	Potencial de abandono
E.A	Electrodo auxiliar
E.T	Electrodo de trabajo
E.R	Electrodo de referencia
F.P	Fuente de poder
TMF	Toneladas métricas finas
S.A	Sociedad anónima
S.R.L	Sociedad de responsabilidad limitada
Var %	Variación porcentual
Ln	Logaritmo natural
L/S	Litros por segundo
g/TM	Gramos por tonelada métrica
mg/L	Miligramos por litro
min	Minuto

m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
ms	Mili siemens
Ac	Corriente alterna
Dc	Corriente directa
Cm	Centímetro
Ms/cm	Mili siemens por centímetro

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Variables del estudio.....	6
Tabla 2 Matriz de consistencia .....	7
Tabla 3 Producción aurífera estimada enero – octubre incluyendo mineros artesanales.....	32
Tabla 4 Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados .....	39
Tabla 5 Granulometría de molienda .....	42
Tabla 6 Parámetros del proceso de lixiviación con cianuro .....	44
Tabla 7 Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 6 hrs.....	44
Tabla 8 Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 12 hrs.....	45
Tabla 9 Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 18 hrs.....	45
Tabla 10 Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 24 hrs.....	46
Tabla 11 Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°1. ....	48
Tabla 12 Características finales de la solución lixiviada .....	49
Tabla 13 Ensayos químicos del proceso de electrodeposición de oro y plata .....	49
Tabla 14 Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°2 .....	50
Tabla 15 Características finales de la solución lixiviada .....	51
Tabla 16 Balance metalúrgico prueba 2.....	51
Tabla 17 Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°3 .....	52
Tabla 18 Características finales de la solución lixiviada .....	52
Tabla 19 Balance metalúrgico prueba 3.....	53
Tabla 20 Recuperación total - prueba N°1.....	54
Tabla 21 Recuperación total - prueba N°2.....	54

Tabla 22 Recuperación total - prueba N°3..... 55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa Los Huertos de Rio Seco .....	12
Figura 2 Reacciones químicas de la solubilidad de oro en soluciones cianuradas .....	14
Figura 3 Diagrama de Pourbaix para el proceso de cianuración de oro.....	15
Figura 4 Diagrama de Pourbaix para la cianuración de plata .....	16
Figura 5 Concentración de soluciones cianuradas en función de la solubilidad de oro y plata....	18
Figura 6 Recuperación de metales preciosos en función de la temperatura (°C) .....	21
Figura 7 Estructura de la producción de oro por empresas, enero – marzo .....	32
Figura 8 Empresas productoras de plata y su porcentaje de contribución .....	34
Figura 9 Enlace electrum - goethita (el-gt) y partículas libres de goethita (gt) y de gangas (GGs). 200X.....	40
Figura 10 Enlace calcopirita (cp) - covelita (cv), con la pirita (py), con la goethita (gt) y con la ganga (GGs). 200X. ....	40
Figura 11 Enlace calcopirita (cp) - covelita (cv). 200X.....	41
Figura 12 Curva de moliendabilidad.....	43
Figura 13 Recuperación porcentual de oro con respecto al tiempo de lixiviación con cianuro....	46
Figura 14 Recuperación porcentual de plata con respecto al tiempo de lixiviación con cianuro. 47	47
Figura 15 Recuperación de oro y plata en función de la densidad de corriente .....	53
Figura 16 Gráfico de barras de la influencia de las variables independientes de voltaje y densidad de corriente, para la recuperación de oro y plata .....	57
Figura 17 Reporte de análisis químicos 1 .....	67
Figura 18 Reporte de análisis químicos 2.....	68



Figura 19 Mineral oxidado de la zona de Río Seco .....	69
Figura 20 Mineral 100% - 10 malla.....	69
Figura 21 Ro Tap para análisis granulométrico .....	70
Figura 22 Malla 200 para pruebas de moliendabilidad.....	70
Figura 23 Molino de bolas de laboratorio .....	71
Figura 24 Mesa de rodillos para pruebas de cianuración en botella .....	71
Figura 25 Lana de acero para pruebas metalúrgicas de electrodeposición .....	72
Figura 26 Sistema de pruebas de electrodeposición .....	72

## **CAPÍTULO I: Introducción**

La refinación de oro en la pequeña y mediana minería es una actividad pocas veces aplicada, ya sea por desconocimiento en el mayor de los casos, o por falta de servicios en esta área de trabajo, el hecho de estudiar las técnicas usadas en la refinación de oro, para este sector importante, nos permitirá definir posibles soluciones que esperamos sean acogidas por la gente ligada a esta actividad (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

Luego del proceso de disolución de las especies con cianuro, es necesario que los metales complejados sean transformados en forma de precipitados, ya sea con carbón activado o polvo de zinc, la cual depende, por lo general, de la cantidad de oro y plata en la solución. Cuando las soluciones pregnant o soluciones ricas en metales preciosos presentan mayor cantidad de oro, se realiza, por lo general, una adsorción con carbón activado, que luego es desorbido en unos tanques, empleando alcohol, soda caustica y cianuro, a temperaturas entre 70 y 80 °C. Las soluciones que salen del proceso de desorción son de alta concentración de oro y plata, e ingresa al circuito de electrodeposición de los metales valiosos. El proceso de adsorción-desorción de carbón es una forma eficiente de concentrar soluciones con contenido de oro y plata, que provienen de la cianuración. Ya que el carbón generalmente es lavado en una solución acidificada, y que además debe ser regenerado empleando altas temperaturas antes de ser usado nuevamente, estos procesos pueden incrementar significativamente la inversión y convertir esta actividad en antieconómica. Además, existe pérdida de metal precioso asociado con pérdida de carbón fino desde el sistema; por estas razones es conveniente eliminar la etapa de adsorción-desorción de carbón y directamente electrodepositar el oro a partir de la cianuración.

## **CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema**

### **2.1. Descripción del Problema**

Los procesos de preconcentración utilizados usualmente en la industria aurífera como la adsorción con carbón activado, conlleva a la regeneración de la materia prima con el uso de ácidos y elevadas temperaturas, los cuales eleva notoriamente los costos del proceso, además que generan serios problemas medioambientales (Pérez, 2015). Por ello, surge la necesidad de estudiar el proceso de electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración, sustituyendo el uso de carbón activado para recuperar Au y Ag en la zona de Río Seco – Carabayllo.

La problemática que se tendrá en cuenta para el desarrollo del proyecto de investigación se basa en que los procesos de preconcentración utilizados usualmente en la industria incrementan las operaciones necesarias para obtener el producto valioso final, lo que significa un aumento de los costos del proceso (Pérez, 2015).

¿La implementación de una electrodeposición sustituyendo el uso de carbón activado, logrará recuperar Au y Ag a partir de soluciones de baja concentración a nivel de laboratorio?

### **2.2. Justificación de la Investigación**

La operación de una celda electrolítica para electrodepositar Au y Ag a partir de una solución cianurada de baja concentración a nivel industrial no se realiza, por falta de investigaciones sobre la electrodeposición sustituyendo el uso de carbón activado.

El desarrollo del proyecto de investigación se justifica tecnológicamente, debido a que el proceso de cianuración de minerales oxidados y electrodeposición directa de las soluciones cianuradas logrará recuperar Au y Ag sin el uso de carbón activado u algún otro proceso de preconcentración de soluciones cianuradas. La recuperación de Au y Ag mediante

electrodeposición directa controlando las variables de densidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico, propone reemplazar a los procesos de adsorción, y desorción de metales preciosos, los cuales generan un impacto ambiental severo, como es en el caso del proceso de regeneración del carbón activado (Pérez, 2015). Así también, los procesos de desorción están sujetas por lo general a elevadas temperaturas, por lo que se produce la formación de compuestos volátiles, perjudiciales para la salud y el medioambiente (Tomalá, 1998). La reducción de equipos en el proceso de recuperación de Au y Ag mediante la electrodeposición directa implica una reducción notoria en los costos asociados al proceso, lo que justifica tecnológicamente su aplicación generando un proceso más rentable y medioambientalmente, en la zona de Río Seco – Carabayllo.

## **2.3.Objetivos**

### **2.3.A. *Objetivos Generales***

- Aplicar el proceso de electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración, sustituyendo el uso de carbón activado para recuperar Au y Ag en la zona de Río Seco – Carabayllo.

### **2.3.B. *Objetivos Específicos***

- Caracterizar la mineralogía de la muestra problema de la zona de Río Seco para identificar los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies de interés.
- Realizar el proceso de lixiviación de minerales oxidados para obtener soluciones de baja concentración en Au y Ag, en la zona de Río Seco – Carabayllo.

- Recuperar Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición de soluciones cianuradas de baja concentración, estudiando las variables de intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico.

## **2.4. Hipótesis y Variables**

### **2.4.A. Hipótesis General**

- Se logrará recuperar Au y Ag mediante el proceso electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración sustituyendo el uso de carbón activado, en la zona de Río Seco – Carabayllo.

### **2.4.B. Hipótesis Específicas**

- La caracterización mineralógica de la muestra problema de la zona de Río Seco - Carabayllo, identificará los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies de interés.
- Se obtendrá soluciones de baja concentración en Au y Ag mediante el proceso de lixiviación de minerales oxidados, en la zona de Río Seco – Carabayllo.
- Aumentará la recuperación Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición de soluciones cianuradas de baja concentración, a una mayor intensidad de corriente y menor diferencia de potencial eléctrico.

### **2.4.C. Identificación de Variables**

Las variables que se tomaran en cuenta para el proceso de lixiviación con cianuro son:

**Variable independiente**

- Tiempo de lixiviación con cianuro

**Variable dependiente**

- Recuperación de oro y plata (%)

**Variables intervinientes controladas**

- Nivel de alcalinidad (pH)
- Granulometría
- Masa de cianuro de sodio por tonelada de mineral
- Relación Sólido/ Líquido

Las variables que se tomaran en cuenta para el proceso de electrodeposición directa de soluciones cianuradas de baja concentración son:

**Variable independiente**

- Diferencia de potencial eléctrico (V).
- Intensidad de corriente (A).

**Variable dependiente**

- Recuperación de oro y plata (%).

**Variables intervinientes controladas**

- Tipo y dimensiones del cátodo.
- Concentración de oro y plata en solución.
- Potencial catódico.
- pH.

#### 2.4.D. Operacionalización de Variables

Con el objetivo de relacionar las variables que intervinieron en los procesos de lixiviación con cianuro y electrodeposición directa de soluciones cianuradas se emplearan los balances de masa en hojas de cálculo, que nos permitirá analizar las variables en estudio.

Las variables dependientes de recuperación de Au y Ag se relacionan con las variables independientes a través del ajuste de ecuaciones en las gráficas de dispersión, en hojas de cálculo, La tabla 1 representa las variables estudiadas en la presente investigación.

**Tabla 1**

*Variables del estudio*

Variables		Definición	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Tiempo de lixiviación con cianuro	Es el tiempo de procesamiento necesario para obtener la mayor recuperación de Au y Ag.	El tiempo se mide en horas con la ayuda de un cronómetro.	Mayor recuperación de oro y plata.
	Diferencia de potencial eléctrico (V)	Razón entre el cambio de energía potencial, $\Delta E_p$ , de la carga $q$ y la magnitud de esta carga.	El voltaje se mide con la ayuda de un multímetro, y se reporta en voltios.	
	Intensidad de corriente (A)	La intensidad de corriente eléctrica (I) es la cantidad de electricidad o carga eléctrica (Q) que circula por un circuito en la unidad de tiempo (t).	La intensidad se controló con la ayuda de un multímetro y se reportó en amperaje (A).	
Dependiente	Recuperación de oro y plata (%)	Recuperación es la relación entre el peso del metal precioso en el concentrado de mineral y el del mismo componente en mineral de alimento de la misma operación unitaria, expresado en porcentaje y es indicativo de la eficiencia o rendimiento de una operación.	Eficiencia de recuperación de Au y Ag expresado en %.	Ensayos químicos de adsorción atómica y copelación.

*Nota:* Se presentan la definición, dimensión e indicadores de las variables.



## 2.5. Matriz de Consistencia

**Tabla 2**

*Matriz de consistencia*

<b>"RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA POR ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, DE BAJA CONCENTRACIÓN EN LA ZONA DE RÍO SECO - CARABAYLLO"</b>				
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>Hipótesis</b>	
			<b>Variables de la hipótesis general</b>	
			<b>Nombre de la variable</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>
¿La implementación a nivel laboratorio de una electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración logrará la recuperación de Au y Ag sustituyendo el uso de carbón activado?	Aplicar el proceso de electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración, sustituyendo el uso de carbón activado para recuperar Au y Ag en la zona de Río Seco - Carabayllo.	Se logrará recuperar Au y Ag mediante el proceso electrodeposición en soluciones cianuradas de baja concentración sustituyendo el uso de carbón activado, en la zona de Río Seco - Carabayllo.	Recuperación de oro y plata	Se reportan en términos porcentuales de oro y plata, como resultado de los ensayos químicos de los componentes.
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Variables de las hipótesis específicas</b>	
<b>Problema específico N°1</b>	<b>Objetivo específico N°1</b>	<b>Hipótesis específica N°1</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>
¿Cómo identificar los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies presentes en la muestra problema de la zona de Río Seco - Carabayllo?	Caracterizar la mineralogía de la muestra problema de la zona de Río Seco para identificar los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies de interés.	La caracterización mineralógica de la muestra problema de la zona de Río Seco - Carabayllo, identificará los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies de interés.	E y enlaces presentes.	Estos datos se observan en el microscopio óptico de luz polarizante.
			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( $\mu\text{m}$ ).
<b>Problema específico N°2</b>	<b>Objetivo específico N°2</b>	<b>Hipótesis específica N°2</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>
¿Cómo obtener soluciones de baja concentración en Au y Ag, en la zona de Río Seco - Carabayllo??	Realizar el proceso de lixiviación de minerales oxidados para obtener soluciones de baja concentración en Au y Ag, en la zona de Río Seco - Carabayllo.	Se obtendrá soluciones de baja concentración en Au y Ag mediante el proceso de lixiviación de minerales oxidados, en la zona de Río Seco - Carabayllo.	Tiempo de lixiviación.	Estos datos se recolectan con el uso de un cronómetro, y se reportan en horas.
<b>Problema específico N°3</b>	<b>Objetivo específico N°3</b>	<b>Hipótesis específica N°3</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>
¿Como influye las variables de la intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico en la recuperación Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición de soluciones cianuradas de baja concentración?	Recuperar Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición de soluciones cianuradas de baja concentración, estudiando las variables de intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico.	Aumentará la recuperación Au y Ag mediante el proceso de electrodeposición de soluciones cianuradas de baja concentración, a una mayor intensidad de corriente y menor diferencia de potencial eléctrico.	Intensidad de corriente.	Se reportan en amperios (A), como resultado del control del proceso utilizando un amperímetro.
			Diferencia de potencial eléctrico.	Se reportan en términos de voltaje (V) utilizando un voltímetro.

