

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE CARBÓN FINO
RESIDUAL DEL PROCESO ADR POR CIANURACIÓN EN LA
PLANTA LA JOYA MINING S.A.C. AREQUIPA**

PRESENTADA POR:

Br. DANY ROYER APAZA CUAQUIRA

Br. JORGE LUIS TUIRO QUISPE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

ING. PORFIRIO CARRASCO TAPIA

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. 3655-2025-FIGMM-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor PORFIRIO CARRASCO TAPIA
 quien aplica el software de detección de similitud al
 trabajo de investigación/tesis titulada: RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE
CARBÓN FINO RESIDUAL DEL PROCESO ODR POR LIANURACIÓN
EN LA PLANTA LA JOYA MINING S.A.C. AREQUIPA

Presentado por: DANY ROYER APAZA CUSQUIRA DNI N° 71429190 ;
 presentado por: SERGE LUIS TUJTO CUISPE DNI N°: 70815573
 Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de ABRIL de 2026.....



 Firma

Post firma..... PORFIRIO CARRASCO TAPIA

Nro. de DNI..... 24002884

ORCID del Asesor..... 0000 - 0002 - 4360 - 9866

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27.259:575883560

Jorge Luis Tuiro Quispe

RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE CARBÓN FINORESIDUAL DEL PROCESO ADR POR CIANURACIÓN EN L...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:575883560

Fecha de entrega

7 abr 2026, 5:45 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

7 abr 2026, 6:04 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE CARBÓN FINORESIDUAL DEL PROCESO ADR POR CIANURAC.....pdf

Tamaño del archivo

5.1 MB

140 páginas

27.829 palabras

151.060 caracteres




7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
72 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Presentación

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco de nuestra consideración:

De acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos vigente para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, tenemos a bien presentar ante usted y ante los señores miembros del jurado evaluador, el siguiente Informe de Tesis titulado:

“RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE CARBÓN FINO RESIDUAL DEL PROCESO ADR POR CIANURACIÓN EN LA PLANTA LA JOYA MINING S.A.C. AREQUIPA”

El presente informe expone los fundamentos teóricos, metodológicos y experimentales relacionados con la evaluación técnica de la recuperación de oro a partir del carbón fino residual generado en el proceso ADR. El estudio fue desarrollado a nivel de laboratorio mediante pruebas de cianuración por agitación, con el propósito de proponer una alternativa viable que contribuya a optimizar la recuperación global de oro en la planta.

Atentamente,

Br. APAZA CUAQUIRA, Dany Royer

Br. TUIRO QUISPE, Jorge Luis

Dedicatorias

A Dios, por ser mi fuente de luz, fuerza y esperanza. Por sostenerme en cada momento de duda y por mostrarme que, con fe y perseverancia, todo es posible.

A mi madre, Doña Filomena, cuyo amor, sacrificio y apoyo en toda mi carrera universitaria. Gracias por enseñarme, con tu ejemplo, que no hay meta imposible cuando se lucha con el corazón.

A mis hermanos, Yuri y Nazira, por su compañía constante, sus palabras de aliento y por estar presentes en cada etapa de este camino. Su apoyo ha sido fundamental.

A mi compañera de vida, Srta. Luz Miriam, por su amor, comprensión y paciencia inagotable. Por estar a mi lado en los días de cansancio y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Gracias por depositar tu confianza en mí. Este logro también es tuyo.

Y a mí mismo, por la determinación de seguir adelante a pesar de los desafíos, por confiar en el proceso y por no abandonar mis sueños. Hoy me reconozco con orgullo.

Dedicatoria

A mis padres, Cornelia y Nicanor, les dedico este logro con profundo agradecimiento. Su apoyo incondicional, sacrificio y amor han sido fundamentales en mi camino, sus consejos y motivaciones me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Su confianza en mí ha sido mi mayor motivación.

A mis hermanos, les agradezco por su apoyo incondicional, en cada etapa de mi vida profesional, por sus consejos y tiempo compartido han sido muy valiosos para mí.

A todo los familiares y amigos que estuvieron presentes en los momentos más difíciles, les agradezco por sus consejos y tiempo compartido durante mi etapa universitaria. Su apoyo ha sido fundamental en mi crecimiento personal y profesional.

TUIRO QUISPE Jorge Luis

El carbón activado usado en el circuito ADR de la planta La Joya Mining S.A.C. sufrió desgaste mecánico y atricción, generando carbón de granulometría fina que, pese a contener oro no recuperado en la desorción convencional, era descartado. El objetivo de esta investigación fue recuperar el oro a partir del carbón fino residual del proceso ADR mediante cianuración, en la planta La Joya Mining S.A.C. – Arequipa. Se realizaron pruebas metalúrgicas en laboratorio aplicando el proceso de cianuración por agitación. La metodología se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental factorial 2^3 , considerando como variables independientes la concentración de cianuro de sodio, el pH de la solución y el tiempo de residencia; la variable dependiente fue el porcentaje de recuperación de oro. Las pruebas se realizaron utilizando carbón fino como materia prima. Se determinó la ley de oro en el carbón de cabeza y en el carbón después de la cianuración, y se calculó el porcentaje de recuperación correspondiente. Los resultados mostraron que la mayor recuperación obtenida fue de 45,67 %, un valor inferior al rango esperado en condiciones industriales (>90 %). No obstante, este valor confirmó la viabilidad técnica del proceso. Se concluyó que es factible recuperar el oro del carbón fino residual. El estudio aportó a la metalurgia del oro opciones sostenibles para residuos, con ventajas técnicas, económicas y ambientales.

Palabras clave: Recuperación de oro, Carbón fino, Cianuración, Planta ADR, Diseño factorial.

Abstract

The activated carbon used in the ADR circuit of the La Joya Mining S.A.C. plant suffered mechanical wear and attrition, generating fine-grained carbon that, despite containing gold not recovered by conventional desorption, was discarded. The objective of this research was to recover gold from the residual fine carbon of the ADR process using cyanidation at the La Joya Mining S.A.C. plant in Arequipa, Peru. Metallurgical tests were conducted in the laboratory using the agitation cyanidation process. The methodology was developed under a quantitative approach, using a 2^3 factorial experimental design, considering the sodium cyanide concentration, the pH of the solution, and the residence time as independent variables; the dependent variable was the percentage of gold recovery. The tests were performed using fine carbon as raw material. The gold grade was determined in the raw carbon and in the carbon after cyanidation, and the corresponding percentage recovery was calculated. The results showed that the highest recovery achieved was 45.67%, a value lower than the expected range under industrial conditions (>90%). However, this value confirmed the technical feasibility of the process. It was concluded that it is feasible to recover gold from residual fine coal. The study contributed sustainable waste management options to gold metallurgy, with technical, economic, and environmental advantages.

Keywords: Gold recovery, Fine carbon, Cyanidation, ADR plant, Factorial design.

