



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

Lixiviación de minerales refractarios mediante la oxidación con carburo de calcio para mejorar la recuperación de plata-oro en Cerro de Pasco

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

Diana María Carolina MALCA GUERRERO
Jesus Glenn MALDONADO LLACSAHUANGA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Malca, D. & Maldonado, J. (2025). *Lixiviación de minerales refractarios mediante la oxidación con carburo de calcio para mejorar la recuperación de plata-oro en Cerro de Pasco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Diana María Carolina Malca Guerrero
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72316526
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Jesus Glenn Maldonado Llacsahuanga
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77224902
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	http://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Luis Américo Rivera Del Valle
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Miembro del jurado 1	

Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jose Luis Vidarte Merizalde
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.16. Lixiviación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Pasco Provincia: Pasco
Año o rango de años en que se realizó la investigación	ENERO 2024 – DICIEMBRE 2024
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.02.2026 14:35:58 -05:00

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

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

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

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 19, del mes de noviembre del 2025 siendo las 9:00 am, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. LUIS AMÉRICO, Rivera Del Valle	(PRESIDENTE)
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: «**LIXIVIACIÓN DE MINERALES REFRACTARIOS MEDIANTE LA OXIDACIÓN CON CARBURO DE CALCIO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE PLATA-ORO EN CERRO DE PASCO**» presentada por Doña: DIANA MARÍA CAROLINA MALCA GUERRERO, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniera: **METALÚRGICA**.

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

.....**SATISFACCIÓN**.....

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

.....*Catorce*..... (*14*) *Aprobado*.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA METALÚRGICA**, a Doña: **Diana María Carolina Malca Guerrero**.

Siendo las *10,05* horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 19 de noviembre del 2025

Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Presidente

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro

Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS 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 19, del mes de noviembre del 2025 siendo las 9:00 am, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. LUIS AMÉRICO, Rivera Del Valle	(PRESIDENTE)
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: «**LIXIVIACIÓN DE MINERALES REFRACTARIOS MEDIANTE LA OXIDACIÓN CON CARBURO DE CALCIO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE PLATA-ORO EN CERRO DE PASCO**» presentada por Don: JESUS GLENN MALDONADO LLACSAHUANGA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

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

.....SATISFACCIÓN.....

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

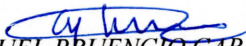
.....Catorce (14) Aprobado.....

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

Siendo las 10:05 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 19 de noviembre del 2025


Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Presidente


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SISTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



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

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.°001178-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “Lixiviación de minerales refractarios mediante la oxidación con carburo de calcio para mejorar la recuperación de plata-oro en Cerro de Pasco” presentado por los bachilleres **DIANA MARÍA CAROLINA Malca Guerrero y JESUS GLENN Maldonado Llacsahuanga** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

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

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

Lima, 12 de diciembre de 2024

Firma del Asesor _____

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS

DNI: 08608364

CONTENIDO

RESUMEN	VIII
CAPÍTULO I: Introducción.....	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema.....	3
2.1. Descripción de la Problemática	3
2.2. Formulación del Problema	3
2.2.1.Problema General.....	3
2.2.2.Problemas Específicos.....	3
2.3. Objetivos de la Investigación	4
2.3.1.Objetivo General.....	4
2.3.2.Objetivos Específicos	4
2.4. Hipótesis de la Investigación.....	5
2.4.1.Hipótesis General	5
2.4.2.Hipótesis Específicas.....	5
2.5. Las Variables	5
2.5.1.Variable Independiente.....	5
2.5.2.Variable Dependiente	6
2.5.3.Variables controladas	6
2.6. Operacionalización de Variables	6
2.7. Importancia y Alcance de la Investigación	9
CAPÍTULO III: Marco Teórico.....	10
3.1. Antecedentes de la Investigación.....	10

3.2. Bases Teóricas	14
3.2.1. La Minería	14
3.2.2. Los Minerales.....	15
3.2.2.1. Yacimientos Primarios	16
3.2.2.2. Yacimientos Secundarios.....	16
3.2.3. Metalogenia del Área de Cerro de Pasco	17
3.2.4. Minerales Refractarios	19
3.2.5. El Oro	19
3.2.5.1. Minerales de Oro.....	20
3.2.6. La Plata.....	21
3.2.6.1. Potencial Geológico de los Minerales de Plata.....	21
3.2.7. Cianuración de Oro y Plata.....	22
3.2.7.1. Solubilidad de Oro y Plata en Soluciones de Cianuro.....	23
3.2.7.2. Termodinámica del Proceso de Cianuración	30
3.2.7.3. Factores Cinéticos	31
3.2.7.4. Principales Factores que Afectan la Disolución del Oro	31
3.2.7.4.1. Efecto del Oxígeno	31
3.2.7.4.2. Concentración de Cianuro.....	33
3.2.7.4.3. Efecto de la Temperatura	34
3.2.7.4.4. Efecto del Tamaño de Partícula.....	37
3.2.7.4.5. Efecto de los Reguladores de pH	37
3.2.8. Carburo de Calcio	39
3.2.8.1. Obtención de Carburo de Calcio	39

CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación.....	41
4.1. Área de Estudio.....	41
4.2. Diseño de Investigación	41
4.3. Población y Muestra	41
4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	42
CAPÍTULO V: Pruebas Experimentales.....	43
5.1. Análisis Mineralógico de la Muestra	43
5.1.1.Caracterización Química	43
5.1.2.Estudios de Mineralogía	45
5.1.3.Estudio de Mineralogía TIMA - TMS.....	49
5.2. Preparación de Blending	51
5.3. Pruebas de Cinética de Cianuración de Mineral de Cabeza.....	52
5.4. Pruebas de Cinética de Cianuración del Mineral de Cabeza Adicionando Carburo de Calcio	54
5.4.1.Cianuración con 1 Kg CaC_2 /TM.....	55
5.4.2.Cianuración con 2 Kg CaC_2 /TM.....	56
5.4.3.Cianuración con 3 Kg CaC_2 /TM.....	58
5.4.4.Cianuración con 4 Kg CaC_2 /TM.....	59
5.5. Determinación del tiempo óptimo de lixiviación	61
5.5.1.Metodología	61
5.5.2.Modelo cinético de Klimpel	61
5.5.3.Resultados.....	62
CAPÍTULO VI: Evaluación de Resultados.....	64

CAPÍTULO VIII: Evaluación Económica	69
7.1. Flujo de Caja Diferencial	69
7.2. Análisis de Sensibilidad	70
7.1.1. Análisis Unidimensional	71
7.1.2. Análisis Bidimensional.....	72
7.1.3. Resumen de Escenarios	74
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEXOS	84

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por su amor y apoyo incondicional, ejemplo de esfuerzo, los cuales me enseñaron a perseverar y a creer en mí siempre, esta tesis es fruto de su sacrificio y fe.

Jesus Glenn Maldonado Llacsahuanga

Dedicado a Dios, mi familia y amigos.

Diana María Carolina Malca Guerrero

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento de manera especial al Ing. Héctor Ventosilla por orientarnos durante el proceso de investigación y a su vez brindarnos el apoyo y seguimiento durante el desarrollo de las pruebas metalúrgicas.

RESUMEN

La presencia de minerales refractarios en el yacimiento representa un desafío significativo para la planta de lixiviación de oro y plata ubicada en Cerro de Pasco, provincia de Pasco (región Pasco, Perú), debido a las bajas recuperaciones de plata y oro obtenidas mediante lixiviación convencional. Con el objetivo de mejorar dichas recuperaciones, se plantea el uso de carburo de calcio (CaC_2) como pre-oxidante previo a la etapa de lixiviación, respaldado por investigaciones recientes que reportan incrementos en las recuperaciones de metales valiosos al aplicar este agente en minerales refractarios.

Para el presente estudio, el mineral fue molido a una granulometría de 80 % - 270 malla luego se procedió a agitar la pulpa y se le inyectó aire (O_2 : 8 ppm), se acondicionó a pH: 11 y se procedió con la lixiviación por agitación durante 72 h utilizando NaCN (500 ppm). Se evaluaron dosificaciones de 0,1,2,3 y Kg CaC_2 /TM. La prueba estándar (0 Kg CaC_2 /TM), reprodujo las condiciones operativas convencionales, obteniéndose recuperaciones de 36,79 % Ag y 19,09 % Au. Asimismo, la prueba con 2 Kg CaC_2 /TM obtuvo las máximas recuperaciones de Ag y Au. Esta condición fue seleccionada para el análisis cinético (modelo de Klimpel), el cual determinó un tiempo óptimo de lixiviación de 68 h logrando recuperaciones de 39,97 % de Ag y 28,31 % de Au.

Se concluye que el uso de CaC_2 como pre-oxidante previo a la lixiviación permitió incrementar la recuperación de Ag y Au en el mineral refractario estudiado, mitigando parcialmente los efectos de refractariedad. Asimismo, el análisis económico del proyecto ($t=12$ meses) mostró resultados favorables bajo un escenario conservador: VAN = US\$ 4,27 millones y TIR = 338 %, superior al CPPC = 10 %, lo que respalda la viabilidad técnico-económica de la propuesta.

NOMENCLATURA

%	Por ciento
°C	Grados Centígrados
μm	Micras
e -	Electrones
msnm	Metros sobre el nivel del mar
pH	Potencial de Hidrógeno
Ag	Plata
Au	Oro
CaC ₂	Carburo de Calcio
O ₂	Oxígeno
h	Hora
g	Gramo
g/l	Gramo por litro
Kg/TM	Kilogramo por tonelada métrica
ppm	Partes por millón
TM	Tonelada Métrica
L.D.	Límite de detección
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa interna de Retorno
CPPC	Costo Promedio Ponderado de Capital

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa geológico de Cerro de Pasco con edades de rocas intrusivas y mineralización</i>	18
Figura 2 <i>Esquema de la celda de corrosión en superficie de oro en solución de cianuro con oxígeno</i>	25
Figura 3 <i>Diagrama de Pourbaix para oro y cianuro</i>	26
Figura 4 <i>Diagrama de Pourbaix para plata y cianuro</i>	27
Figura 5 <i>Diagrama de Pourbaix para oro y plata - cianuro</i>	29
Figura 6 <i>Gráfico comparativo de la influencia de la oxidación en la cianuración</i>	33
Figura 7 <i>Gráfico comparativo de la influencia de la concentración de cianuro en la rapidez de disolución</i>	34
Figura 8 <i>Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura en la cianuración</i>	36
Figura 9 <i>Gráfico comparativo de la influencia del pH en la cianuración</i>	38
Figura 10 <i>Obtención del carburo de calcio</i>	40
Figura 11 <i>Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba estándar</i>	53
Figura 12 <i>Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 1 Kg CaC₂/TM</i>	55
Figura 13 <i>Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 2 Kg CaC₂/TM</i>	57
Figura 14 <i>Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 3 Kg CaC₂/TM</i>	58
Figura 15 <i>Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 4 Kg CaC₂/TM</i>	60
Figura 16 <i>Cinética de lixiviación Ag</i>	65
Figura 17 <i>Cinética de lixiviación Au</i>	65
Figura 18 <i>Kg CaC₂/TM Vs. %Recuperación Ag</i>	67

Figura 19 <i>Kg CaC₂/TM Vs. %Recuperación Au</i>	67
Figura 20 <i>Diagrama VAN Vs. %VAR Variables</i>	72
Figura 21 <i>Contribución al VAN para cada escenario</i>	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Variables de estudio</i>	7
Tabla 2 <i>Matriz de consistencia</i>	8
Tabla 3 <i>Análisis químico por AAS</i>	43
Tabla 4 <i>Análisis químico por ICP</i>	44
Tabla 5 <i>Composición modal – TIMA PMA</i>	45
Tabla 6 <i>Asociación de pirita</i>	46
Tabla 7 <i>Grado de liberación de la pirita</i>	47
Tabla 8 <i>Tamaño de grano de Pirita</i>	49
Tabla 9 <i>Tamaño de partícula del mineral</i>	49
Tabla 10 <i>Distribución de tamaños de grano para minerales de plata</i>	50
Tabla 11 <i>Deportment de la plata</i>	50
Tabla 12 <i>Asociación de minerales de plata</i>	51
Tabla 13 <i>Conformación del blending</i>	51
Tabla 14 <i>Parámetros de cianuración</i>	52
Tabla 15 <i>Balance Metalúrgico – Prueba estándar</i>	53
Tabla 16 <i>Parámetros de cianuración aplicando CaC_2</i>	54
Tabla 17 <i>Balance Metalúrgico – Prueba 1 Kg CaC_2/TM</i>	56
Tabla 18 <i>Balance Metalúrgico – Prueba 2 Kg CaC_2/TM</i>	57
Tabla 19 <i>Balance Metalúrgico – Prueba 3 Kg CaC_2/TM</i>	59
Tabla 20 <i>Balance Metalúrgico – Prueba 4 Kg CaC_2/TM</i>	60
Tabla 21 <i>Parámetros cinéticos de lixiviación (2 kg CaC_2/TM)</i>	62

Tabla 22 <i>Tiempo requerido para alcanzar recuperaciones objetivo.</i>	62
Tabla 23 <i>Comparación entre recuperaciones experimentales y modeladas a 68 h.</i>	63
Tabla 24 <i>Parámetros actuales sin proyecto</i>	69
Tabla 25 <i>Parámetros con proyecto</i>	70
Tabla 26 <i>Precio estimado de los metales</i>	70
Tabla 27 <i>%Variación Variables Vs VAN</i>	71
Tabla 28 <i>Puntos críticos de cada variable</i>	72
Tabla 29 <i>Resumen de parámetros utilizados para el análisis bidimensional</i>	73
Tabla 30 <i>Resumen de escenarios del Proyecto: Optimista, Esperado y Pesimista</i>	74

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Resultado del análisis granulométrico por difracción láser que define el tamaño P80 (54,7 μm) del mineral de alimentación utilizado en las pruebas de cianuración.</i>	84
Anexo 2 <i>Equipo de análisis granulométrico Mastersizer 3000 empleado para la determinación de la distribución de tamaño de partícula del mineral estudiado.</i>	84
Anexo 3 <i>Muestra de mineral compuesto (blending de los stockpiles A, B y C) utilizada como alimentación en las pruebas de cianuración.</i>	85
Anexo 4 <i>Carburo de Calcio (CaC_2), reactivo usado como pre-oxidante en el estudio</i>	85
Anexo 5 <i>Registro fotográfico de la lixiviación en agitación del mineral con aireación mediante lanzas</i>	86
Anexo 6 <i>Resultados experimentales de Prueba estándar 0 Kg CaC_2/TM</i>	86
Anexo 7 <i>Resultados experimentales de Prueba 1 Kg CaC_2/TM</i>	87
Anexo 8 <i>Resultados experimentales de Prueba 2 Kg CaC_2/TM</i>	87
Anexo 9 <i>Resultados experimentales de Prueba 3 Kg CaC_2/TM</i>	88
Anexo 10 <i>Resultados experimentales de Prueba 4 Kg CaC_2/TM</i>	88
Anexo 11 <i>Precio promedio de metales Au y Ag del 2000 al 2025</i>	89
Anexo 12 <i>Flujo de caja sin proyecto</i>	90
Anexo 13 <i>Flujo de caja con proyecto</i>	91
Anexo 14 <i>Flujo de caja diferencial</i>	92
Anexo 15 <i>Periodo de Recupero de la Inversión</i>	92
Anexo 16 <i>Variación %Promedio de los precios de Ag y Au Vs. VAN</i>	93
Anexo 17 <i>Variación %Promedio de los precios de Ag y CaC_2 Vs. VAN</i>	94

Anexo 18 <i>Variación %Promedio de los precios de Ag y la Inversión Vs. VAN</i>	95
Anexo 19 <i>Variación %Promedio de los precios de Au y CaC₂ Vs. VAN</i>	96
Anexo 20 <i>Variación %Promedio de los precios de Au y la Inversión Vs. VAN</i>	97
Anexo 21 <i>Variación %Promedio de los precios de CaC₂ y la Inversión Vs. VAN</i>	98

CAPÍTULO I: Introducción

En la actualidad, el proceso de lixiviación con cianuro aplicado a minerales refractarios no alcanzan recuperaciones de plata y oro favorables, por ello existen otros métodos que permiten oxidar el mineral a fin de lograr la liberación de los metales de interés contenidos en el mineral, entre otros procesos podemos mencionar la tostación (pirometalurgia), oxidación química, oxidación a presión en autoclaves y la biolixiviación; sin embargo, el elevado costo de estos procesos nos llevan a buscar alternativas que sean beneficiosas para asegurar la continuidad de las operaciones.

En el proceso de lixiviación, la plata y el oro deben estar expuestos a la acción de disolución de la solución cianurada, por lo cual se realiza un estudio microscópico para determinar el grado de liberación y tamaño de partícula requerida en la operación, así como también se determina la cinética de extracción en la solución.

La aplicación de carburo de calcio como oxidante en el proceso hidrometalúrgico de cianuración para minerales refractarios no precisa de la instalación de equipos complejos o modificar las variables de presión y temperatura. El carburo de calcio genera una reacción exotérmica en contacto con el agua, propiciando la formación de hidróxido de calcio y gas acetileno; lo que genera una atmósfera oxidante que favorece la oxidación del mineral refractario, ocasionando así la liberación de los metales de interés que se encuentran ocluidos en la matriz del mineral y por tanto beneficiaría las recuperaciones del oro y la plata. La aplicación de este proceso es simple, dado que el carburo de calcio se adiciona en la etapa previa a la lixiviación; y se presenta como una alternativa que permite el beneficio de los minerales refractarios. Por ello, la presente

investigación estudia la influencia que tiene el carburo de calcio en la recuperación de plata y oro de minerales refractarios.

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

La planta de beneficio procesa minerales oxidados y refractarios con contenidos de plata y oro, provenientes de las zonas: Stockpile A, Stockpile B y Stockpile C. El proceso utilizado es el de cianuración por agitación en tanques, con una concentración de oxígeno de 8 ppm, recuperando los metales principales mediante la precipitación de los valores disueltos de plata-oro con polvo de Zinc (Merrill Crowe). La presencia de minerales refractarios en el blending dificulta la recuperación de los metales de plata-oro. De esta manera, esta investigación surge a partir del requerimiento de proyectos de mejora enfocados en incrementar la recuperación de finos de plata y oro, por ello se evaluará el uso del carburo de calcio como oxidante del mineral refractario en la etapa de pretratamiento en el proceso de cianuración.

2.2. Formulación del Problema

2.2.1. Problema General

- ¿De qué manera se podría mejorar la recuperación de Ag-Au en la lixiviación de minerales refractarios en Cerro de Pasco - Pasco?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo influye la oxidación del blending de mineral refractario utilizando carburo de calcio en la recuperación de oro y plata mediante lixiviación cianurada en minerales de Cerro de Pasco - Pasco?

- ¿Cuál es el tiempo de lixiviación necesario para alcanzar una recuperación objetivo en el tratamiento de oxidación del mineral refractario de Cerro de Pasco - Pasco bajo condiciones definidas de operación?
- ¿De qué manera se puede determinar la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial mediante una oxidación para un mineral refractario?

2.3. Objetivos de la Investigación

2.3.1. *Objetivo General*

- Incrementar la recuperación de Ag-Au mediante la oxidación utilizando carburo de calcio en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco - Pasco.

2.3.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar el consumo óptimo de carburo de calcio en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.
- Determinar el tiempo mínimo de lixiviación que permita alcanzar una recuperación objetivo de Ag (39,73%) y Au (28,3%) en el mineral refractario de Cerro de Pasco - Pasco a partir del consumo optimo de carburo de calcio.
- Determinar la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial mediante la elaboración el VAN, TIR y periodo de recupero de la inversión.

2.4. Hipótesis de la Investigación

2.4.1. *Hipótesis General*

- La oxidación con carburo de calcio en la lixiviación permitirá mejorar el porcentaje de recuperación de Ag y Au en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.

2.4.2. *Hipótesis Específicas*

- Un consumo óptimo de carburo de calcio permitirá incrementar la recuperación de Ag y Au en la lixiviación del blending de un mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.
- Es posible alcanzar la recuperación objetivo de Ag (39,73%) y Au (28.3%) en un tiempo determinado con el consumo optimo de carburo sin comprometer la estabilidad del proceso y sin necesidad de prolongar innecesariamente la etapa de lixiviación.
- La aplicación de herramientas de evaluación financiera como el VAN, la TIR y el periodo de recuperación de la inversión determinarán la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial.

2.5. Las Variables

2.5.1. *Variable Independiente*

- Concentración de carburo de calcio en el pretratamiento de procesos de cianuración
- Tiempo de lixiviación en horas

2.5.2. *Variable Dependiente*

- Porcentaje de recuperación de plata-oro.

2.5.3. *Variables controladas*

- Temperatura
- Concentración de cianuro
- Granulometría
- pH de cianuración
- pH de oxidación

2.6. Operacionalización de Variables

Para procesar e identificar la influencia de las variables independientes y dependientes en el proceso de oxidación y cianuración se realizarán los balances metalúrgicos para cada prueba. En la tabla 1 se indican las variables de estudio.

Tabla 1*Variables de estudio*

Variables		Definición	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Concentración de carburo de calcio (Kg/TM)	Cantidad de reactivo requerido para alcanzar la mayor recuperación de Ag y Au	El carburo de calcio se pesa en una balanza electrónica, para efectos de ratio se realiza la conversión a Kg/TM	Incremento en recuperaciones de Ag y Au
	Tiempo de lixiviación (h)	Tiempo mínimo requerido de lixiviación para alcanzar las recuperaciones de Ag y Au objetivo.	El tiempo se mide con cronómetro digital y se expresa en horas (h)	Intervalo de tiempo
Dependiente	Recuperación de plata y oro (%)	Razón entre la masa del metal valioso obtenido en el concentrado y la masa del metal valioso de la alimentación, se expresa en porcentaje.	Eficiencia de recuperación de metales valiosos (Ag y Au)	Análisis químico de adsorción atómica.