*Nota:* Datos del planteamiento del problema organizados.

## CAPÍTULO III: Marco Teórico

### 3.1. Antecedentes

En la década pasada se desarrollaron varios estudios sobre la electroobtención de oro a partir de soluciones diluidas de cianuro y baja concentración de oro, como los realizados por (Brandon y otros, 1987) en el centro de investigación BP de Gran Bretaña y García en el Instituto de Investigaciones Mineras - Universidad Nacional de San Juan, Argentina; donde se concluye que es técnica y económicamente factible para capacidades pequeñas de producción. Se recomienda el estudio de nuevos materiales catódicos de mejor calidad y respuesta electrolítica.

(Paulino & Salazar, 2019) en su tesis “Variables que influyen en la electrodeposición del oro a partir de soluciones cianuradas diluidas en la empresa Ecoservicios e ingeniería limpia S.A.C – Puente Piedra – Lima”, evaluó celdas electrolíticas con aspectos físicos y técnicos similares a las usadas en el proceso Zadra, basándose en la eficiencia de los electrodos porosos y el uso de circuitos mecánicos que aumentan la capacidad de transferencia de masa al electrodo.

Para el desarrollo experimental empleó soluciones diluidas de complejos cianúricos de forma pura y con adición de elementos contaminantes (con la finalidad de evaluar el efecto de estos materiales). Analizó la eficiencia y el consumo de energía en el proceso como resultado de reacciones químicas que ocurren en el fenómeno de electrodeposición de oro que son básicamente: La reducción del elemento oxígeno y la evolución del hidrógeno. El dispositivo mecánico fue usado para la recirculación del electrolito, lo que significó un aumento de elementos electroactivos en solución, logrando así una recuperación de oro a más de 99%. El autor sostiene que los electrodos de acero inoxidable son más eficientes para el proceso electrometalúrgico por la

distribución y homogeneidad que presenta su área expuesta, comparado con la lana de acero templado convencional.

El autor concluye que la intensidad de corriente aumenta a 0.7 A y limita la electrodeposición de oro para concentraciones de 0.01 moles por litro y que para soluciones de mayor concentración, el potencial de electrodeposición de oro se hace más negativo. Sostiene que el cobre metálico empieza a electrodepositarse con un voltaje de -0.86 V (SHE).

(Calloapaza, 2020) en su tesis “Obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la escuela profesional Ingeniería Metalúrgica UNA Puno 2018”, desarrollo 5 pruebas metalúrgicas experimentales de electrodeposición, analizando el efecto de la densidad de corriente y el tiempo de electrodeposición en función de la recuperación de plata. Concluye que para una densidad de corriente de 3.2 A/m<sup>2</sup> recupera 93.57% del metal de interés en un tiempo de 40 minutos. Para el análisis de la variable tiempo, empleo una densidad de corriente de 0.6 A/m<sup>2</sup> y en un tiempo de 130 minutos logró recuperar 92.11% de plata.

(Cruz, 2016) en su tesis “Evaluación de los parámetros para el diseño y construcción de una celda de electro obtención para recuperar oro”, evaluó el efecto de las variables de operación como: La temperatura de operación, tiempo del proceso, concentración del electrolito y la recuperación de metales usando electrodos de acero inoxidable 304 L.

El autor realizó pruebas metalúrgicas de electrodeposición variando la intensidad de corriente, proceso que recuperó hasta un máximo de 99.04% de oro, para 25 Amperios y 2.6 voltios, como variables independientes de la operación.

(García, 2020) en su tesis doctoral “Estudio cinético termodinámico de la recuperación de oro y plata en soluciones acuosas de cianuro mediante procesos electroquímicos”, sostiene que es posible la electrodeposición directa de las soluciones cianuradas por medio del proceso metalúrgico electroquímico de electrocoagulación, proceso que se usa comumente en el tratamiento de aguas residuales. El proceso consiste en el uso de electrodos de hierro o hidróxido de aluminio en forma de red, que al desprenderse en forma de nanopartículas, forman coágulos que atrapan a los metales preciosos. Las pruebas de electrocoagulación llegaron a recuperar oro y plata desde 28% a 99%.

(Poisot y otros, 2012) en su artículo “Influence of oxygen reduction and hydrogen evolution in the gold and silver direct electrodeposition process from thiourea solutions in a filter press type reactor”, investigaron la recuperación de valores mediante la electrodeposición directa de oro y plata a partir de soluciones de tiourea en un reactor electroquímico tipo filtro prensa, utilizando como cátodo una placa de acero inoxidable 316. Así también, sustentaron la fuerte influencia que tienen las reacciones parásitas (desprendimiento de hidrógeno y reducción de oxígeno en el cátodo) sobre el proceso de electrodeposición de oro y plata. Además, mediante la manipulación del potencial de reducción y la velocidad de flujo, lograron minimizar la evolución de hidrógeno. Los autores enfatizaron en el gran valor, principalmente en el escalamiento del proceso de electrodeposición.

(Meng y otros, 2021) el artículo científico “Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery” demostraron que lograron recuperar oro a partir de soluciones provenientes de la lixiviación con yodo, la cual según afirma, llegó a recuperar más del 99% de los metales valiosos. Uno de los aspectos más importantes, señalado por los autores, es que el yodo se formó en el área del ánodo, en otras palabras, los reactivos utilizados

para la lixiviación del oro se enriquecieron en el área del ánodo durante el proceso de recuperación de oro por electrodeposición. Demostraron que la recuperación de yodo en el área del ánodo fue de 83 % y el anolito logró reciclarse. Concluyeron que el proceso de reciclaje del yodo en proceso de electrodeposiciones, logra resolver el problema del alto costo de la lixiviación por yodación.

## **3.2. Ubicación de Carabaylo**

### ***3.2.1. Ubicación Geográfica de la minería artesanal en Carabaylo***

Carabaylo es la ciudad de mayor área en la provincia de Lima y pertenece a uno de los 43 que conforman la capital de nuestro país. Se encuentra ubicado al norte de la capital y se extiende en ambos bordes del Río Chillón. Es limítrofe con el distrito de Canta por el norte (Santa Rosa de Quives), por el sur con el distrito de Comas, por el este con Huarochirí y por el oeste limita con los distritos de Ancón y Puente Piedra.

Las coordenadas geográficas del distrito de Carabaylo son: 11°51'0" S, 77°2'0" W y tiene una altitud media de 230 a 500 msnm (Rivera, 2020).

### ***3.2.2. Accesibilidad – Río Seco***

El acceso al centro poblado Los Huertos de Río Seco es a través de la ciudad de Lima, recorriendo la Panamericana Norte hasta la Av. Túpac Amaru hasta el km 22, para luego desviar a la altura del Fundo Cassinelli y llegar al centro poblado. El tramo desde el Fundo hasta Río Seco es trocha (Solis, 2020).

## Figura 1

*Mapa Los Huertos de Río Seco*



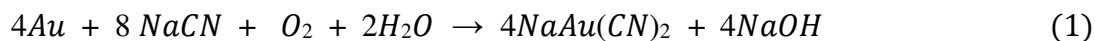
*Nota:* Ubicación del lugar de estudio (Mapacarta.com).

### 3.3. Tratamiento por Lixiviación con Cianuro en Menas de Oro y Plata

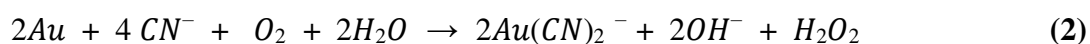
La lixiviación con cianuro es un tratamiento hidrometalúrgico que se basa en la disolución de oro y plata en soluciones con cianuro y a pH alcalino, es decir a un pH determinado para que garantice la formación de complejos (CN<sup>-</sup> metal) (Meza, 1981).

El cianuro es un compuesto químico bastante tóxico y aún no ha sido reemplazado en la industria de los metales preciosos que se explotan por lixiviación, debido a la relación beneficio/costo que lo hace atractivo industrialmente (Andrade & Hodouin, 2005; Srithammavut, 2008).

Hasta la fecha se han realizado diversos estudios de investigación que describen la mecánica de la disolución de metales preciosos (oro y plata), la reacción química que gobierna el proceso de cianuración de menas de oro fue propuesta por Elsner (1846) y se describe en la reacción 1 (Meza, 1981; Yannopoulos, 2012).



La reacción descrita anteriormente (1) se forma con dos reacciones que ocurren a la vez y describen completamente el mecanismo de la disolución de metales preciosos, y fue propuesta por Bodländer (1896) (Meza, 1981; Marsden & House, 2006; Yannopoulos, 2012).

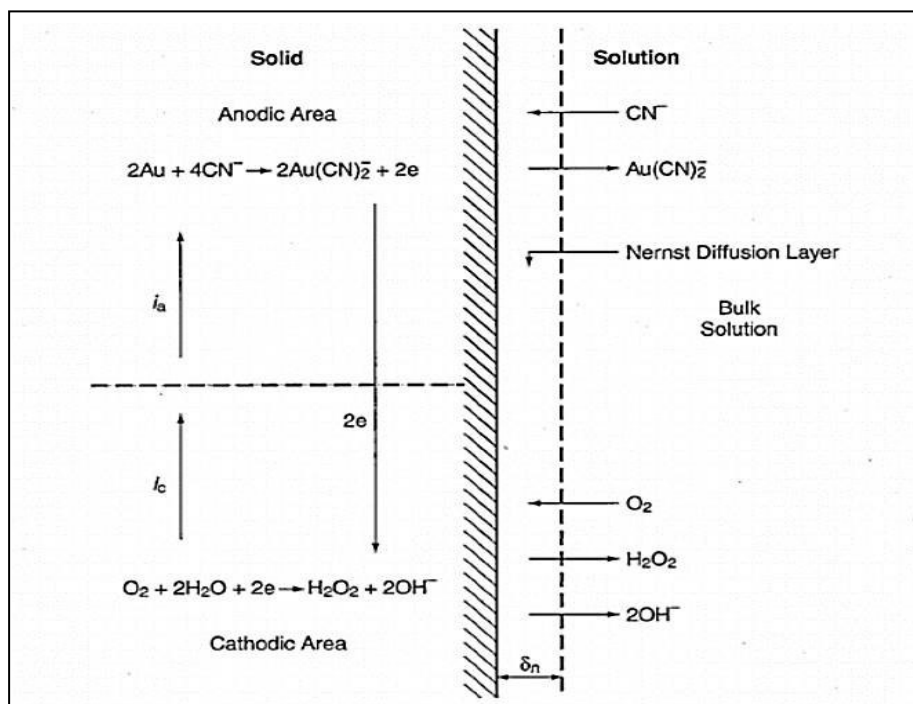


La reacción química 2 demuestra que se necesita oxígeno para que el oro se oxide y forme un complejo cianaurico ( $Au(CN)_2^-$ ) (Habashi & Toor, 1979).

La extracción de oro mediante soluciones cianuradas es un mecanismo de reacciones electroquímicas, y el mecanismo de este fenómeno se representa en la figura 2 (De la Torre & Guevara, 2006).

**Figura 2**

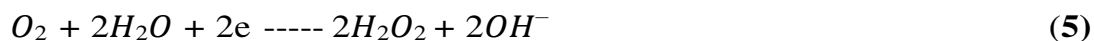
*Reacciones químicas de la solubilidad de oro en soluciones cianuradas*



*Nota:* Reacciones de oro y cianuro (Marsden & House, 2006).

En la figura 3 se puede observar que se produce la oxidación del cianuro como ion y se lleva a cabo a un potencial de -0.6 V, en la zona anódica, y en la zona catódica se lleva a cabo la reducción del elemento oxígeno con un potencial de reacción de 0.4 V.

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



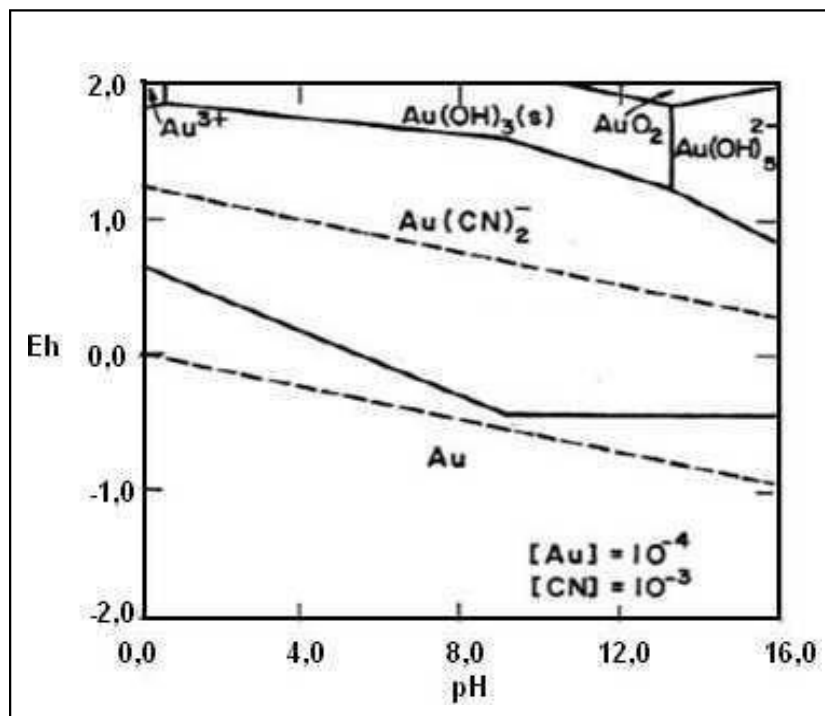
La figura 3 muestra el diagrama Eh-pH para el mecanismo de la disolución de oro y se observa que la formación del complejo cianaurico se lleva a cabo a un potencial de -0.6 V y se



puede apreciar los campos de estabilidad de los compuestos formados a diferentes condiciones (Eh y pH) (Marsden & House, 2006; Yannopoulos, 2012).