Índice

Presentación	i
Dedicatorias	ii
Resumen.....	¡Error! Marcador no definido.
Abstract	iv
Índice.....	vi
Índice de tablas	xiii
Índice de figuras.....	xiv
Lista de abreviaturas	xvi
Introducción	xvii
Capítulo I	1
Planteamiento del problema.....	1
1.1 Situación Problemática	1
1.2 Formulación del Problema.....	3
1.2.1 Problema General	3
1.2.2 Problemas Específicos	3
1.3 Justificación	3
1.3.1 Conveniencia	3
1.3.2 Relevancia Social	4
1.3.3 Relevancia Tecnológica.....	4
1.3.4 Valor Teórico.....	4
1.3.5 Utilidad Metodológica.....	5

1.4	Objetivos.....	5
1.4.1	Objetivo General.....	5
1.4.2	Objetivos Específicos	5
	Capítulo II.....	6
	Marco Teórico.....	6
2.1	Antecedentes.....	6
2.1.1	Antecedentes Nacionales.....	6
2.1.2	Antecedentes Internacionales	6
2.2	Bases Teóricas	8
2.2.1	El Oro	8
2.2.2	Propiedades Físicas del Oro	9
2.2.3	Propiedades Químicas del Oro	10
2.2.4	Ocurrencia del Oro	10
2.2.5	Principales Minerales Portadores de Oro	12
2.2.6	Métodos Utilizados en la Extracción De Oro.....	12
2.2.7	Selección del Proceso de Extracción de Oro.....	13
2.3	Principios en la Hidrometalurgia del Oro	15
2.4	Cianuración.....	17
2.4.1	Termodinámica del Proceso de Cianuración de Oro	20
2.4.2	Cinética del Proceso de Cianuración	24

2.5	Métodos de Cianuración	25
2.5.1	Método Tipo “dump leaching”	25
2.5.2	Método de Lixiviación Tipo “heap leaching”	25
2.5.3	Método de Lixiviación Tipo “vat leaching”	26
2.5.4	Método de Lixiviación por Agitación	26
2.5.5	Incidencia de las Variables en la Lixiviación por Agitación.....	28
2.6	Purificación y Concentración de Solución.....	30
2.6.1	Adsorción en Carbón Activado	31
2.6.2	Mecanismo de la Adsorción de Oro en el Carbón Activado	32
2.6.3	Efecto de la Presencia de Iones en la Solución Sobre la Adsorción de Complejos Oro-Cianuro.....	33
2.6.4	Factores que Afectan la Adsorción de los Complejos Aurocianuros	34
2.6.5	Métodos de Adsorción de los Complejos Aurocianuros en el Carbón Activado	35
2.6.6	Métodos de Desorción de los Complejos Aurocianuros del Carbón Activado Cargado	39
	Capítulo III.....	40
	Hipótesis y Variables	40
3.1	Hipótesis	40
3.1.1	Hipótesis general	40
3.1.2	Hipótesis Específicas.....	40
3.2	Variables	40

3.2.1	Variables Independientes (X_i)	40
3.2.2	Variable Dependiente (Y_i).....	41
3.2.3	Variables Intervinientes.....	41
3.3	Operacionalización de Variables	42
Capítulo IV.....		43
Metodología.....		43
4.1	Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica.....	43
4.2	Metodología de la Investigación.....	44
4.3	Población de Estudio	44
4.3.1	Muestra, Tamaño de Muestra y Técnicas de Muestreo	44
4.3.2	Técnicas y Recolección de Datos	45
4.4	Materiales, Equipos, Reactivos.....	46
4.4.1	Materiales.....	46
4.4.2	Equipos	46
4.4.3	Reactivos	47
4.5	Validez y Confiabilidad de Instrumentos.	47
4.6	Técnicas de Procesamiento de Datos y Plan de Análisis de Datos.....	47
4.7	Metodología Seleccionada y Aplicada al Proyecto de Investigación	48
Capítulo V.....		50
Desarrollo y Resultados Experimentales		50
5.1	Toma de Muestras del Carbón	51

5.2	Preparación de Muestras en el Laboratorio de Hidrometalurgia	52
5.2.1	Análisis Químico de las Muestras del Carbón Fino Residual	55
5.3.1	Determinación de la Gravedad Especifica del Carbón Fino Residual.....	56
5.4	Diseño de las Pruebas Metalúrgicas	57
5.5	Condiciones Operativas para las Pruebas Metalúrgicas	59
5.5.1	Preparación de Solución de Nitrato de Plata.....	62
5.5.2	Preparación de Solución Indicador de Yoduro de Potasio al 5%.....	63
5.6	Ejecución de las Pruebas Metalúrgicas.....	64
5.5	Control de Parámetros Durante la Prueba.....	65
5.5.1	Determinación de Cianuro Libre.....	65
5.5.2	Control del pH	69
5.5.3	Tiempo.....	69
5.5.4	Resultados.....	70
	Capítulo VI.....	73
	Análisis y Discusión de Resultados	73
6.1.	Matriz de Diseño 2^3 para el Análisis y Discusión de Resultados por Minitab	73
6.2.	Análisis de Resultados con Minitab Según el Diseño Factorial	74
6.2.1.	Análisis de los Resultados Predeterminados por el diseño factorial 2^3	75
6.2.2.	Análisis de los Resultados Ajustados en el Diseño Factorial 2^3	79
6.2.2.1.	Análisis y Determinación de las Variables más Incidentes en el Proceso	80
6.2.2.2.	Análisis y Grafica Normal de los Efectos en la Recuperación de Oro	81
6.2.2.3.	Efectos Principales de Cada Variable en la Recuperación de Oro	83

6.2.2.4. Efectos de las Interacciones en la Recuperación de Oro	84
6.2.2.5. Análisis de Varianza	86
6.2.2.6. Factor de Correlación del Modelo Ajustado de los Datos	88
6.2.2.7. Coeficientes Codificados para el Modelo Matemático de Recuperación	90
6.2.2.8. Modelo de Correlación para la Optimización del Proceso	92
6.2.2.9. Optimización de la Recuperación de Oro Según el Modelo de Correlación	93
6.2.2.10. Gráfica de Contornos de Respuesta	95
6.2.2.11. Gráfica de Superficie de Respuesta.....	96
6.3. Discusión de los Resultados	98
Conclusiones	100
Recomendaciones	101
Referencias Bibliográficas.....	102
Bibliografía	102
ANEXOS	106
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	106
Anexo 2: Producción de Carbón Fino en la Planta año 2023.	107
Anexo 3: Balance de planta por mes y año 2023	107
Anexo 4: Materiales y equipos usados para la investigación	108
Anexo 5: Ficha técnica Carbón activado 6x12 - POCHTECA.....	111
Anexo 6: Cuarteo y Muestreo de la Muestra Representativa del Carbón Fino Residual	112
Anexo 7: Reporte de Análisis Químico del Carbón Fino Residual	113
Anexo 8: Fotografía del Inicio de las Pruebas Experimentales	114
Anexo 9: Control de parámetros de las pruebas metalúrgicas	114
Anexo 10: Secado y tamizado del carbón.....	115
Anexo 11: Preparación de la Muestras de Resultados Experimentales para Laboratorio	115

Anexo 12: Reporte de los resultados de cada Prueba experimental.	116
Anexo 13: Balance Metalúrgico.	119
Anexo 14: Diagrama de Flujo del circuito de molienda La Joya Mining S.A.C.	120
Anexo 15: diagrama de flujo del circuito CIL La Joya Mining SAC.	121

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades físicas del oro	9
Tabla 2 Métodos para recuperación, concentración y procesamiento de oro.....	13
Tabla 3 Selección de variables para el proceso	41
Tabla 4 Operacionalización de variables.....	42
Tabla 5 Carbó fino generado por mes.....	51
Tabla 6 Recopilación de datos para la determinación de gravedad específica.....	57
Tabla 7 Niveles (-1) y (+1) de las variables independientes	58
Tabla 8 Matriz del Diseño Factorial 2^3 , variables codificadas y decodificadas	58
Tabla 9 Matriz del diseño factorial 2^3 y condiciones operativas para la prueba experimental	59
Tabla 10 Parámetros operativos considerados para las pruebas experimentales.....	60
Tabla 11 Estandarización de proporciones para la preparación de pulpas	61
Tabla 12 Cianuro libre y reposición de cianuro para la primera hora	67
Tabla 13 Cianuro libre y reposición de cianuro para dos horas	68
Tabla 14 Cianuro libre y reposición de cianuro para cuatro horas	68
Tabla 15 Resumen de las reposiciones de cianuro de cada prueba	70
Tabla 16 Comportamiento de pH durante el proceso	70
Tabla 17 Condiciones y resultados experimentales.....	72
Tabla 18 Arreglos de diseño Factorial con puntos centrales según Minitab	73
Tabla 19 Resultados Experimentales del Diseño Factorial 2^3 con Punto Central	74
Tabla 20 Análisis de Varianza (ANOVA) Predeterminada por el diseño 2^3	77
Tabla 21 Resumen del modelo en función al grado de ajuste	79
Tabla 22 Análisis de Varianza (ANOVA) para la Recuperación de Oro	87
Tabla 23 Resumen del Factor de Ajuste del Modelo de Regresión para la Recuperación de Oro	89
Tabla 24 Coeficientes Codificados del Modelo de Regresión para la Recuperación de Oro..	90