Tabla 2*Matriz de consistencia*

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Técnica
Problema general ¿De qué manera se podría mejorar la recuperación de Ag-Au en la lixiviación de minerales refractarios en Cerro de Pasco - Pasco?	Objetivo general Incrementar la recuperación de Ag-Au mediante la oxidación utilizando carburo de calcio en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco - Pasco.	Hipótesis general La oxidación con carburo de calcio en la lixiviación permitirá mejorar el porcentaje de recuperación de Ag y Au en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.	Recuperación de oro y plata	Se reportan en términos porcentuales de los resultados de los ensayos químicos.
Problema específico 1 ¿Cómo influye la oxidación del blending de mineral refractario utilizando carburo de calcio en la recuperación de oro y plata mediante lixiviación cianurada en minerales de Cerro de Pasco - Pasco?	Objetivo específico 1 Determinar el consumo óptimo de carburo de calcio en la lixiviación de mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.	Hipótesis específica 1 Un consumo óptimo de carburo de calcio permitirá incrementar la recuperación de Ag y Au en la lixiviación del blending de un mineral refractario en Cerro de Pasco – Pasco.	Concentración del carburo de calcio	Este dato se recolecta mediante el pesado del carburo de calcio en una balanza.
Problema específico 2 ¿Cuál es el tiempo de lixiviación necesario para alcanzar una recuperación objetivo en el tratamiento de oxidación del mineral refractario de Cerro de Pasco - Pasco bajo condiciones definidas de operación?	Objetivo específico 2 Determinar el tiempo mínimo de lixiviación que permita alcanzar una recuperación objetivo de Ag (39,73%) y Au (28,3%) en el mineral refractario de Cerro de Pasco - Pasco a partir del consumo óptimo de carburo de calcio.	Hipótesis específica 2 Es posible alcanzar la recuperación objetivo de Ag (39,73%) y Au (28,3%) en un tiempo determinado con el consumo óptimo de carburo sin comprometer la estabilidad del proceso y sin necesidad de prolongar innecesariamente la etapa de lixiviación.	Tiempo mínimo	Este dato se recolecta mediante la medición de intervalos de tiempo con un cronómetro digital.
Problema específico 3 ¿De qué manera se puede determinar la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial mediante una oxidación para un mineral refractario?	Objetivo específico 3 Determinar la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial mediante la elaboración el VAN, TIR y periodo de recupero de la inversión.	Hipótesis específica 3 La aplicación de herramientas de evaluación financiera como el VAN, la TIR y el periodo de recuperación de la inversión determinarán la rentabilidad económica del proyecto a escala industrial.	Rentabilidad económica	Hojas de cálculo.

2.7. Importancia y Alcance de la Investigación

El proyecto de investigación propone el uso del carburo de calcio (CaC_2), en la etapa de oxidación del proceso de lixiviación con cianuro en minerales refractarios de Cerro de Pasco - Pasco, con el objetivo de incrementar las recuperaciones de plata y oro.

El alcance del proyecto de investigación está determinado para implementarse en la planta metalúrgica.

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

(Negreiros & Rubio, 2019), en su tesis “Influencia del carburo de calcio y la granulometría en la lixiviación de oro de un mineral refractario” determinaron la posibilidad de recuperación de oro a partir de un mineral refractario, utilizando como reactivo oxidante carburo de calcio. Siendo la dosificación de carburo de calcio influye significativamente en la recuperación de oro, en los niveles de 3, 6 y 9 Kg/TM teniendo recuperaciones de 55.52%; 46.21% y 43.72% respectivamente (Teniendo una pendiente negativa). Con respecto a la granulometría no influye significativamente en la recuperación de oro en 60% - malla #200 y 90% - malla # 400, obteniendo recuperaciones de 47.37% y 49.60% respectivamente.

(Shishido et al., 2017), en el artículo “Utilización del carburo de calcio para la recuperación de oro a partir de minerales refractarios arsenicales”, concluyeron que el carburo de calcio utilizado en la cianuración de los minerales mejora la recuperación de oro en comparación de un proceso convencional con una recuperación de oro de 18% con la adición de 5 kg/TM de carburo de calcio y con una granulometría de 95% a $-400\ \mu\text{m}$ en la remolienda del mineral. Las pruebas realizadas y el reactivo propuesto en el artículo no podrían adaptarse a un proceso estándar que pudiera aplicarse a cualquier mineral refractario, ya que la mineralogía de la parte valiosa y la ganga mineral es completamente diferente de mineral a mineral, por lo tanto, se debe realizar las pruebas necesarias para cada tipo de mineral refractario.

(Arana & Leyva, 2019), en su investigación “Influencia del carburo de calcio y el tiempo de aireación en la recuperación de oro por cianuración en agitación de un mineral aurífero-arsenical”, evaluaron el efecto de la dosificación de carburo de calcio y el tiempo de aireación

sobre la recuperación de oro en un relave aurífero arsenical de flotación. Las variables de estudio incluyeron tres niveles de dosificación de carburo de calcio (0, 3 y 6 Kg/TM) y tiempos de aireación (0, 30 y 60 minutos). Los resultados mostraron que la mayor recuperación de oro (26.36%) se obtuvo con una dosificación de 3 Kg/TM y 60 minutos de aireación, mientras que la recuperación mínima (5.26%) se obtuvo sin dosificación ni aireación. El análisis de varianza a un 95% de confianza confirmó que ambas variables influyen significativamente en la recuperación de oro de este tipo de relave.

(Caniren & Karagüzel, 2021), en su estudio “Silver Metal Extraction from Refractory Silver Ore Using Chloride-Hypochlorite and Hydrochloric Acid Media Under High Pressure”, investigaron la lixiviación de plata de minerales refractarios en presencia de medios de hipoclorito a alta presión. Los resultados mostraron que la mayor recuperación de plata (62.35%) se obtuvo bajo condiciones óptimas de lixiviación, que incluían una temperatura de 150 °C, presión de oxígeno de 1800 kPa, tiempo de lixiviación de 2 horas, concentraciones de NaCl y NaOCl de 2 mol/dm³ y 0.4 mol/dm³ respectivamente, con una relación de sólidos de 30% y un tamaño de partícula (d80) de 15 µm. Este enfoque de lixiviación mostró ser más eficiente en un tiempo relativamente corto en comparación con la lixiviación convencional con cianuro, especialmente para la extracción de plata encapsulada en minerales de baritina y cuarzo.

(Ahtiainen et al., 2021), en su artículo “Simultaneous sulfide oxidation and gold dissolution by cyanide-free leaching from refractory and double refractory gold concentrates”, investigaron la lixiviación de oro y la oxidación de sulfuros en minerales refractarios de oro utilizando una solución de cloruro-bromuro como alternativa al cianuro. Encontraron que la extracción de oro estaba directamente relacionada con el grado de oxidación del sulfuro: una oxidación del 97% permitía una recuperación del 99% de oro. Sin embargo, en concentrados doblemente refractarios,

la recuperación fue baja (18%) a pesar de una alta oxidación del sulfuro. Para mejorar los resultados, carbón activo en lixiviación con cloruro-bromuro y lograron aumentar la recuperación de oro al 67%. La adición de nitrato de plomo en el sistema de lixiviación con cloruro-bromuro incrementó aún más la recuperación hasta el 88%. Este enfoque no cianurado muestra que la lixiviación de oro y la oxidación de sulfuros en un solo proceso unitario es prometedora para el tratamiento de concentrados de oro refractarios a presión atmosférica.

(Xue et al., 2020), en su estudio “Stepwise extraction of gold and silver from refractory gold concentrate calcine by thiourea”, exploraron una alternativa al cianuro mediante la lixiviación con tiourea para la extracción de oro y plata de calcinados de concentrado de oro refractario. En una primera etapa, obtuvieron extracciones del 84,42% para el oro y del 44,15% para la plata utilizando tiourea sin aditivos, incrementando estos valores a 88,71% y 52,65% al añadir sulfonato de lignina sódica, urea y ion hierro. La tiourea utilizada pudo reciclarse tras la sustitución del oro por polvo de hierro. En una segunda etapa con activación mecánica, lograron extracciones de 96,51% de oro y 70,43% de plata. Además, pruebas a escala piloto confirmaron la efectividad y viabilidad industrial de esta tecnología para una extracción más limpia y eficiente de metales preciosos.

(Kuifang et al., 2020), en su estudio “Hydrometallurgical recovery of manganese, gold and silver from refractory Au-Ag ore by two-stage reductive acid and cyanidation leaching”, caracterizaron un mineral refractario de Au-Ag de Beiya, en Yunnan, China, y estudiaron los estados de ocurrencia de oro y plata de baja ley. Encontraron que el oro estaba presente mayormente como oro nativo visible, lo cual permite su lixiviación mediante cianuración. Sin embargo, la plata estaba en formas como plata nativa, acantita y otros minerales, pero predominantemente como plata invisible en óxidos de manganeso, lo cual dificulta su extracción.

Aplicaron un pretratamiento de lixiviación ácida reductora con sulfito de sodio, logrando una alta extracción de manganeso (70,27%) y liberando la plata para su posterior cianuración, obteniendo un porcentaje de lixiviación de 80,19% para la plata y 87,37% para el oro. Además, recuperaron el manganeso y el cobre de la solución con un 99,90% y 99,80% de eficacia, respectivamente, mediante reducción y precipitación. Este nuevo proceso hidrometalúrgico demostró ser efectivo para la recuperación de manganeso, oro y plata.

(Ghobeiti et al., 2013), en su estudio “Chloride–hypochlorite leaching of gold from a mechanically activated refractory sulfide concentrate”, investigaron el efecto de la activación mecánica en la lixiviación de oro mediante cloruro-hipoclorito en un concentrado pirítico refractario con 27 g/t de oro. Encontraron que una muestra molida durante 45 minutos alcanzó el 100% de extracción de oro en 30 minutos, mientras que una muestra sin moler solo logró un 37,2% después de 480 minutos (a 25 °C y 600 rpm). La mejora se debió al aumento de superficie específica y la tensión en la estructura cristalina por la activación mecánica. Además, observaron que la sensibilidad a la temperatura disminuyó tras la molienda, y el control de la lixiviación pasó de ser mixto en la muestra sin moler a un control de reacción química y difusión en la muestra molida.

(Oraby & Eksteen, 2015), en su artículo “The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine–peroxide solutions and their adsorption on carbon”, evaluaron la lixiviación de oro y plata en una solución de glicina con pH modificado y peróxido de hidrógeno. Hallaron que este sistema puede disolver oro y plata en condiciones neutras y alcalinas a temperaturas de 23 a 60 °C. Observaron que, en una solución con 0,5 M de glicina y 1% de peróxido a pH 11, la tasa de lixiviación de oro fue de 0,322 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ después de 48 horas, comparable a la obtenida en sistemas de tiosulfato-EDTA en seis días. En soluciones alcalinas, la tasa de lixiviación de oro de una

aleación oro-plata (50% Ag) fue seis veces mayor que la de oro puro, y la lixiviación de plata alcanzó $0,247 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. También se observó un periodo de inducción de 48 horas para láminas de metal, tras el cual la lixiviación se aceleró. La velocidad de disolución de metales aumentó con la concentración de glicina, contenido de plata y pH (hasta 11), y el complejo oro-glicinato mostró buena adsorción en carbón activado (hasta $13,2 \text{ g Au/kg}$ de carbón en 4 horas).

(Roldán et al., 2020), en su investigación “Leaching of Silver and Gold Contained in a Sedimentary Ore, Using Sodium Thiosulfate; A Preliminary Kinetic Study”, evaluaron la lixiviación de oro y plata en un mineral exhalativo sedimentario del este de Hidalgo, México, utilizando tiosulfato de sodio como agente lixivante no tóxico. Los resultados preliminares mostraron que el proceso de lixiviación tuvo poca dependencia de la temperatura y la concentración de tiosulfato. Determinaron un orden de reacción de $-0,61$ para la plata con una concentración de tiosulfato entre $200\text{--}500 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ y de $-0,09$ para el oro en un rango de $32\text{--}320 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$. Además, al variar el pH de 7 a 10, el orden de reacción para la plata fue de $5,03$ y para el oro de $0,94$ en un pH de $9,5$ a 11 . La energía de activación para la plata fue de $3,15 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, indicando un control difusivo, mientras que para el oro fue de $36,44 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, mostrando un control mixto: difusivo a bajas temperaturas ($298\text{--}313 \text{ K}$) y químico a temperaturas más altas ($318\text{--}323 \text{ K}$).

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. La Minería

La minería es una de las actividades más antiguas y fundamentales en la historia de la humanidad, se encarga de la extracción de los minerales que se encuentran acumulados en los yacimientos del suelo y subsuelo. Estos recursos minerales han sido esenciales para el desarrollo

de diversas civilizaciones a lo largo de los siglos, jugando un papel crucial en la evolución de la tecnología, la economía y la cultura. Desde tiempos remotos, los minerales han sido utilizados por el ser humano para múltiples fines, como la fabricación de herramientas, utensilios de uso cotidiano, armas, y en la creación de obras de arte. Además, la minería ha proporcionado los recursos necesarios para la alimentación y la mejora de la calidad de vida de las sociedades.

En el caso del Perú, la minería tiene una rica historia que se remonta a épocas precolombinas, siendo uno de los centros más importantes de la metalurgia antigua. La cultura Chavín, que floreció en la región andina, fue pionera en el trabajo de metales como el oro, la plata y el cobre. Los metales preciosos fueron utilizados tanto en la creación de objetos rituales como en la fabricación de utensilios de gran valor, y el oro, en particular, era considerado un símbolo de poder y divinidad. Sin embargo, fue con la llegada de los conquistadores españoles en el siglo XVI cuando la minería se consolidó como un pilar central en el sistema social y económico del país. Los españoles introdujeron nuevas tecnologías de extracción y procesamiento de metales, impulsando la minería como una actividad económica de gran escala, que rápidamente se convirtió en un motor de la economía colonial. Desde entonces, la minería ha sido un sector estratégico para el desarrollo económico del Perú, siendo uno de los principales productores de metales preciosos como el oro, la plata, el cobre y el zinc (Sánchez, 2021).

3.2.2. *Los Minerales*

Los minerales son sustancias sólidas, inorgánicas y de origen natural que presentan una composición química definida, con posibles variaciones dentro de ciertos límites, y una estructura cristalina ordenada. Estos forman parte de las rocas que constituyen la corteza terrestre. Cuando los minerales se encuentran concentrados en cantidades y condiciones que permiten su extracción

de forma económicamente rentable, reciben el nombre de yacimientos minerales. La posibilidad de que un yacimiento sea explotado dependerá de factores técnicos, económicos, legales y ambientales (Rivera, 2005).

3.2.2.1. Yacimientos Primarios

Los yacimientos primarios están originados de los procesos de segregación magmática, ya que estos procesos se verifican en el proceso de enfriamiento lento de magmas encontradas en las profundidades de la corteza terrestre. Estos magmas son rocas fundidas que están compuestas por silicatos y óxidos, pero a su vez contienen agua y compuestos de cloro, azufre, carbono, flúor y boro. El origen de estos magmas puede ser diverso, generalmente se trata de material fundido primario.

Este proceso de enfriamiento lento comprende una etapa inicial llamada fase magmática, en la cual se solidifican la mayor parte de la sílice y de los silicatos, así como también se separan por densidades algunos óxidos y sulfuros. En una etapa final se presenta una fase hidrotermal, en la que, con el descenso de la temperatura, la solución residual acuosa se estabiliza y adquiere gran movilidad. Estas soluciones tienden a formar los filones hidrotermales (Ballester et al., 2000).

3.2.2.2. Yacimientos Secundarios

Estos pueden originarse debido a la acción de agentes atmosféricos sobre los yacimientos primarios. Dichos procesos, al degradar los depósitos originales mediante mecanismos de concentración mecánica (como el transporte y depósito de sedimentos) o química (como la disolución y precipitación de compuestos), dan lugar a la formación de yacimientos secundarios. Las rocas, al estar sometidas a agentes físicos y químicos, forman arenas y gravas que transportan

una alta concentración de minerales pesados. Generalmente, estos minerales no son económicamente viables para la explotación en los yacimientos primarios debido a su baja ley, pero en los depósitos secundarios su concentración resulta factible.

Este proceso implica la percolación de aguas superficiales sobre yacimientos de sulfuros metálicos, lo que genera oxidación, lixiviación y redeposición de sulfuros en zonas internas. En la zona de oxidación predomina la pirita, la cual origina soluciones de sulfato férrico que lixivian fácilmente los sulfuros de cobre, zinc, níquel y cobalto. En cuanto al comportamiento de los metales preciosos, el oro permanece inalterado debido a su baja reactividad, mientras que la plata, al ser más susceptible a procesos de oxidación, se lixivia parcialmente. Como resultado, se observa una disminución en la concentración de Cu, Ag, Zn, Co y Ni, y un aumento en la de Fe, Pb y Au (Ballester et al., 2000).

3.2.3. Metalogenia del Área de Cerro de Pasco

En la morfología del depósito se tiene una mineralogía variada y completa de los cuales destacaremos que estos se agrupan en un cuerpo silico-pirítico, vetas, minerales de oro, cuerpos mineralizados de plomo-zinc, cuerpos mineralizados de plata y cuerpos oxidados argentíferos.

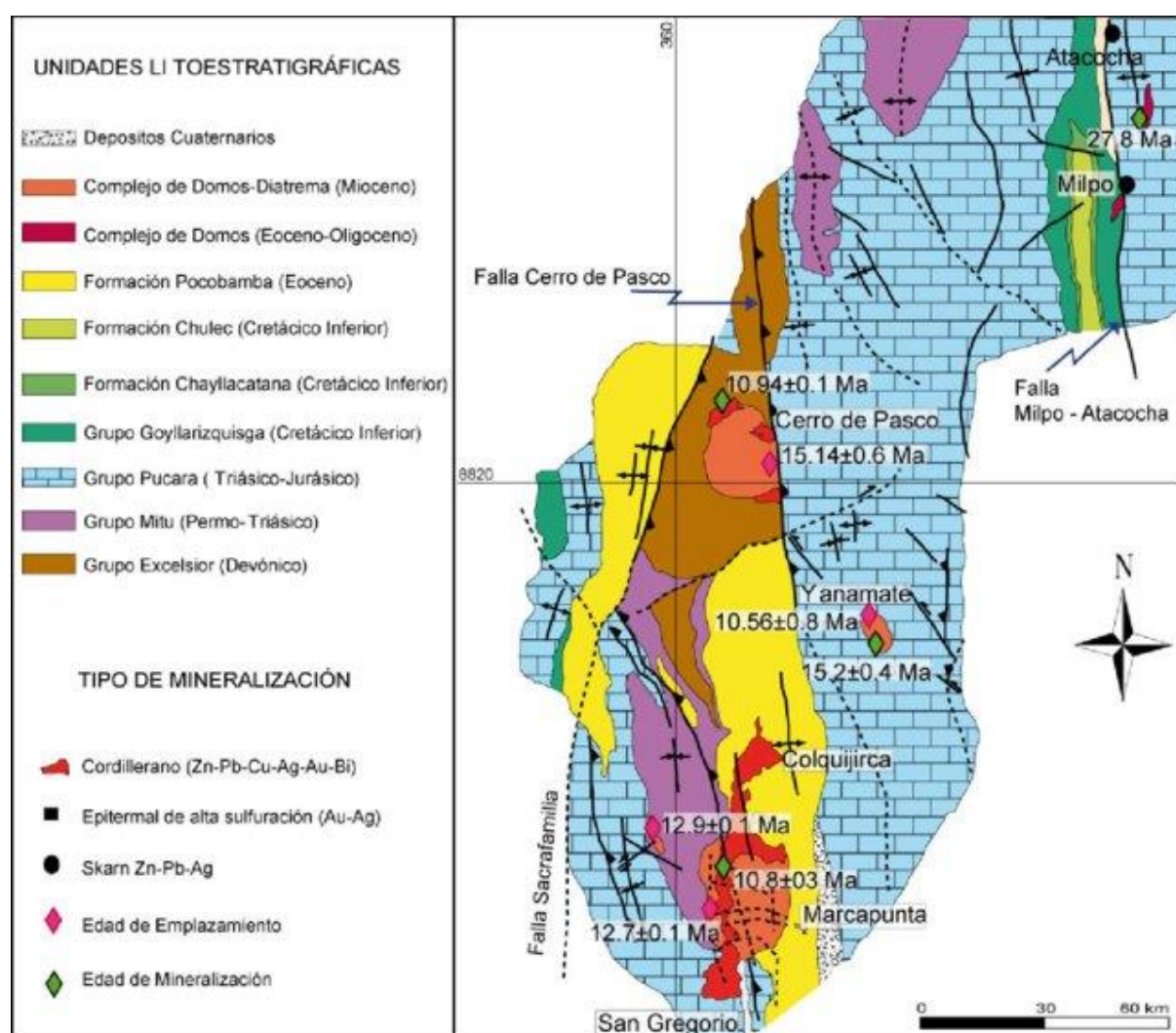
La mineralización de la plata está presente en vetas y cuerpos irregulares, generalmente conteniendo en las vetas una composición de enargita y tennantita. Con respecto a los cuerpos mineralizados de plata están constituidos por una masa porosa que se mezcla con sulfuros.

Los cuerpos oxidados argentíferos generalmente suprayace al cuerpo silico-pirito y a los cuerpos de plomo-zinc, conteniendo altos valores de plata cuando se encuentran sobre estos últimos.

Concluyendo se tiene que la mineralización de este yacimiento del área de Cerro de Pasco está relacionada al pórfido de monzonita cuarcífera y cuya mecánica de deposición fue parcialmente conducida por las grandes fracturas y la naturaleza de las rocas encajantes (Rivera N. , 2002).

Figura 1

Mapa geológico de Cerro de Pasco con edades de rocas intrusivas y mineralización



Nota: Las muestras utilizadas corresponden a una ubicación representativa dentro de esta zona, sin asignación específica de yacimiento (Carlotto et al., 2009).

3.2.4. *Minerales Refractarios*

Los minerales de oro y plata estarán en la clasificación de refractarios cuando una parte significativa de los metales no pueden ser extraídos eficientemente usando métodos convencionales. Con respecto a la clasificación de los depósitos de minerales refractarios estos podemos clasificarlos geoquímicamente como minerales sedimentarios, los que presentan oro libre, y los que son minerales hidrotérmicos. Estos 2 depósitos se consideran de una recuperación compleja. El término refractario representa a los minerales de oro y plata que tienen una recuperación en el proceso de cianuración convencional menor al 80%.

La refractabilidad es causada comúnmente por la oclusión o diseminación de las partículas finas submicroscópicas de oro (menor a 1 μm) que se encuentran encapsuladas en los minerales de sulfuros, como la pirita, el cuarzo, y la arsenopirita, las cuales tienen matrices insolubles y complicadas de penetrar con soluciones de cianuro en la lixiviación. Otros principales enfoques que se tiene sobre las posibles causas de la refractabilidad es la insolubilidad de minerales auríferos o la formación de capas de óxido y de compuestos de hierro, plomo, arsénico y antimonio que se agrupan alrededor de las partículas de oro y plata durante el proceso de extracción (Dennen & Gross, 2010).

3.2.5. *El Oro*

El oro es un metal amarillo que presenta una gran ductilidad y maleabilidad. También es el elemento metálico más inerte, presenta una gran estabilidad y resistencia a la corrosión teniéndose que los ácidos minerales simples exceptuando al ácido selénico no disuelven el oro; otro ácido que disuelve el oro es la combinación de ácido clorhídrico y ácido nítrico conocido como agua regia. El oro puro y muchas de sus aleaciones son no magnéticas, también se tienen

aleaciones de oro y manganeso que tienen propiedades magnéticas o aleaciones con hierro, níquel o cobalto las cuales son ferromagnéticas. El quilate se utiliza para describir la proporción de oro presente en una aleación siendo 24 quilates oro puro y 18 quilates son 75% oro (Chryssoulis & McMullen, 2005).