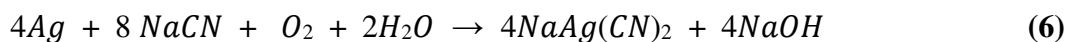
**Figura 3**

*Diagrama de Pourbaix para el proceso de cianuración de oro*



*Nota:* Para una temperatura de 25°C (Marsden & House, 2006).

Las especies de minerales con contenido de oro generalmente llevan plata en su estructura molecular en distintas proporciones y el mecanismo de la disolución de este metal (plata) en soluciones con cianuro obedece a las mismas reacciones electroquímicas, el cual se describe en la reacción 6 (Habashi & Toor, 1979; Higuera y otros, 2007).



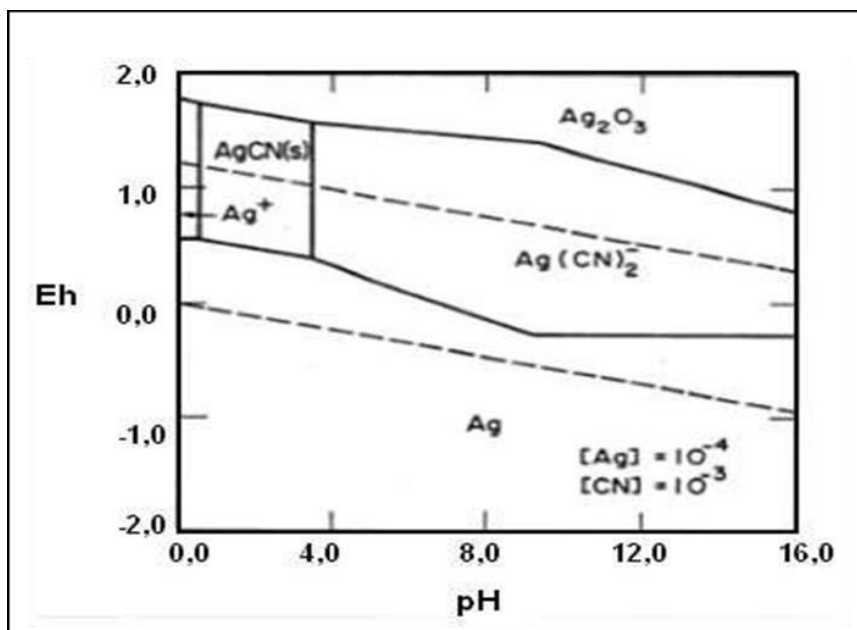
En la reacción 7, se muestra la reacción electroquímica que ocurre en la zona anódica para la disolución de la plata, y se lleva a cabo con un potencial de  $-0,31$  V.



En la figura 4 se observa el diagrama Eh – pH para la disolución de la plata con cianuro y las regiones de estabilidad de la formación del ion complejo  $Ag(CN)_2^-$ , se observa que la formación tiene lugar con un amplio rango de pH (Marsden & House, 2006).

**Figura 4**

*Diagrama de Pourbaix para la cianuración de plata*



*Nota:* Para una temperatura de  $25^\circ C$  (Marsden & House, 2006).

La diferencia con respecto a la disolución del oro en soluciones cianuradas se debe a la reducción del oxígeno de forma directa a la formación de iones hidroxilo como se describe en la ecuación 8, donde se puede observar que la pérdida de electrones es cuatro y no dos como es el

caso de la disolución del oro, también se observa que no se lleva a cabo la formación de peróxido de hidrógeno.



De ambas reacciones para la solubilidad de oro y la plata, se puede decir que la velocidad de disolución de la plata es menor que la correspondiente para el oro en un sistema cianurado, dado que el coeficiente del oxígeno es 0.25 mientras que para el oro es de 0.5 (Marsden & House, 2006).

Estudios de investigación han demostrado que, a concentraciones bajas de cianuro de sodio, de 0.0025 moles de soluto por litro de solución, la velocidad para que la plata sea disuelta es casi la mitad de lo que se requiere para la disolución de oro. Por lo contrario, señalan que el exceso de soluto, del orden de 0.1 moles por litro de solución, aumenta la cinética de reacción de disolución de la plata, reduciendo la solubilidad de oro por efecto de la necesidad de estos metales por reaccionar con el cianuro libre (Marsden & House, 2006).

### ***3.3.1. Factores que Afectan al Proceso de Lixiviación con Cianuro***

Las principales variables que condicionan la solubilidad de oro y plata son:

- Nivel de cianuro en solución (concentración)
- Nivel de oxigenación del sistema
- La alcalinidad – pH
- La temperatura
- Agitación del sistema
- Granulometría

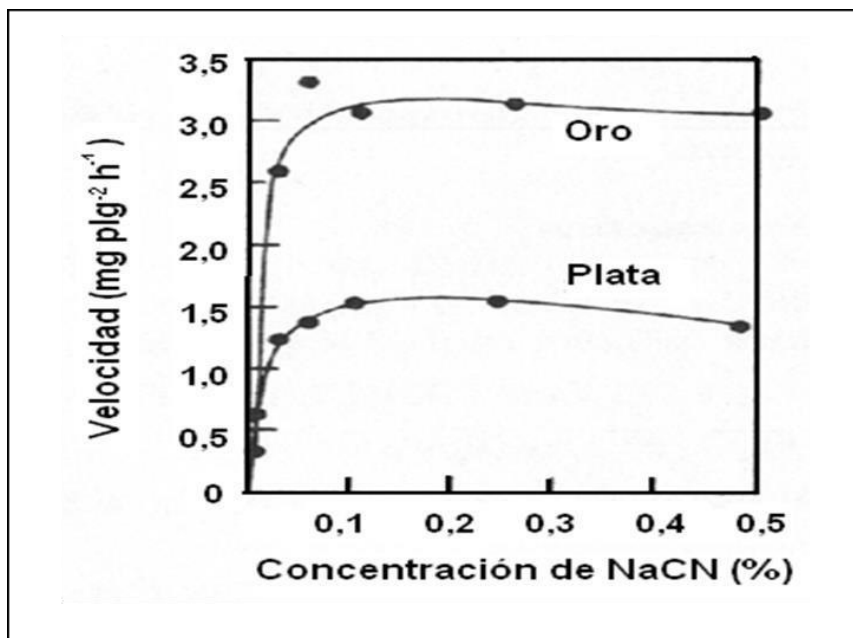
- Densidad de pulpa
- Composición de la mena

### 3.3.1.1. Concentración de Cianuro

Se ha podido concluir tras diversos estudios de investigación realizados para identificar la consecuencia de la masa de cianuro en solución con respecto a la velocidad de solubilidad de oro y plata, que la transformación de oro a complejo cianurico aumenta con la concentración de cianuro, llegando a un valor límite, y por encima de este valor la disolución disminuye ligeramente, la figura 5 intenta describir dicho fenómeno (Ramires & Sanchez, 2016; Morales, 2018).

**Figura 5**

*Concentración de soluciones cianuradas en función de la solubilidad de oro y plata*



*Nota:* Las curvas mostradas son de oro y plata (Marsden & House, 2006).

De acuerdo con el balance de masa de la reacción química 6 se necesitan dos moles de cianuro de sodio para solubilizar un mol de oro; sin embargo, en la práctica se trabaja con un exceso de cianuro debido a la presencia de especies cianicidas, es decir, compuestos que también son capaces de reaccionar con el cianuro (Marsden & House, 2006).

La concentración de cianuro se mantiene con la adición de este reactivo en el medio, teniendo en cuenta que la disolución del cianuro en agua es de orden 4.8g/L a 25° C de temperatura. El consumo industrial es de orden 0.2 a 0.3 g/L para especies que no contienen cianicidas y lo contrario es 1 g/L (Logsdon y otros, 2001; Ramires & Sanchez, 2016).

### **3.3.1.2. Concentración de Oxígeno**

La concentración de oxígeno es necesaria para que ocurra la reacción de disolución de oro y plata en un medio cianurado (Romero & Flores, 2010). La baja solubilidad que presenta el oxígeno en el agua es de orden de 8.2 mg/L a 25°C, siendo este valor la limitante de la reacción, y disminuye conforme aumenta la temperatura y disminuye la presión. Por lo descrito anteriormente podemos concluir que el proceso hidrometalúrgico de cianuración depende del flujo de la cantidad de oxígeno a transportar hacia el área superficial del metal (Huai y otros, 2017).

Siendo necesario el oxígeno en un sistema de cianuración de metales preciosos, se desarrollan dos métodos para garantizar la presencia de este elemento en cantidades suficientes en solución: proceso hidrometalúrgico de cianuración bajo presión y, con la adición de agentes oxidantes como oxígeno y peróxido de hidrógeno. Estos métodos se justifican cuando el contenido metálico es alto y justifican su tratamiento (Marsden & House, 2006).

Mediante investigaciones desarrolladas para determinar la influencia de la cantidad de oxígeno en solución, se determinó que cuando la relación  $[CN^-]/[O_2]$  tiende a 6, se garantiza una alta cinética de disolución de oro (Meza, 1981).

### **3.3.1.3. pH Y Alcalinidad**

Se puede apreciar en el diagrama de Pourbaix de la figura 3 que a un pH de 9.5 se forma el complejo de Au(I), pero también ocurre la hidrólisis del cianuro en agua, por esta razón es que generalmente se lixivia con cianuro a un pH de 10.5, evitando la formación del ácido cianhídrico (Arce & Cano, 2020).

Si bien es cierto se requiere un pH mínimo de 10.5 para evitar la formación del cianhídrico, cada mineral en particular tiene sus propias condiciones de alcalinidad que garantizan la máxima eficiencia en la disolución de los metales preciosos, sin embargo, resultados de investigación demostraron que la cinética de disolución de los metales preciosos se reduce, a pH mayores a 11, encontrando un efecto bastante significativo a un pH mayor a 12 (Soto, 2021).

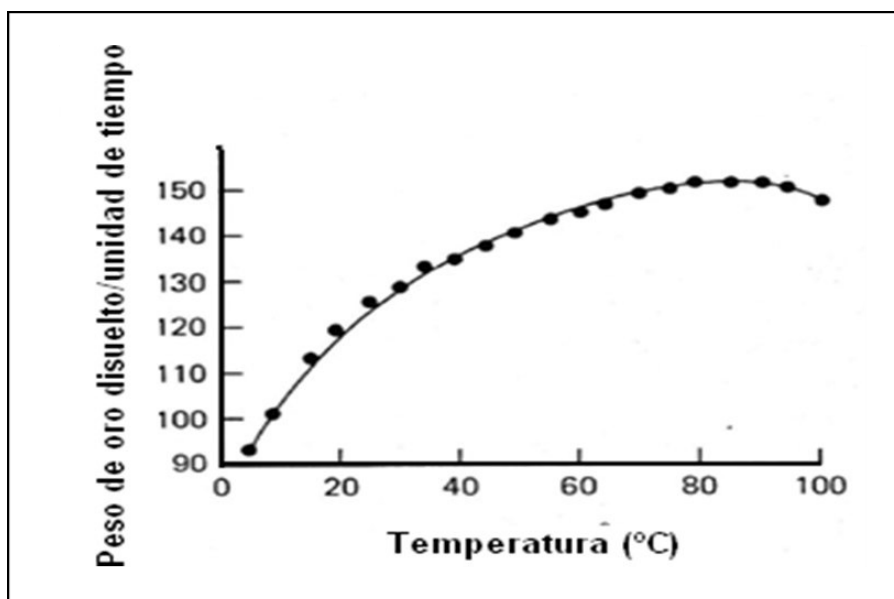
El modificador de pH generalmente usado es la cal u óxido de calcio, que cumple las funciones de: neutralizar los compuestos que acidifican el sistema (Arce & Cano, 2020).

### **3.3.1.4. Temperatura**

La cinética de lixiviación de los metales preciosos aumenta con la temperatura, como consecuencia de la excitación de las moléculas que conforman el sistema cianurado en el proceso hidrometalúrgico. En la figura 6 se muestra el efecto de esta variable sobre el proceso (Vesga, 2010).

**Figura 6**

*Recuperación de metales preciosos en función de la temperatura (°C)*



*Nota:* La curva mostrada es de oro (Marsden & House, 2006).

Se demostró en laboratorio mediante pruebas experimentales que la cinética de disolución tiene un máximo hasta una temperatura cercana a los 85°C, y para temperaturas mayores a este valor, la cinética es lenta, debido a la baja solubilidad del oxígeno (Marsden & House, 2006).

En las pruebas experimentales se demostró que, a temperaturas de 20 a 85°C, la velocidad de disolución de metales preciosos aumentó de 20 a 25 % para un rango de temperatura de 20 a 85° C, respectivamente (Yannopoulos, 2012).

En la industria, el costo para elevar la temperatura del proceso no es rentable para minerales marginales, y se opera a temperatura ambiente, que modifican la recuperación de estos metales (Meza, 1981).

### **3.3.1.5. Agitación**

Aumentar la cinética de agitación del sistema, generará acelerar la cinética de solubilidad de los metales preciosos, como consecuencia de la reducción del tamaño de la capa que envuelve a la molécula, lo que favorece la difusión de los reactantes en el sistema (Bustinza, 2019).

El aumento de la cinética presenta un límite superior, y valores por encima de este límite, no representa algún cambio significativo en la disolución de las especies. En la industria los sistemas de agitación pueden ser mecánicos o neumáticos (Meza, 1981; Yannopoulos, 2012).

### **3.3.1.6. Granulometría del Mineral**

La granulometría del mineral debe garantizar que las superficies de las partículas de interés comercial entren en contacto con el reactivo y pueda ocurrir la reacción. El tamaño del mineral depende de la eficiencia de molienda y es un parámetro que se determina en laboratorio para luego ser escalado a nivel industrial.

También se puede decir que una sobremolienda del mineral incrementa la liberación de otras especies que compiten por las reacciones con el sistema cianurado (De la Torre & Guevara, 2006).

Cuando se trabaja con una razón cianuro/oxígeno de valor 6, la solubilidad de las especies de interés tiene un límite máximo de 34  $\mu\text{m}/\text{h}$ , para partículas de 45  $\mu\text{m}$  un tiempo de 13 horas y 44 horas para un tamaño de 150  $\mu\text{m}$ . Granulometrías superiores a este último son difíciles de mantenerlas en suspensión y alteran las condiciones de trabajo por su gran tamaño, perjudicando las condiciones del tanque (Soto, 2021).