Índice de figuras

Figura 1 <i>Principales minerales portadores de oro</i>	11
Figura 2 <i>Factores que inciden en el proceso de selección</i>	15
Figura 3 <i>Química de la reacción de oro</i>	16
Figura 4 <i>Diagrama de equilibrio de Eh-pH en el sistema Au-H₂O CN⁻ a 25°C</i>	18
Figura 5 <i>Representación esquemática del proceso del mecanismo de cianuración de oro</i>	19
Figura 6 <i>Diagrama de equilibrio CN-HCN (pKa=9.3)</i>	22
Figura 7 <i>Diagrama Eh-pH para el oro y el aurocianuro, mostrando además las de operación para los distintos otros procesos industriales de extracción del oro.</i>	23
Figura 8 <i>Representación del modelo cinético del núcleo recesivo</i>	24
Figura 9 <i>Equipos y tipos de agitación</i>	27
Figura 10 <i>Esquema de la estructura de oro de carbón activado</i>	31
Figura 11 <i>Mecanismo de la adsorción de los complejos aurocianuros en el carbón</i>	32
Figura 12 <i>Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIP.</i>	36
Figura 13 <i>Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIL.</i>	37
Figura 14 <i>Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIC.</i>	38
Figura 15 <i>Ubicación de la planta La Joya Mining S.A.C.</i>	43
Figura 16 <i>Metodología establecida para el desarrollo del proyecto</i>	48
Figura 17 <i>Matriz de Diseño factorial 2³</i>	49
Figura 18 <i>Diagrama de flujo del procedimiento experimental</i>	50
Figura 19 <i>Muestreo de carbón fino en la planta de beneficio</i>	52
Figura 20 <i>Muestra de carbón fino residual</i>	53
Figura 21 <i>Carbón nuevo lavado</i>	54

Figura 22 <i>Tamizado del carbón fresco</i>	55
Figura 23 <i>Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados y predeterminados por el diseño</i>	76
Figura 24 <i>Diagrama de Pareto corregido de los efectos Estandarizados</i>	80
Figura 25 <i>Gráfico de Efectos Estandarizados en la Recuperación de Oro a partir del Carbón Residual Fino</i>	82
Figura 26 <i>Efecto individual de cada variable en la recuperación</i>	83
Figura 27 <i>Interacción de Medias Ajustadas para la Respuesta “Y”</i>	85
Figura 28 <i>Optimización de Variables Operativas para Maximizar la Recuperación de Oro</i>	94
Figura 29 <i>Gráficas de Contorno de la Respuesta en Función de las Variables Operativas</i> ..	96
Figura 30 <i>Superficie de Respuesta en Función de las Variables Operativas</i>	97

Lista de abreviaturas

Au: oro

CA: carbón activado.

CN: cianuro libre.

ADR: adsorción, desorción y reactivación.

g/cm³: gramos por centímetro cubico.

Eh: potencial del proceso.

g/l: gramos por litro.

h: hora.

kg: kilogramo.

Kg/TM: kilogramos por tonelada métrica.

m³: metro cubico.

m³/h : metro cubico por hora.

ozt: onzas troy.

pmm: partes por millón.

TM: toneladas métricas.

%: por ciento.

PLS: solución de lixiviación cargada.

µm: micrómetro.

Å: Armstrong.

Introducción

En la actualidad, la industria minera orienta parte de sus esfuerzos a optimizar la eficiencia de los procesos metalúrgicos mediante la valorización de subproductos generados en las plantas de beneficio. En este contexto, el carbón fino residual generado en el circuito ADR de la planta La Joya Mining S.A.C. se presenta como una oportunidad técnica para recuperar oro que no fue completamente desorbido en las etapas convencionales de desorción del carbón activado. La magnitud de la problemática es evidente si tomamos en cuenta que en el año 2023 se produjo aproximadamente 27,581.470 Kg de carbón fino residual, del cual se estima un contenido metálico de 2,889.294 g de oro (101.916846 oz). Lo cual significa una pérdida económica de \$ 340,014.995 dólares, esta situación significativa no sólo hace que se vea reducida la eficiencia metalúrgica global de todo el proceso, sino que contribuye un pasivo tanto económico como ambiental, puesto que se desecha un material que aún tiene valor significativo. Esta investigación parte de la pregunta ¿será factible la recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración?

El objetivo de esta investigación es recuperar el oro desechado en el carbón fino producido en el circuito de ADR, mediante la cianuración por agitación, proceso reconocido por su efectividad en la industria aurífera. Para ello, se diseñaron y ejecutaron pruebas controladas en laboratorio, variando la concentración de cianuro de sodio (NaCN), el pH de la solución y el tiempo de residencia. La recuperación máxima obtenida, fue de un 45.67 %, este valor resulta ser menor al que se postula como estándar en la industria (> 90%), siendo un resultado prometedor en términos de la naturaleza residual del material. De igual forma confirma que la cianuración es una alternativa que permite mejorar la recuperación global de oro en la planta y contribuye una propuesta científica – técnica.

La estructura de esta tesis está organizada en seis capítulos. El capítulo I, aborda el planteamiento del problema, la situación problemática del tema a tratar, formulación del problema, justificación, objetivo general y objetivos específicos de la investigación. En el capítulo II, contiene la información del marco teórico de la investigación. En el capítulo III, se detallan las hipótesis planteadas y se contextualizan las variables involucradas en la investigación, tanto dependientes e independientes. El capítulo IV expone la metodología empleada en la investigación, dado que el estudio se enmarca en un estudio correlacional, se busca alcanzar un entendimiento integral de las variables involucradas, con el propósito de alcanzar una compensación de las variables analizadas, así como generar información confiable que sirva de guía para la investigación. El capítulo V expone el desarrollo experimental de la investigación, especificando de forma detallada la metodología empleada, los materiales, equipos utilizados y así como los ensayos realizados. En el capítulo VI se presenta los análisis y discusión de resultados obtenidos de las pruebas experimentales; la recuperación de oro y la importancia de las variables. Así mismo se expone las conclusiones que destacan los aportes más relevantes de la investigación, junto con recomendaciones que orientan posibles trabajos a futuro en esta línea de estudio.

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1 Situación Problemática

El oro es uno de los metales preciosos más valorados y más importantes desde el punto de vista económico y de la estrategia mundial, que se obtiene a partir de minerales con contenido del metal precioso o como subproducto de la obtención de otros metales (caso del cobre) y también puede ser recuperado a partir de desechos electrónicos, etc. La recuperación de oro desde los minerales, convencionalmente, se realiza por el proceso de cianuración, adsorción por carbón activado, desorción (elución), electrodeposición, fundición y refinación.

Múltiples trabajos de investigación han puesto de manifiesto la importancia de recuperar oro no solo desde minerales primarios, sino también a partir de fuentes secundarias como relaves, escorias y residuos de carbón activado (Marsden & House, 2006). De forma concreta, el carbón fino residual, generado en los procesos de adsorción - desorción en plantas ADR ha sido reconocido como un material capaz de contener cantidades apreciables de oro que no se pueden reincorporar al circuito de adsorción en virtud de su granulometría (Chávez et al., 2019; Xie et al., 2022); Sin embargo, la literatura revisada denota una falta de estudios específicos sobre esta problemática, así como la ausencia de estudios que se dediquen a evaluar la viabilidad técnica de recuperar oro por cianuración de este tipo de subproducto.