3.2.5.1. Minerales de Oro

El oro es un elemento químicamente inerte en condiciones de temperatura y presión ambientales, lo que explica la escasez de compuestos naturales del metal. Su concentración promedio en la corteza terrestre es baja, del orden de 0,005 g/t, siendo inferior a la de la mayoría de los metales comunes. Esta baja concentración implica que, en yacimientos primarios, su explotación no siempre es económicamente viable sin un proceso de concentración natural significativo. Dicho enriquecimiento puede producirse por procesos gravitacionales o por movilización y posterior precipitación desde soluciones hidrotermales oxidantes, ácidas y ricas en agentes complejantes, como los cloruros (Marsden & House, 2006).

Debido a su carácter siderófilo, el oro muestra escasa afinidad por el oxígeno y el azufre, pero alta afinidad por metales. Se concentra principalmente en fases metálicas o en soluciones hidrotermales residuales durante las etapas finales del enfriamiento magmático, en lugar de incorporarse a los silicatos formados tempranamente. Los depósitos de oro más ricos suelen encontrarse en ambientes con alto contenido de arcillas y bajo contenido de carbonatos, donde las condiciones reductoras favorecen la reprecipitación del oro a partir de los fluidos minerales.

En la naturaleza, el oro aparece principalmente en forma de metal nativo o aleado con plata (hasta un 15 %), conocido como electrum. También puede encontrarse en aleaciones con

elementos como bismuto, telurio, cobre, hierro y platino, lo que les otorga una mineralogía distintiva respecto a otros elementos metálicos (Marsden & House, 2006).

3.2.6. La Plata

La plata es un metal escaso que se encuentra en la corteza terrestre, pero a su vez es el menos costoso y más abundante de los metales preciosos. La plata es encontrada de forma natural en la parte superficial de la corteza terrestre en forma de menas, así como también en aleaciones con otros metales en su mayoría son el oro y el cobre. Este metal cuenta con propiedades físicas y químicas muy importantes por lo que su extracción es esencial en la época actual. Este metal posee una gran ductilidad, maleabilidad y posee la mayor reflexión óptica siendo descatoado en la joyería.

La gran capacidad de conducción térmica y eléctrica de este metal lo hace idóneo para la fabricación de conectores y fusibles hechos a base de plata pura, recientemente se está empleando para el área médica ya que se puede utilizar para medir la glucosa de un diabético. La plata a lo largo de la historia se ha usado y formado parte de las civilizaciones debido a sus grandes propiedades y características, por ello la importancia de la extracción y procesamiento de este metal (Morones, 2010).

3.2.6.1. Potencial Geológico de los Minerales de Plata

La plata está asociada en su mayor parte al oro, cobre y plomo siendo poco común encontrar plata nativa la cual puede presentarse con la pureza mayor al 95%. En los depósitos con mayor concentración de plata son epitermales e incluyen vetas hidrotermales de carbonatos, cuarzo y fluorita, a menudo en rocas terciarias alteradas.

La complejidad de la mineralogía de la plata genera que se tenga alrededor de 75 minerales de plata importantes y 200 aleaciones minerales que contienen plata. El potencial geológico que tiene este metal con respecto al oro, que está casi siempre presente cuando la ley es mayor a 10 g/t, es muy importante ya que el mayor volumen y leyes altas generan una gran cantidad de ingresos. La parte perjudicial a tener en cuenta es que al tener mayor masa de procesamiento puede reducir la recuperación sobre todo en la lixiviación por el fácil empañamiento del electrum en presencia de iones de sulfuro, formándose así una capa que limitará el acceso de las soluciones cianuradas disminuyendo así la cinética de disolución y eventualmente la extracción tanto del oro como la plata (Marsden & House, 2006).

3.2.7. Cianuración de Oro y Plata

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. Para que esta lixiviación de produzca, la solución lixivante debe contener tres componentes químicos esenciales, estos son:

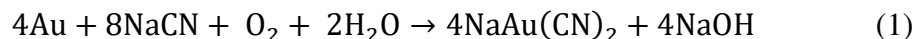
- El ion cianuro (CN^-)
- El oxígeno disuelto en la solución (O_2)
- El ion hidroxilo (OH^-)

Los dos primeros son los reactantes químicos que disuelven a los metales preciosos y el último es un componente esencial que le da un carácter alcalino a la solución, permitiendo el accionar químico del ion cianuro en forma más eficiente, menos riesgosa y una operación económica (Srithammavut, 2008).

3.2.7.1. Solubilidad de Oro y Plata en Soluciones de Cianuro

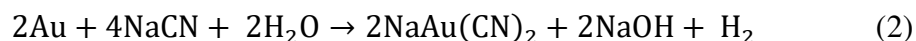
Hay muchas teorías que tratan de explicar los mecanismos de disolución de oro y plata en soluciones de cianuro, pero las más aceptadas son las siguientes (Deschênes, 2016):

- Teoría de Elsner's (1846). Es el primero en reconocer que el oxígeno es necesario para la disolución de oro en soluciones de cianuro:



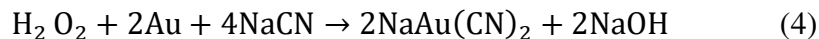
La disolución de la plata puede ser representada por una reacción similar.

- Teoría de Janin (1882, 1892). No acepta el hecho de que el oxígeno es esencial para la disolución y es un convencido de que el hidrógeno está involucrado durante el proceso de acuerdo con la reacción:



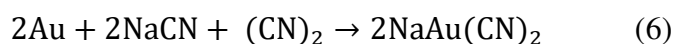
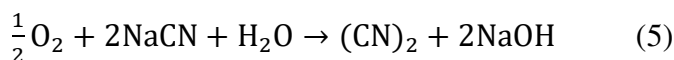
Posteriormente Maclaurin (1893) y Christy (1896) concluyeron que la teoría de Janin es termodinámicamente imposible y ratificaron la teoría de Elsner's experimentalmente.

- Teoría de Bodlander (1896). Sugiere que la disolución del oro tiene lugar en dos etapas de acuerdo con las reacciones siguientes:



Como se puede observar el Sr. Bodlander propone la presencia de un producto intermedio que es el peróxido de hidrógeno. La reacción total de estas dos etapas es la reacción de Elsner's.

- Teoría del Cianógeno. Christy (1896). Sugiere que el oxígeno necesario para la disolución, libera gas cianógeno y consideró que este gas es el agente lixivante del oro:



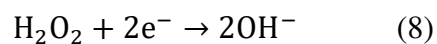
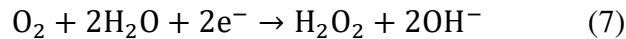
Al año siguiente Skey y Park (1898) llegaron a la conclusión de que las soluciones acuosas de cianógeno no ejercían la más mínima acción solvente sobre el oro y la plata.

- Teoría del Cianato (CNO^-). MacArthur (1905). Sugiere que, si el oxígeno es necesario para la disolución, este oxidará al cianuro a cianato y que este era el agente lixivante del oro. Esta asunción es refutada por Green (1913), quien demostró que el cianato no tiene ninguna acción sobre el oro.

Evidencia termodinámica Barsky, determinó la energía libre de formación de los complejos iónicos auro y argentocianuro y con estos datos calculó los cambios de energía libre de varias reacciones sugeridas. Estos cálculos favorecieron la teoría de Elsner's y Bodlander, en el caso de la teoría de Janin se refuto termodinámicamente.

- Teoría de la Corrosión. Boonstra (1943). Es el primero en reconocer que la disolución de oro en soluciones de cianuro es similar a un proceso de corrosión metálica, en que el oxígeno disuelto en la solución es reducido a peróxido de hidrógeno e ion hidroxilo. Boonstra al igual que Bodlander sugiere que el proceso ocurre en varias etapas tal como se indica a continuación:

Reducción Catódica:



Oxidación Anódica:

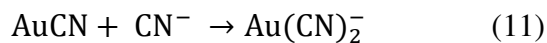
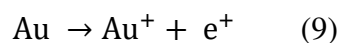
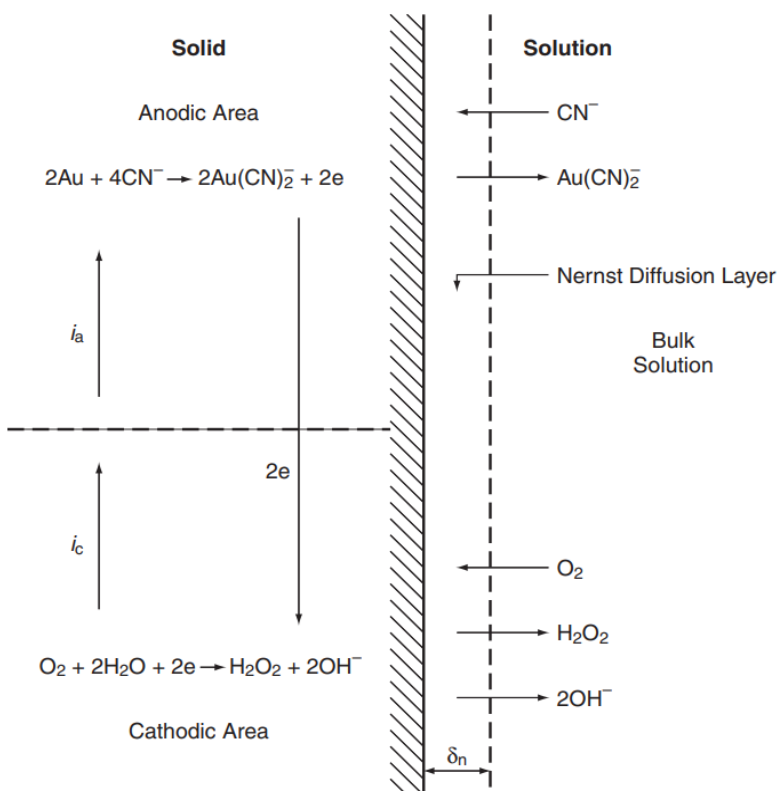


Figura 2

Esquema de la celda de corrosión en superficie de oro en solución de cianuro con oxígeno

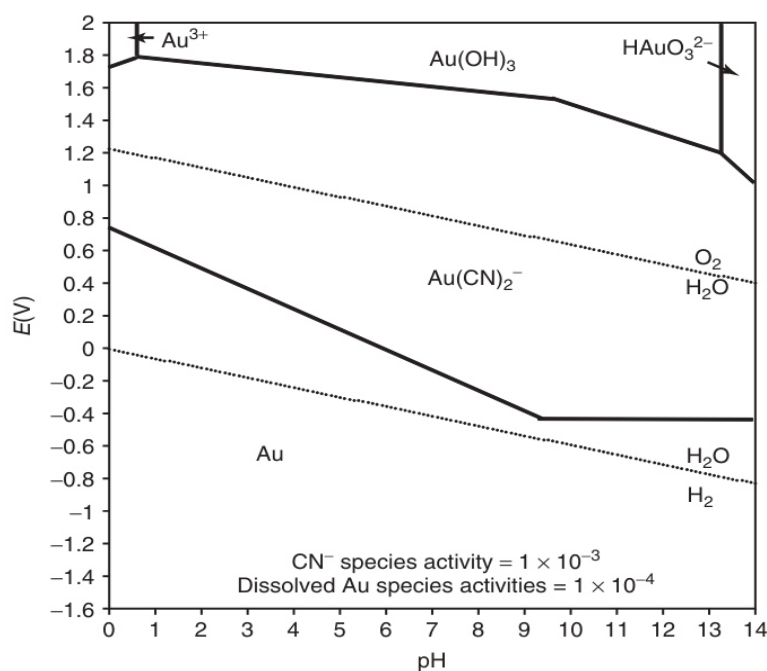


Nota: Reacciones anódica y catódica del oro en cianuración (Marsden & House, 2006)

El diagrama de Pourbaix de la Figura 3 ilustra visualmente las condiciones óptimas de pH y potencial (redox) para la disolución del oro mediante cianuración, que corresponden a la zona de estabilidad del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y, simultáneamente, con un potencial lo suficientemente oxidante para disolver el oro metálico, pero no excesivamente alto para evitar la formación de hidróxidos o pasivación. También resalta el papel del oxígeno como agente oxidante esencial en este proceso.

Figura 3

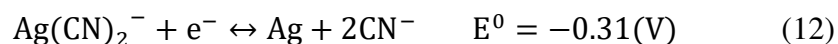
Diagrama de Pourbaix para oro y cianuro



Nota: Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema $\text{Au-H}_2\text{O-CN}^-$ a 25°C (Marsden & House, 2006).

La plata frecuentemente se encuentra junto al oro en cantidades económicamente relevantes, por lo que su comportamiento en soluciones de cianuro es de suma importancia. La

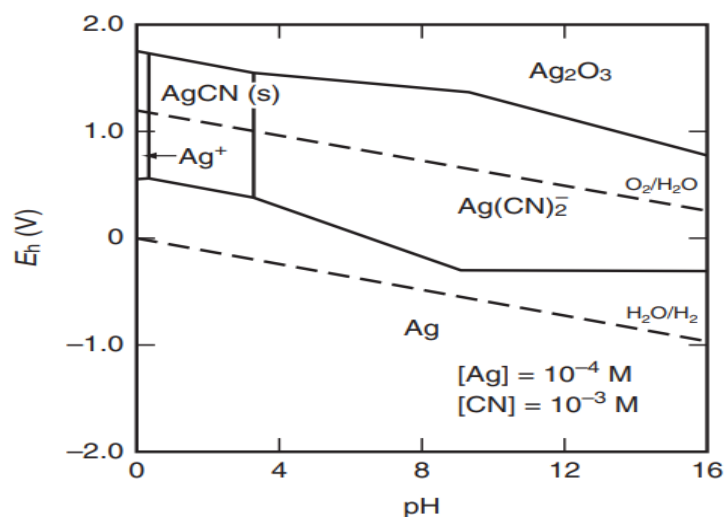
plata metálica tiene un comportamiento similar al oro en una solución acuosa de cianuro y se disuelve anódicamente según la siguiente ecuación:



La Figura 4, un diagrama de Pourbaix para el sistema plata-cianuro-agua a 25°C, ilustra las condiciones de estabilidad de las especies de plata. Se aprecia claramente la región de predominio del complejo de dicianoargenato(I) $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, que es la especie soluble y deseada para la lixiviación de la plata. Además, el diagrama muestra que el cianuro de plata insoluble ($\text{AgCN}(\text{s})$) se forma a valores de pH inferiores a aproximadamente 3.5. Esto indica que, en condiciones ácidas, la plata tiende a formar un precipitado insoluble de cianuro de plata, lo cual es perjudicial para la recuperación de plata mediante cianuración (Palyanova, 2020).

Figura 4

Diagrama de Pourbaix para plata y cianuro

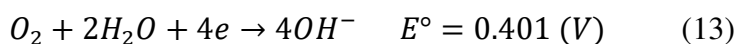


Nota: Diagrama Eh–pH del sistema Ag–CN–H₂O a 25 °C que muestra los campos de estabilidad de las especies de plata y el intervalo en el que predomina el complejo soluble $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, relevante para la cianuración con carburo de calcio.

Asimismo, el área de predominio de AgCN(s) aumenta de manera significativa a medida que se reduce el CN^- , por ejemplo, de 10^{-3} a 10^{-4} M, con consecuencias significativas para los sistemas de lixiviación (Palyanova, 2020).

En concentraciones muy altas de cianuro, se pueden formar complejos de orden superior, como $\text{Ag}(\text{CN})_3^{2-}$ y $\text{Ag}(\text{CN})_4^{3-}$, sin embargo, tienen poca importancia práctica.

Se ha demostrado que la disolución de la plata se produce a través de un mecanismo de cuatro electrones, con reducción directa del oxígeno a iones hidroxilo según la siguiente ecuación:

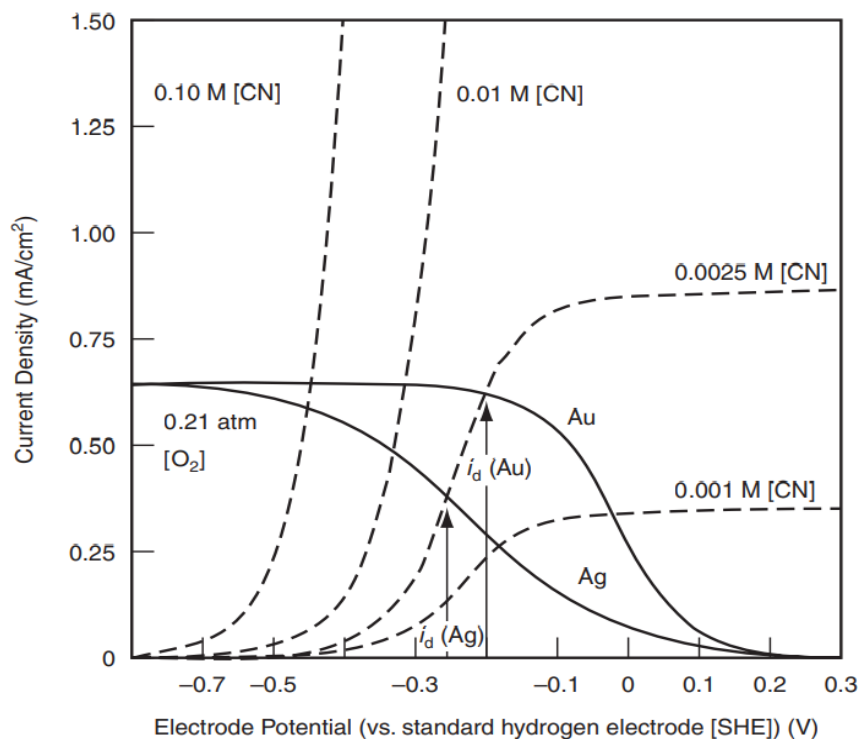


Se cree que la reducción de oxígeno en la superficie de la plata implica un proceso mixto de difusión más transferencia de carga, que incorpora la adsorción de oxígeno en la superficie. El coeficiente de transferencia para la reducción de oxígeno en la plata es 0,25 mientras que en el oro es de 0,5.

Bajo condiciones usualmente aplicadas en la disolución óptima del oro, la velocidad de disolución de la plata es significativamente más lenta que la del oro, como lo indican las curvas de corriente-potencial en la Figura 5 (Marsden & House, 2006).

Figura 5

Diagrama de Pourbaix para oro y plata - cianuro



Nota: Curvas de polarización del sistema Au–Ag–CN–O₂ que muestran la variación de la densidad de corriente de disolución de oro y plata y de la reducción de O₂ con el potencial y la concentración de cianuro, relevantes para la cinética de cianuración. (Marsden y House, 2006).

Por ejemplo, a una concentración de cianuro de 0,0025 M NaCN y utilizando aire para proporcionar oxígeno, la densidad de corriente de disolución para la plata es aproximadamente la mitad de la del oro. Sin embargo, la diferencia en las tasas de disolución se reduce a medida que aumenta la concentración de cianuro, y la Figura 5 muestra que las corrientes de oro y plata se aproximan entre sí en concentraciones superiores a 0,1 M de NaCN (es decir, 5 g/L).

Por tanto, las operaciones que tratan minerales con alto contenido de plata pueden aplicar concentraciones elevadas de cianuro para mejorar las extracciones de plata y superar cualquier

efecto retardante en la disolución del oro causado por la competencia por el cianuro (Palyanova, 2020).

3.2.7.2. Termodinámica del Proceso de Cianuración

Los mecanismos fisicoquímicos de la lixiviación del oro se basan en sus propiedades termodinámicas y en sus estados estables y metaestables, los cuales se pueden representar en el diagrama de Pourbaix que relaciona el potencial óxido-reducción del metal con el pH del medio. En estos diagramas podemos evidenciar como los compuestos $\text{Au}(\text{OH})_3$, AuO_2 , HAuO_3 y también el ion Au^{3+} necesitan altos potenciales redox (mayores al de la descomposición del oxígeno) para formarse, debido a esta gran inestabilidad es muy difícil la lixiviación del oro metálico (Asamoah et al., 2014).

De lo anterior, se deduce que las mejores condiciones termodinámicas para disolver el oro son:

- I. Presión parcial de oxígeno elevada
- II. Concentración de cianuro elevada
- III. Concentración de iones OH^- baja (pH moderadamente alcalino)

Sin embargo, las condiciones industriales de cianuración son:

- I. Presión parcial de oxígeno constante (en presencia de aire o con oxígeno puro)
- II. Concentración de cianuro baja (0,01–0,05 mol/L)
- III. pH elevado, con el objetivo de evitar la formación de gas cianhídrico (HCN), altamente tóxico y volátil (Marsden & House, 2006)

3.2.7.3. Factores Cinéticos

La cinética en una lixiviación es un factor muy importante para considerar. El tiempo cuando ocurren las reacciones de menor velocidad es la etapa controlante, en las cuales se lleva a cabo la reacción en gran parte, es importante identificar esta etapa para poder maximizar la eficiencia de un proceso. En una reacción en la cual se hallan involucradas una fase sólida y otra líquida, ocurre en las etapas siguientes:

- I. Absorción de oxígeno en la solución.
- II. Transporte de cianuro y oxígeno disuelto en la interface solido-liquido.
- III. Adsorción de los reactantes (CN⁻ y O₂) en la superficie sólida.
- IV. Reacción electroquímica.
- V. Desorción de los complejos solubles de oro-cianuro y otros productos de reacción desde la fase sólida.
- VI. Transporte de los productos desorbidos a la solución.

Durante las etapas I, II, V, VI el tiempo que se emplea es controlado por las velocidades de difusión, por su parte las etapas III y IV están en función de la velocidad de los procesos químicos. Cuando la difusión es muy lenta, es necesaria una mayor agitación para acelerar la reacción, si es retardada por los procesos químicos, es necesario elevar la temperatura (Misari, 2010).