### **3.3.1.7. Dilución de Pulpa**

La lixiviación con cianuro se realiza con un rango de 35 % a 50% de sólidos y depende de la granulometría del mineral, gravedad específica de la mena y la composición mineralógica de la muestra que puedan determinar la viscosidad de la pulpa. Se conoce que a bajo porcentaje de sólidos en operación se hace máxima la difusión, y, por lo contrario, un máximo porcentaje de sólidos incrementa el tiempo de residencia de la pulpa en los tanques de agitación (Marsden & House, 2006).

### **3.3.1.8. Naturaleza del Mineral**

El oro que no se encuentra liberado, difícilmente se podrá recuperar con el proceso hidrometalúrgico de cianuración, dado que la superficie del metal de interés no se encuentra expuesta para entrar en contacto con el ion cianuro, a este tipo de materiales se le conoce como refractarios, y su recuperación es menor al 80% y en algunos casos no justifican económicamente su tratamiento por medios convencionales. Este mineral refractario es también conocido como oro encapsulado, ya que el oro se encuentra incluido en la matriz de algún otro mineral como sulfuros, telurios, carbonatos, etc. (De la Torre & Guevara, 2006).

En algunas menas, la presencia de ciertos compuestos puede reducir la cinética de disolución, dado que estas especies consumen cianuro y oxígeno para formar otros complejos y se detallan a continuación (Aghamirian & Yen, 2005; Bustinza, 2019).

## **3.4. Electrometalurgia**

La electrometalurgia es la ciencia que estudia el fenómeno de la recuperación de metales aplicando energía eléctrica sobre un medio de transporte (electrolito).

Se pueden diferenciar dos tipos de electrodeposición y depende del medio de transporte de los electrones:

**a. Procesos electrometalúrgicos en soluciones acuosas**

Aplicada fundamentalmente a la recuperación electrometalúrgica que no superan los 333°K de cobre, zinc, níquel, cobalto, plomo, plata, oro y también metales menores como cadmio, cromo, manganeso, galio, titanio y telurio.

**b. Electrolisis de sales fundidas**

Procesos de recuperación electrometalurgia de metales como aluminio, litio, magnesio, potasio y otros metales menores como tierras raras, titanio, vanadio, wolframio, zirconio y torio, a temperaturas de trabajo generalmente altas (Domic, 2001).

**3.4.1. Proceso Electroquímico**

Se denomina proceso electroquímico aquel fenómeno que relaciona la corriente eléctrica con las reacciones químicas y se caracteriza por presentar un tipo de reacción de oxidación y otra de reducción. En la reacción anódica se pierden electrones, dado que el sistema libera electrones. La reacción catódica que se produce en un sistema electroquímico involucra una reacción química de reducción, donde participan los electrones que se desprendieron en el ánodo y se desplazan a través de los conductores de electrones que unen el cátodo con el ánodo (Morales A. , 2003).

Se puede concluir que, en un proceso electroquímico, los iones se desplazan libremente en una solución electrolítica. Los iones con carga negativa se desplazan hacia el electrodo de carga positiva buscando el equilibrio, y los iones con carga positiva hacia el electrodo de carga negativa,

este fenómeno ocurre porque las cargas intentan mantener el equilibrio químico. El electrolito se define como un medio de transporte de cargas positivas o negativas (Chang, 2006).

Podemos distinguir dos tipos de procesos electroquímicos y depende de la naturaleza con que se lleve a cabo el fenómeno, sea o no espontáneo. Los procesos electroquímicos espontáneos se llevan a cabo naturalmente y la celda se le conoce como pila o galvánica. Los procesos electroquímicos que no ocurren mediante un proceso natural se dan como consecuencia de aplicar energía eléctrica al sistema, y su proceso ocurre en una celda electrolítica.

Las recuperaciones de metales mediante procesos electroquímicos necesitan la inducción de corriente eléctrica para que pueda ocurrir el transporte de carga metálica. La naturaleza de la energía eléctrica puede ser de tipo continua o directa a la celda, permitiendo el transporte masa con cargas negativas entre el ánodo y el cátodo. Se puede decir que la energía eléctrica actúa como medio impulsor de partículas de carga negativa (Soto & Solís, 2012).

### 3.4.1.1. Ley de Faraday

La ley de Faraday demuestra que la cantidad de materia depositada sobre una superficie es función de, la inducción de energía eléctrica que se difunde a través de la celda, y el tiempo de operación del proceso electrometalúrgico (Cáceres, 2007).

Su expresión es:

$$m_F = \frac{M}{nF} \times I \times t$$

$m_F$  : metal depositado (g)

$M$  : peso molecular del metal depositado

$n$  : valencia del ion metálico en la solución

$F$  : 96487 Coulomb/equivalente (valor de la constante de Faraday)

- I : Intensidad de corriente en amperios, que circula en el sistema
- t : tiempo de ocurrencia de la reacción electroquímica(s)

### 3.4.1.2. Equivalente Electroquímico

El equivalente electroquímico (EEQ) se define como la cantidad de sustancia que se deposita cuando circula una corriente de un Amperio en un segundo. El equivalente electroquímico de un metal queda determinado por las siguiente formula (Cáceres, 2007).

$$EEQ = \frac{M}{nF}$$

Donde:

EEQ = g/culombios,

M=peso atómico (gramos),

n=valencia y

F= constante de Faraday (96500 culombios)

### 3.4.1.3. Eficiencia de Corriente

La cantidad de metal que se deposita sobre una superficie con una determinada corriente y en un tiempo establecido, es calculada mediante la ecuación de Faraday (m F), y corresponde a la masa teóricamente depositada, ya que considera que toda la corriente un sistema ideal, donde se asume que toda la corriente solo es aprovechada para depositar el metal, para un proceso electroquímico real, se toman en cuenta diversas reacciones, como las llamadas parásitas y como consecuencia, la masa depositada realmente (mR) es menor a la cantidad teórica o esperada.

La eficiencia de corriente es la relación entra la masa que se deposita en un proceso real y el calculado teóricamente, según la ley de Faraday:

$$EC(\%) = \frac{m_R}{m_F} \times 100$$

En términos conceptuales, se define como la fracción de corriente que se utiliza en el proceso electroquímico. Por ejemplo, si la EC es de 0.9 (90%), quiere decir que solamente el 90% de la energía eléctrica es aprovechada por el sistema y el 10% de energía que resta, está siendo empleado en otras reacciones que acompañan al sistema (parasitarias). Una de las reacciones que se llevan a cabo y consumen energía es la que produce la reducción del hidrógeno (Cáceres, 2007).

### **3.4.2. Termodinámica del Proceso Electroquímico**

Los aspectos termodinámicos que se deben tomar en cuenta en un proceso electroquímico donde se trabaja con un cátodo y un ánodo conectados a través de un medio conductor e inmersos en una solución electrolítica, están basados en la termodinámica de procesos electroquímicos que estudia el fenómeno de equilibrio termodinámico de los electrodos, donde las fases presentes en el sistema cuentan con distintos potenciales eléctricos, y para que una reacción se lleve a cabo es necesario que las cargas se reacomoden dentro de ella, lo que equivale a decir que se realizará un trabajo eléctrico y cuyas conclusiones más importantes, relacionadas con los procesos de electroobtención y electrorefinación de metales, se resumen en la escala normal de potenciales, la ley de Nernst y en los diagramas de equilibrios potencial – pH.

En consecuencia, se puede afirmar (Wen, 2021):

- Para que se lleve a cabo una reacción química, es necesario que la variación de energía libre del sistema sea menor a cero o la variación de energía del sistema sea mayor a cero, en conclusión, la energía del cátodo es mayor a la energía del ánodo.

- Si la energía del cátodo es menor a la energía del ánodo, se dice que no tendrá a lugar una reacción electroquímica, siendo la variación de energía libre mayor a cero.
- Se dice que una reacción alcanza el equilibrio cuando la variación de energía es igual a cero.

### 3.4.2.1. Potencial de Electrodo

El potencial de un electrodo no es medible por sí solo, es decir representa una escala relativa y no absoluta. Es decir que cuando un metal M se encuentra inmerso en un medio acuosa (Sol) o llamada electrolito, en la que existe la presencia de iones,  $Mz+$ , se forma una interfaz M | Sol en la que se forma una distribución de los iones cargados que las constituyen. La diferencia de potencial eléctrico de las especies en el metal (electrones, y iones) y de la solución (iones) se conoce como potencial absoluto (Torres & Montes, 2017).

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{metal}} - \Phi_{\text{solución}}$$

El potencial absoluto del electrodo no es medible y solo es comparable con otros potenciales, llamados de referencia,  $\Delta\Phi_{\text{ref}}$ .

Por otro lado, si tomamos a uno de ellos como potencial de referencia, entonces la gradiente de potencial que se da entre ellos se le conoce como potencial redox  $E(\text{Ox/Red})$ . Comúnmente se asume como electrodo de referencia al electrodo normal de hidrógeno (ENH) y a su potencial absoluto se le asume el valor de cero (Torres & Montes, 2017).

Por lo tanto, se define al potencial relativo, a la gradiente entre los potenciales absolutos del electrodo y el que se asume como referencia (Cáceres, 2007).

$$E = \Phi_{\text{metal}} - \Phi_{\text{ref}} = \Delta\Phi - \Delta\Phi_{\text{ref}}$$

### 3.4.2.2. Electrodo de Referencia

Los electrodos de referencia que se usan en los procesos electroquímicos proporcionan un potencial estable de tal forma que las diferencias de potencial detectadas en la celda pertenecen al electrodo de trabajo. A continuación, se describen los electrodos de referencia más usados y considerados importantes para el tema de investigación.

### 3.4.2.3. Escala Normal de Potenciales

Para efectos de elaboración de los potenciales de electrodos, se toma como referencia al electrodo normal de hidrógeno. Se midió el potencial de los electrodos metálicos y no metálicos a condiciones estandarizadas de un mol, 298°K y una atmosfera de presión (Cáceres, 2007).

### 3.4.3. Aspectos Cinéticos del Proceso Electroquímico

La cinética electroquímica estudia la velocidad de las reacciones químicas cuando los electrodos no se encuentran en reposo, que equivale decir que estudia el sistema cuando sobre ella se le incide una corriente eléctrica  $I$  (Morales A. , 2003).

#### 3.4.3.1. Densidad de Corriente

Es la corriente que se suministra sobre un área determinada, y normalmente se registra en amperes/dm<sup>2</sup>. La importancia de esta variable radica en que dependiendo de la superficie del material a electrodepositar se podrá saber la cantidad de corriente que necesita el sistema, en

función al baño electrolítico del que se trate. Mediante estos datos se podan conocer el peso del metal depositado y el tiempo necesario para determinado depósito (Panchi, 2009).

Por lo tanto, podemos expresar a la densidad de corriente mediante la siguiente expresión matemática:

$$i = \frac{I}{S}$$

- i : densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>)  
 I : corriente que pasa por el electrodo (A)  
 S : superficie del electrodo (m<sup>2</sup>)

La cantidad de corriente por unidad de área se relaciona con la velocidad de la reacción que se lleva a cabo en el electrodo según:

$$V_{\text{reaccion}} = \frac{i}{nF}$$

En los procesos electrometalúrgicos, la cantidad de corriente por unidad de área es proporcional a la velocidad de la reacción (Morales A. , 2003).

### **3.5. Producción Nacional de Oro y Plata con Impacto del Covid19**

Como consecuencia de lo acatado en el Decreto Supremo N° 044-2020-PCM que declaró el Estado de Emergencia Nacional como consecuencia del COVID – 19, para el periodo de marzo y abril del 2020, las empresas mineras solo poder realizar labores críticas y con mínimo personal.

Se llevo a cabo el reinicio con normalidad de operaciones en 4 fases, alcanzando en julio del presente año las tres primeras fases y lograr el reinicio general de las labores mineras (Ministerio de Energía y Minas, 2021).



### ***3.5.1. Producción Nacional de Oro con Impacto del Covid19***

La producción de oro a nivel nacional, en octubre del 2021 alcanzó un incremento positivo del 6.7%, comparado con el mismo mes del año pasado. Este incremento en la producción aurífera se dio como resultado de compañías mineras auríferas como Minera Poderosa S.A con un incremento de 12.4%, y Minera Aurífera Retamas S.A con un 42.4%. Como consecuencia de estos incrementos en la producción aurífera por empresas la producción acumulada hasta octubre alcanzó las 79.7 TMF. Esta producción significó un aumento del 12,1 % con relación al mismo mes del año 2020.

La producción aurífera a nivel de empresas mantuvo a Compañía Minera Poderosa S.A. como la principal productora de este metal precioso, con una contribución del 9.7% del total de la producción nacional. Luego le siguen en el ranking de productores Minera Yanacocha S.R.L. y Minera Aurífera Retamas S.A, con una contribución del 8.2% y 7.5%, respectivamente.

En términos de productores regionales, La Libertad se posicionó en primer lugar con una participación del 31.9% del total de la producción. Así mismo, Cajamarca y Arequipa contribuyeron en la producción nacional con 20.5% y 18.4% respectivamente, manteniéndose en segundo y tercer puesto a nivel nacional de productores de oro (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

La tabla 2 describe la variación en términos porcentuales de la producción nacional de oro en los meses de octubre del 2020 y 2021, así mismo se muestra el porcentaje de variación de la producción enero – octubre de los periodos 2020 y 2021.