En la planta de beneficio La Joya Mining S.A.C., ubicado en el distrito La Joya, provincia y departamento de Arequipa, la empresa desarrolla actividades de procesamiento de minerales auríferos provenientes del acopio. El circuito metalúrgico implementado comprende las etapas de chancado, molienda, proceso CIL (carbón en lixiviación), desorción del carbón cargado, electrodeposición, fundición y refinación de oro y plata. Del proceso CIL, el carbón

activado cargado con oro es transferido hacia la etapa de desorción, donde se realiza la recuperación del metal de interés. Posteriormente el carbón es sometido a un lavado químico con ácido clorhídrico y a una reactivación térmica con el propósito de restaurar sus propiedades adsorbentes. A continuación, se lleva a cabo una clasificación granulométrica, obteniéndose carbón reactivado de granulometría gruesa que se reutiliza en el proceso CIL y carbón reactivado de granulometría fina, el cual se descarta como carbón fino residual. En el año 2023 (Anexo 2) la planta registró una generación total de carbón fino de 27,581.470 kg (27.581TM), con un contenido de oro de 2,899.294 g (101.916846 Ozt). La eliminación de este material implica una pérdida de oro, que, expresada en términos económicos, asciende a \$ 340,014.995, “considerando una cotización de oro de USD 3,337.40 \$/Oz de oro” (Portal, 2025).

El vacío de estudios sistemáticos sobre la recuperación de oro presente en carbón fino residual conlleva un vacío de conocimiento en el aspecto académico y en lo tecnológico. Pese a que existen publicaciones referidas a este proceso en el trabajo de cianuración de los relaves auríferos y a la regeneración de carbones activados, en este caso no se han ido desarrollando ensayos concretos aplicados a carbón fino de desecho (residual).

Considerando la pérdida económica asociada a la disposición del carbón fino residual con contenido de oro en la planta La Joya Mining S.A.C. la presente investigación se enfocó en evaluar la recuperación de oro mediante transferencia desde el carbón fino residual hacia carbón activado nuevo de granulometría gruesa, empleando un medio de solución cianurada por medio de la agitación. El estudio contempló como variables experimentales la concentración de cianuro, pH de la solución y el tiempo de contacto.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Será factible la recuperación de oro a partir de carbón fino residual proveniente del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, considerando la influencia de la concentración de cianuro, el pH y el tiempo?

1.2.2 Problemas Específicos

PE 1: ¿Cuál es la concentración óptima de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa?

PE 2: ¿Cuál será el pH óptimo en la solución de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa?

PE 3: ¿Cuál es el tiempo óptimo del proceso para lograr la máxima recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa?

1.3 Justificación

1.3.1 Conveniencia

Los procesos de recuperación de oro mediante cianuración, generalmente, incluyen las etapas de: cianuración por agitación o en pilas, adsorción con carbón activado, desorción del carbón cargado, electrodeposición, fundición y refinación. En la planta La Joya Mining S.A.C., durante la etapa de desorción, el carbón tratado es sometido a reactivación térmica y química, generándose como subproducto un carbón fino residual que aún contiene oro remanente. Por

este motivo, la presente investigación se orientó a evaluar la recuperación de dicho oro contenido en el carbón fino residual que normalmente es descartado.

1.3.2 Relevancia Social

La recuperación de oro a partir del carbón fino residual tendría un efecto positivo en la planta, abriendo la posibilidad de implementar de manera formal el proceso de tratamiento de este material. Su puesta en marcha generaría oportunidades laborales directas e indirectas en las etapas de instalación y operación, incrementando la demanda de personal especializado. Asimismo, una mayor utilidad económica para la empresa permitiría financiar proyectos sociales en su área de influencia, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de la población local.

1.3.3 Relevancia Tecnológica

La aplicación de un proceso de cianuración para recuperar oro desde el carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C. representa un avance tecnológico significativo, ya que permite aprovechar un subproducto que actualmente se descarta con contenido de metal valioso. Esta metodología, de acuerdo con los resultados obtenidos, podría replicarse en otras plantas de beneficio aurífero con operaciones similares, optimizando la recuperación global de oro en la industria.

1.3.4 Valor Teórico

El presente estudio aporta conocimiento técnico para cubrir la falta de información relacionada con la recuperación de oro desde carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C. La información generada amplía la base teórica existente y constituye un referente para investigaciones posteriores que busquen optimizar este tipo de procesos.

1.3.5 Utilidad Metodológica

El trabajo es de enfoque cuantitativo, que genera una metodología de recuperación de oro a partir del carbón fino residual, las mismas que pueden ser estandarizados y validados para su aplicación de manera general en toda industria metalúrgica de recuperación de oro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa.

1.4.2 Objetivos Específicos

OE 1: Determinar la concentración de cianuro de sodio adecuado para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La

Joya Mining S.A.C. Arequipa.

OE 2: Establecer el pH adecuado en la solución de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa.

OE 3: Establecer el tiempo del proceso para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Nacionales

(Villar & Paliza, 2006), en su informe de tesis intitulado “*Recuperación de oro a partir del procesamiento del carbón fino generado por la planta de carbón activado de minera Yanacocha*”, cuyo objetivo fue encontrar la recuperación de oro a partir del carbón fino, considerando una muestra proveniente de la empresa minera Yanacocha, para la investigación utilizaron una metodología de desorción de carbón en columnas y consideraron como variables: flujo de operación de 18 m³/h, tonelaje de carbón de 4.5t, adición de soda caustica de 300 kg, adición de solución de cianuro de sodio de 2 m³ y temperatura de trabajo de 145°C, bajo esas condiciones llegaron a concluir, que la desorción de carbón fino con correctas adiciones de cianuro de sodio permite la recuperación de más de 95% de los contenidos de oro y plata en el carbón fino.

Este antecedente pone de manifiesto que el carbón fino residual está incorporado en su mayoría por un contenido significativo en metales que podría ser recuperado mediante técnicas de desorción, lo cual respalda la importancia de trabajar en la búsqueda de alternativas tales como las técnicas de cianuración por agitación del carbón fino de la planta La Joya Mining SAC, materia central de la presente tesis.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

(Hernández A., 2019), en su tesis titulado “*Determinación de una metodología para extracción de oro y plata de los residuos de carbón activado utilizados en los circuitos de carbón en la industria minera para reducir las pérdidas de los metales, utilizando como base*”

el horno para finos de carbón”, cuyo objetivo general fue encontrar a determinar una metodología para extracción de oro y plata de los residuos de carbón activado utilizados en los circuitos de carbón en la industria minera, para reducir las pérdidas de los metales, utilizando como base el horno para finos de carbón fabricado por KCA, considerando finos de carbón provenientes del proyecto de oro *Detour Lake*, localizado en Ontario, Canadá. En dicho trabajo utilizó dos tipos de metodologías de lixiviación: lixiviación agitada y molienda y lixiviación. Cada uno con diferentes condiciones y equipos, a fin de determinar el proceso que permita la mayor extracción de oro y plata del producto generado por el horno. Las variables que consideró fue pH, oxígeno disuelto y la concentración de cianuro libre, llegando a determinar que la mejor metodología de extracción fue moliendo el material durante 8 horas y someter la pulpa a una lixiviación agitada durante 160 horas en un *KCA Lifter bottle* (botella de plástico HDPE diseñada por KCA, especializada, con cargadores en el interior que garantizan una buena mezcla entre los sólidos y la solución de cianuro) obteniendo 96 % del oro y 77 % de la plata contenidos en los residuos carbón.

(**Velasco, Onorato, & Torres, 2018**), en el trabajo de investigación intitulada *“Ensayo de recuperación de oro desde carbón fino residual cargado por vía hidrometalurgia”*, cuyo objetivo fue estudiar el tratamiento hidrometalúrgico para la recuperación de oro a partir de carbón fino residual cargado con oro, aplicando la metodología para transferir oro a trozos de carbón fresco, utilizando un medio de transferencia acuoso.

La metodología consistió en realizar ensayos a escala de laboratorio para determinar el efecto de variables operativas en la transferencia de oro desde el carbón fino residual cargado hacia trozos de carbón grueso. En total se desarrollaron 53 pruebas, en las cuales se consideraron

parámetros como la concentración de cianuro, pH, tiempo de ciclo y número de etapas de transferencia.