3.2.7.4. Principales Factores que Afectan la Disolución del Oro

3.2.7.4.1. Efecto del Oxígeno

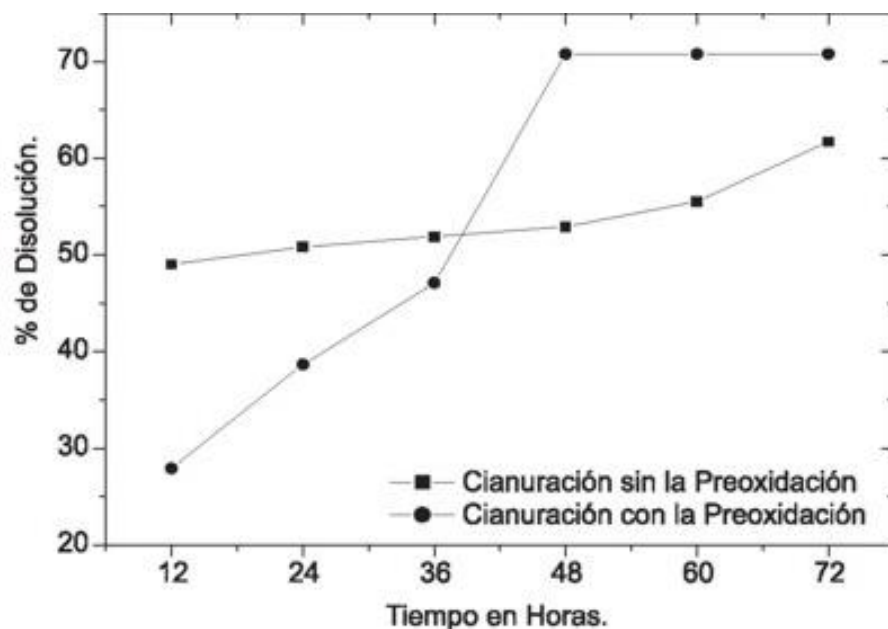
El oxígeno molecular es el agente oxidante principal en la disolución del oro durante el proceso de cianuración. Aunque en el pasado se utilizaron otros oxidantes como el peróxido de

sodio, el permanganato de potasio, el bromo o el cloro, su uso ha disminuido considerablemente debido a la complejidad de su manipulación, sus altos costes y problemas de seguridad (Marsden & House, 2006) . Actualmente, la aireación controlada mediante inyección de aire o de oxígeno puro es suficiente para lograr una oxidación eficiente del oro en condiciones industriales. Esto ha sido posible gracias a un mejor entendimiento de los mecanismos involucrados en la cianuración y los efectos de los minerales acompañantes. La correcta aireación, en combinación con un pH adecuado, puede ofrecer resultados comparables a los de oxidantes químicos más agresivos (Gonzales & Bravo, 2021).

La Figura 6 demuestra que la preoxidación acelera la velocidad de disolución y mejora sustancialmente el porcentaje final de recuperación de la especie disuelta en comparación con la cianuración directa, lo que resalta el efecto beneficioso del oxígeno en la cianuración.

Figura 6

Gráfico comparativo de la influencia de la oxidación en la cianuración



Nota: Comparación del porcentaje de disolución en función del tiempo para la cianuración con y sin etapa de preoxidación, que muestra el aumento de extracción cuando se incorpora la preoxidación. (Salinas, 2004).

3.2.7.4.2. Concentración de Cianuro

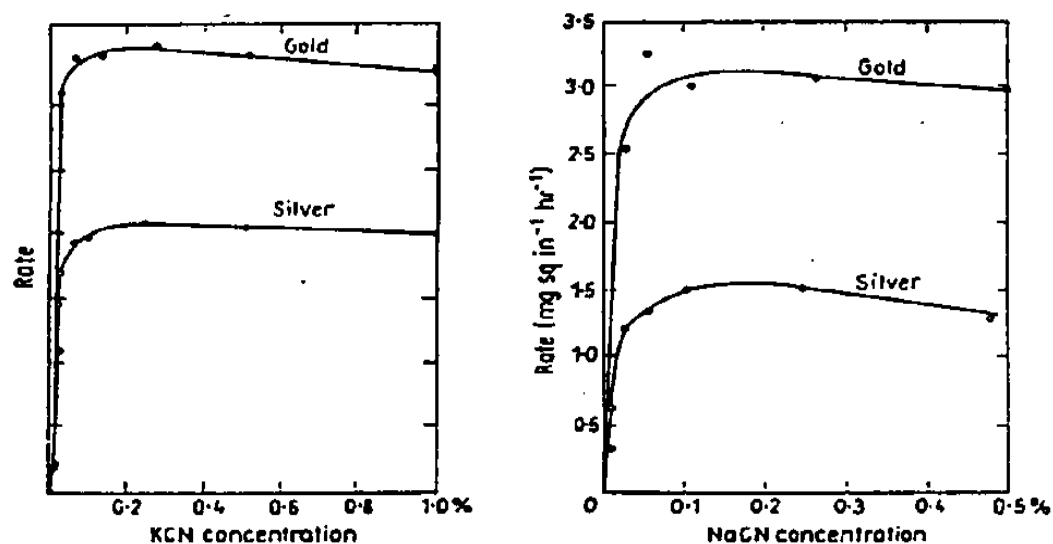
La velocidad de disolución del oro en soluciones de cianuro según las pruebas de muchos investigadores varía ampliamente debido a las condiciones o técnicas que se emplearon. Para ello se deberá tener condiciones de agitación intensiva, así como también un volumen grande la solución cianurada en contacto con una superficie de oro relativamente pequeña expuesta; según estas condiciones ideales la velocidad máxima de disolución del oro se puede encontrar en soluciones de 0.0098% de NaCN.

En la práctica la mayoría de las plantas de cianuro tratan los minerales auríferos usando soluciones con menos de 0.05% de NaCN (Mendo, 2016).

En la Figura 7 se observa que la rapidez de disolución para ambos metales aumenta con el incremento inicial de la concentración de cianuro hasta alcanzar una concentración óptima, más allá de la cual la rapidez tiende a estabilizarse o disminuir ligeramente.

Figura 7

Gráfico comparativo de la influencia de la concentración de cianuro en la rapidez de disolución



Nota: Curvas de disolución de oro y plata que relacionan la concentración de KCN y NaCN con la rapidez de disolución, mostrando el incremento de la velocidad hasta valores casi constantes al aumentar la concentración de cianuro. (Ramos, 2019).

3.2.7.4.3. Efecto de la Temperatura

En un proceso de lixiviación cianurada que contiene oro metálico, el aumento de la temperatura genera dos efectos opuestos que influyen en la velocidad de disolución del metal. Por un lado, se observa un incremento en la disolución del oro, ya que la temperatura favorece la velocidad de las reacciones químicas involucradas. Sin embargo, al mismo tiempo, se produce una

disminución en la solubilidad de los gases, lo que reduce la disponibilidad de oxígeno disuelto, un agente esencial en la oxidación del oro durante el proceso.

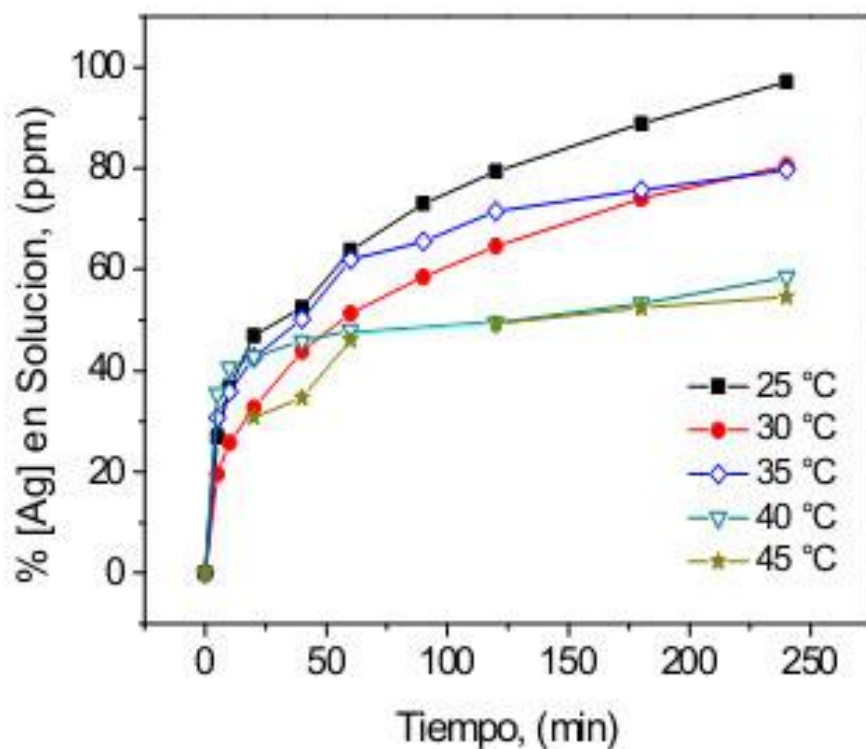
A pesar de este descenso en el oxígeno disponible, la disolución del oro puede continuar a temperaturas elevadas debido a que la mayor energía térmica reduce la energía de activación de las reacciones redox, facilitando la disolución aún en condiciones de menor oxidación.

En cuanto a la plata, el comportamiento frente a la temperatura también muestra una mejora en la velocidad de disolución a temperaturas moderadamente elevadas. No obstante, al igual que en el caso del oro, temperaturas demasiado altas pueden causar una mayor descomposición del cianuro, lo cual reduce su disponibilidad y eficiencia. Además, tanto para el oro como para la plata, el aumento de la temperatura puede incrementar el consumo de cianuro por reacción con cianicidas presentes en el mineral, lo que representa una desventaja operativa y económica.

Aunque el aumento de temperatura puede acelerar la cinética de disolución de metales preciosos, su aplicación práctica está limitada por factores como el costo energético, la pérdida de cianuro y la reducción de oxígeno disuelto (Zaldaña & Zavaleta, 2016).

Figura 8

Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura en la cianuración



Nota: Curvas de disolución de plata que muestran la variación del porcentaje de Ag en solución en función del tiempo para distintas temperaturas de cianuración, evidenciando el incremento de la extracción con la temperatura. (Juárez et al, 2012).

La Figura 8 sugiere que existe una temperatura óptima para la cianuración de la plata, y que un aumento excesivo de la temperatura más allá de este punto (en este caso, por encima de 35°C) tiene un efecto negativo en la recuperación final de plata.

3.2.7.4.4. *Efecto del Tamaño de Partícula*

En minerales auríferos que contienen oro grueso y libre, es recomendable aplicar procesos gravimétricos, como jigs, mesas vibratorias o concentradores centrífugos, antes del proceso de cianuración. Esto se debe a que el oro en partículas gruesas no puede ser disuelto eficientemente en un tiempo razonable durante la lixiviación. Un método ampliamente utilizado para reducir el tamaño de partícula es la molienda, la cual permite la recirculación de partículas pesadas hasta alcanzar un tamaño adecuado para el proceso de cianuración (Mendo, 2016).

En cuanto a la plata, su comportamiento depende en gran medida del tipo de mineralogía en la que se encuentre. Si se presenta en forma libre, también puede ser parcialmente recuperada por concentración gravimétrica, aunque en menor proporción que el oro, debido a su menor densidad. Sin embargo, la mayor parte de la plata suele encontrarse combinada con sulfuros o en formas finamente diseminadas, por lo que el tamaño de partícula juega un papel fundamental: una molienda fina adecuada facilitará su exposición y posterior disolución durante la cianuración (Zaldaña & Zavaleta, 2016).

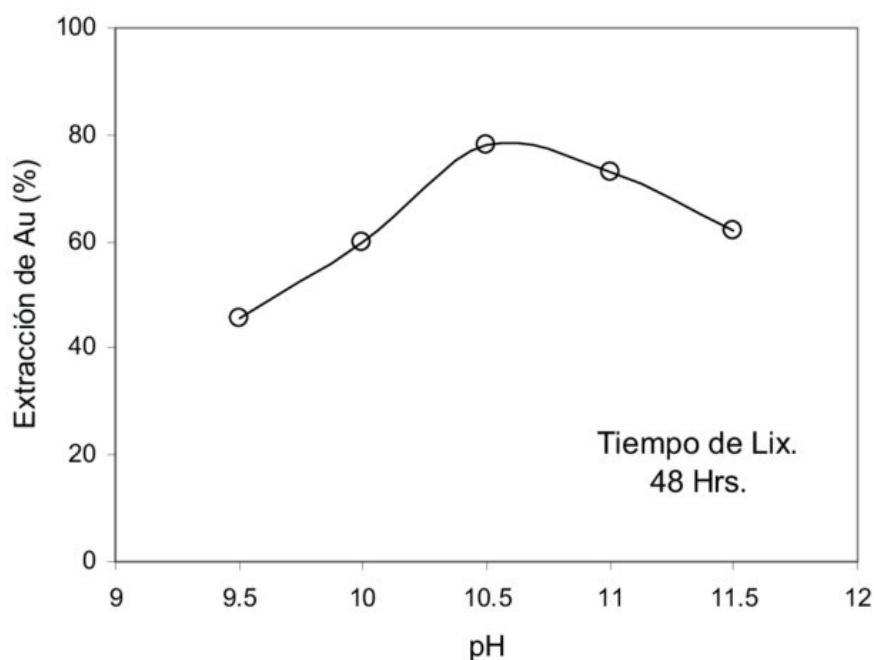
3.2.7.4.5. *Efecto de los Reguladores de pH*

Los reguladores de pH tales como el hidróxido de sodio y esencialmente el hidróxido de calcio demoran la disolución del oro en soluciones cianuradas. Según investigaciones sobre la velocidad de disolución en soluciones de 0.10% de NaCN, encontraron que la velocidad de disolución usando hidróxido de calcio disminuye rápidamente al estar próximo a un pH de 11 y llegando a ser negligible a un pH de 12.2. Las funciones reguladoras principales son las de evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis, neutralizar los compuestos ácidos en el mineral, sedimentar

las partículas finas del mineral y mejora la extracción cuando se trata minerales que contienen telururos ya que estos se descomponen fácilmente a mayores alcalinidades (Arce & Cano, 2020).

Figura 9

Gráfico comparativo de la influencia del pH en la cianuración



Nota: Curva de disolución de oro (Rojas, 2003).

La Figura 9 demuestra que es crucial mantener el pH dentro de un rango alcalino específico (alrededor de 10.5) para maximizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración. Con respecto a la plata, se considera una curva de extracción similar a la del oro, con un pH óptimo en un rango alcalino.

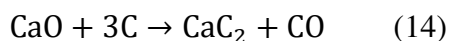
3.2.8. *Carburo de Calcio*

El carburo de calcio es un compuesto sólido de tono grisáceo que experimenta una reacción exotérmica al entrar en contacto con el agua, generando cal apagada (hidróxido de calcio) y acetileno. Este tipo de compuestos se produce mediante la combinación del carbono con otro elemento E, que generalmente es más electropositivo que el carbono.

El carburo de calcio industrial es un material sólido, duro y denso, cuya coloración varía según su pureza, desde un gris marrón hasta un tono negro azulado. Cuando se fragmenta, presenta una textura que combina características amorfas y cristalinas. Su composición química consiste en un átomo de calcio y dos átomos de carbono (CaC_2), y generalmente se clasifica en diferentes tamaños de partícula según el uso que se le dará. Las materias primas principales para su producción son la energía eléctrica, el caliza y fuentes de carbono como el coque de petróleo y el carbón vegetal. En su forma pura, el carburo de calcio es incoloro y se encuentra en dos formas cristalinas: una tetragonal, que se obtiene al calentar el material a $440\text{ }^\circ\text{C}$, y otra cúbica, que se forma a temperaturas superiores. El carburo de calcio comercial tiene una pureza aproximada del 82 %, y en su composición se incluyen trazas de fosfuro de calcio, sulfuro de calcio, ferrosilicio, nitruro de magnesio y carburo de silicio. El color marrón observado en algunos casos se debe a la presencia de pequeñas cantidades de óxido de hierro (Rodygin et al., 2016).

3.2.8.1. **Obtención de Carburo de Calcio**

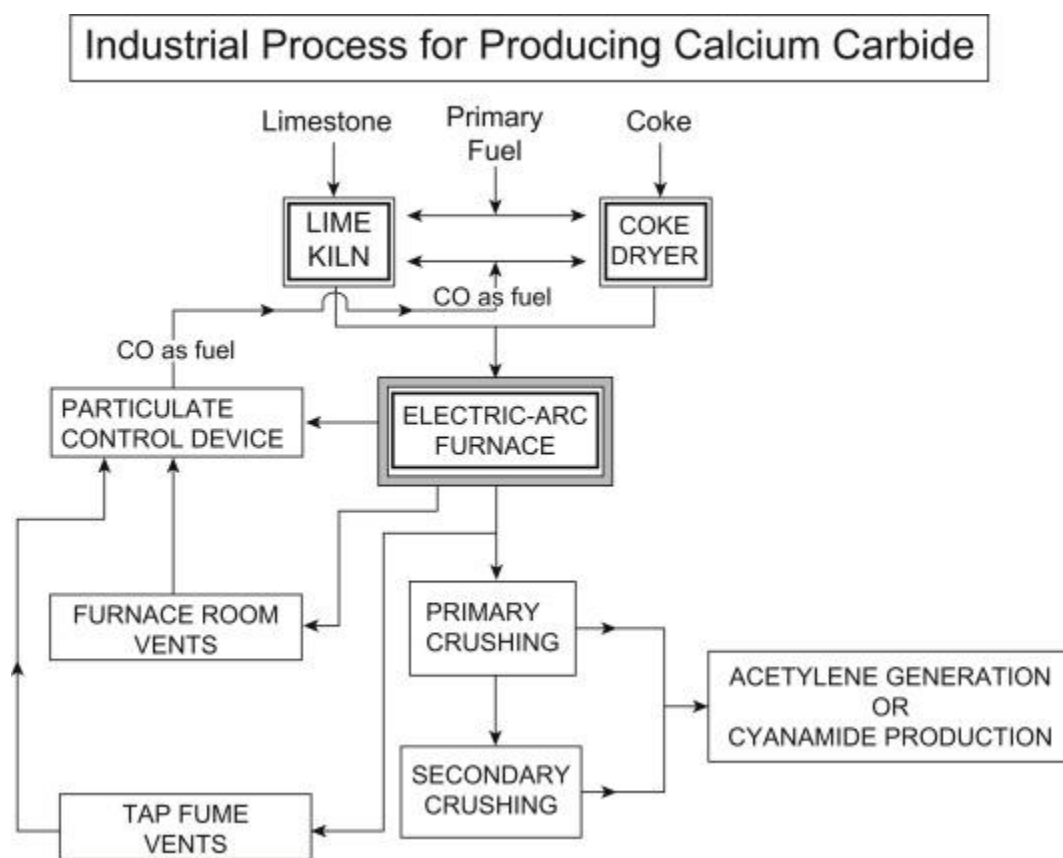
El carburo de calcio se produce en un proceso de arco eléctrico mediante la reacción del óxido de calcio con coque a temperaturas que oscilan entre los 2000 y $2500\text{ }^\circ\text{C}$:



Debido a las condiciones extremas que requiere este proceso, la síntesis del carburo de calcio resulta ser bastante cara, ya que demanda una gran cantidad de energía. Además, los fosfatos presentes como impurezas en los materiales iniciales pueden generar fosfuro de calcio (Ca_3P_2) bajo las mismas condiciones, el cual reacciona con agua produciendo fosfina (PH_3). Esta impureza, junto con trazas de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3), es responsable del característico mal olor del "carburo" (Samoylenko et al., 2023).

Figura 10

Obtención del carburo de calcio



Nota: Diagrama ilustrativo (Ropp, 2013).

CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

4.1. Área de Estudio

El área de estudio del proyecto está localizada en Cerro de Pasco, la cual pertenece a la provincia de Pasco de la región Pasco. La ciudad está ubicada a 4380 msnm y presenta un clima frío con presencia de lluvias siendo la temperatura promedio anual de 5.9°C y la precipitación media de 1180 mm. Cerro de Pasco es conocido por ser la capital minera del Perú ya que posee yacimientos de cobre, zinc, plata y plomo.

4.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación del presente proyecto es de tipo cuantitativo experimental dado que busca examinar el impacto en las recuperaciones de plata y oro (variables dependientes), a partir de la variación de las concentraciones de carburo de calcio y el tiempo de lixiviación (variables independientes).

4.3. Población y Muestra

La población del presente proyecto de tesis parte del mineral de cabeza (Blending), el cual está conformado por 3 frentes: Stockpile A, Stockpile B y Stockpile C; el mineral es proveniente de Cerro de Pasco – Pasco.

El estudio y desarrollo de las pruebas metalúrgicas del proyecto se llevaron a cabo en el laboratorio de investigaciones metalúrgicas de la planta, y el análisis de soluciones y muestras sólidas en el laboratorio químico de la unidad minera.

La cantidad de muestra utilizada para el siguiente estudio fue de 129 Kg.

4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

- Búsqueda de información bibliográfica referente al incremento de recuperación de plata y oro a partir de minerales refractarios.
- Coordinar con el área de Geología a fin de obtener una muestra representativa del Blending de alimentación a la planta de beneficio ubicada en Cerro de Pasco – Pasco.
- Envío de 100 gr de muestra molida de cabeza a laboratorio químico para su ensayo por leyes de Ag y Au.
- Elaboración del diseño experimental para desarrollo de pruebas metalúrgicas mediante el uso de Ms. Excel.
- Desarrollo de pruebas con el Blending de alimentación a la planta variando la concentración de CaC_2 (1, 2, 3 y 4 Kg/t).
- Realizar el balance metalúrgico a fin de determinar la dosificación óptima de CaC_2 , determinar el tiempo mínimo requerido para alcanzar las máximas recuperaciones de Ag y Au, y elaborar la evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO V: Pruebas Experimentales

5.1. Análisis Mineralógico de la Muestra

Las muestras enviadas a laboratorio se prepararon a una granulometría de Malla # 200 las cuales posteriormente fueron secadas a una $T^{\circ}=60^{\circ}\text{C}$.

Haciendo uso del Mini Jones – Rifle ($< 1.0 \text{ kg}$) se realizó la homogenización de las muestras con el objetivo de obtener la mejor representatividad para los análisis químicos y mineralógicos.

5.1.1. Caracterización Química

Para la caracterización química se empleó 200 g de masa de cada muestra, la cual fue pulverizada a 90% - malla 140 ASTM y enviada al laboratorio químico.