**Tabla 3**

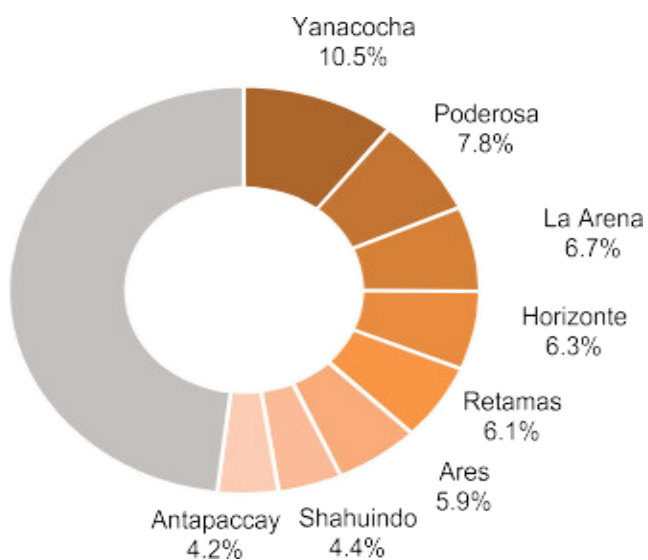
*Producción aurífera estimada enero – octubre incluyendo mineros artesanales*

Metal		Octubre			Enero-Octubre		
		2020	2021	Var. %	2020	2021	Var. %
Cobre	(TMF)	207,214	214,600	3.6%	1,721,273	1,893,486	10.0%
Oro	(g finos)	7,843,158	8,369,529	6.7%	71,068,947	79,692,923	12.1%
Zinc	(TMF)	142,741	121,049	-15.2%	1,040,823	1,292,908	24.2%
Plata	(kg finos)	265,487	269,436	1.5%	2,162,515	2,740,577	26.7%
Plomo	(TMF)	22,613	21,629	-4.4%	192,953	219,175	13.6%
Hierro	(TMF)	1,092,972	1,199,606	9.8%	6,728,011	10,396,190	54.5%
Estaño	(TMF)	2,156	1,976	-8.4%	16,086	22,219	38.1%
Molibdeno	(TMF)	2,857	2,920	2.2%	26,229	27,683	5.5%

*Nota:* Los datos producción se presenta en toneladas métricas finas (TMF), gramos y kilogramos finos (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

**Figura 7**

*Estructura de la producción de oro por empresas, enero – marzo*



*Nota:* Los datos están representados en porcentaje (%) (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

### **3.5.2. Producción Nacional de Plata con Impacto del Covid19**

Como consecuencia de la reactivación económica en mayo del 2021, la producción de plata en nuestro país tuvo una recuperación significativa. Cabe mencionar que más del 30% de plata producidas en nuestro territorio corresponden a la producción de compañías mineras como: Antamina, Buenaventura y Ares.

Las estadísticas pusieron de manifiesto el crecimiento de 1.5% en octubre del presente año con respecto a la producción del año 2020, siendo este dato un reflejo de la producción de compañías mineras como Ares S.A.C con una contribución del 59.1%, Volcan que representa un 21.4%, y Minera Chinalco Perú con 25.7%, ambos comparados con el mismo mes del año pasado.

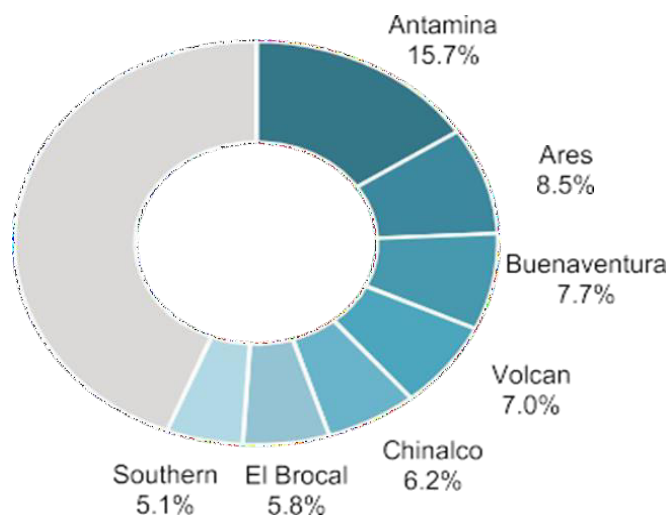
El Ministerio de energía y minas afirma que la producción nacional de plata registro un incremento de 26.7% en octubre del 2021, en comparación con el mismo mes del año 2020.

Según cifras del MINEM, Antamina se mantuvo como primer productor de plata con un porcentaje de 15.7 % con respecto al total, seguido de compañía minera Ares y Buenaventura, con una participación de 8,5% y 7.7%, respectivamente.

En la figura 8 se muestra la contribución de las empresas en términos porcentuales en la producción argentífera a nivel nacional (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

**Figura 8**

*Empresas productoras de plata y su porcentaje de contribución*



*Nota:* Los datos están representados en porcentaje (%) (Ministerio de Energía y Minas, 2021)

## **CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación y Mineralogía de la Muestra Problema**

### **4.1. Tipo y Diseño de Investigación**

La elaboración y el desarrollo del siguiente proyecto de investigación es de tipo experimental, dado que utilizó experimentos basados en el método científico, aplicando los principios de la caracterización mineralógica de la muestra problema, procesos hidrometalúrgicos de lixiviación con cianuro y electrodeposición de soluciones cianuradas, con el objetivo de recuperar Au y Ag en soluciones de baja concentración en el distrito de Río Seco, Carabayllo.

La investigación también es cualitativa, cuantitativa y deductiva, dado que interpretó la presencia de los minerales en la muestra problema, se analizó y relacionó las variables independientes y dependientes en cada prueba experimental realizada.

### **4.2. Unidad de Análisis**

La unidad de análisis corresponde al poblado de Río Seco, distrito de Carabayllo; lugar donde se obtuvo la información necesaria para el desarrollo del proyecto de tesis.

### **4.3. Muestra de Estudio**

Corresponde al mineral muestreado de los yacimientos metálicos oxidados con contenido de Au y Ag en Río Seco - Carabayllo

La caracterización mineralógica de la muestra problema se realizó en la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y las pruebas metalúrgicas en laboratorio de procesamiento de minerales de la empresa METALANDIN SAC.

#### **4.4. Tamaño de Muestra**

La cantidad de material que se muestreo para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de investigación fueron de aproximadamente 120 Kg, cantidad necesaria para el desarrollo de las pruebas de moliendabilidad, caracterización mineralógica, ensayos químicos, cinética de lixiviación y electrodeposición de la solución cianurada. El material fue preparado mecánicamente hasta un tamaño de 100%- Malla 10 y cuarteado en el equipo Jones con la finalidad de almacenar una muestra testigo.

#### **4.5. Procedimiento Metodológico de la Investigación**

El desarrollo del proyecto de investigación fue de la siguiente manera:

- Recopilación de información pertinente para el desarrollo del proyecto de investigación.
- Muestreo representativo de mineral de cabeza del poblado de Rio Seco, distrito de Carabaylo.
- Preparación mecánica del mineral de cabeza (chancado y molienda).
- Caracterización mineralógica y ensayo químico de cabeza.
- Pruebas de lixiviación del mineral oxidado.
- Pruebas metalúrgicas de electrodeposición de Au y Ag a partir de las soluciones cianuradas provenientes del proceso de lixiviación.
- Reportar los resultados obtenidos mediante balances metalúrgicos.

#### **4.6. Equipos y Materiales**

Durante el desarrollo de las pruebas metalúrgicas se usaron equipos y materiales procedentes de los laboratorios de metalurgia extractiva de la empresa METALANDIN SAC, así

también, los ensayos de caracterización mineralógica se desarrollaron la empresa GEOXINPESAC

los cuales son:

#### **4.6.1. Equipos**

- Chancadora de quijada
- Chancadora de rodillos
- Microscopio Óptico
- Ro-Tap
- Molino de bolas
- Horno de secado
- Mesa de rodillos
- Balanza digital
- Equipo de titulación
- Potenciómetro
- Fuente de poder
- Transformador
- Otros

#### **4.6.2. Materiales**

- Tela tul
- Lana de acero
- Plaquillas de acero inoxidable
- Recipiente de plástico
- Bomba de agua

- Mangueras de plástico 0.5 mm de diámetro
- Cables de cobre
- Serie de tamices
- Pissetas
- Matraces
- Embudo
- Botellas para cianuración (damajuanas)
- Vasos precipitados
- Papel tornasol
- Goteros
- Papel filtro
- EPPs (Guantes, lentes, respiradores, otros)

#### **4.7. Análisis Mineralógico de la Investigación**

El mineral oxidado con contenido de Au y Ag muestreado en la zona de Río Seco, Carabayllo se preparó mecánicamente hasta alcanzar una granulometría de 81.15 % - 200 Malla, posteriormente preparó una briqueta debidamente pulida para ser observada en el microscopio óptico de luz reflejada para su análisis correspondiente, lo cual permitió identificar los componentes, distribuciones, enlaces y grados de liberación de las especies de interés.

En la tabla 4 se detallan las especies mineralógicas observadas y los grados de liberación correspondientes.



**Tabla 4**

*Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados*

<b>Minerales</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Volumen (%)</b>	<b>Grado De Liberación (%)</b>
Electrum	(Au,Ag)	El	0.01	0
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	Cp	0.18	0
Covelita	CuS	Cv	0.18	0
Pirita	FeS <sub>2</sub>	Py	1.78	82.99
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hm	1.22	96.97
Goethita	FeO.OH	Gt	4.25	69.47
Gangas		GGs	92.4	98.34

*Nota:* Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC

La distribución volumétrica de las especies de minerales se reportó en términos porcentuales, de igual manera para los grados de liberación de las especies; determinados para todas especies de minerales presentes en la muestra problema y se detallan en la tabla 3.

La tabla anterior se puede interpretar de la siguiente manera:

El electrum ocupa el 0.01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100% se encuentra formando enlaces con otras especies de minerales

La calcopirita representa el 0.18% de la muestra, permaneciendo enlazada en el 100% de la muestra.

La covelita representa el 0.18% del total de la muestra problema, permaneciendo enlazada en el 100% de la muestra.

La pirita representa el 1.78% del total de la muestra problema, encontrándose libre el 82.99% de este mineral.

La hematita representa el 1.22% del total de la muestra problema, encontrándose libre el 96.97% de este mineral.

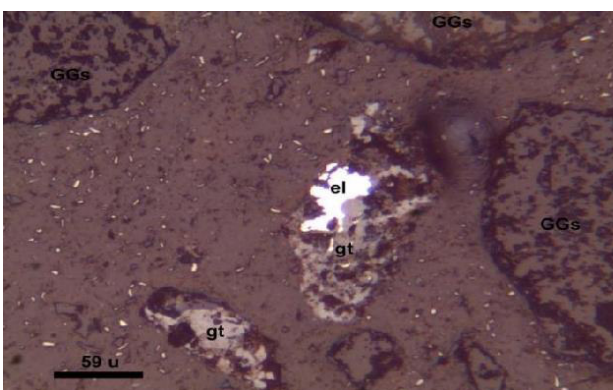
La goethita representa el 4.25% del total de la muestra problema y el 69.47% de este mineral se encuentra liberado.

Las gangas representan el 92.40% del total de la muestra problema, de los cuáles el 98.34% se encuentran liberadas.

El motivo por la cual las especies de minerales que se lograron observar e identificar al microscopio no se encuentran totalmente liberadas, se debe a los enlaces que se encuentran formando.

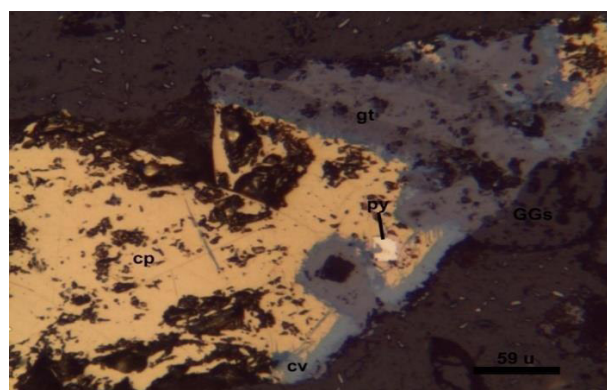
### Figura 9

*Enlace electrum - goethita (el-gt) y partículas libres de goethita (gt) y de gangas (GGs). 200X.*



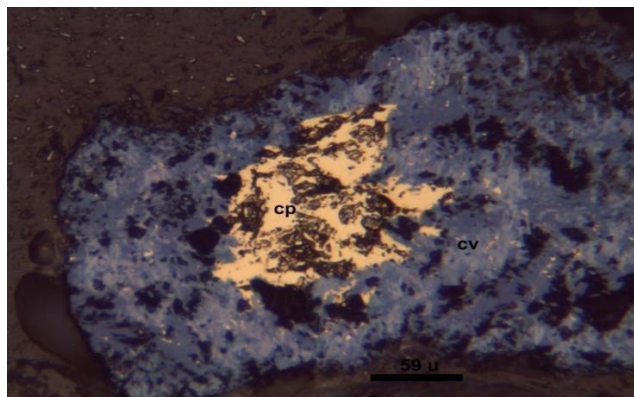
### Figura 10

*Enlace calcopirita (cp) - covelita (cv), con la pirita (py), con la goethita (gt) y con la ganga (GGs). 200X.*



**Figura 11**

*Enlace calcopirita (cp) - covelita (cv). 200X.*



*Nota:* Información proporcionada por Geoexploracion Ingenieros Perú SAC.

## CAPÍTULO V: Pruebas Experimentales

### 5.1. Pruebas de Moliendabilidad del Mineral

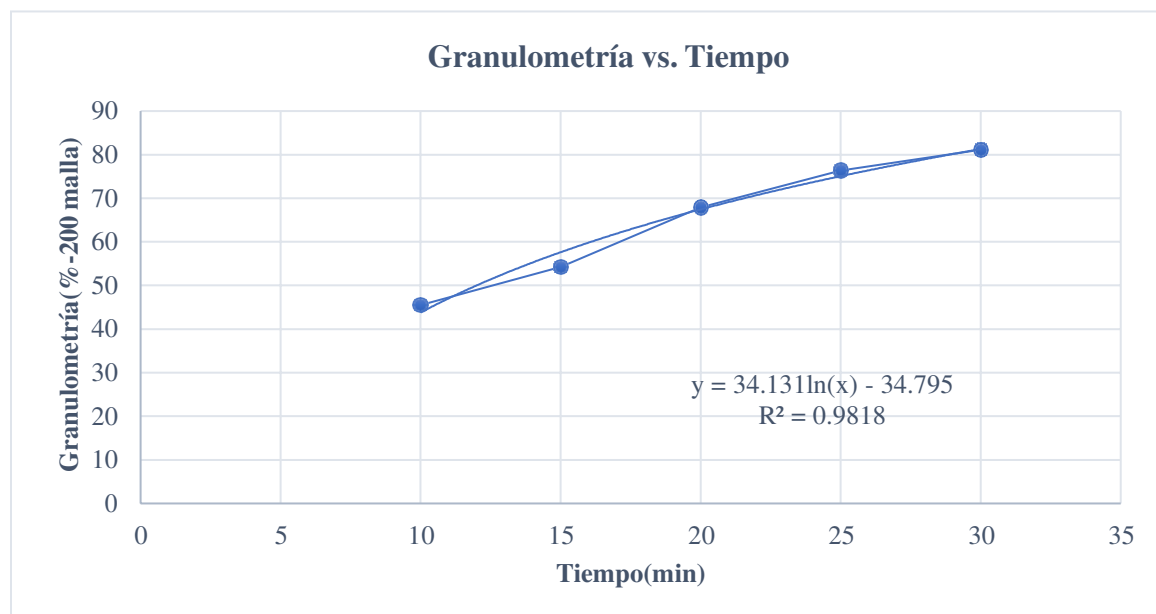
La molienda constituye la última etapa en el proceso de reducción de tamaño de las partículas de mineral y se llevó a cabo en el molino de bolas del laboratorio de preparación mecánica de minerales en las instalaciones del laboratorio METALANDIN S.A.C, obteniéndose la curva de moliendabilidad para determinar el tiempo necesario para obtener una granulometría de 80 % - 200 Malla, a partir de una muestra con granulometría de 100 % - 10 Malla.