Como resultado del proceso, el oro adsorbido en el carbón fino se transfiere al carbón grueso. Las primeras pruebas se llevaron a cabo en un lote a escala de laboratorio para determinar el efecto de las diferentes variables involucradas en la transferencia de oro a partir del carbón fino residual cargado a trozos de carbón grueso. Definidas las variables, se realizaron 53 ensayos, considerando las variables de proceso óptimas previamente determinadas, obteniendo resultados con 90% de nivel de confianza, 9% de error y una desviación estándar de 0,5. Los mejores resultados se obtuvieron con una concentración de cianuro de 2.000 ppm; pH 12,5, tiempo de ciclo de seis horas y la aplicación de tres ciclos de transferencia.

Se concluyó que el proceso de transferencia hidrometalúrgica constituye una alternativa eficaz para aprovechar el carbón fino residual cargado, siendo un aporte relevante para investigaciones orientadas a la recuperación de oro desde materiales que normalmente son descartados, lo que se vincula directamente con el presente estudio.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 El Oro

El oro es un elemento químico con número atómico 79, con una presencia aproximada de 0.004 ppm en la corteza terrestre. Desde el punto de vista geoquímico, se clasifica como elemento siderófilo debido a su facilidad para disolverse en Fe fundido y su baja afinidad con el O y el S. Este metal suele encontrarse conjuntamente con Ag, As, Sb, Se y Te en depósitos de metales preciosos, así como con Fe, Zn y Cu en yacimientos de sulfuros.

“En la naturaleza, el Au se presenta principalmente en estado metálico, razón por la cual se denomina “oro nativo”, y en muy pocos casos aparece como especie mineral.

Etimológicamente, la palabra oro deriva del latín aurum, que significa aurora brillante” (Linares G., 2010, p. 4).

2.2.2 Propiedades Físicas del Oro

Todo proceso de extracción de oro por vía hidrometalurgia están influenciados por sus propiedades físicas, químicas, etc. siendo las propiedades físicas, según Marsden & House, la que se muestra en la tabla 1.

A la tabla 1, se puede adicionar las siguientes propiedades físicas:

- “El oro puede ser distinguido de otros minerales, particularmente de los sulfuros de color amarillo, como la pirita y la calcopirita, por maleabilidad y ductilidad; además es insoluble en ácido” (Domic, 2001, pág. 89).
- “Impurezas tales como bismuto, plomo y telurio afectan su ductilidad y disminuyen su peso específico, el cual puede llegar a ser tan bajo como 15 g/cm^3 ” (Domic, 2001, pág. 189).

Tabla 1

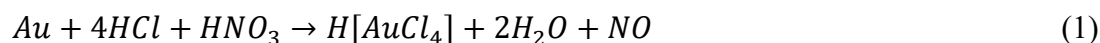
Propiedades físicas del oro

PROPIEDAD	VALOR-UNIDAD
Símbolo	Au
Conductividad térmica a 273 K	311.4 W/(mK)
Peso atómico	196.9665
Evaporación	$3.653 \times 10^5 \text{ J/mol}$
Entropía a 298 K	47.33 J/K
Dureza Brinell	25
Sistema cristalino	FCC
Punto de ebullición	2808°C
Punto de fusión	1064°C
Densidad a 273 K	19.32 g/cm^3

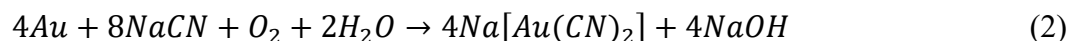
Nota. El cuadro muestra las propiedades físicas del oro. Tomado de (Marsden & House, 2006)

2.2.3 Propiedades Químicas del Oro

El Au se caracteriza por su elevada resistencia a disolverse en medios ácidos comunes. Sin embargo, ciertos agentes como el HCl en presencia de oxidantes, por ejemplo, HNO₃, O₂, iones Cu²⁺ o Fe²⁺, logran atacar su superficie y provocar su disolución (Gasca Torres, 2016, p. 2). Sólo el agente lixivante “agua regia ataca con gran efectividad” (Gasca Torres, 2016, pág.2). Tal como se muestra en la reacción química:



“A partir de esta reacción se da la disolución del oro, en un medio acuoso ácido concentrado fuerte, más un oxidante y un ligante para el metal de interés en este caso para el oro” (Gasca Torres, 2016, pág. 2). “Para la extracción de Au presente en minerales auríferos y la extracción de este a un medio iónico por disolución, existe una ley que gobierna este proceso, planteada por Elsner que se da por medio de la disolución del oro en un medio cianurante, con la presencia de un agente oxidante de por medio, el oxígeno” (Gasca Torres, 2016).



2.2.4 Ocurrencia del Oro

El oro en la naturaleza, principalmente se presenta en las siguientes formas:

Oro libre: “Cuando el metal no se encuentra combinado con otros minerales, su recuperación es sencilla mediante procesos como separación gravimétrica, amalgamación o cianuración directa” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 75).

Oro asociado a sulfuros de hierro: “Se distribuye en partículas finas dentro de minerales como pirita o pirrotita. Su obtención requiere operaciones más complejas que involucran preconcentración y calcinación previa a la cianuración” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 76).

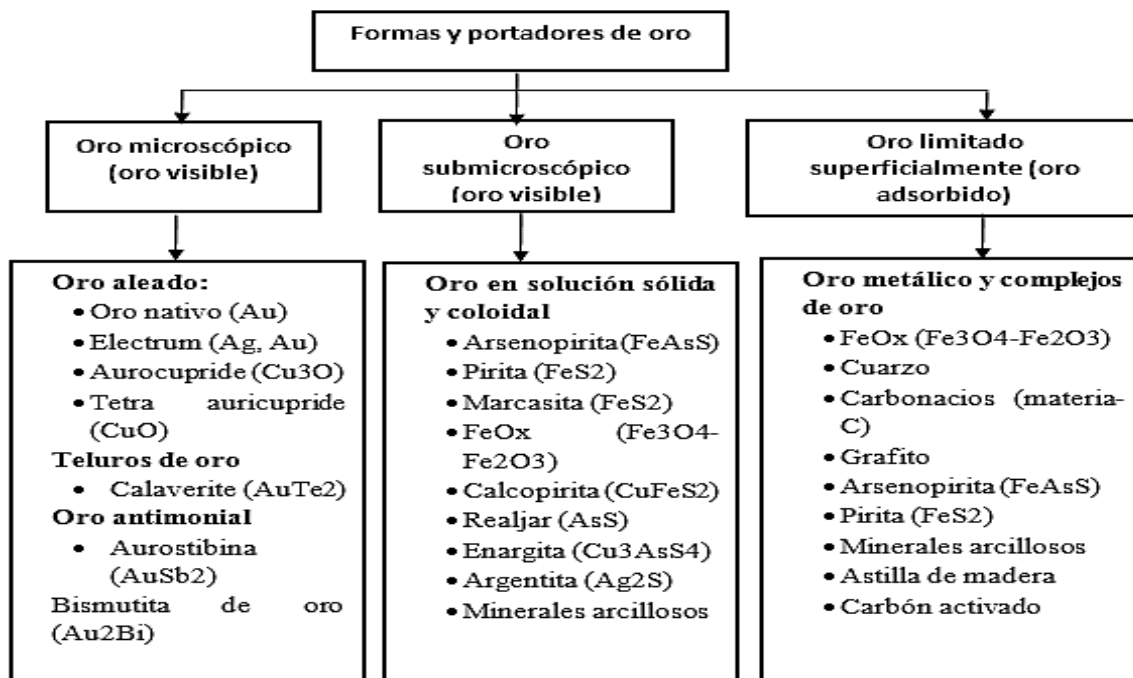
Oro asociado a minerales de arsénico o de antimonio: “La presencia de estos elementos complica su extracción. Las rutas de tratamiento convencionales (concentración, calcinación y cianuración) suelen producir bajos rendimientos, lo que afecta la rentabilidad” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 76).