Tabla 3

Análisis químico por AAS

Elemento Unidad	Ag g/Tm	Au g/Tm	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	S_Total %
STOCKPILE A1	291	3.02	0.13	0.08	0.12	15.43	0.58
STOCKPILE A2	265	2.92	0.01	0.06	0.02	1.21	0.49
STOCKPILE B1	220	0.56	0.48	1.80	0.72	>20	>40
STOCKPILE B2	441	0.10	0.21	1.32	0.36	>20	36.38
STOCKPILE C1	75	0.06	0.08	0.77	1.20	15.29	2.89
STOCKPILE C2	113	0.06	0.04	1.19	0.76	13.11	3.58

Nota: La tabla muestra los resultados del análisis químico por AAS para cada muestra

Tabla 4*Análisis químico por ICP*

Elemento Unidad	Al %	Ca %	Fe %	K %	Mg %	Na %	P %	S %	Ti %	Ag ppm	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm
STOCKPILE A1	0.89	0.15	14.53	0.17	0.04	0.08	0.06	0.51	0.19	>100	5473	663	<0.5	806	8	6	35	1323
STOCKPILE A2	0.53	0.05	1.14	0.15	0.03	0.01	0.03	0.47	0.09	>100	280	1008	<0.5	86	1	6	43	64
STOCKPILE B1	0.27	0.14	>15	0.01	0.02	0.07	0.06	>10	0.01	>100	2729	19	<0.5	1064	35	4	29	4900
STOCKPILE B2	0.82	0.31	>15	0.14	0.05	0.05	0.12	>10	0.02	>100	1295	15	<0.5	875	27	4	32	2269
STOCKPILE C1	2.02	4.68	13.84	0.55	1.97	0.23	0.17	2.55	0.04	77	833	188	1	171	32	3	26	883
STOCKPILE C2	3.13	0.91	12.14	0.61	0.45	0.11	0.33	3.29	0.03	>100	532	406	2	43	44	2	42	431
Elemento Unidad	Ga ppm	La ppm	Li ppm	Mn ppm	Mo ppm	Nb ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Sr ppm	Tl ppm	V ppm	W ppm	Y ppm	Zn ppm	Zr ppm
STOCKPILE A1	18	4	19	1357	8	15	11	722	2807	1	59	520	13	22	83	2	1219	21
STOCKPILE A2	21	6	7	1941	3	3	6	576	278	1	26	238	8	12	90	4	218	12
STOCKPILE B1	36	2	4	345	1	29	11	>10000	1493	<0.5	76	1250	27	21	74	3	7284	18
STOCKPILE B2	92	7	9	316	1	20	13	>10000	679	1	50	1621	9	32	120	4	3802	17
STOCKPILE C1	37	7	12	>10000	1	18	11	7444	247	4	20	351	35	43	38	7	>10000	38
STOCKPILE C2	163	12	18	6461	1	15	9	>10000	161	12	<10	765	20	58	53	18	8004	33

Nota: La tabla muestra los resultados del análisis químico por ICP para cada muestra

5.1.2. Estudios de Mineralogía

Se realizó el estudio TIMA – PMA, el cual identificó bajo contenido de sulfuros en las muestras a excepción de la pirita donde su contenido es variable de 5 % a 80 %; este último generaría altos consumos de cal debido a que los sulfuros generan pH muy ácidos. Por otro lado, la muestra también presenta contenido de carbonatos y óxidos; lo cual también generaría altos consumos de cianuro.

Tabla 5

Composición modal – TIMA PMA

Modal Full	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
Sphalerite	0.00	0.00	1.14	0.76	0.52	0.09
Chalcopyrite	0.00	0.00	0.42	0.22	0.04	0.01
Chalcocite	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
Tennantite	0.00	0.00	0.16	0.02	0.00	0.00
Enargite	0.00	0.00	0.08	0.06	0.01	0.00
Tetrahedrite	0.00	0.00	0.40	0.01	0.01	0.00
Galena	0.01	0.00	0.72	0.62	0.15	0.20
Plumbojarosite	0.03	0.04	0.00	0.01	0.05	0.02
Lead APS	0.60	0.31	1.24	2.31	1.84	2.87
Anglesite	0.00	0.00	0.64	0.45	0.03	0.54
Cerussite	0.00	0.00	0.40	0.34	0.01	0.07
Pyrite	0.27	0.75	80.79	65.87	4.70	5.46
Pyrrhotite	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01
Other Sulphides	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Hemmimorphite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00
Quartz	73.30	95.63	13.62	26.59	40.41	58.80
Feldspar (Na-K-Ca)	0.03	0.05	0.00	0.04	1.23	0.62
Muscovite	0.00	0.01	0.00	0.14	1.91	2.39
Clays	1.48	0.06	0.01	0.52	0.89	4.56
Other Mica	0.01	0.01	0.00	0.01	0.28	0.85
Calcite	0.05	0.04	0.02	0.05	2.11	0.04
Dolomite	0.13	0.02	0.01	0.41	17.14	2.27
Fe Carbonate (Mn, Zn)	5.67	0.26	0.05	0.15	12.56	15.49
Mn Carbonate (Cu, Fe, Zn)	0.01	0.06	0.00	0.00	0.86	0.08
Smithsonite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
Other Carbonates	0.01	0.00	0.01	0.01	0.56	0.02

Tabla 8*Tamaño de grano de Pirita*

Tamaño	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
<5.00	100.00	0.00	21.39	50.33	6.63	16.45
≥5.00<10.00	0.00	0.00	28.61	25.60	20.24	18.30
≥10.00<20.00	0.00	0.00	30.90	12.51	40.88	65.25
≥20.00<35.00	0.00	0.00	19.10	0.00	32.24	0.00
≥35.00<53.00	0.00	0.00	0.00	11.55	0.00	0.00
≥53.00<75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
≥75.00<130.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
All grains	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla 9*Tamaño de partícula del mineral*

Particle size	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
<5.00	2.80	3.82	2.99	4.10	1.61	3.15
≥5.00<10.00	10.41	11.29	15.08	15.10	5.31	8.88
≥10.00<20.00	24.70	26.71	32.67	29.64	12.05	16.68
≥20.00<35.00	20.52	22.22	23.76	22.14	11.54	13.85
≥35.00<53.00	19.02	18.58	17.73	16.57	12.37	15.83
≥53.00<75.00	13.60	11.32	6.48	8.15	13.94	15.18
≥75.00<130.00	8.94	5.28	1.15	3.70	23.99	17.27
≥130.00<212.00	0.00	0.80	0.13	0.59	12.45	7.82
≥212.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.73	1.34
All particles	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

5.1.3. Estudio de Mineralogía TIMA - TMS

El estudio TIMA-TMS identificó presencia de oro a una muestra, sin embargo, para el resto de las muestras no se lograron detectar y esto es atribuido a las siguientes razones: el oro se encuentra a tamaños inferiores a 1.0 μm (< L.D); el contenido de oro es inferior a 1.0 ppm (< L.D), o el oro se presenta como solución sólida. Se evidenció la presencia de plata en todas las muestras, donde el metal está presente en la Argentita/Acantita (soluble en solución cianurada). La mayor

parte de ellos libres, y cuando no es así, están asociados u ocluidos a pirita y silicatos duros (menor probabilidad de disolución). Los minerales de plata tienen un tamaño de grano de $P80 = 10 \mu\text{m}$.

Tabla 10

Distribución de tamaños de grano para minerales de plata

Grain Size	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
<5.00	21.18	10.00	40.30	36.30	60.00	43.75
$\geq 5.00 < 10.00$	45.29	41.43	43.28	34.81	13.33	37.50
$\geq 10.00 < 20.00$	22.94	37.14	11.94	22.96	20.00	12.50
$\geq 20.00 < 35.00$	7.06	10.00	4.48	3.70	6.67	6.25
$\geq 35.00 < 53.00$	2.35	0.00	0.00	2.22	0.00	0.00
$\geq 53.00 < 75.00$	0.59	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00
$\geq 75.00 < 130.00$	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
All particles	100	100	100	100	100	100

Tabla 11

Deportment de la plata

Modal Distribution / Sample	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
Argentite	100.00	100.00	80.61	90.62	99.70	99.41
Pb-Bi-Ag Sulphide	0.00	0.00	19.39	9.38	0.30	0.59
Total	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

Tabla 12*Asociación de minerales de plata*

Modal Distribution / Sample	STOCK PILE A1	STOCK PILE A2	STOCK PILE B1	STOCK PILE B2	STOCK PILE C1	STOCK PILE C2
Sphalerite	0.00	0.00	0.38	0.56	0.00	0.00
Copper Sulphides/Sulfosalts	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00
Galena	0.00	0.00	3.71	0.93	1.05	0.71
Lead Oxides*	0.06	0.05	25.63	2.82	1.47	3.76
Zinc Oxides*	9.33	0.97	2.72	0.00	1.13	8.61
Pyrite/Pyrrhotite	0.00	0.20	8.66	14.97	3.55	10.94
Other Sulphides	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hard Silicates	10.95	40.21	2.59	6.84	63.24	24.88
Phyllosilicates	7.04	0.00	0.00	0.00	0.00	3.23
Carbonates	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	0.00
Other Silicates	0.63	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25
Mn Oxide/Hidroxide, Fe Oxide/Hidroxide	6.75	2.19	9.95	0.00	3.16	17.07
Alunite	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Others	0.99	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Free surface	64.25	54.28	45.81	73.89	24.86	30.56
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

5.2. Preparación de Blending

El área de geología envió una muestra representativa del mineral blending (129 Kg), el cual está conformado según se detalla en la tabla 13.

Tabla 13*Conformación del blending*

Frente	Unidad	Cantidad
Stockpile A	%	18
Stockpile B	%	41
Stockpile C	%	41
Total (blending)	%	100

5.3. Pruebas de Cinética de Cianuración de Mineral de Cabeza

Para el desarrollo de las pruebas de cianuración, el mineral blending fue molido hasta alcanzar una granulometría de 80% - 270 malla, luego se colocó la pulpa en agitación y se inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, posteriormente la pulpa fue acondicionada utilizando cal hasta alcanzar un pH:11 y luego se adicionó NaCN; se consideró un periodo de lixiviación de 72 horas. Siendo el objetivo de estas pruebas determinar el consumo de NaCN, cal así como las recuperaciones de Ag y Au.

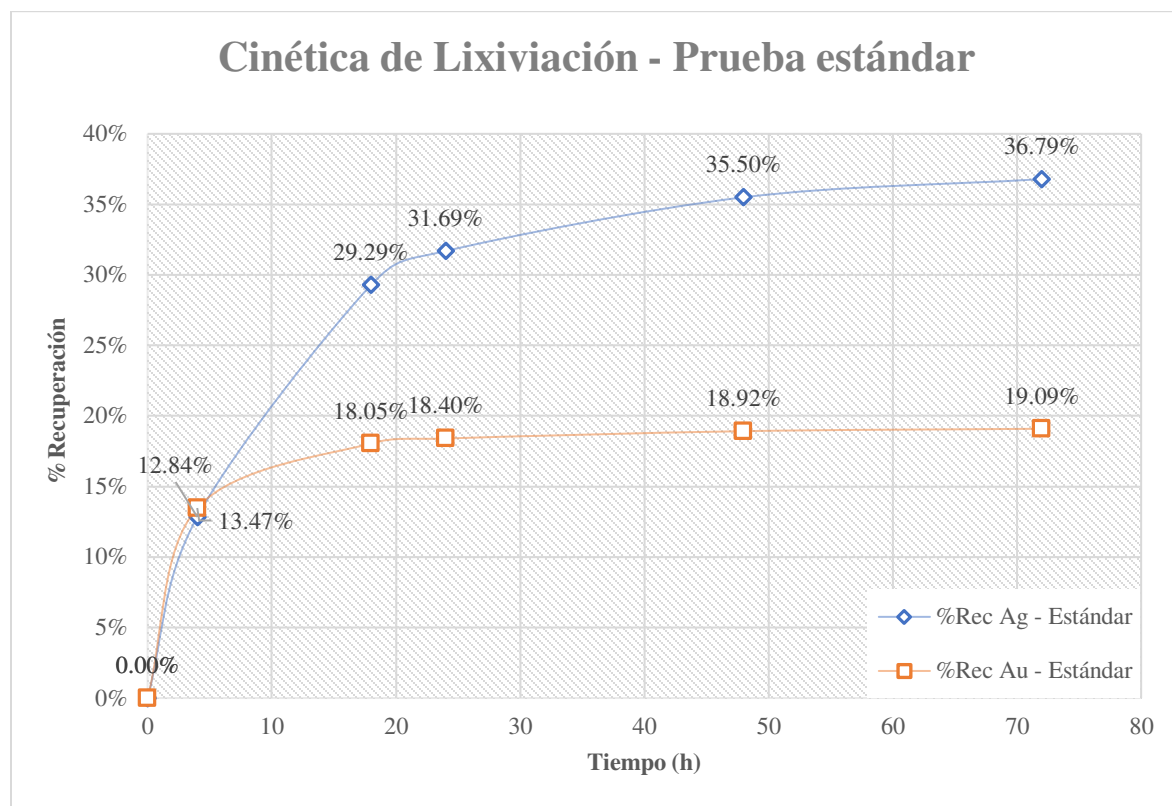
Líneas abajo, se muestran la tabla 14 con los parámetros considerados en las pruebas:

Tabla 14

Parámetros de cianuración

Parámetros	Unidad	Cantidad
Peso de muestra	g	1000
Dilución (L/S)		1.1/1
Tamaño de partícula		80% -270 malla
Tiempo de lixiviación	h	72
Concentración O ₂	ppm	8

Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar la cinética de lixiviación del mineral tratado, teniendo un pH natural de 6.0. Se utilizó el modelo de Klimper para el ajuste de las curvas de cinética de lixiviación. La figura 11 muestra la cinética de lixiviación obtenida para el Ag y Au; asimismo la Tabla 15 muestra el balance metalúrgico.

Figura 11*Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba estándar***Tabla 15***Balance Metalúrgico – Prueba estándar*

Componentes	Peso o Volumen (ml o g)	Ley Ag (g/t o mg/l)	Ley Au (g/t o mg/l)	Contenido Fino Ag	Contenido Fino Au	% Recuperación Ag	% Recuperación Au
Cabeza	1000					100	100
Solución rica	1127.7	57.55	0.069	64.89	0.08	36.79	19.09
Relave	1000	111.496	0.331	111.50	0.33	63.21	80.91
Cab. Calculada		176.39	0.4092	176.39	0.41		

El resultado de la prueba de cianuración por agitación se obtiene un consumo de cal de 10 Kg/TM, para el NaCN 4 Kg/TM en 72 horas de agitación con una extracción del 36.79% de Ag y 19.09% de Au.

5.4. Pruebas de Cinética de Cianuración del Mineral de Cabeza Adicionando Carburo de Calcio

De manera análoga al procedimiento de la prueba de cianuración convencional, el mineral blending fue molido hasta alcanzar una granulometría de 80% - 270 malla, luego se colocó la pulpa en agitación y se inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, posteriormente se adicionó el carburo de calcio 1, 2, 3 y 4 Kg/TM para cada muestra, siendo el tiempo de acondicionamiento de 20 minutos. Luego, se adicionó cal (pH:11) y NaCN; se consideró la lixiviación en agitación por un periodo de 72 horas. El objetivo de estas pruebas fue determinar las recuperaciones de Ag y Au (variables respuesta) en base a la variación de carburo de calcio (variable independiente).

Tabla 16

Parámetros de cianuración aplicando CaC_2

Parámetros	Unidad	Cantidad
Peso de muestra	g	1000
Dilución (L/S)		1.1/1
Tamaño de partícula		80% -270 malla
Tiempo de acondicionamiento del CaC_2	min	20
Dosificación de CaC_2	Kg/TM	1, 2, 3 y 4
Concentración O_2	ppm	8
Tiempo de lixiviación	h	72

A continuación, se señalan los resultados de la cianuración a las 72 horas, variando la concentración del carburo de calcio.

5.4.1. Cianuración con 1 Kg CaC_2 /TM

Previo a la lixiviación, se inició con agitación de la pulpa a la cual se le inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, se ajustó el pH de la pulpa (pH Inicial: 6) mediante la adición de cal hasta alcanzar un pH final de 11. Posteriormente, se procedió a agregar el 1g carburo de calcio (1 Kg CaC_2 /TM) cuyo periodo de acondicionamiento fue de 20 minutos, luego se procedió con la adición del NaCN. La figura 12 muestra la cinética de lixiviación obtenida para el Ag y Au; asimismo la Tabla 17 muestra el balance metalúrgico.

Figura 12

Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 1 Kg CaC_2 /TM

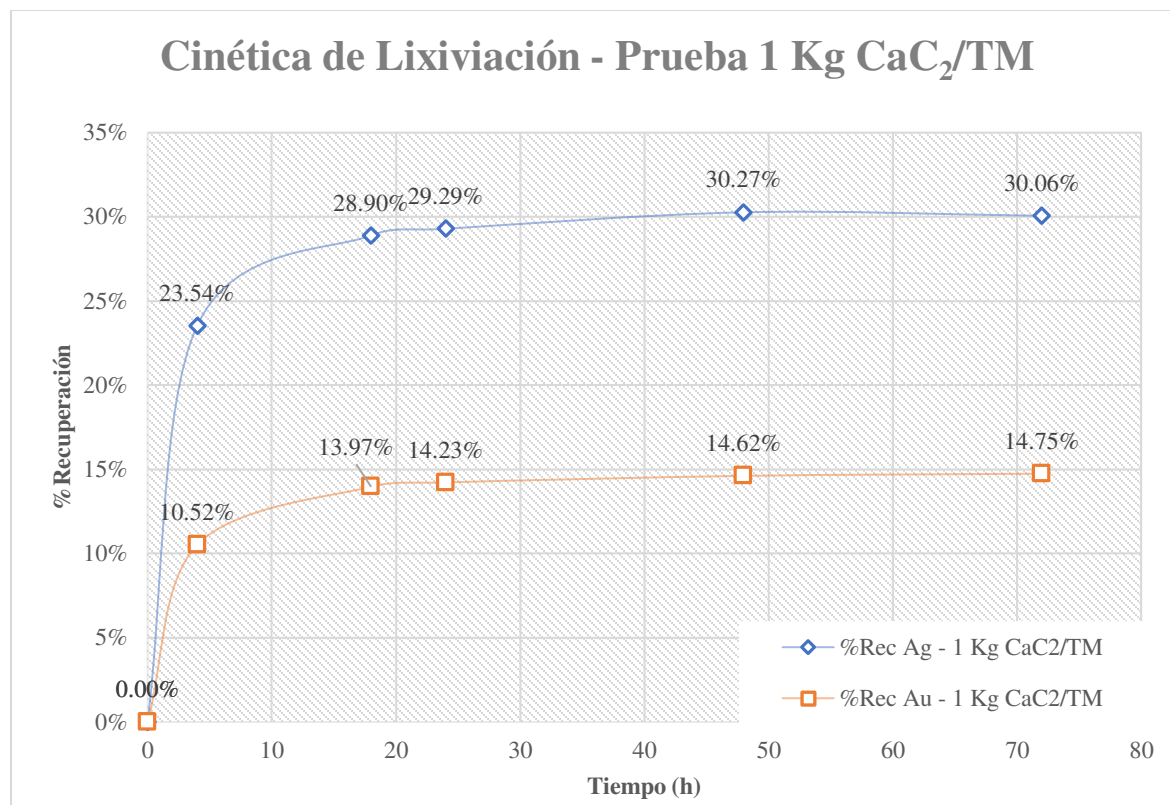


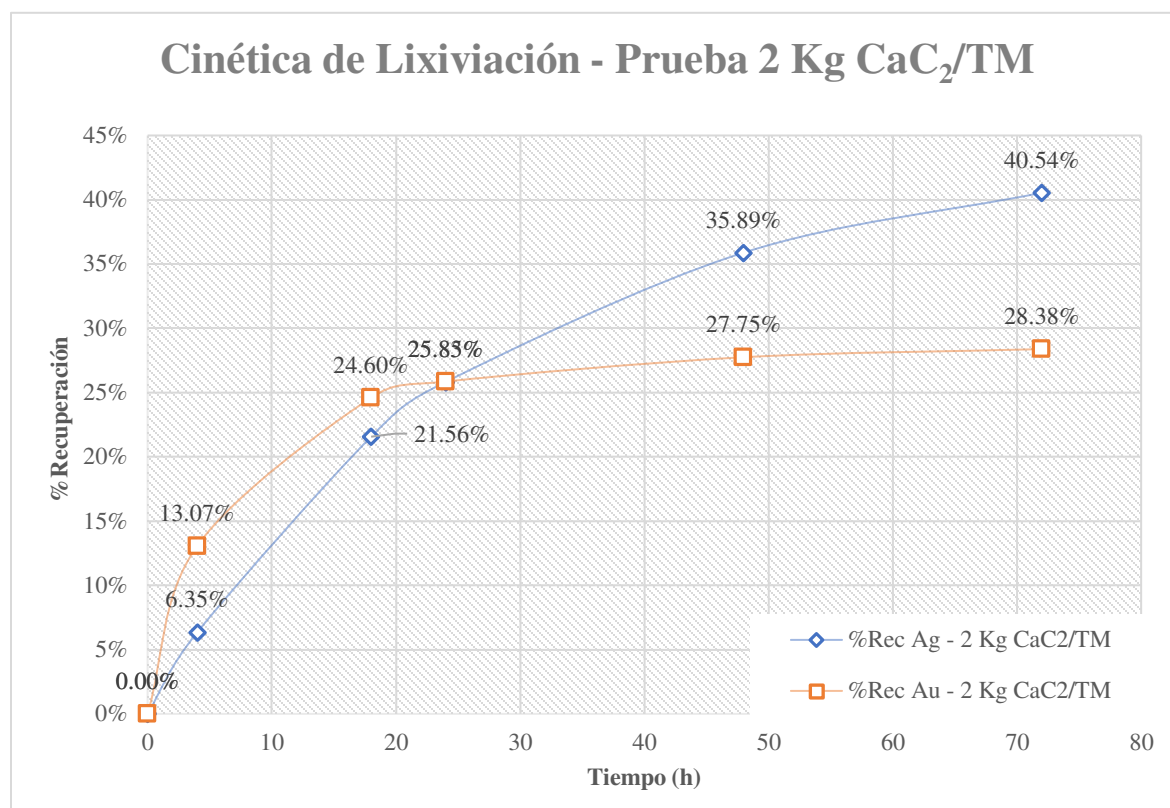
Tabla 17*Balance Metalúrgico – Prueba 1 Kg CaC₂/TM*

Componentes	Peso o Volumen (ml o g)	Ley Ag (g/t o mg/l)	Ley Au (g/t o mg/l)	Contenido Fino Ag	Contenido Fino Au	% Recuperación Ag	% Recuperación Au
Cabeza	1000					100	100
Solución rica	1127.7	54.97	0.07	61.99	0.08	30.06	14.75
Relave	1000	144.22	0.46	144.22	0.46	69.94	85.25
Cab. Calculada		206.21	0.54	206.21	0.54		

El resultado de la prueba de cianuración por agitación se obtiene un consumo de cal de 10 Kg/TM, para el NaCN 4 Kg/TM en 72 horas de agitación con una extracción del 30.06% de Ag y 14.75% de Au.

5.4.2. Cianuración con 2 Kg CaC₂/TM

Previo a la lixiviación, se inició con agitación de la pulpa a la cual se le inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, se ajustó el pH de la pulpa (pH Inicial: 6) mediante la adición de cal hasta alcanzar un pH final de 11. Posteriormente, se procedió a agregar el 2 g carburo de calcio (2 Kg CaC₂/TM) cuyo periodo de acondicionamiento fue de 20 minutos, luego se procedió con la adición del NaCN. La figura 13 muestra la cinética de lixiviación obtenida para el Ag y Au; asimismo la Tabla 18 muestra el balance metalúrgico.