**Tabla 5**

*Granulometría de molienda*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Granulometría (%-200 malla)</b>
10	45.53
15	54.27
20	67.91
25	76.38
30	81.15

*Nota:* Los datos de la granulometría están representados en porcentaje (%).

**Figura 12***Curva de moliendabilidad*

*Nota:* Se presenta la tendencia de la curva con una ecuación logarítmica (%).

## 5.2. Pruebas de Cianuración del Mineral de Cabeza

El mineral de cabeza fue molido hasta una granulometría de 80% - 200 malla para ser procesado por lixiviación en botellas con agitación mecánica utilizando cianuro de sodio y cal como regulador de pH, por un tiempo de 24 horas. Se tomó en cuenta el tiempo de cianuración como variable independiente y como variable de respuesta la recuperación de Au y Ag.

En la tabla 6 se describen las condiciones de operación.

### 5.2.1. Condiciones del Proceso de Cianuración

**Tabla 6**

*Parámetros del proceso de lixiviación con cianuro*

<b>Peso de la muestra</b>	250g.
<b>Dilución de la pulpa (L/S)</b>	2/1
<b>Tamaño de partícula</b>	80.47% -200 malla
<b>Tiempo de lixiviación con cianuro</b>	6,12,18,24 hrs.
<b>Nivel de alcalinidad (pH)</b>	10.5
<b>Concentración de cianuro</b>	500 ppm

*Nota:* Parámetros operativos del proceso.

### 5.2.2. Resultados de la Cianuración a 6 Horas

**Tabla 7**

*Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 6 hrs.*

Componentes	Peso ó Volumen	Ley		Contenido Fino(mg)		Recuperación (%)	
	(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Ag (g/TM) ó (mg/lt)	Au	Ag	Au	Ag
<b>Cabeza</b>	250	17.51	52.7	4.38	13.18	100.00	100.00
<b>Solución Rica</b>	500	6.87	11.24	3.44	5.62	72.51	44.43
<b>Relave</b>	250	5.21	28.12	1.30	7.03	27.49	55.57
<b>Cabeza Calculada</b>		18.95	50.60				

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

### 5.2.3. Resultados de la Cianuración a 12 Horas

**Tabla 8**

*Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 12 hrs.*

Componentes	Peso ó Volumen	Ley		Contenido Fino(mg)		Recuperación (%)	
	(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Ag (g/TM) ó (mg/lt)	Au	Ag	Au	Ag
<b>Cabeza</b>	250	17.51	52.70	4.38	13.18	100.00	100.00
<b>Solución Rica</b>	500	8.24	18.72	4.12	9.36	92.93	69.62
<b>Relave</b>	250	1.37	16.34	0.34	4.09	7.68	30.38
<b>Cabeza Calculada</b>		17.85	53.78				

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

### 5.2.4. Resultados de la Cianuración a 18 Horas

**Tabla 9**

*Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 18 hrs.*

Componentes	Peso ó Volumen	Ley		Contenido Fino(mg)		Recuperación (%)	
	(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Ag (g/TM) ó (mg/lt)	Au	Ag	Au	Ag
<b>Cabeza</b>	250	17.51	52.70	4.38	13.18	100.00	100.00
<b>Solución Rica</b>	500	8.53	22.54	4.27	11.27	95.57	86.39
<b>Relave</b>	250	0.79	7.10	0.20	1.78	4.43	13.61
<b>Cabeza Calculada</b>		17.85	52.18				

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

### 5.2.5. Resultados de la Cianuración a 24 Horas

**Tabla 10**

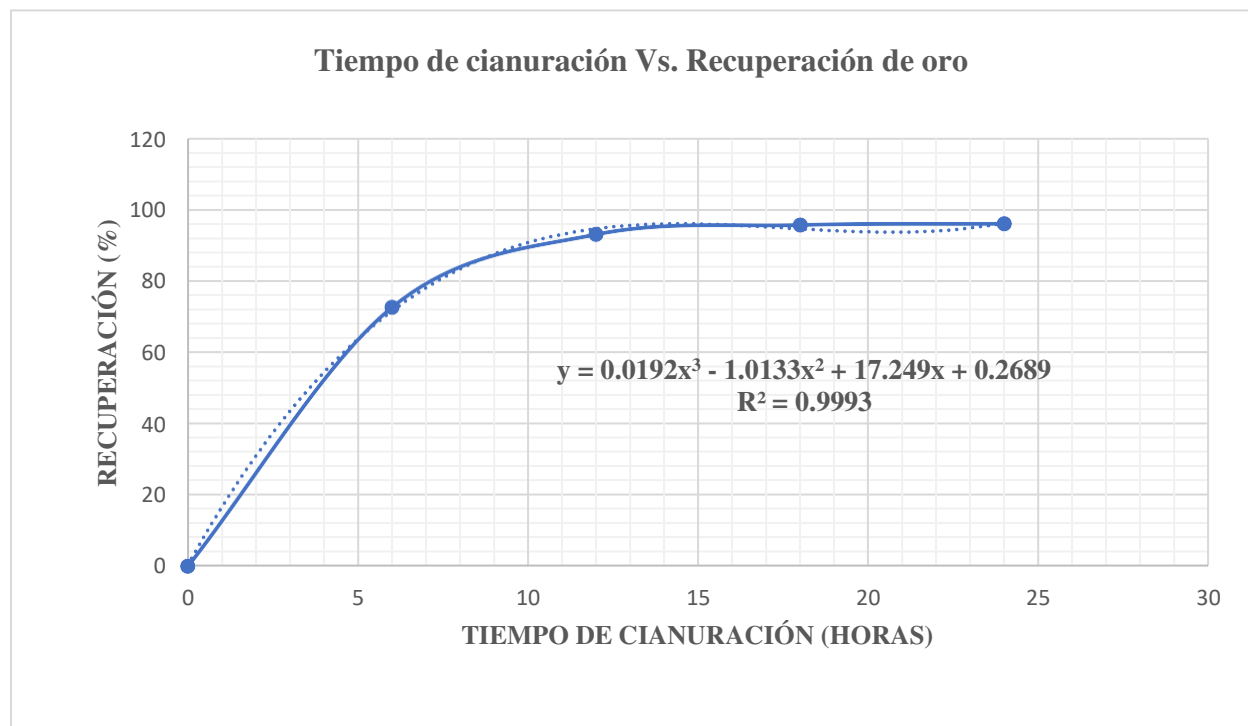
Tratamiento de datos obtenidos para la lixiviación con cianuro a 24 hrs.

Componentes	Peso ó Volumen	Ley		Contenido Fino		Recuperación (%)	
	(ml) ó (g)	Au (g/TM) ó (mg/lt)	Ag (g/TM) ó (mg/lt)	Au	Ag	Au	Ag
<b>Cabeza</b>	250	17.51	52.70	4.38	13.18	100.00	100.00
<b>Solución Rica</b>	500	8.69	22.56	4.35	11.28	95.92	86.55
<b>Relave</b>	250	0.74	7.01	0.19	1.75	4.08	13.45
<b>Cabeza Calculada</b>		18.12	52.13				

Nota: La recuperación se presenta en porcentaje (%).

**Figura 13**

Recuperación porcentual de oro con respecto al tiempo de lixiviación con cianuro

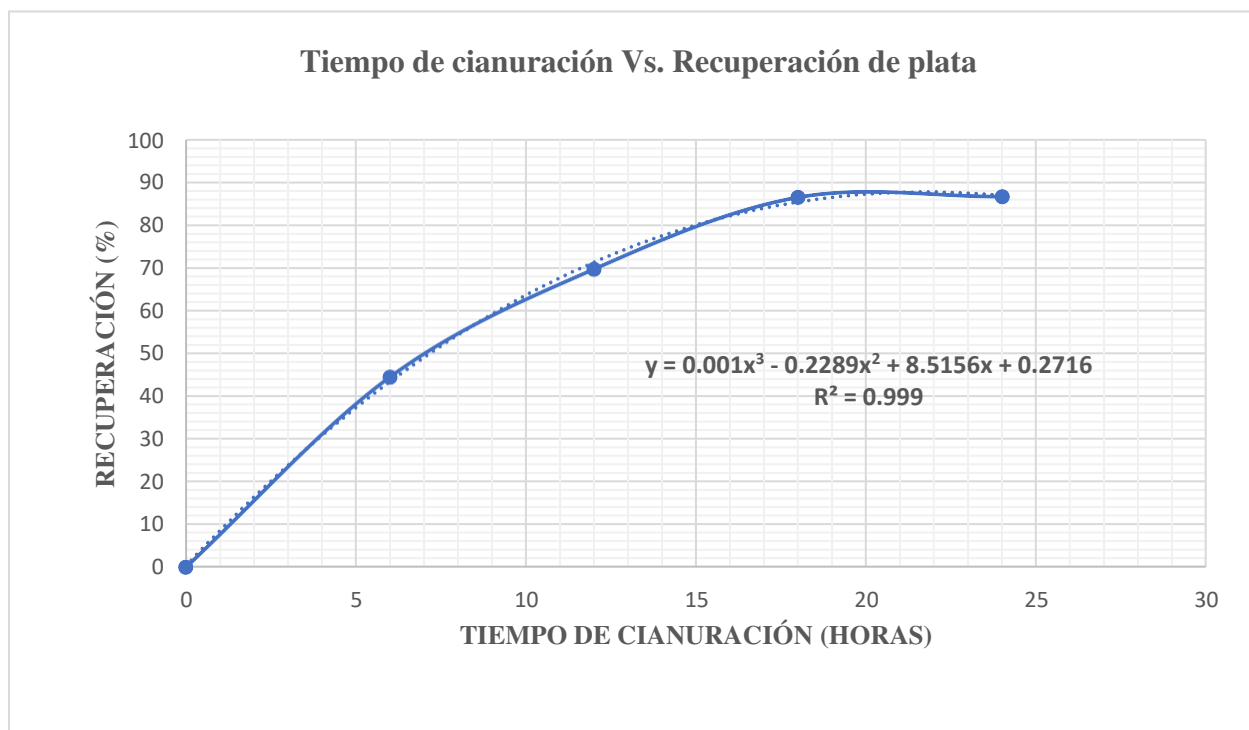


Nota: Se presenta la tendencia de la curva con una ecuación polinómica de tercer grado (%).



**Figura 14**

*Recuperación porcentual de plata con respecto al tiempo de lixiviación con cianuro.*



*Nota:* Se presenta la tendencia de la curva con una ecuación polinómica de tercer grado (%).

### 5.3. Pruebas de Electrodeposición de Soluciones Cianuradas

Se hizo un sistema de electrodeposición en circuito cerrado empleando tres celdas plásticas transparente, un motor sumergible de 3.33 l/min de capacidad estándar y electrodos de acero inoxidable, empleándose como cátodo lana de acero comercial. Se preparó suficiente muestra para realizar 3 pruebas de electrodeposición con un volumen de solución de 1.3 L cada una, lo que significó lixiviar 8 botellas en 24 horas. Para el desarrollo de las pruebas de cianuración se empleó una mesa de rodillo de capacidad de 4 botellas.

Se experimentó con amperajes de 1.6 A, 5.87 A, y 7.95 A para valores de potencial eléctrico de 0.54 V, 3.91V, y 3.50V, respectivamente. Para el desarrollo experimental se empleó

lana de acero en cantidades similares para el cátodo, de esta forma se determinó la influencia de la intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico sobre la eficiencia en electrodeposición de Au y Ag.

### 5.3.1. Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°1

Las condiciones iniciales de las pruebas metalúrgicas de electrodeposición de Au y Ag se muestran en la tabla 11. Los valores de intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico estuvieron en función a los datos experimentales que emplearon los autores mencionados anteriormente.

**Tabla 11**

*Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°1.*

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>
Capacidades de celda	1.4 L
	1.8 L
	2.4 L
Volumen de solución	1.3L
Conductividad iónica	5.37 ms/cm a 25 °C
Temperatura	25 °C
Peso de lana de acero	9.119 gr.
Intensidad de corriente	1.60 (A)
Voltaje	0.54 V
Tiempo de electrodeposición	100 min
Área catódica	$0.0609 \times 9.119 = 0.56 \text{ m}^2$

*Nota:* Parámetros operativos del proceso.

El área catódica se calculó en función a la densidad superficial de valor  $0.0609 \text{ g/m}^2$ , y el peso de la lana de acero correspondiente.

Caudal promedio: 0.159 l/s

Se calcula la densidad de corriente aplicada:

$$D_c = I / A_c$$

$$D_c = 1.60 \text{ A} / 0.56 \text{ m}^2 = 2.86 \text{ A/m}^2$$

**Tabla 12**

*Características finales de la solución lixiviada*

<b>Condiciones finales</b>	<b>Cantidad</b>
Volumen de solución	1.3 L
Conductividad iónica	4.59 ms/cm
Temperatura	25°C

*Nota:* Parámetros del proceso.

Después de la electrodeposición se procedió a tomar una alícuota de 10 ml. y se obtuvo las siguientes características:

### 5.3.1.1. Balance Metalúrgico de Electrodeposición de Oro Prueba 1

**Tabla 13**

*Ensayos químicos del proceso de electrodeposición de oro y plata*

<b>Componentes</b>	<b>Volumen (Lt)</b>	<b>Ley(mg/Lt)</b>		<b>Metálico (mg)</b>		<b>Recuperación (%)</b>	
		<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>
Solución rica	1.30	8.69	22.56	11.30	29.33		
Solución Residual	1.30	7.54	20.33	9.802	26.43		
Producto electrodepositado				1.50	2.9	<b>13.27</b>	<b>9.89</b>

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

### 5.3.2. Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°2

Las condiciones iniciales de las pruebas metalúrgicas de electrodeposición de Au y Ag se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°2*

Características	Cantidad
Capacidades de celda	1.4
	1.8
	2.4
Volumen de solución	1.3L
Conductividad iónica	5.47 ms/cm a 25 °C
Temperatura	25 °C
Peso de lana de acero	9.08 gr.
Intensidad de corriente	5.87 (A)
Voltaje	3.91 V
Tiempo de electrodeposición	100 min
Área catódica	$0.0609 \times 9.08 = 0.60 \text{ m}^2$

*Nota:* Parámetros operativos del proceso.