Oro asociado a minerales de cobre, plomo y zinc: “Puede recuperarse como subproducto durante la explotación de estos metales. En el caso del Cu, el Au permanece hasta la refinación electrolítica, donde se obtiene de los lodos anódicos” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 76).

Oro en menas refractarias: “El metal se observa microscópicamente en sulfuros metálicos como pirita o arsenopirita. Su liberación mediante cianuración convencional no es viable debido a la mineralogía compleja y al alto costo de procesamiento” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 76).

Figura 1

Principales minerales portadores de oro



Nota: La figura contiene principales minerales que contienen oro. Tomado de (Uceda H. D. A., 2020, pág. 74)

2.2.5 Principales Minerales Portadores de Oro

En la naturaleza, “el Au se presenta principalmente en forma nativa o como aleación con Ag, conocida como electrum, cuya composición varía entre 25 % y 55 % de Ag” (Uceda H. D. A., 2020, p. 75). “También se encuentra asociado a minerales de cuarzo en pizarras cristalinas, en rocas graníticas (filones o mantos), en arenas de ríos y depósitos aluviales, donde aparece en laminillas, granos o en fragmentos mayores (pepitas)” (Uceda H. D. A., 2020, p. 74).

Asimismo, “el Au se asocia a sulfuros metálicos como pirita (FeS_2), galena (PbS) y blenda (ZnS), así como a minerales que contienen Te y As” (Uceda H. D. A., 2020, p. 74). Un resumen de los minerales que contienen Au se presenta en la figura 1.

2.2.6 Métodos Utilizados en la Extracción De Oro

Los principales métodos utilizados a nivel general en la extracción de oro, se puede considerar:

Concentración gravimétrica: permite separar oro metálico a partir de los minerales según su peso específico, tamaño y forma. Método que permite recuperar oro libre por gravedad en un fluido (pulpa). Este método requiere movimiento continuo de la pulpa y de tal manera se puede formar estratos desde menor hasta mayor peso. Este método, se recomienda para trabajos de recuperación de oro a nivel pequeña minería.

Amalgamación: el oro es recuperado por medio de contacto con mercurio y así formar una amalgama, este método permite recuperar oro a partir de mineral molido, arena de río u otro tipo de material que contenga oro libre. El oro en amalgama es separado por un proceso de quemado (refogado), proceso que resulta ser altamente impactante para el medio ambiente y propio operador.

Lixiviación: proceso de mayor aplicación a nivel internacional en la extracción de oro a partir de los minerales molidos. Se hace interactuar mineral molido con los agentes lixiviantes, que pueden ser: cianuro de sodio, cianuro de potasio, Gold Max, Tiourea, Gold Dressing, etc. El proceso se utiliza en la industria de gran, mediana y pequeña escala.

Flotación: Proceso fisicoquímico que permite recuperar oro a partir de una pulpa, en forma de concentrado, cuando el oro se encuentra aproximadamente de 100 a 200 μm de separación del oro de partículas y sulfuros puede funcionar.

En la siguiente tabla se muestra los métodos principales para la recuperación y concentración de oro:

Tabla 2

Métodos para recuperación, concentración y procesamiento de oro

Concentración	Método	Agente	Producto
Gravimetría	Físico	Agua	Partículas o pepita
Flotación	Fisicoquímico	Solución de colector	Concentrado
Lixiviación	Químico	Cianuro de sodio, otros.	Solución de cianuro
Precipitación	Electroquímico	Medio de cianuro con polvo de zinc	Precipitados con contenido de oro

Nota. La tabla contiene los métodos principales para la concentración y recuperación de oro.

Tomado de (Linares G., 2010, pág. 4)

2.2.7 Selección del Proceso de Extracción de Oro

“La determinación del método de beneficio es un procedimiento que avanza de manera iterativa y generalmente se inicia una vez que, en la etapa de exploración, se confirma la existencia de Au con una ley y volumen adecuados para que el yacimiento sea evaluado como económicamente explotable” (Marsden J.O, 2009, pág. 69).

“En lo referente al Au, la definición del procedimiento de beneficio contempla dos finalidades principales” (Marsden J.O, 2009, pág. 69):

- “Maximizar la rentabilidad del proyecto, priorizando la recuperación de Au en función de la eficiencia de producción y los costos globales de procesamiento (capital y operación).” (Marsden J.O, 2009, pág. 69)
- “Diseñar un proceso que cumpla con las exigencias técnicas y estratégicas del proyecto, incorporando criterios normativos, aspectos políticos y consideraciones ambientales” (Marsden J.O, 2009, pág. 69).

“La interacción química que presenta un mineral de Au específico frente a las diferentes alternativas de tratamiento resulta determinante para cumplir los objetivos de recuperación. En la actualidad, más del 85 % de la producción mundial de Au contempla alguna etapa de procesamiento químico” (Marsden J.O, 2009, pág. 69).

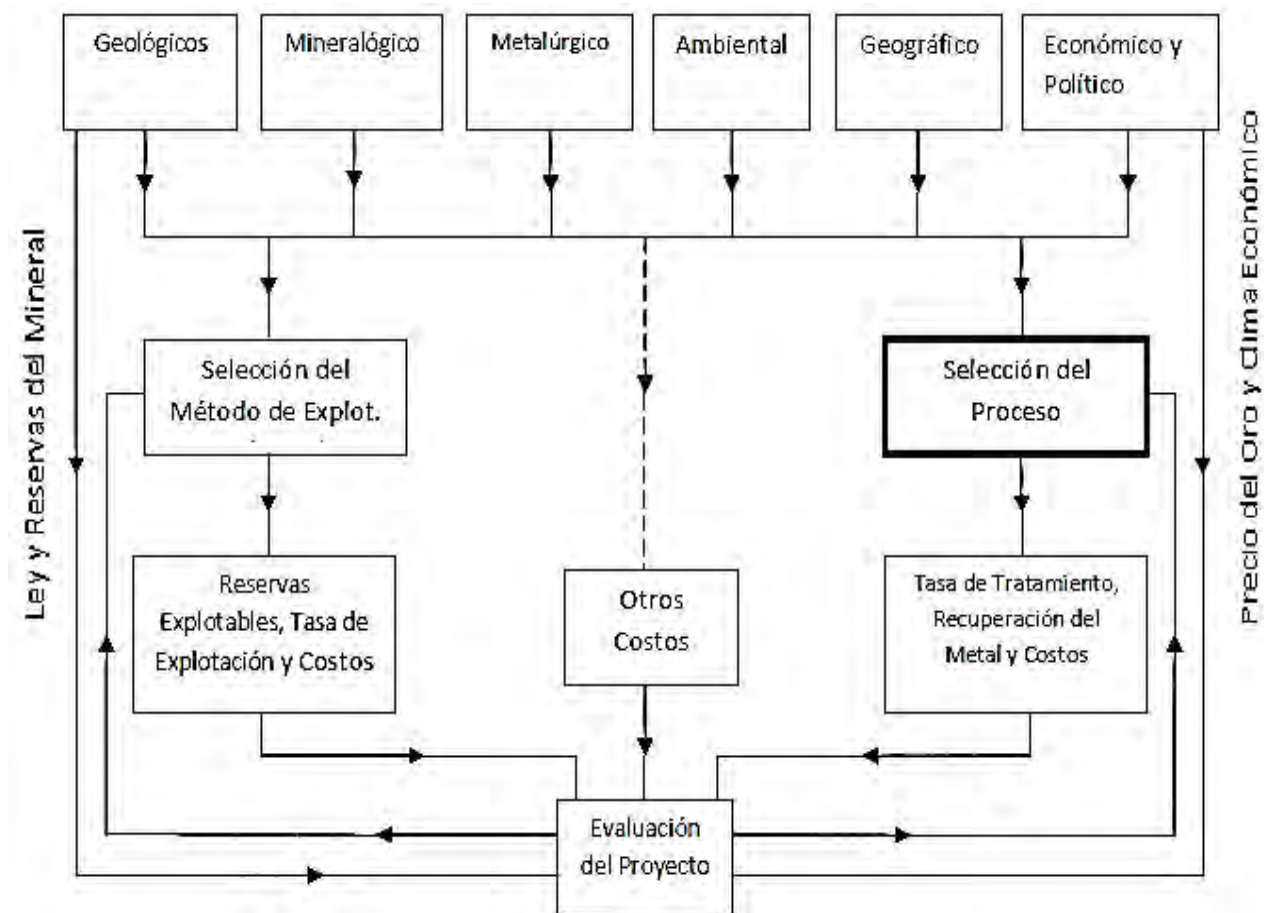
2.2.7.1 Factores que Inciden en la Selección del Proceso

“Los factores que influyen en la definición del método de beneficio pueden clasificarse en seis grupos principales: factores geológicos, mineralógicos, metalúrgicos, ambientales, geográficos, económicos y políticos” (Marsden J.O, 2009, pág. 70). Tal como se indica en la figura 2.