Figura 13*Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 2 Kg CaC₂/TM***Tabla 18***Balance Metalúrgico – Prueba 2 Kg CaC₂/TM*

Componentes	Peso o Volumen (ml o g)	Ley Ag (g/t o mg/l)	Ley Au (g/t o mg/l)	Contenido Fino Ag	Contenido Fino Au	% Recuperación Ag	% Recuperación Au
Cabeza	1000					100	100
Solución rica	1127.7	65.35	0.08	73.70	0.09	40.54	28.38
Relave	1000	108.09	0.23	108.09	0.23	59.46	71.62
Cab. Calculada		181.79	0.32	181.79	0.32		

El resultado de la prueba de cianuración por agitación se obtiene un consumo de cal de 10 Kg/TM y para el NaCN 4 Kg/TM en 72 horas de agitación con una extracción del 40.54% de Ag y 28.38% de Au.

5.4.3. Cianuración con 3 Kg CaC_2 /TM

Previo a la lixiviación, se inició con agitación de la pulpa a la cual se le inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, se ajustó el pH de la pulpa de 6 a 11 mediante la adición de cal. Luego se añadieron 3 g de carburo de calcio (3 Kg CaC_2 /TM) y se dejó acondicionar durante 20 minutos, para posteriormente agregar el cianuro. La Figura 14 muestra la cinética de lixiviación para Ag y Au, y la Tabla 19 presenta el balance metalúrgico.

Figura 14

Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 3 Kg CaC_2 /TM

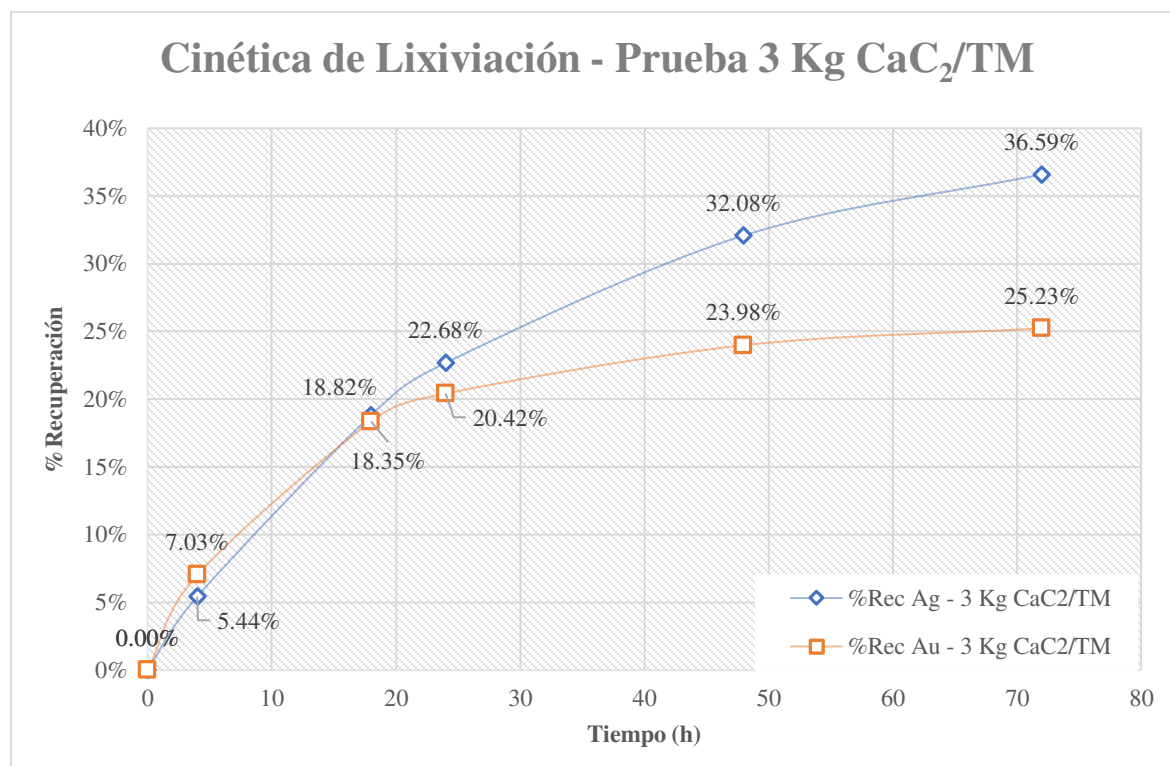


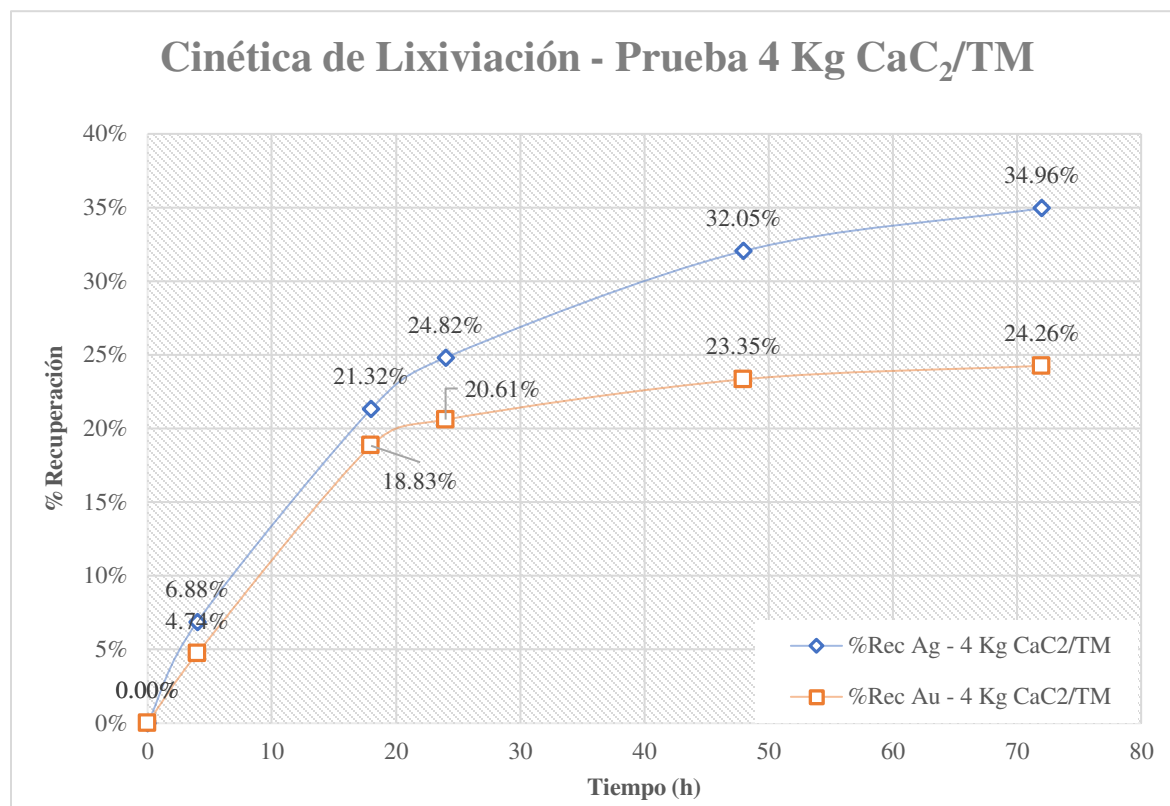
Tabla 19*Balance Metalúrgico – Prueba 3 Kg CaC₂/TM*

Componentes	Peso o Volumen (ml o g)	Ley Ag (g/t o mg/l)	Ley Au (g/t o mg/l)	Contenido Fino Ag	Contenido Fino Au	% Recuperación Ag	% Recuperación Au
Cabeza	1000					100	100
Solución rica	1127.7	67.36	0.09	75.96	0.10	36.59	25.23
Relave	1000	131.646	0.292	131.65	0.29	63.41	74.77
Cab. Calculada		207.61	0.39	207.61	0.39		

El resultado de la prueba de cianuración por agitación se obtiene un consumo de cal de 10 Kg/TM, para el NaCN 4 Kg/TM en 72 horas de agitación con una extracción del 36.59% de Ag y 25.23% de Au.

5.4.4. Cianuración con 4 Kg CaC₂/TM

Previo a la lixiviación, se inició con agitación de la pulpa a la cual se le inyectó aire hasta alcanzar 8 ppm de oxígeno, se ajustó el pH de la pulpa (pH Inicial: 6) mediante la adición de cal hasta alcanzar un pH final de 11. Posteriormente, se procedió a agregar el 4 g carburo de calcio (4 Kg CaC₂/TM) cuyo periodo de acondicionamiento fue de 20 minutos, luego se procedió con la adición del NaCN. La figura 15 muestra la cinética de lixiviación obtenida para el Ag y Au; asimismo la Tabla 20 muestra el balance metalúrgico.

Figura 15*Cinética de lixiviación Ag y Au – Prueba 4 Kg CaC₂/TM***Tabla 20***Balance Metalúrgico – Prueba 4 Kg CaC₂/TM*

Componentes	Peso o Volumen (ml o g)	Ley Ag (g/t o mg/l)	Ley Au (g/t o mg/l)	Contenido Fino Ag	Contenido Fino Au	% Recuperación Ag	% Recuperación Au
Cabeza	1000					100	100
Solución rica	1127.7	62.31	0.09	70.27	0.10	34.96	24.26
Relave	1000	130.72	0.31	130.72	0.31	65.04	75.74
Cab. Calculada		200.99	0.407	200.99	0.41		

El resultado de la prueba de cianuración por agitación se obtiene un consumo de cal de 10 Kg/TM, para el NaCN 4 Kg/TM en 72 horas de agitación con una extracción del 34.96% de Ag y 24.26% de Au.

5.5. Determinación del tiempo óptimo de lixiviación

El tiempo de lixiviación es en el tratamiento de minerales refractarios de oro y plata una variable crítica la cual influye en la disolución de los metales ya que un tiempo insuficiente se convierte en un limitante, mientras que en exceso genera costos adicionales de operación y eficiencia baja del uso de los tanques de agitación. Se estudiará la influencia del tiempo, manteniendo constante el consumo óptimo de CaC_2 en 2 kg/t para determinar el tiempo que maximiza la recuperación objetivo-planteada por condiciones económicas y metalúrgicas realistas.

5.5.1. Metodología

En base a la caracterización cinética experimental realizada la cual mantuvo constantes principales de control como granulometría, pH, concentración de cianuro y temperatura, se diseñó un programa de ensayos de lixiviación en un rango de 72 horas. Los datos obtenidos fueron ajustados al modelo de Klimpel mediante regresión no lineal (método de Levenberg-Marquardt) empleando Solver en Excel.

5.5.2. Modelo cinético de Klimpel

$$R(t) = R_{\max} [1 - (1/(k \cdot t))(1 - e^{(-k \cdot t)})] \quad (14)$$

Donde $R(t)$ es la recuperación al tiempo t , $R_{\max}$ es la recuperación máxima teórica, y k es la constante cinética. El modelo describe la recuperación acumulada y permite identificar el punto de rendimientos decrecientes.

5.5.3. Resultados

Tabla 21

Parámetros cinéticos de lixiviación (2 kg CaC₂/TM)

Metal	Rmax	k (h⁻¹)
Ag	0.508	0.068
Au	0.296	0.326

Nota. Rmax y k son constantes

Se observa que la plata alcanza un Rmax más alto (50.8 %) pero con cinética más lenta, mientras que el oro presenta un Rmax menor (29.6 %) pero con cinética más rápida. Esta diferencia confirma la distinta naturaleza de la liberación de cada metal.

Tabla 22

Tiempo requerido para alcanzar recuperaciones objetivo.

Metal	Recuperación objetivo (%)	Tiempo (h)
Ag	39.73	66.48
Au	28.30	67.69

Nota. Calculado a partir de la ecuación de Klimpel.

Los resultados muestran que Ag requiere 66.5 h y Au 67.7 h para alcanzar los objetivos propuestos. La diferencia de ≈ 1 h obliga a fijar un tiempo de operación común. En este sentido, 68 h surge como valor de compromiso, coherente con la práctica industrial de redondeo a turnos completos.

Tabla 23

Comparación entre recuperaciones experimentales y modeladas a 68 h.

Metal	Experimental (%)	Modelo (68h) (%)
Ag	39.73	39.97
Au	28.30	28.31

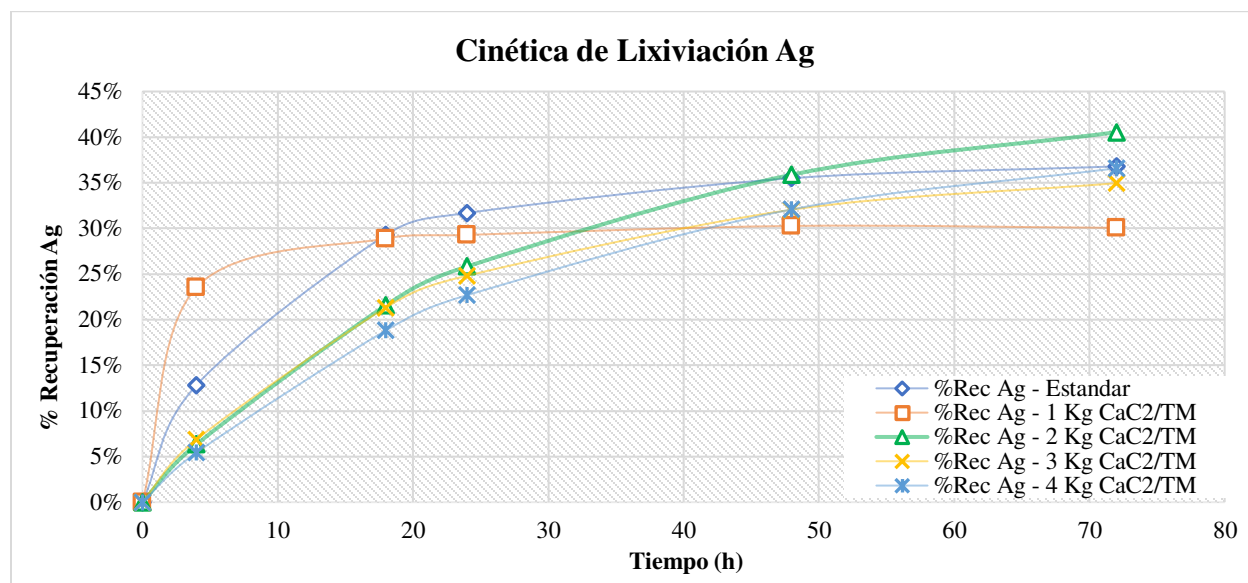
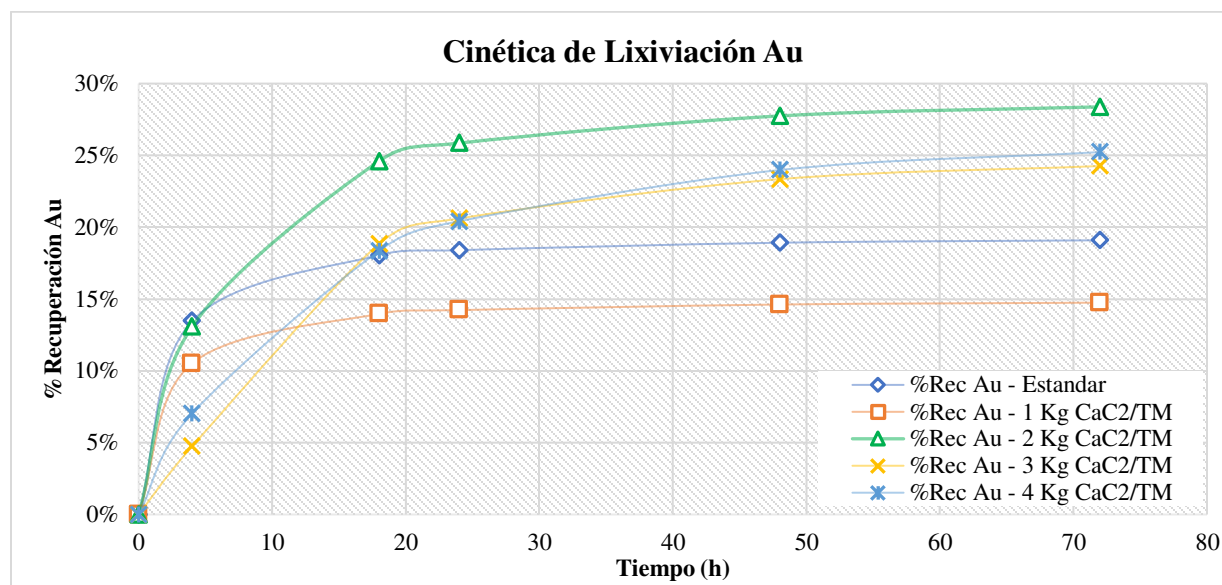
Nota. Las diferencias son menores al 0.3 %.

Este resultado valida la aplicación del modelo de Klimpel, dado que los valores simulados y experimentales coinciden estrechamente. La robustez del modelo respalda su uso en la predicción del tiempo óptimo. No obstante, se reconoce como limitación que el modelo no considera efectos difusivos a escala industrial.

CAPÍTULO VI: Evaluación de Resultados

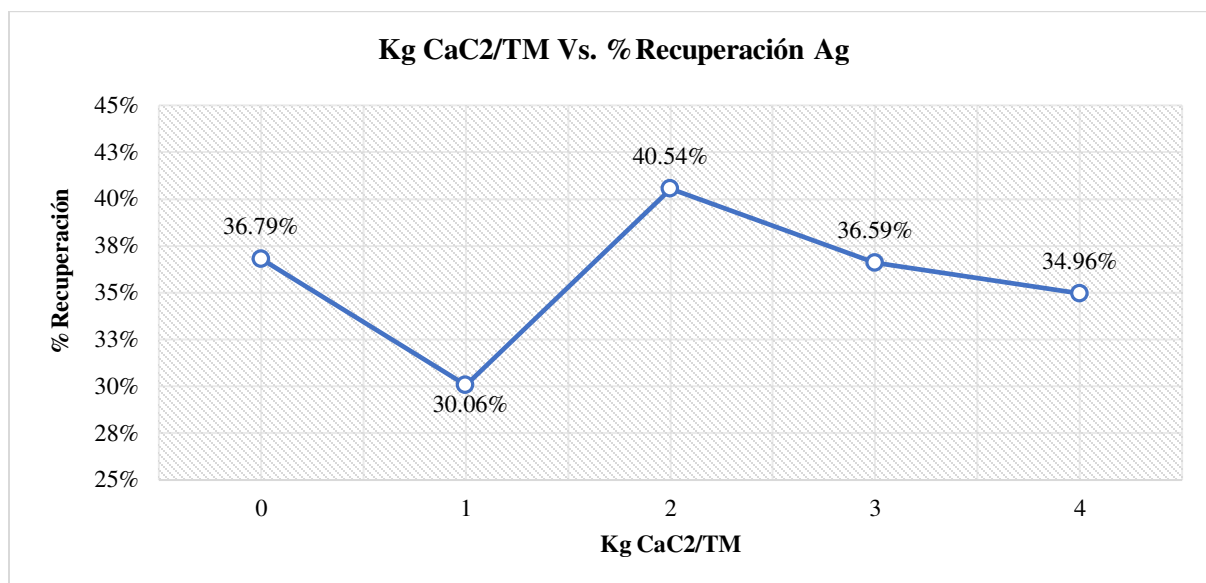
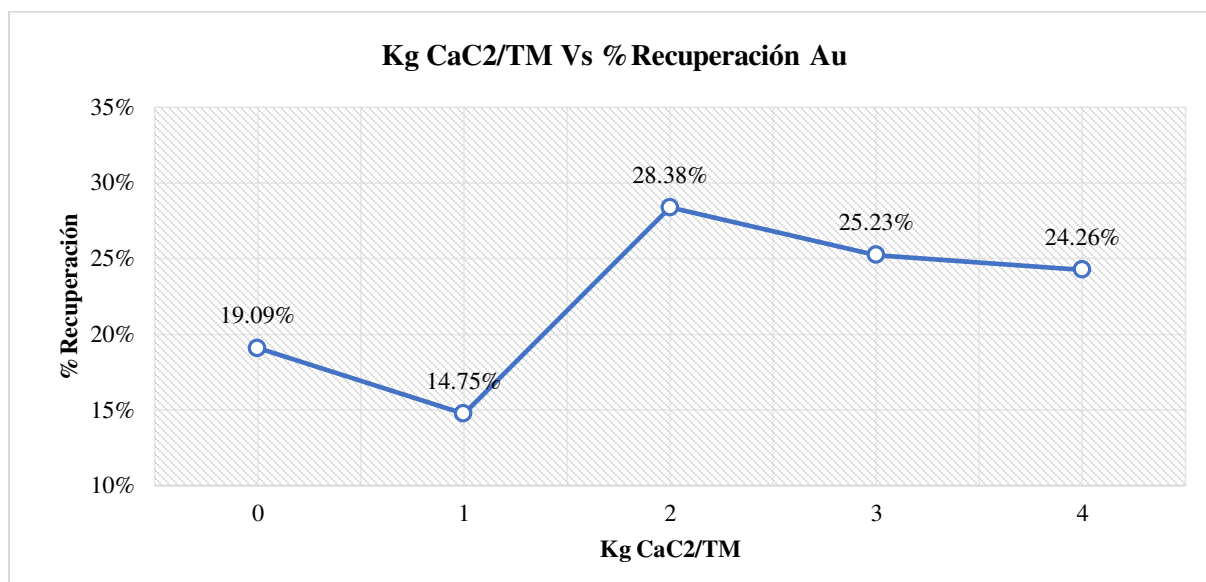
Las pruebas de cianuración con carburo de calcio fueron realizadas con una granulometría de 80% -270 Malla. Se procedió con la agitación de la pulpa inyectando aire hasta alcanzar una concentración de oxígeno de 8 ppm, luego se le adicionó las siguientes dosificaciones de carburo de calcio 0,1,2,3 y 4 Kg CaC_2 /TM para cada muestra considerando un tiempo de acondicionamiento de 20 minutos. Posteriormente se realizó la lixiviación en agitación a un pH=11, se mantuvo la fuerza de cianuro en 500 ppm mientras que el tiempo de lixiviación para cada prueba fue de 72 horas, luego se realizó las cinéticas de lixiviación ajustando los datos al modelo de Klimper y el balance metalúrgico para poder determinar las recuperaciones de Ag y Au en base a la variación de la adición de carburo de calcio.