Caudal promedio: 0.127 l/s

Se calcula la densidad de corriente aplicada

$$D_c = I / A_c$$

$$D_c = 5.87 \text{ A} / 0.60 \text{ m}^2 = 9.78 \text{ A/m}^2$$

**Tabla 15***Características finales de la solución lixiviada*

<b>Condiciones finales</b>	<b>Cantidad</b>
Volumen de solución	1.3 L
Conductividad iónica	4.57 ms/cm
Temperatura	25°C

*Nota:* Parámetros del proceso.

Después de la electrodeposición se procedió a tomar una alícuota de 10 ml para su respectivo análisis químico.

### 5.3.2.1. Balance Metalúrgico de Electrodeposición de Oro Prueba 2

**Tabla 16***Balance metalúrgico prueba 2*

<b>Componentes</b>	<b>Volumen (Lt)</b>	<b>Ley(mg/Lt)</b>		<b>Metálico (mg)</b>		<b>Recuperación (%)</b>	
		<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>
Solución rica	1.30	8.69	22.56	11.30	29.33		
Solución Residual	1.30	4.76	10.11	6.19	13.14		
Producto electrodepositado				5.11	16.19	<b>45.22</b>	<b>55.20</b>

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

### 5.3.3. Pruebas Metalúrgicas de Electrodeposición N°3

Las condiciones iniciales de las pruebas metalúrgicas de electrodeposición de Au y Ag se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Condiciones iniciales de electrodeposición de Au y Ag prueba N°3*

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>
Capacidades de celda	1.4
	1.8
	2.4
Volumen de solución	1.3L
Conductividad iónica	5.08 ms/cm a 25 °C
Temperatura	25 °C
Peso de lana de acero	9.37 gr.
Intensidad de corriente	7.95 (A)
Voltaje	3.50 V
Tiempo de electrodeposición	100 min
Área catódica	$0.0609 \times 9.37 = 0.57 \text{ m}^2$

*Nota:* Parámetros operativos del proceso.

Se calcula la densidad de corriente aplicada

$$D_c = I / A_c$$

$$D_c = 7.95 \text{ A} / 0.57 \text{ m}^2 = 13.95 \text{ A/m}^2$$

**Tabla 18**

*Características finales de la solución lixiviada*

<b>Condiciones finales</b>	<b>Cantidad</b>
Volumen de solución	1.3 L
Conductividad iónica	4.17 ms/cm
Temperatura	25°C

*Nota:* Parámetros del proceso.

Después de la electrodeposición se procedió a tomar una alícuota de 10 ml para su respectivo análisis químico.

### 5.3.3.1. Balance Metalúrgico de Electrodeposición de Oro Prueba 3

**Tabla 19**

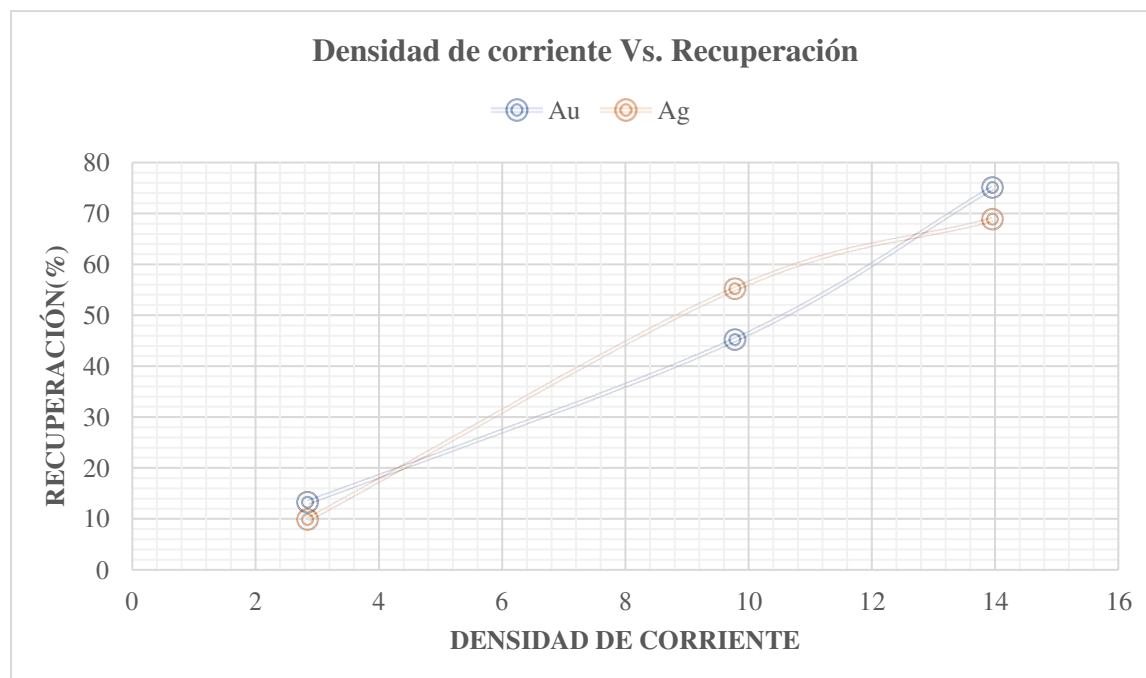
*Balance metalúrgico prueba 3*

Componentes	Volumen (Lt)	Ley(mg/Lt)		Metálico (mg)		Recuperación (%)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Solución rica	1.30	8.69	22.56	11.30	29.33		
Solución Residual	1.30	2.17	7.04	2.82	9.15		
Producto electrodepositado				8.48	20.18	<b>75.04</b>	<b>68.80</b>

*Nota:* La recuperación se presenta en porcentaje (%).

**Figura 15**

*Recuperación de oro y plata en función de la densidad de corriente*



*Nota:* Las curvas mostradas son de oro y plata.

#### 5.4. Eficiencia final del proceso – Extracción total

Para hallar la eficiencia se considera la masa del metal depositado:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Peso del metal depositado}}{\text{Peso teórico}} \times 100\%$$

Y el peso del metal depositado lo obtenemos con:

$$m = \frac{\text{Peq} \times I \times t}{96500}$$

**Tabla 20**

*Recuperación total - prueba N°1*

Componentes	Contenido metálico(mg)		Eficiencia (%)	
	Au	Ag	Au	Ag
Mineral de cabeza	11.38	34.26		
Metal electroobtenido	1.50	2.90	13.18	8.46

*Nota:* Los datos son presentados en miligramos (mg) y porcentaje (%)

#### Eficiencia de Corriente – Prueba 1

$$m = \frac{65.66 \times 1.60 \times 6000}{96500} = 6.532\text{g}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{1.50}{6532} \times 100\% = 0.023\%$$

**Tabla 21**

*Recuperación total - prueba N°2*

Componentes	Contenido metálico(mg)		Eficiencia (%)	
	Au	Ag	Au	Ag
Mineral de cabeza	11.39	34.26		
Metal electroobtenido	5.11	16.19	44.86	47.25



*Nota:* Los datos son presentados en miligramos (mg) y porcentaje (%)

### Eficiencia de Corriente – Prueba 2

$$m = \frac{65.66 \times 5.87 \times 6000}{96500} = 23.964\text{g}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{5.11}{23964} \times 100\% = 0.021\%$$

**Tabla 22**

*Recuperación total - prueba N°3*

Componentes	Contenido metálico(mg)		Eficiencia (%)	
	Au	Ag	Au	Ag
<b>Mineral de cabeza</b>	11.39	34.26		
<b>Metal electroobtenido</b>	8.48	20.18	74.45	58.90

*Nota:* Los datos son presentados en miligramos (mg) y porcentaje (%)

### Eficiencia de Corriente – Prueba 3

$$m = \frac{65.66 \times 7.95 \times 6000}{96500} = 32.456\text{g}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{8.48}{32456} \times 100\% = 0.026\%$$

## CAPÍTULO VI: Interpretación de los Resultados Obtenidos

Para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas, el mineral se preparó mecánicamente para determinar su moliendabilidad, determinado que después de 25 minutos de molienda se reduce a un tamaño de 76.38% - 200 Malla. Según lo mencionado para desarrollo posterior de las pruebas de cianuración se desarrolló en un tiempo de 30 minutos de molienda obteniendo una granulometría de 81.15 % - 200 Malla, con lo que se pudo observar la liberación de las especies.

Las pruebas metalúrgicas de lixiviación con cianuro se plantearon con un rango de tiempo del proceso hasta las 24 horas y tomando alícuotas cada 6 horas. Así se logró determinar que en un tiempo de 6 horas se recupera 72.51% de Au y 44.3% de Ag, y un máximo de 95.92 % de Au y 86.55% de Ag en un tiempo de 24 horas de lixiviación. Con estas soluciones de 24 horas lixiviación con cianuro, se realizaron pruebas de electrodeposición en un tiempo de 100 minutos variando la intensidad de corriente y diferencia de potencial eléctrico.

Los resultados más representativos de las pruebas metalúrgicas de electrodeposición fueron los siguientes: La primera prueba se realizó con una intensidad de corriente de 1.6A y 0.54V alcanzando una recuperación de Au de 13.27% y de Ag de 9.89%, 13.18% Au y 8.46% Ag de recuperación total en ambos procesos. La segunda prueba se realizó con una intensidad de corriente de 5.87 A y 3.91V alcanzando una recuperación 45.22% de Au y 55.20% de Ag, 44.86% Au y 47.25% de Ag de recuperación total en ambos procesos. La tercera prueba se realizó con una intensidad de corriente de 7.95 A y 3.50V alcanzando una recuperación 75.04% de Au y 68.80% de Ag, 74.45% Au y 58.90% de Ag de recuperación total en ambos procesos, siendo esta última la mejor prueba de electrodeposición.

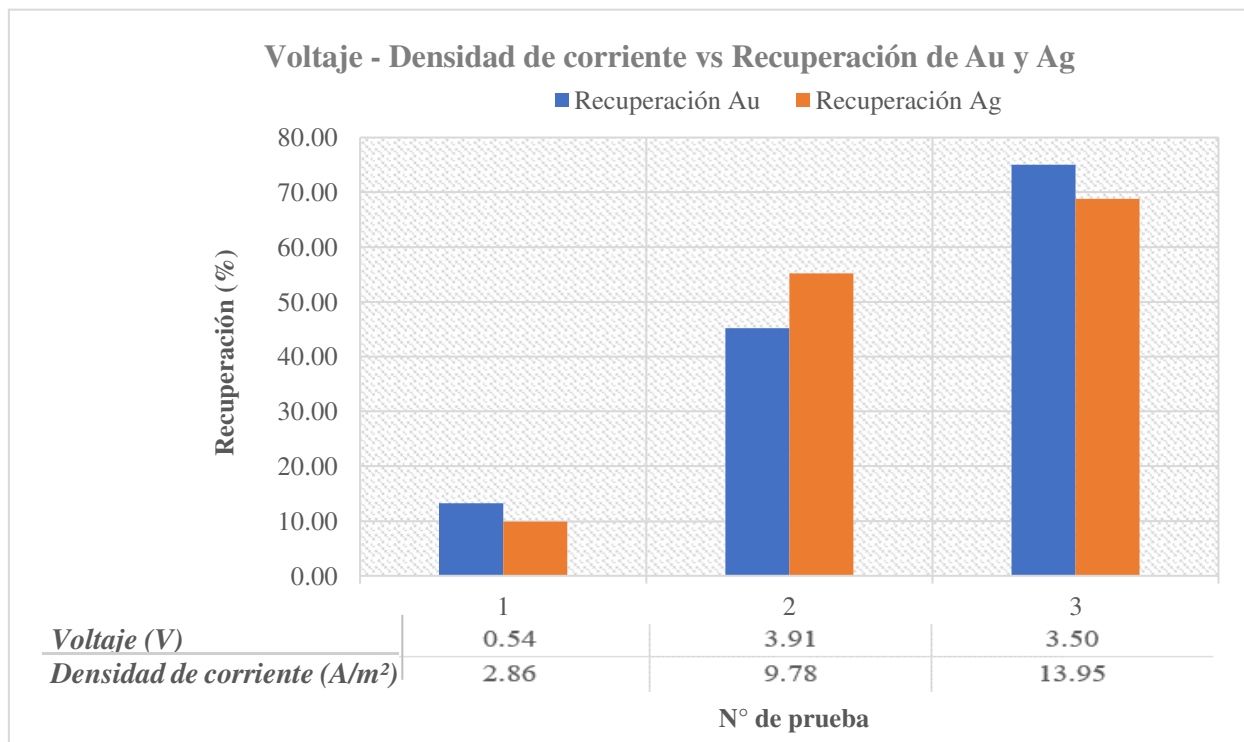
De lo experimentado se puede justificar que mientras subimos la intensidad de corriente, la recuperación aumenta, debido a que la intensidad de corriente aumenta la cinética de las reacciones electroquímicas que gobiernan el proceso, las cuales se describen de forma general en la ecuación 9.



En la siguiente gráfico de barras se puede observar la influencia de las variables de independientes de voltaje y densidad de corriente en la recuperación de Au y Ag.