Dentro de los factores identificados, “los de carácter mineralógico y metalúrgico tienen una influencia directa en la química aplicada a la recuperación de Au y en la elección del método de beneficio, ya que determinan la respuesta del mineral ante un tratamiento químico” (Marsden J.O, 2009, p. 70). “Los demás factores ejercen una influencia indirecta, la cual está condicionada por los requerimientos y características específicas del proyecto, así como por la viabilidad integral del mismo” (Marsden J.O, 2009, pág. 70).

Figura 2

Factores que inciden en el proceso de selección



Nota. En la figura se muestra un esquema de los factores que inciden en la selección del proceso de extracción de oro. Tomado de (Marsden J.O, 2009, pág. 70).

2.3 Principios en la Hidrometalurgia del Oro

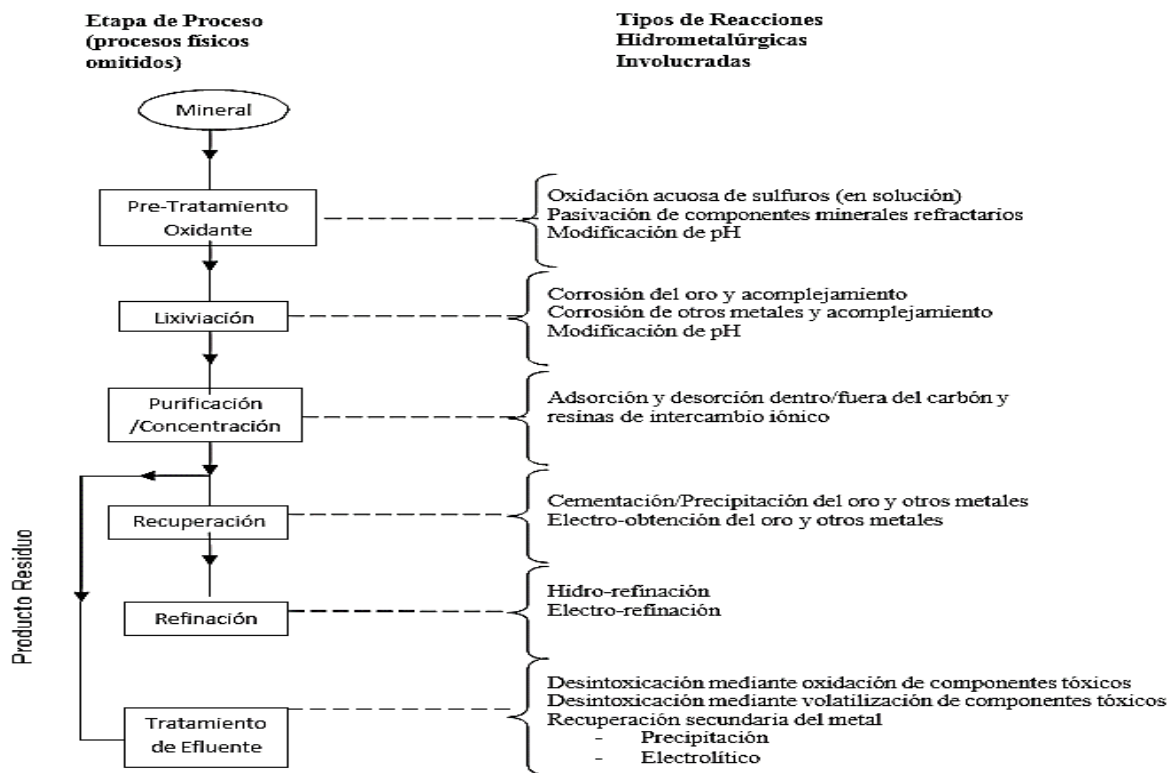
“Dentro de las técnicas hidrometalúrgicas en la extracción de oro; las más importantes de estas son la lixiviación, purificación y concentración de la solución, y su posterior recuperación del oro” (Marsden J.O, 2009, pág. 140). “Según el tipo de mineral, se puede realizar pretratamiento como la cloración, la oxidación a presión y la oxidación biológica para una buena extracción de oro en posteriores etapas de hidrometalúrgicas” (Marsden J.O, 2009, pág. 140).

En la extracción de oro, se debe tener especial cuidado en la cinética de la reacción y en qué grado la reacción procederá. Dichos factores dependen de las propiedades termodinámicas del sistema químico y la cinética de la reacción.

Las reacciones químicas más considerables en la extracción del oro son las que involucran el oro y las reacciones secundarias involucran minerales de ganga. Las reacciones secundarias pueden generar un incremento en el consumo de reactivos, presencia de especies parasitas en la solución que pueden influir de manera negativa en los diversos tipos de reacciones en la extracción de oro, se muestra de manera resumida en la figura 3.

Figura 3

Química de la reacción de oro



Nota. La figura muestra las etapas y reacciones en la extracción de oro a partir del mineral.

Tomado de (Marsden J.O, 2009, pág. 141)

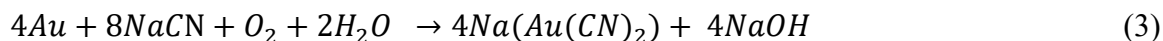
2.4 Cianuración

Es un proceso hidrometalúrgico empleado para la extracción y recuperación del oro contenido en minerales o concentrados, mediante el uso de soluciones acuosas alcalinas de cianuro de sodio. Este procedimiento se basa en la formación de complejos solubles entre el cianuro y el oro metálico, lo que permite separar el metal precioso del material ganga.

“La cianuración también es un procedimiento ampliamente adoptado en la industria minera por su alta eficacia tecnológica y su rentabilidad frente a otros métodos de recuperación de Au” (Uceda H. A. D., 2016, p. 476). Este proceso es el más utilizado para la obtención de la mayor parte de la producción mundial de Au.

“En su versión estándar, la lixiviación con cianuro implica triturar el mineral hasta que el 80 % pase malla 200, preparar una pulpa con agua y mineral, y añadir aproximadamente 2 lb/TM de NaCN junto con un agente alcalinizante, como CaO, para mantener el pH de la solución en torno a 11”(Uceda H. A. D., 2016, pág. 476).