En las pruebas de cianuración se obtuvieron resultados resaltantes, se observa en la Figura 16 y Figura 17, que las mejores recuperaciones 40.54% de Ag y 28.38% de Au se obtuvieron al dosificar 2 Kg CaC_2 /TM. También se observa que en la prueba con 1 Kg CaC_2 /TM se obtuvo la recuperación mínima de 30.06% para el Ag y 14.75% para el Au, mientras que en las pruebas de 3 y 4 Kg CaC_2 /TM se presentó un descenso para la recuperación del Ag y la recuperación de Au.

Figura 16*Cinética de lixiviación Ag***Figura 17***Cinética de lixiviación Au*

Para los resultados de las muestras con 3 Kg CaC_2/TM (recuperación de 36.59%Ag y 25.23%Au) y en la muestra de 4 Kg CaC_2/TM (recuperación de 34.96% Ag y 24.26% de Au) se determinó que siguen una pendiente negativa con respecto a la recuperación, tal como se muestra en la Figura 18 y Figura 19, lo cual coincide con el artículo “Utilización del carburo de calcio para la recuperación de oro a partir de minerales refractarios arsenicales (Shishido et al., 2017), en cuya investigación se aplica carburo de calcio a minerales refractarios arsenicales, donde al dosificar 5 Kg CaC_2/TM obtuvo una recuperación de 18% de Au, mientras que al incrementar la dosificación de carburo de calcio las recuperaciones de Au bajan a menos del 16% por lo que en su investigación concluyeron que el uso de carburo de calcio mejora la recuperación de oro sin embargo al usar una mayor cantidad de carburo de calcio la recuperación tiende a disminuir, siendo esto atribuido a la reacción que se tiene de oxidación con el agua el cual va a generar compuestos aglomerantes como el CaO los cuales afectaran a las partículas del mineral perjudicando el contacto con el cianuro de sodio.

Este efecto de la disminución de la recuperación de Au al aumentar la dosificación del Carburo de calcio también se replica en la tesis “Influencia del carburo de calcio y la granulometría en la lixiviación de oro de un mineral refractario” (Negreiros & Rubio, 2019) en la cual confirma que al aumentar el reactivo oxidante se presencia la disminución de la recuperación de oro el cual se debe a las partículas finas por el efecto oxidante y la reacción que se da por el carburo de calcio al estar en contacto con el agua.

Figura 18*Kg CaC₂/TM Vs. %Recuperación Ag***Figura 19***Kg CaC₂/TM Vs. %Recuperación Au*

Asimismo, ratifica lo mencionado en la tesis “Efecto del carburo de calcio y el silicato de sodio en la cianuración de un mineral aurífero arsenical” (Díaz & Trujillo, 2021), cuyo estudio fue aplicado a un mineral con granulometría 80% pasante Malla 200 cuya recuperación de Au en su prueba sin dosificar carburo fue 17.36%, por otro lado, alcanzaron la mejor recuperación de Au al dosificar 4 Kg CaC_2 /TM (61.61%), mientras que al aumentar la dosificación a 6 y 8 Kg CaC_2 /TM la recuperación disminuyó a 50.02% y 45.33% de Au respectivamente.

Dado que las mejores recuperaciones de Ag y Au se obtuvieron al dosificar 2 Kg CaC_2 /TM, se procedió a determinar el tiempo óptimo para alcanzar las recuperaciones objetivo (Ag 39.7% y Au 28.30%) mediante la ecuación cinética de recuperación y se determinó que con 68 horas de lixiviación se logran las recuperaciones 39.97% Ag y 28.31% Au. A partir de este tiempo, los incrementos marginales que se dan en la recuperación son menor a 0.3% confirmando la eficiencia del tiempo óptimo fijado como punto de operación.

CAPÍTULO VIII: Evaluación Económica

7.1. Flujo de Caja Diferencial

El análisis económico del proyecto comprende la evaluación del flujo de caja, periodo de recupero de la inversión y análisis de riesgo del proyecto durante los primeros 12 meses.

La elaboración del flujo de caja diferencial compara los flujos de caja por ingreso de finos de plata y oro del proyecto en relación a un escenario sin el proyecto, su elaboración requiere de los parámetros actuales de tonelaje, días de operación, leyes de Ag y Au y recuperaciones de Ag y Au actuales, asimismo para el flujo de caja del proyecto se requiere adicional a los parámetros antes mencionados el CPPC, la inversión, el ratio y precio del carburo de calcio y las recuperaciones de Ag y Au alcanzadas con el proyecto. La tabla 24 detalla los parámetros actuales sin proyecto y la tabla 25 los parámetros con proyecto.

Tabla 24

Parámetros actuales sin proyecto

Descripción	Unidades	Valor
Tratamiento	TMD	2800
Días	D	353
Ley Ag	g/TM	194.6
Ley Au	g/TM	0.41
%Rec Ag	%	36.8%
%Rec Au	%	19.1%

Tabla 25*Parámetros con proyecto*

Descripción	Unidades	Valor
CPPC	%	10%
Inversión	\$	\$200,000.00
CaC ₂	Kg/TM	2.0
CaC ₂	\$/Kg	1.2
%Rec Ag proy	%	39.97%
%Rec Au proy	%	28.31%

La tabla 26 muestra el precio estimado de los metales para el cálculo económico.

Tabla 26*Precio estimado de los metales*

Descripción	Unidades	Valor
Ag	\$/oz	32.98
Au	\$/oz	3104.00

El flujo de caja diferencial (Anexo 14) muestra un VAN: \$4,270,499.1, TIR:338% y un periodo de recupero de inversión de 0.32 meses (10 días).

7.2. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad aplicado al proyecto tiene por objetivo comprender el efecto en el VAN ante una variación del precio del Au (\$/oz), precio del Ag (\$/oz), precio del Carburo de calcio (\$/Kg) y la inversión (\$).

7.1.1. Análisis Unidimensional

En el análisis unidimensional mediremos el efecto de cada variable de manera independiente sobre el VAN, y determinaremos los puntos críticos (VAN=0). Los resultados obtenidos de muestran en la tabla 27.

Tabla 27

%Variación Variables Vs VAN

% Variación	VAN Var Precio Ag	VAN Var Precio Au	VAN Var Precio CaC₂	VAN Var Inversión
-100%	\$590,228.9	\$2,132,591.2	\$5,618,178.2	\$4,470,499.1
-90%	\$958,255.9	\$2,346,382.0	\$5,483,410.3	\$4,450,499.1
-80%	\$1,326,282.9	\$2,560,172.8	\$5,348,642.3	\$4,430,499.1
-70%	\$1,694,310.0	\$2,773,963.5	\$5,213,874.4	\$4,410,499.1
-60%	\$2,062,337.0	\$2,987,754.3	\$5,079,106.5	\$4,390,499.1
-50%	\$2,430,364.0	\$3,201,545.1	\$4,944,338.6	\$4,370,499.1
-40%	\$2,798,391.0	\$3,415,335.9	\$4,809,570.7	\$4,350,499.1
-30%	\$3,166,418.0	\$3,629,126.7	\$4,674,802.8	\$4,330,499.1
-20%	\$3,534,445.1	\$3,842,917.5	\$4,540,034.9	\$4,310,499.1
-10%	\$3,902,472.1	\$4,056,708.3	\$4,405,267.0	\$4,290,499.1
0%	\$4,270,499.1	\$4,270,499.1	\$4,270,499.1	\$4,270,499.1
10%	\$4,638,526.1	\$4,484,289.9	\$4,135,731.2	\$4,250,499.1
20%	\$5,006,553.2	\$4,698,080.7	\$4,000,963.3	\$4,230,499.1
30%	\$5,374,580.2	\$4,911,871.5	\$3,866,195.4	\$4,210,499.1
40%	\$5,742,607.2	\$5,125,662.3	\$3,731,427.5	\$4,190,499.1
50%	\$6,110,634.2	\$5,339,453.1	\$3,596,659.6	\$4,170,499.1
60%	\$6,478,661.2	\$5,553,243.9	\$3,461,891.7	\$4,150,499.1
70%	\$6,846,688.3	\$5,767,034.7	\$3,327,123.8	\$4,130,499.1
80%	\$7,214,715.3	\$5,980,825.5	\$3,192,355.9	\$4,110,499.1
90%	\$7,582,742.3	\$6,194,616.3	\$3,057,588.0	\$4,090,499.1
100%	\$7,950,769.3	\$6,408,407.1	\$2,922,820.1	\$4,070,499.1

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) respecto al %Var. de precios de Ag, Au, CaC₂ e Inversión

La tabla 28 muestra los puntos críticos de cada ítem. La figura 20 señala gráficamente la relación entre el VAN (en USD) y el % Var. de las Variables.

Tabla 28

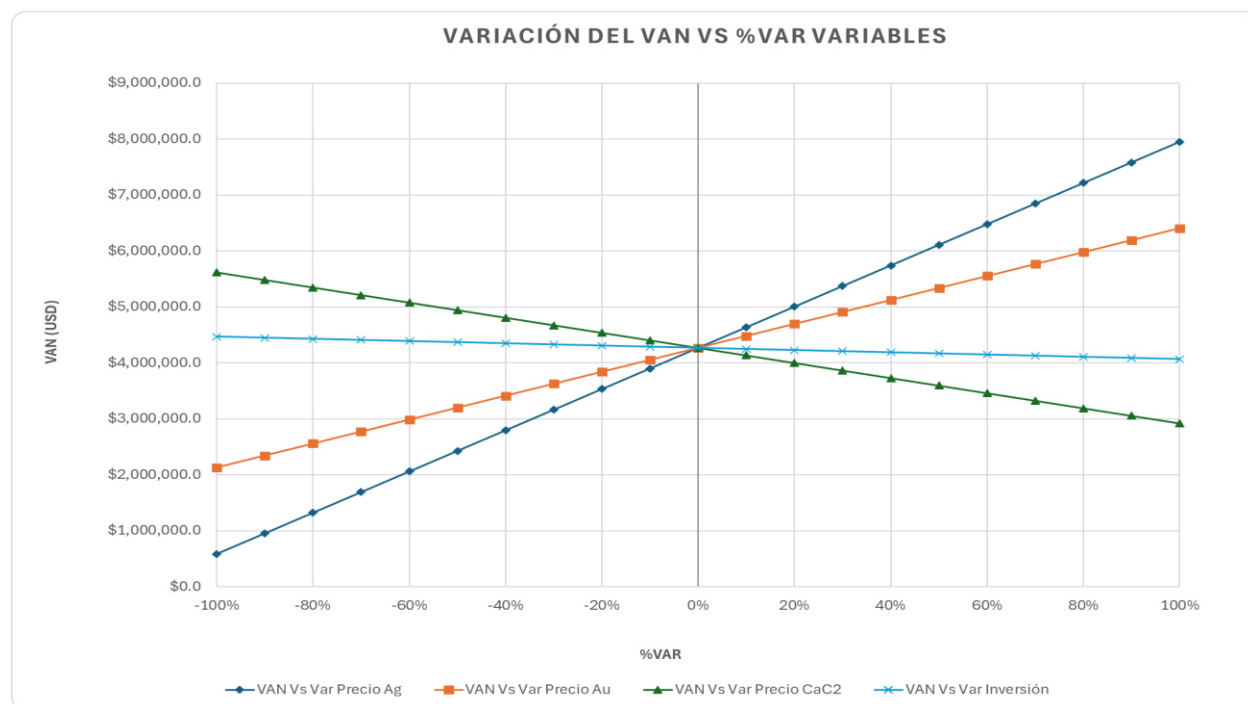
Puntos críticos de cada variable

Análisis puntos críticos	%VAR
Variación % promedio del Precio Ag	-116%
Variación % promedio del Precio Au	-200%
Variación % promedio del Precio de CaC ₂	317%
Variación % promedio de la Inversión	2135%

Nota: Los puntos críticos se expresan en porcentaje de variación.

Figura 20

Diagrama VAN Vs. %VAR Variables



7.1.2. Análisis Bidimensional

En el análisis bidimensional se mide el efecto de la variación de 2 parámetros sobre el VAN, la tabla 29 se especifica los pares considerados para la evaluación:

Tabla 29*Resumen de parámetros utilizados para el análisis bidimensional*

N°	Análisis bidimensional
1	Variación % promedio de los Precios de Ag y Au Vs VAN
2	Variación % promedio de los Precios Ag y CaC ₂ Vs VAN
3	Variación % promedio del Precio Ag y la Inversión Vs VAN
4	Variación % promedio de los Precio de Au y CaC ₂ Vs VAN
5	Variación % promedio del Precio Au y la Inversión Vs VAN
6	Variación % promedio del Precio de CaC ₂ y la Inversión Vs VAN

Los anexos 16 al 21 muestran el análisis bidimensional para cada caso.

7.1.3. Resumen de Escenarios

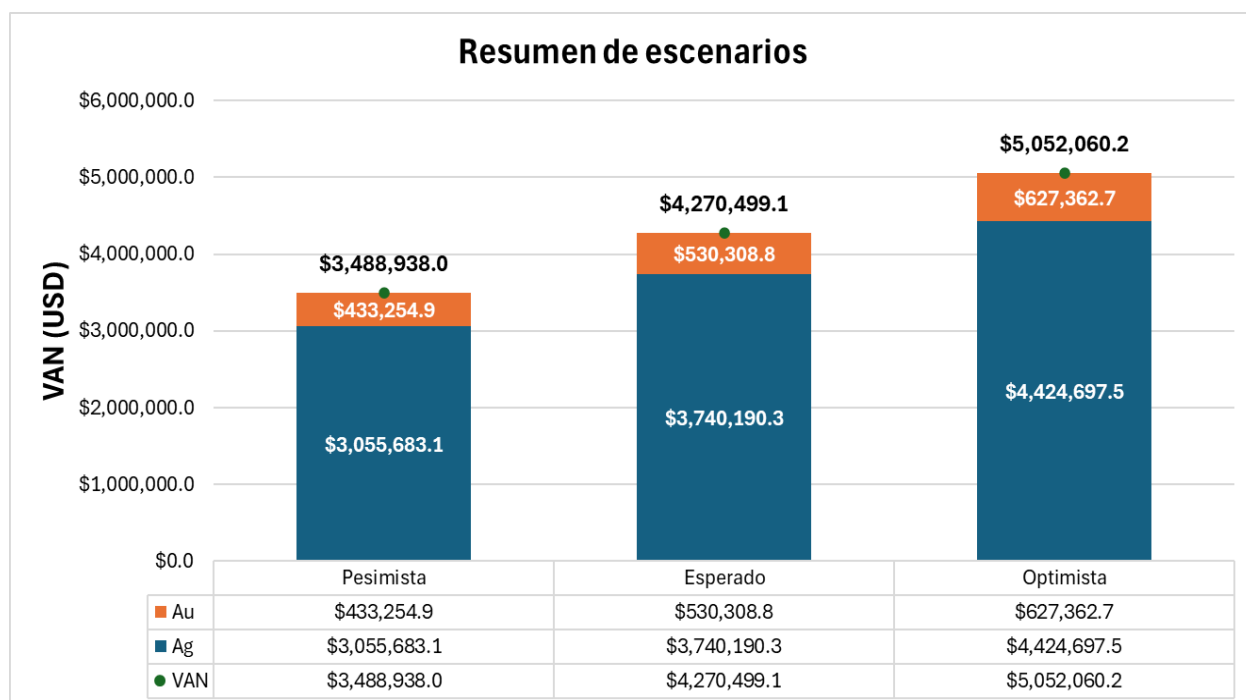
El resumen de escenarios contempla la evaluación del VAN y TIR del flujo de caja diferencial, considerando 3 posibles escenarios: optimista (en el cual se considera que el proyecto se desarrollará bajo condiciones favorables, esperado (consideramos una posición imparcial), y pesimista (el cual considera condiciones desfavorables para el proyecto). La tabla 30 muestra el resumen de los 3 escenarios. Asimismo, la figura 21 muestra la contribución al VAN para cada escenario.

Tabla 30

Resumen de escenarios del Proyecto: Optimista, Esperado y Pesimista

Resumen del escenario	Pesimista	Esperado	Optimista
Celdas cambiantes:			
Variación % promedio del Precio Ag	-10.15%	0%	10.15%
Variación % promedio del Precio Au	-10.91%	0%	10.91%
Variación % promedio del Precio de CaC2	10%	0%	-10%
Variación % promedio de la Inversión	20%	0%	-20%
Celdas de resultado:			
VAN	\$3,488,938.0	\$4,270,499.1	\$5,052,060.2
TIR	234%	338%	496%

Nota: Se observa que en los 3 escenarios se tiene una VAN positivo y una TIR mayor al CPPC (10%).

Figura 21*Contribución al VAN para cada escenario*

Nota: La contribución al VAN se distribuye en un 87.6 % por ingresos derivados de la recuperación de plata (Ag) y un 12.4 % por recuperación de oro (Au).

CONCLUSIONES

- Las pruebas de lixiviación con carburo de calcio (CaC_2) aplicado al mineral de estudio, permitieron establecer que el consumo óptimo es de 2 Kg CaC_2 /TM obteniéndose las recuperaciones de 39.97 % Ag y 28.31% Au. Estos resultados representan un incremento de 3.18% Ag y 9.22% Au respecto a las recuperaciones obtenidas en la prueba estándar (36.79% de Ag y 19.09%).
- El análisis cinético determinó que el tiempo mínimo de lixiviación, utilizando el consumo óptimo de carburo de calcio (2 kg/t), es de 68 horas, intervalo en el cual se alcanzaron simultáneamente las recuperaciones objetivo de Ag (39,97 %) y Au (28,31 %) planteadas en la investigación, resultado que se sustenta en el modelo cinético de Klimpel validado experimentalmente.
- La evaluación económica del proyecto, desarrollada bajo un escenario conservador, nos muestra un de VAN: \$4,270,499.1, una TIR: 338% superior al CPPC (10%), y un periodo de recuperación de la inversión menor a 01 mes. Estos indicadores demuestran que, bajo los parámetros considerados, la implementación del proyecto a escala industrial es económicamente rentable.
- Se observa que un aumento en la ratio de carburo de calcio (Kg CaC_2 /TM) disminuye las recuperaciones de Ag y Au, siendo este efecto percibido al aplicar las dosificaciones de 3 Kg CaC_2 /TM (recuperación de 36.59%Ag y 25.23%Au) y 4 Kg CaC_2 /TM (recuperación de 34.96%Ag y 24.26% de Au).
- En la caracterización de la muestra de mineral se identificó la presencia de oro y plata donde el metal está presente en la Argentita/Acantita, la mayor parte de ellos libres, y cuando no es

así, están asociados u ocluidos a pirita y silicatos duro. La muestra presenta pirita en un rango variable entre 5% a 80% lo cual generó altos consumos de cal (10 Kg CaO/TM) debido a que los sulfuros generan pH muy ácidos, la muestra también presenta contenido de carbonatos y óxidos; lo cual generó consumos altos de cianuro (4 Kg NaCN/TM).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda ejecutar ensayos a nivel de planta piloto bajo condiciones de lixiviación estándar, variando de manera sistemática la dosificación de carburo de calcio (CaC_2) en el blending y validando el tiempo óptimo de 68 h determinado. Esta evaluación conjunta permitirá ajustar el modelo cinético de Klimpel, incrementar su precisión y confirmar su validez de escalamiento para la aplicación industrial, con el propósito de maximizar las recuperaciones de Ag y Au.
- Desarrollar estudios adicionando carburo de calcio en la etapa de molienda y determinar su influencia en las recuperaciones de Ag y Au en contraste con la dosificación de carburo de calcio en la etapa de lixiviación.
- Llevar a cabo pruebas con carburo de calcio para cada frente de manera independiente y en base a los resultados de las recuperaciones de Ag y Au obtenidas elaborar el análisis económico evaluando la posibilidad de definir un blending que permita maximizar las recuperaciones de los metales de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahtiainen, R., Liipo, J., & Lundström, M. (2021). Simultaneous sulfide oxidation and gold dissolution by cyanide-free leaching from refractory and double refractory gold concentrates. *Minerals Engineering*, 170(107042).
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107042>
- Arana, R., & Leyva, J. (2019). *Influencia del carburo de calcio y el tiempo de aireación en la recuperación de oro por cianuración en agitación de un mineral aurífero-arsenical*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- 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>
- Asamoah, R., Amankwah, R., & Addai, J. (2014). Cyanidation of Refractory Gold Ores: A Review. *Conference: 3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*, 204-212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>
- Ballester, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (2000). *Metalurgia Extractiva. Volumen I: Fundamentos*. Madrid: Editorial Sintesis.
- Canleren, Ö., & Karagüzel, C. (2021). Silver Metal Extraction from Refractory Silver Ore Using Chloride-Hypochlorite and Hydrochloric Acid Media Under High Pressure. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, 1215-1223. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00389-9>
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., & Cueva, E. (2009). Dominios geotectónicos

- y metalogénesis del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103, 1-89.
<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/SGP-103-1.pdf>
- Chryssoulis, S., & McMullen, J. (2005). Mineralogical investigation of gold ores. *Developments in Mineral Processing*, 15, 21-71. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15002-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15002-9)
- Dennen, M., & Gross, A. (2010). Refractory Materials: The Global Market, The Global Industry. *Business Economics*, 45, 288-295. <https://doi.org/10.1057/be.2010.30>
- Deschênes, G. (2016). Chapter 26 - Advances in the Cyanidation of Gold. *Gold Ore Processing (Second Edition)*, 429-445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00026-8>
- Díaz, V., & Trujillo, L. (2021). *Efecto del carburo de calcio y el silicato de sodio en la cianuración de un mineral aurífero arsenical*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Ghobeiti, M., Raygan, S., & Rashchi, F. (2013). Chloride–hypochlorite leaching of gold from a mechanically activated refractory sulfide concentrate. *Journal of Cleaner Production*, 138, 59-64. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.06.013>
- Gonzales, B., & Bravo, M. (2021). *Influencia del oxígeno en la cianuración de minerales auríferos con carbón en pulpa para la extracción de oro*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho.
- Juárez, J., Rivera, I., Patiño, F., & Reyes, M. (2012). Efecto de la Temperatura y Concentración de Tiosulfatos sobre la Velocidad de Disolución de Plata contenida en Desechos Mineros usando Soluciones $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ - O_2 - Zn^{2+} . *Información tecnológica*, 23(4), 133-138.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-

07642012000400015&lng=es&nrm=iso>.

ISSN

0718-0764.

<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000400015>

Kuifang, Z., Liu, Z., Xianyang, Q., Shuai, R., & Wei, Z. (2020). Hydrometallurgical recovery of manganese, gold and silver from refractory Au-Ag ore by two-stage reductive acid and cyanidation leaching. *Hydrometallurgy*, 196(105406).
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105406>

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>

Mendo, D. (2016). *Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación. Cachachi – Cajamarca 2016*. Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Cajamarca.

Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro* (Vol. 2). Lima, Perú: San Marcos EIRL.