**Figura 16**

*Gráfico de barras de la influencia de las variables independientes de voltaje y densidad de corriente, para la recuperación de oro y plata*



*Nota:* Las unidades son: Voltaje (voltios), densidad de corriente (Amperios/metros cuadrados), recuperación (%)

## CAPÍTULO VII: Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

- De la curva de moliendabilidad graficada para este mineral se concluye que el tiempo óptimo de molienda para lograr la suficiente liberación del metal valioso es de 30 minutos alcanzando una granulometría de 81.15% a Malla -200. Puesto que el mineral presenta gran dureza debido a la presencia predominante de ganga.
- La caracterización de la muestra del mineral estudiado indicó un tipo de oro electrum sin presencia de partículas gruesas y asociados a especies de hierro; con una distribución volumétrica de 0.01%, así también, se observaron minerales como: calcopirita, covelita, pirita, hematita, goethita y gangas.
- La recuperación máxima de Au y Ag en el proceso de cianuración se obtiene a las 24 horas de haber iniciado el proceso, con 95.92% de recuperación de Au y 86.55% de Ag.
- La prueba de electrodeposición realizada con una intensidad de corriente de 1.60 A y 0.54V, logró recuperar 13.18% de Au, y 8.46% de Ag, en un tiempo de 100 minutos, lo cual representa los valores más bajos de recuperación. Así también, para valores de 5.87 A, y 3.91 V, se logró recuperar 44.86 % de Au, y 47.25% de Ag.
- De la gráfica de densidad de corriente versus recuperación de metal valioso se observa que la tendencia es logarítmica para ambas, obteniendo una recuperación máxima de 75.04% para el Au y 68.80% para Ag con una densidad de corriente de 13.95 A/m<sup>2</sup>.

## 7.2.Recomendaciones

- Se recomienda que el proyecto de investigación estudiado sirva como base para recuperar metales preciosos en los yacimientos oxidados de la zona de Río Seco, Carabayllo; reduciendo los costos producidos por el uso del carbón activado.
- Se recomienda desarrollar pruebas de investigación para evaluar reactivos orgánicos que puedan reemplazar al cianuro.
- Se recomienda realizar un estudio medioambiental sobre los efectos del uso de carbón activado y ácidos en el proceso de recuperación de Au y Ag.
- Realizar pruebas metalúrgicas de electrodeposición estudiando las variables de tiempo de proceso, temperatura y tipos de cátodos observando su influencia en la recuperación de Au y Ag.
- Realizar el estudio económico para evaluar los costos de este proceso y compararlo con los costos producidos por los procesos convencionales con uso de carbón activado y evaluar la factibilidad del proceso propuesto en esta investigación.
- Las universidades y sus facultades de metalurgia deberían implementar laboratorios de electrometalurgia para facilitar la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en este campo.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aghamirian, M., & Yen, W. (2005). Mechanisms of galvanic interactions between gold and sulfide minerals in cyanide solution. *Minerals Engineering*, 18(4), 393-407.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.07.005>
- Andrade, L., & Hodouin, D. (2005). A lumped kinetic model for gold ore cyanidation. *Hydrometallurgy*, 79(3-4), 121-137.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.001>
- Arce, L., & Cano, F. (2020). *Importancia del pH en la recuperación de oro y plata en los procesos de cianuración*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6452>
- Brandon, N., Mahmood, M., Page, P., & Roberts, C. (1987). The Direct Electrowinning of Gold from Dilute Cyanide Leach Liquors. *Hydrometallurgy*, 18, 305-319.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X\(87\)90072-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X(87)90072-7)
- Bustanza, V. (2019). *Estudio del uso de nitrato de plomo para optimizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6de1fa10-4d00-4a9b-887f-1f8c4a6fa1f5/content>
- Cáceres, G. (2007). *Hidrometalurgia y electrometalurgia*. Guía, Universidad de Atacama, Atacama.  
<http://www.exalumnos.uda.cl/metalurgia/402/Hidrometalurgia/hidrometalurgia.pdf>
- Calloapaza, J. (2020). *Obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la escuela profesional Ingeniería*

- Metalúrgica UNA Puno 2018*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13927>
- Chang, R. (2006). *Principios esenciales de química general* (4 ed.). McGraw-Hill. [https://books.google.com.pe/books/about/Principios\\_esenciales\\_de\\_qu%C3%ADmica\\_genera.html?id=cIfeAAAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Principios_esenciales_de_qu%C3%ADmica_genera.html?id=cIfeAAAACAAJ&redir_esc=y)
- Cruz, S. (2016). *Evaluación de los parametros para el diseño y construcción de una celda de electro obtención para recuperar oro*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacionanl del Altiplano, Puno. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2994>
- De la Torre, E., & Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro*. Quito.
- Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago: Andros Impresos. [https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC\\_INST:56UDC\\_INST&docid=alma991002260239703936&context=L](https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST:56UDC_INST&docid=alma991002260239703936&context=L)
- García, J. (2016). *Nivel de autoestima en el autocuidado en escolares de educación secundaria de la Institución Educativa Raúl Porras Barrenechea, Carabayllo - 2014*. Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Humanidades, Lima. [https://repositorio.uch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12872/46/García\\_Aroni\\_July\\_K.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12872/46/García_Aroni_July_K.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- García, M. (2020). *Estudio cinético termodinámico de la recuperación de oro y plata en soluciones acuosas de cianuro mediante procesos electroquímicos*. Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Saltillo, Saltillo. <https://saltillo.tecnm.mx/tecnologico/posgrado/doctoradomateriales/tesis/TESIS-DCI-2020-09.pdf>

- Habashi, F., & Toor, T. (1979). Aqueous oxidation of chalcopyrite in hydrochloric acid. *Metallurgical Transactions B*, 10, 49-56.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02653971>
- Higuera, O., Tristancho, J., & Florez, L. (2007). Comportamiento anódico de la plata en soluciones cianuradas libres de oxígeno. *Scientia et Technica Año XIII*(36).  
<https://doi.org/https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/6921e7d7-b10a-46d0-9dad-0c5177f98543/content>
- Huai, Y., Plackowski, C., & Peng, Y. (2017). The surface properties of pyrite coupled with gold in the presence of oxygen. *Minerals Engineering*, 111, 131-139.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.013>
- Logsdon, M., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2001). *El manejo del cianuro en la extracción de oro*. Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente.  
<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/434.pdf>
- Marsden, J., & House, L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction: Second Edition*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF03215543>
- Meng, Q., Yan, X., & Li, G. (2021). Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery. *Journal of Cleaner Production*, 323.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115>
- Meza, L. (1981). *Aspectos fundamentales de los procesos hidrometalúrgicos de los metales preciosos*. Colombia, Pasto.
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Boletín Estadístico Minero 12° edición*. Ministerio de Energía y Minas, Lima.



<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2802527/BEM%20%2012-2021.pdf.pdf?v=1644589735>

Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Política Nacional Multisectorial para la Pequeña Minería y Minería Artesanal*. Entregable final, MINEM, Lima.  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3456252/POLÍTICA%20NACIONAL%20MULTISECTORIAL%20PARA%20LA%20PEQUEÑA%20MINERÍA%20Y%20MINERÍA%20ARTESANAL.pdf.pdf>

Morales, A. (2003). *Electro-Metalurgia*. Serie de apuntes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54235728/Electrometalurgia-libre.pdf?1503594532=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DElectrometalurgia.pdf&Expires=1683296998&Signature=XQdl7yu1CDAcQ-qKV1Y9TFXhSpSYfNy7A7BfCfxs0pb-fUkT4I6Fc~3kEWaizJ4QRI->

Morales, D. (2018). *Evaluación del proceso de cianuración por*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

Panchi, V. (2009). *Proceso de electrodeposición de metales sobre una base polimérica*. Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional, Quito.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1391/1/CD-2112.pdf>

Paulino, L., & Salazar, R. (2019). *Variables que influyen en la electrodeposición del oro a partir de soluciones cianuradas diluidas en la empresa Ecoservicios e ingeniería limpia S.A.C – Puente Piedra – Lima*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/5777>

- Pérez, V. (2015). La regeneración electroquímica de carbón activado desplazará a la actual regeneración térmica. *SGITT-OTRI (Universidad de Alicante)*.  
<https://doi.org/https://otri.ua.es/es/empresa/documentos/ot-1309-regeneracion-electroquimica.pdf>
- Poisot, E., Alonso, A., González, I., & Lapidus, G. (2012). Influence of oxygen reduction and hydrogen evolution in the gold and silver direct electrodeposition process from thiourea solutions in a filter press type reactor. *Hydrometallurgy*, 129-130, 90-96.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.09.006>
- Ramires, C., & Sanchez, Y. (2016). *Influencia del tiempo de lixiviación y concentración de NaCN sobre el porcentaje de recuperación de Au mediante agitación en pulpa de un mineral aurífero procedente de Minera Danzing - Ancash*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Rivera, J. (2020). *Aplicación de técnicas de conservación en la rehabilitación del pavimento flexible en la Av. Lomas de Carabayllo – Carabayllo 2020*. Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo, Lima.
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 75-82.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.15381/idata.v13i2.6193>
- Solis, C. (2020). *Estrategias basadas en producción más limpia y biorremediación para mitigar los impactos ambientales negativos generados por los efluentes industriales de las curtiembres del Parque Industrial de Río Seco, Arequipa*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.

<https://doi.org/https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1f73fdb1-a5d9-4652-b6d9-cf8a94af462a/content>

Soto, A. (2021). *Evaluación de la cianuración de concentrados de oro y plata*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14392>

Soto, J., & Solís, A. (2012). *Caracterización y optimización de parametros de Sx/ew para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2636/Soto\\_bj.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2636/Soto_bj.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Srithammavut, W. (2008). *Modeling of Gold Cyanidation*. Tesis de maestría, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/42686/nbnfi-fe200810152009.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Tomalá, C. (1998). *Análisis de un sistema de adsorción y desorción de oro de carbón activado y su electrodeposición*. Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politecnica del Litoral, Guayaquil. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/32468>

Torres, L., & Montes, A. (2017). Conversión de potenciales entre distintos electrodos de referencia: Una analogía para facilitar su comprensión. *Sociedad Química de México*, 12-14. [https://doi.org/http://bsqm.org.mx/pdf-boletines/V11/V11N1/4ConversionPotenciales\\_BSQ11-1.pdf](https://doi.org/http://bsqm.org.mx/pdf-boletines/V11/V11N1/4ConversionPotenciales_BSQ11-1.pdf)

Vesga, D. (2010). *Evaluación de la disolución de oro del mineral de la mina san pablo, ubicada en el municipio de Remedios Antioquia, mediante cianuración con agitación mecánica*.

Tesis de licenciatura, Universidad Industrial de Santander, Santander.  
<http://repositorio.uis.edu.co>

Wen, J. (2021). *Estudio termodinámico del sistema cobre-zinc-tiourea en solución acuosa para la electrodeposición de fotocátodos basados en sulfuros de cobre-zinc*. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago de Chile.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/181673/Estudio-termodinamico-del-sistema-cobre-zinc-tiourea-en-solucion-acuosa-para-la-electrodeposicion-de-fotocatos-basados-en-sulfuros-de-cobre-zinc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Yannopoulos, J. (2012). *The Extractive Metallurgy of Gold*. New York: Van Nostrand Reinhold.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0>

## ANEXOS

## Figura 17

## Reporte de análisis químicos 1



**H&F LABORATORIOS SAC**  
DESDE 1999

Análisis químico de minerales, concentrados, aleaciones,  
agua y aire. Control ambiental.  
Fabricación y venta, de reactivos químicos y equipos.

### REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

**Solicitante** : VIDAL ARAMBURU - JACK ESCOBAR  
**Tipo de Muestra** : Solución  
**Procedencia** :  
**Fecha de Recepción** : 15 de Julio de 2021  
**Referencia** : H&F 569 / 2021

Denominación de muestra:	RESULTADOS DE ANALISIS	
	Ag mg/L	Au mg/L
SOLUCION RICA 6H	6.87	11.24
SOLUCION RICA 12H	8.24	18.72
SOLUCION RICA 18H	8.53	22.54
SOLUCION RICA 24H	8.69	22.56

Lima, 21 de Julio de 2021

H&F LABORATORIOS SAC  
SERVICIOS ANALITICOS  
  
ALVARO HUAYTALLA N.  
GERENTE GENERAL

Oficina: Av. Colonial 1583 – Lima. Tlf: 425 6179 - 334 4562 Página web: <http://www.hyflaboratorio.com/>

Laboratorio: Mz. E5 Lote 6 Parque Industrial Pachacutec- Ventanilla

*Nota:* Los datos están representados es miligramos por litro (mg/L).

## Figura 18

### Reporte de análisis químicos 2



**H&F LABORATORIOS SAC**  
DESDE 1999

Análisis químico de minerales, concentrados, aleaciones,  
agua y aire. Control ambiental.  
Fabricación y venta, de reactivos químicos y equipos.

### REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

**Solicitante** : VIDAL ARAMBURÚ - DIEGO MENDOZA  
**Tipo de Muestra** : Solución  
**Procedencia** :  
**Fecha de Recepción** : 12 de Agosto de 2021  
**Referencia** : H&F 588 / 2021

Denominación de muestra:	RESULTADOS DE ANALISIS	
	Ag mg/L	Au mg/L
SOLUCION INICIAL ELECT.	8.69	22.56
SOLUCION FINAL 1 ELECT.	7.54	20.33
SOLUCION FINAL 2 ELECT.	4.76	10.11
SOLUCION FINAL 3 ELECT.	2.17	7.04

Lima, 16 de Agosto de 2021

H&F LABORATORIOS SAC  
SERVICIOS ANALITICOS  
  
ALBINO HUAYTALLA H.  
GERENTE GENERAL

Oficina: Av. Colonial 1583 – Lima. Tlf: 425 6179 - 334 4562 **Página web:** <http://www.hyflaboratorio.com/>

Laboratorio: Mz. E5 Lote 6 Parque Industrial Pachacutec- Ventanilla

*Nota:* Los datos están representados es miligramos por litro (mg/L).

**Figura 19**

*Mineral oxidado de la zona de Río Seco*



*Nota: Muestreo del mineral.*

**Figura 20**

*Mineral 100% - 10 Malla*



*Nota: Muestreo del mineral.*

**Figura 21**

*Ro Tap para análisis granulométrico*



*Nota:* Equipo del laboratorio METALANDIN S.A.C.

**Figura 22**

*Malla 200 para pruebas de moliendabilidad*



*Nota:* Equipo del laboratorio de extractiva de la UNMSM.



**Figura 23**

*Molino de bolas de laboratorio*



*Nota:* Equipo del laboratorio de extractiva de la UNMSM.

**Figura 24**

*Mesa de rodillos para pruebas de cianuración en botella*



*Nota:* Equipo del laboratorio de extractiva de la UNMSM.

**Figura 25**

*Lana de acero para pruebas metalúrgicas de electrodeposición*



*Nota:* Material del laboratorio de electrometalurgia de la UNMSM.

**Figura 26**

*Sistema de pruebas de electrodeposición*



*Nota:* Material del laboratorio de electrometalurgia de la UNMSM.