Morones, J. (2010). Plata: metal precioso con amplio espectro de aplicaciones. *Revista Ciencia y Desarrollo*, 36(241), 56-62.
<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/241/Articulos/Plata/Plata1.html>

Negreiros, H., & Rubio, E. (2019). *Influencia del carburo de calcio y la granulometría en la lixiviación de oro de un Mineral refractario*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.

Palyanova, G. (2020). Gold and Silver Minerals in Sulfide Ore. *Geology of Ore Deposits*, 62, 383-406. <https://doi.org/10.1134/S1075701520050050>

Ramos, A. (2019). Lixiviación de plata a temperatura alta en mineral complejo de pirita. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 97-108.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000100010&lng=es&tlng=es

Rivera, H. (2005). *Geología general* (Segunda ed.). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Rivera, N. (2002). Metalogenia del distrito minero de Cerro de Pasco. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 94, 71-97. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/BSGP-94-71.pdf>

Rodygin, K., Werner, G., Kucherov, F., & Ananikov, V. (2016). Calcium Carbide: A Unique Reagent for Organic Synthesis and Nanotechnology. *Chemistry – An Asian Journal*, 11(7), 965-976. <https://doi.org/10.1002/asia.201501323>

Rojas, N. (2003). *Recuperación de oro y plata desde residuos ferríticos mediante cianuración*. Concepción: Universidad de Concepción.

Roldán, E., Salinas, E., Hernández, J., Cerecedo, E., Rodríguez, V., Jeldres, R., & Toro, N. (2020). Leaching of Silver and Gold Contained in a Sedimentary Ore, Using Sodium Thiosulfate; A Preliminary Kinetic Study. *Metals*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/met10020159>

Ropp, R. (2013). Chapter 5 - Group 14 (C, Si, Ge, Sn, and Pb) Alkaline Earth Compounds. In R. Ropp, *Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds* (pp. 351-480). Elsevier.

Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, R., Patino, F., Hernández, J., & Hernández, L. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48, 315-320. <https://doi.org/https://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v48n4/v48n4a21.pdf>

Samoylenko, D., Rodygin, K., & Ananikov, V. (2023). CO₂-Free Calcium Carbide Manufacturing: Demanded Strategy in the Carbon-Neutral Chemical Industry. *Chinese Journal of Chemistry*, 41(24), 3611-3617. <https://doi.org/10.1002/cjoc.202300358>

- Sánchez, W. (2021). *Cartera de Proyectos de Construcción de Mina*. Ministerio de Energía y Minas. Lima: Dirección de Promoción Minera.
[https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/INVERSION/2021/CPM2021\(1\).pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/INVERSION/2021/CPM2021(1).pdf)
- Shishido, M., Alfaro, E., & Pilihuaman, A. (2017). Utilizacion del Carburo de Calcio para la recuperacion de Oro a partir de minerales refractario arsenicales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 20(39), 57-64.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14166>
- Srithammavut, W. (2008). *Modeling of gold Cyanidation*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Lappeenranta, Lappeenranta.
- Xue, G., Lei, Z., Qing, T., & Hong, Q. (2020). Stepwise extraction of gold and silver from refractory gold concentrate calcine by thiourea. *Hydrometallurgy*, 194(105330).
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105330>
- Zaldaña, E., & Zavaleta, G. (2016). *Influencia de la temperatura y de la granulometría en el pre-tratamiento por lixiviación alcalina (Na_2S y NaOH) de un mineral refractario con contenido de arsénico(As) procedente de Sayapullo, para incrementar la recuperación de oro mediante cianuración*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

ANEXOS

Anexo 1

Resultado del análisis granulométrico por difracción láser que define el tamaño P80 (54,7 μm) del mineral de alimentación utilizado en las pruebas de cianuración.



Anexo 2

Equipo de análisis granulométrico Mastersizer 3000 empleado para la determinación de la distribución de tamaño de partícula del mineral estudiado.



Anexo 3

Muestra de mineral compuesto (blending de los stockpiles A, B y C) utilizada como alimentación en las pruebas de cianuración.



Anexo 4

Carburo de Calcio (CaC_2), reactivo usado como pre-oxidante en el estudio



Anexo 5

Registro fotográfico de la lixiviación en agitación del mineral con aireación mediante lanzas



Anexo 6

Resultados experimentales de Prueba estándar 0 Kg CaC_2 /TM

Tiempo (h)	CN-ppm	Ag ppm	Au ppm	% Rec Ag Exp.	% Rec Au Exp.	Error Ag	Error Au
0	500	0	0	0.00%	0.00%	0.000000	0.000000
4	52.63	18.30	0.05	11.70%	12.90%	0.000130	0.000033
18	147.364	46.77	0.07	29.90%	19.64%	0.000037	0.000251
24	263.13	51.53	0.07	32.95%	20.16%	0.000159	0.000311
48	221.046	54.45	0.07	34.81%	18.05%	0.000047	0.000075
72	284.202	56.74	0.06	36.28%	17.16%	0.000026	0.000374

Anexo 7*Resultados experimentales de Prueba 1 Kg CaC₂/TM*

Tiempo (h)	CN-ppm	Ag ppm	Au ppm	% Rec Ag Exp.	% Rec Au Exp.	Error Ag	Error Au
0	500	0	0	0.00%	0.00%	0.000000	0.000000
4	105.26	44.50	0.05	24.34%	10.15%	0.000063	0.000014
18	105.26	48.18	0.07	26.35%	15.03%	0.000649	0.000114
24	242.09	50.25	0.07	27.48%	15.38%	0.000326	0.000134
48	210.52	57.91	0.07	31.67%	13.89%	0.000197	0.000052
72	294.72	58.95	0.07	32.24%	13.60%	0.000473	0.000132

Anexo 8*Resultados experimentales de Prueba 2 Kg CaC₂/TM*

Tiempo (h)	CN-ppm	Ag ppm	Au ppm	% Rec Ag Exp.	% Rec Au Exp.	Error Ag	Error Au
0	500	0	0	0.00%	0.00%	0.000000	0.000000
4	52.63	0.41	0.04	0.25%	13.22%	0.003717	0.000002
18	84.208	33.81	0.06	20.97%	23.28%	0.000035	0.000175
24	210.52	48.45	0.07	30.05%	27.32%	0.001789	0.000214
48	231.572	55.57	0.08	34.47%	27.93%	0.000200	0.000003
72	347.358	65.08	0.08	40.37%	27.95%	0.000003	0.000019

Anexo 9*Resultados experimentales de Prueba 3 Kg CaC₂/TM*

Tiempo (h)	CN-ppm	Ag ppm	Au ppm	% Rec Ag Exp.	% Rec Au Exp.	Error Ag	Error Au
0	500	0	0	0.00%	0.00%	0.000000	0.000000
4	42.104	18.10	0.01	9.83%	3.29%	0.002850	0.001395
18	63.156	30.86	0.07	16.76%	19.74%	0.000556	0.000192
24	305.254	48.84	0.08	26.53%	22.84%	0.001479	0.000591
48	242.098	62.69	0.08	34.05%	23.62%	0.000387	0.000013
72	284.202	63.50	0.08	34.49%	23.64%	0.000442	0.000253

Anexo 10*Resultados experimentales de Prueba 4 Kg CaC₂/TM*

Tiempo (h)	CN-ppm	Ag ppm	Au ppm	% Rec Ag Exp.	% Rec Au Exp.	Error Ag	Error Au
0	500	0	0	0.00%	0.00%	0.000000	0.000000
4	31.578	19.70	0.02	11.05%	4.32%	0.001743	0.000017
18	73.682	30.01	0.07	17.17%	19.06%	0.002014	0.000005
24	284.202	47.23	0.08	26.50%	22.73%	0.000284	0.000450
48	231.572	60.14	0.08	33.74%	22.74%	0.000286	0.000036
72	273.676	60.82	0.08	34.12%	22.74%	0.000069	0.000230

Anexo 11*Precio promedio de metales Au y Ag del 2000 al 2025*

Año	Precio (\$/Oz)	Variación % Precio US\$ / Oz Ag	Precio (\$/Oz)	Variación % Precio US\$ / Oz Au
2000	4.95		279.03	
2001	4.38	-11.68%	270.99	-2.88%
2002	4.60	5.14%	309.97	14.39%
2003	4.88	6.03%	363.51	17.27%
2004	6.66	36.51%	409.21	12.57%
2005	7.31	9.75%	444.84	8.71%
2006	11.56	58.18%	604.34	35.85%
2007	13.39	15.84%	696.72	15.29%
2008	15.00	12.01%	871.71	25.12%
2009	14.64	-2.36%	972.97	11.62%
2010	20.15	37.62%	1224.66	25.87%
2011	35.22	74.80%	1569.21	28.13%
2012	31.14	-11.60%	1669.52	6.39%
2013	23.85	-23.40%	1411.46	-15.46%
2014	19.07	-20.03%	1265.58	-10.34%
2015	15.72	-17.58%	1160.66	-8.29%
2016	17.15	9.09%	1248.99	7.61%
2017	17.07	-0.49%	1257.56	0.69%
2018	15.71	-7.93%	1269.23	0.93%
2019	16.22	3.22%	1392.50	9.71%
2020	20.54	26.62%	1770.25	27.13%
2021	25.17	22.54%	1799.63	1.66%
2022	21.80	-13.39%	1800.60	0.05%
2023	23.40	7.36%	1942.67	7.89%
2024	28.27	20.81%	2387.70	22.91%
2025	32.98	16.68%	3104.00	30.00%
PROMEDIO	17.34	10.15%	1211.44	10.91%

Anexo 12

Flujo de caja sin proyecto

[illegible]

Anexo 13

Flujo de caja con proyecto

[illegible]

Anexo 16

Variación %Promedio de los precios de Ag y Au Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DEL AU	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO Ag									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	-\$1,547,679.0	-\$627,611.5	\$292,456.1	\$1,212,523.6	\$2,132,591.2	\$3,052,658.7	\$3,972,726.3	\$4,892,793.8	\$5,812,861.4
	-75%	-\$1,013,202.1	-\$93,134.5	\$826,933.0	\$1,747,000.6	\$2,667,068.2	\$3,587,135.7	\$4,507,203.3	\$5,427,270.8	\$6,347,338.4
	-50%	-\$478,725.1	\$441,342.5	\$1,361,410.0	\$2,281,477.6	\$3,201,545.1	\$4,121,612.7	\$5,041,680.2	\$5,961,747.8	\$6,881,815.4
	-25%	\$55,751.9	\$975,819.5	\$1,895,887.0	\$2,815,954.6	\$3,736,022.1	\$4,656,089.7	\$5,576,157.2	\$6,496,224.8	\$7,416,292.3
	0%	\$590,228.9	\$1,510,296.5	\$2,430,364.0	\$3,350,431.6	\$4,270,499.1	\$5,190,566.7	\$6,110,634.2	\$7,030,701.8	\$7,950,769.3
	25%	\$1,124,705.9	\$2,044,773.4	\$2,964,841.0	\$3,884,908.5	\$4,804,976.1	\$5,725,043.7	\$6,645,111.2	\$7,565,178.8	\$8,485,246.3
	50%	\$1,659,182.9	\$2,579,250.4	\$3,499,318.0	\$4,419,385.5	\$5,339,453.1	\$6,259,520.6	\$7,179,588.2	\$8,099,655.7	\$9,019,723.3
	75%	\$2,193,659.9	\$3,113,727.4	\$4,033,795.0	\$4,953,862.5	\$5,873,930.1	\$6,793,997.6	\$7,714,065.2	\$8,634,132.7	\$9,554,200.3
	100%	\$2,728,136.8	\$3,648,204.4	\$4,568,271.9	\$5,488,339.5	\$6,408,407.1	\$7,328,474.6	\$8,248,542.2	\$9,168,609.7	\$10,088,677.3

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación de los precios de Ag y Au.

Anexo 17

Variación %Promedio de los precios de Ag y CaC₂ Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DEL CaC ₂	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO Ag									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	\$1,937,907.9	\$2,857,975.5	\$3,778,043.1	\$4,698,110.6	\$5,618,178.2	\$6,538,245.7	\$7,458,313.3	\$8,378,380.8	\$9,298,448.4
	-75%	\$1,600,988.2	\$2,521,055.7	\$3,441,123.3	\$4,361,190.8	\$5,281,258.4	\$6,201,325.9	\$7,121,393.5	\$8,041,461.1	\$8,961,528.6
	-50%	\$1,264,068.4	\$2,184,136.0	\$3,104,203.5	\$4,024,271.1	\$4,944,338.6	\$5,864,406.2	\$6,784,473.7	\$7,704,541.3	\$8,624,608.8
	-25%	\$927,148.7	\$1,847,216.2	\$2,767,283.8	\$3,687,351.3	\$4,607,418.9	\$5,527,486.4	\$6,447,554.0	\$7,367,621.5	\$8,287,689.1
	0%	\$590,228.9	\$1,510,296.5	\$2,430,364.0	\$3,350,431.6	\$4,270,499.1	\$5,190,566.7	\$6,110,634.2	\$7,030,701.8	\$7,950,769.3
	25%	\$253,309.1	\$1,173,376.7	\$2,093,444.2	\$3,013,511.8	\$3,933,579.3	\$4,853,646.9	\$5,773,714.5	\$6,693,782.0	\$7,613,849.6
	50%	-\$83,610.6	\$836,456.9	\$1,756,524.5	\$2,676,592.0	\$3,596,659.6	\$4,516,727.1	\$5,436,794.7	\$6,356,862.2	\$7,276,929.8
	75%	-\$420,530.4	\$499,537.2	\$1,419,604.7	\$2,339,672.3	\$3,259,739.8	\$4,179,807.4	\$5,099,874.9	\$6,019,942.5	\$6,940,010.0
	100%	-\$757,450.1	\$162,617.4	\$1,082,685.0	\$2,002,752.5	\$2,922,820.1	\$3,842,887.6	\$4,762,955.2	\$5,683,022.7	\$6,603,090.3

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación de los precios de Ag y CaC₂.

Anexo 18

Variación %Promedio de los precios de Ag y la Inversión Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DE LA INVERSIÓN	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO Ag									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	\$790,228.9	\$1,710,296.5	\$2,630,364.0	\$3,550,431.6	\$4,470,499.1	\$5,390,566.7	\$6,310,634.2	\$7,230,701.8	\$8,150,769.3
	-75%	\$740,228.9	\$1,660,296.5	\$2,580,364.0	\$3,500,431.6	\$4,420,499.1	\$5,340,566.7	\$6,260,634.2	\$7,180,701.8	\$8,100,769.3
	-50%	\$690,228.9	\$1,610,296.5	\$2,530,364.0	\$3,450,431.6	\$4,370,499.1	\$5,290,566.7	\$6,210,634.2	\$7,130,701.8	\$8,050,769.3
	-25%	\$640,228.9	\$1,560,296.5	\$2,480,364.0	\$3,400,431.6	\$4,320,499.1	\$5,240,566.7	\$6,160,634.2	\$7,080,701.8	\$8,000,769.3
	0%	\$590,228.9	\$1,510,296.5	\$2,430,364.0	\$3,350,431.6	\$4,270,499.1	\$5,190,566.7	\$6,110,634.2	\$7,030,701.8	\$7,950,769.3
	25%	\$540,228.9	\$1,460,296.5	\$2,380,364.0	\$3,300,431.6	\$4,220,499.1	\$5,140,566.7	\$6,060,634.2	\$6,980,701.8	\$7,900,769.3
	50%	\$490,228.9	\$1,410,296.5	\$2,330,364.0	\$3,250,431.6	\$4,170,499.1	\$5,090,566.7	\$6,010,634.2	\$6,930,701.8	\$7,850,769.3
	75%	\$440,228.9	\$1,360,296.5	\$2,280,364.0	\$3,200,431.6	\$4,120,499.1	\$5,040,566.7	\$5,960,634.2	\$6,880,701.8	\$7,800,769.3
	100%	\$390,228.9	\$1,310,296.5	\$2,230,364.0	\$3,150,431.6	\$4,070,499.1	\$4,990,566.7	\$5,910,634.2	\$6,830,701.8	\$7,750,769.3

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación del precio de Ag y la inversión.

Anexo 19

Variación %Promedio de los precios de Au y CaC₂ Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DEL CaC ₂	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO Au									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	\$3,480,270.2	\$4,014,747.2	\$4,549,224.2	\$5,083,701.2	\$5,618,178.2	\$6,152,655.1	\$6,687,132.1	\$7,221,609.1	\$7,756,086.1
	-75%	\$3,143,350.5	\$3,677,827.4	\$4,212,304.4	\$4,746,781.4	\$5,281,258.4	\$5,815,735.4	\$6,350,212.4	\$6,884,689.4	\$7,419,166.3
	-50%	\$2,806,430.7	\$3,340,907.7	\$3,875,384.7	\$4,409,861.6	\$4,944,338.6	\$5,478,815.6	\$6,013,292.6	\$6,547,769.6	\$7,082,246.6
	-25%	\$2,469,510.9	\$3,003,987.9	\$3,538,464.9	\$4,072,941.9	\$4,607,418.9	\$5,141,895.9	\$5,676,372.8	\$6,210,849.8	\$6,745,326.8
	0%	\$2,132,591.2	\$2,667,068.2	\$3,201,545.1	\$3,736,022.1	\$4,270,499.1	\$4,804,976.1	\$5,339,453.1	\$5,873,930.1	\$6,408,407.1
	25%	\$1,795,671.4	\$2,330,148.4	\$2,864,625.4	\$3,399,102.4	\$3,933,579.3	\$4,468,056.3	\$5,002,533.3	\$5,537,010.3	\$6,071,487.3
	50%	\$1,458,751.6	\$1,993,228.6	\$2,527,705.6	\$3,062,182.6	\$3,596,659.6	\$4,131,136.6	\$4,665,613.6	\$5,200,090.5	\$5,734,567.5
	75%	\$1,121,831.9	\$1,656,308.9	\$2,190,785.9	\$2,725,262.8	\$3,259,739.8	\$3,794,216.8	\$4,328,693.8	\$4,863,170.8	\$5,397,647.8
	100%	\$784,912.1	\$1,319,389.1	\$1,853,866.1	\$2,388,343.1	\$2,922,820.1	\$3,457,297.0	\$3,991,774.0	\$4,526,251.0	\$5,060,728.0

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación de los precios del Au y CaC₂.

Anexo 20

Variación %Promedio de los precios de Au y la Inversión Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DE LA INVERSIÓN	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO Au									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	\$2,332,591.2	\$2,867,068.2	\$3,401,545.1	\$3,936,022.1	\$4,470,499.1	\$5,004,976.1	\$5,539,453.1	\$6,073,930.1	\$6,608,407.1
	-75%	\$2,282,591.2	\$2,817,068.2	\$3,351,545.1	\$3,886,022.1	\$4,420,499.1	\$4,954,976.1	\$5,489,453.1	\$6,023,930.1	\$6,558,407.1
	-50%	\$2,232,591.2	\$2,767,068.2	\$3,301,545.1	\$3,836,022.1	\$4,370,499.1	\$4,904,976.1	\$5,439,453.1	\$5,973,930.1	\$6,508,407.1
	-25%	\$2,182,591.2	\$2,717,068.2	\$3,251,545.1	\$3,786,022.1	\$4,320,499.1	\$4,854,976.1	\$5,389,453.1	\$5,923,930.1	\$6,458,407.1
	0%	\$2,132,591.2	\$2,667,068.2	\$3,201,545.1	\$3,736,022.1	\$4,270,499.1	\$4,804,976.1	\$5,339,453.1	\$5,873,930.1	\$6,408,407.1
	25%	\$2,082,591.2	\$2,617,068.2	\$3,151,545.1	\$3,686,022.1	\$4,220,499.1	\$4,754,976.1	\$5,289,453.1	\$5,823,930.1	\$6,358,407.1
	50%	\$2,032,591.2	\$2,567,068.2	\$3,101,545.1	\$3,636,022.1	\$4,170,499.1	\$4,704,976.1	\$5,239,453.1	\$5,773,930.1	\$6,308,407.1
	75%	\$1,982,591.2	\$2,517,068.2	\$3,051,545.1	\$3,586,022.1	\$4,120,499.1	\$4,654,976.1	\$5,189,453.1	\$5,723,930.1	\$6,258,407.1
	100%	\$1,932,591.2	\$2,467,068.2	\$3,001,545.1	\$3,536,022.1	\$4,070,499.1	\$4,604,976.1	\$5,139,453.1	\$5,673,930.1	\$6,208,407.1

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación de los precios de Au y la inversión.

Anexo 21

Variación %Promedio de los precios de CaC₂ y la Inversión Vs. VAN

VARIACIÓN %PROMEDIO DEL PRECIO DE LA INVERSIÓN	VARIACIÓN PROMEDIO DEL PRECIO DEL CaC ₂									
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	-100%	\$5,818,178.2	\$5,481,258.4	\$5,144,338.6	\$4,807,418.9	\$4,470,499.1	\$4,133,579.3	\$3,796,659.6	\$3,459,739.8	\$3,122,820.1
	-75%	\$5,768,178.2	\$5,431,258.4	\$5,094,338.6	\$4,757,418.9	\$4,420,499.1	\$4,083,579.3	\$3,746,659.6	\$3,409,739.8	\$3,072,820.1
	-50%	\$5,718,178.2	\$5,381,258.4	\$5,044,338.6	\$4,707,418.9	\$4,370,499.1	\$4,033,579.3	\$3,696,659.6	\$3,359,739.8	\$3,022,820.1
	-25%	\$5,668,178.2	\$5,331,258.4	\$4,994,338.6	\$4,657,418.9	\$4,320,499.1	\$3,983,579.3	\$3,646,659.6	\$3,309,739.8	\$2,972,820.1
	0%	\$5,618,178.2	\$5,281,258.4	\$4,944,338.6	\$4,607,418.9	\$4,270,499.1	\$3,933,579.3	\$3,596,659.6	\$3,259,739.8	\$2,922,820.1
	25%	\$5,568,178.2	\$5,231,258.4	\$4,894,338.6	\$4,557,418.9	\$4,220,499.1	\$3,883,579.3	\$3,546,659.6	\$3,209,739.8	\$2,872,820.1
	50%	\$5,518,178.2	\$5,181,258.4	\$4,844,338.6	\$4,507,418.9	\$4,170,499.1	\$3,833,579.3	\$3,496,659.6	\$3,159,739.8	\$2,822,820.1
	75%	\$5,468,178.2	\$5,131,258.4	\$4,794,338.6	\$4,457,418.9	\$4,120,499.1	\$3,783,579.3	\$3,446,659.6	\$3,109,739.8	\$2,772,820.1
	100%	\$5,418,178.2	\$5,081,258.4	\$4,744,338.6	\$4,407,418.9	\$4,070,499.1	\$3,733,579.3	\$3,396,659.6	\$3,059,739.8	\$2,722,820.1

Nota: La tabla muestra los valores del VAN (en USD) ante la variación de los precios del CaC₂ y la inversión.