Durante la extracción de oro, los investigadores coinciden en que la disolución del metal se lleva a cabo según la Reacción de Elsner, que representa el proceso global de cianuración del oro en presencia de oxígeno disuelto:



Dicho proceso, tiene como semirreacciones intermedias de carácter anódica y catódica, siendo:

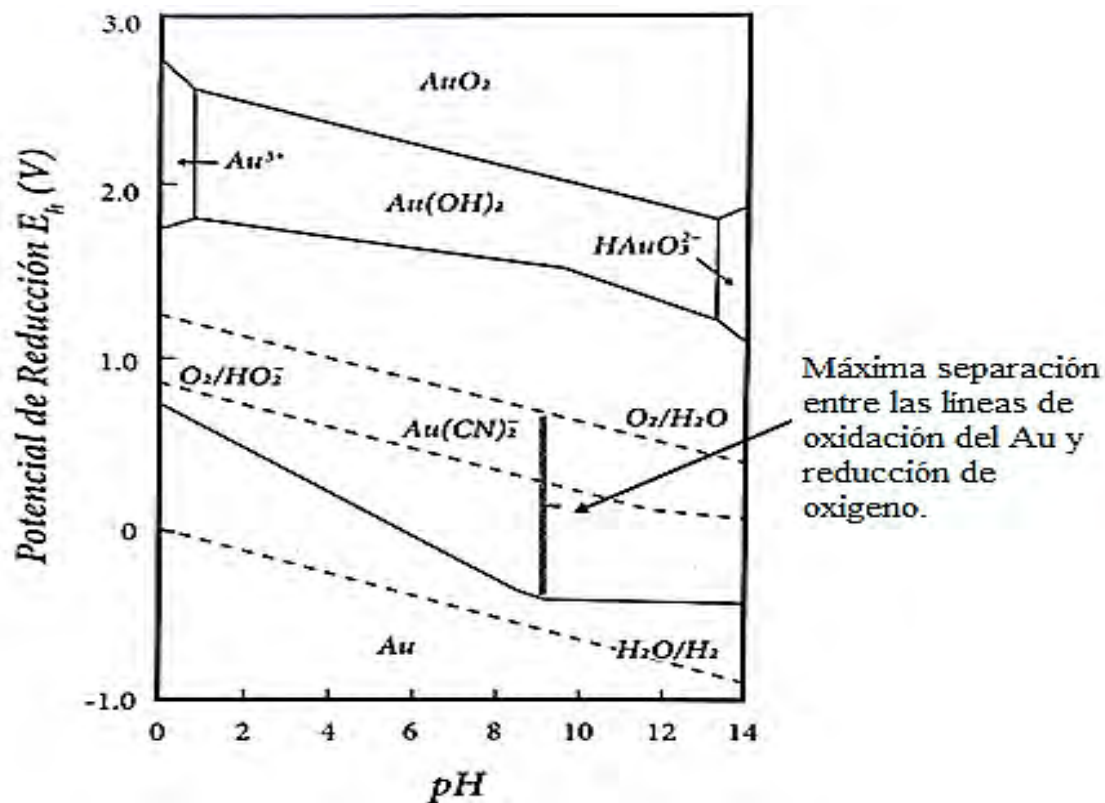
- **Reacción anódica:**



En un medio acuoso con cianuro en condiciones alcalinas, el Au se oxida y pasa a solución formando el complejo cianurado de Au(I), $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, tal como se ilustra en la figura 4.

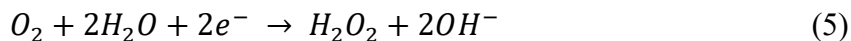
Figura 4

Diagrama de equilibrio de Eh-pH en el sistema Au-H₂O-CN⁻ a 25°C



Nota. La figura muestra el diagrama del proceso de oxidación de oro en un medio de cianuro. Tomado de (Uceda H. D. A., 2020, pág. 246).

- **Reacción catódica:**



“En medios aireados con cianuro en condiciones alcalinas, la disolución anódica del Au (indicada en la ecuación 5) ocurre de manera simultánea con la reducción catódica del O₂. El peróxido de hidrógeno generado actúa como un agente oxidante potente, interviniendo en

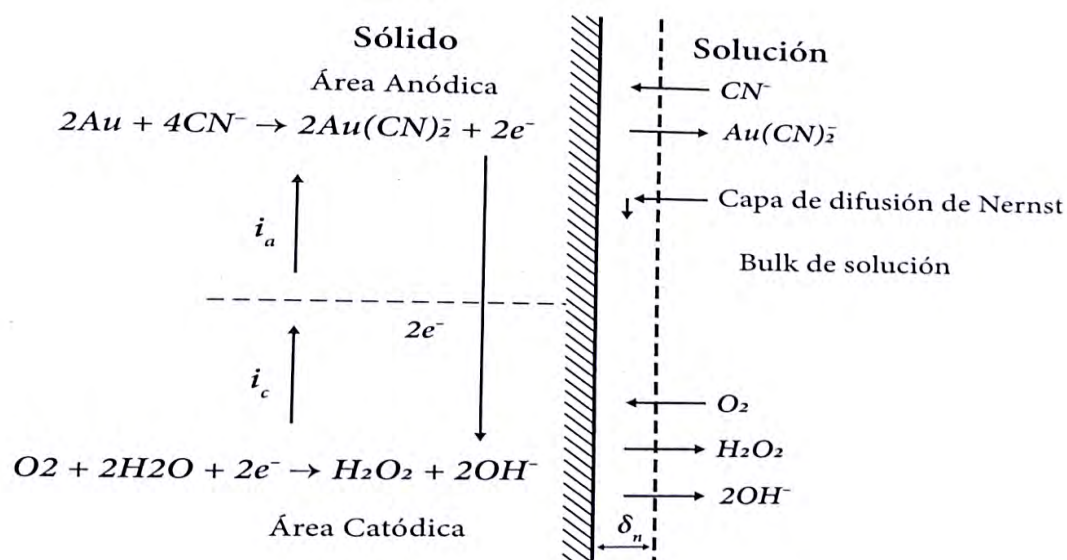
reacciones secundarias de oxidación propias de la cianuración” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 248).

Según la estequiometría del proceso de la disolución del oro en un medio de cianuro, el proceso ocurrirá si se tiene la presencia de los siguientes elementos de cianuración: agente oxidante (oxígeno), agentes estabilizadores (cianuro libre) y regulador de pH para evitar la hidrólisis del cianuro.

El mecanismo de la cianuración se basa en un proceso de corrosión que ocurre en la superficie del Au al entrar en contacto con una solución cianurada que contiene O_2 disuelto, tal como se aprecia en la figura 5.

Figura 5

Representación esquemática del proceso del mecanismo de cianuración de oro



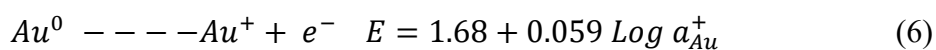
Nota. La figura muestra el proceso del mecanismo de la cianuración de oro. Tomado de (Uceda H. D. A., 2020, pág. 249).

2.4.1 Termodinámica del Proceso de Cianuración de Oro

“El Au presenta una elevada estabilidad, evidenciada por su baja reactividad en condiciones normales y en la mayoría de soluciones acuosas y ácidas concentradas. Este metal solo se disuelve en soluciones oxidantes que contienen agentes como cloruros, bromuros, sulfuros y tiourea, entre otros” (Uceda H. D. A., 2020, p. 117). “Este comportamiento permite que la extracción de Au sea altamente selectiva respecto a otros minerales” (Uceda H. D. A., 2020, p. 117).

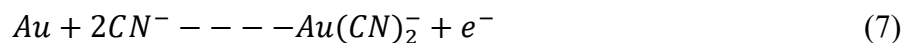
“La química del Au y sus compuestos, en especial en solución, está condicionada por su alta electronegatividad, lo que le confiere capacidad para establecer interacciones con diversos enlaces” (Uceda H. D. A., 2020, p. 117). “Los compuestos de Au y sus especies en solución se encuentran casi siempre en los estados de oxidación Au^+ y Au^{3+} ” (Uceda H. D. A., 2020, p. 117).

Desde una perspectiva termodinámico, el proceso de cianuración de oro puede analizarse mediante un diagrama de potencial en función del pH, basado en la siguiente ecuación:



En esta ecuación, E representa el potencial químico, mientras que a_{Au} es las actividades químicas del oro.

La ecuación que describe la disolución del oro es la siguiente:



Ecuación de Nernst

El potencial de equilibrio de esta reacción se obtiene a partir de la ecuación de Nernst:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (8)$$

Donde:

E = potencial del electrodo(V).

E^0 : potencial estándar del sistema $Au(CN)_2^-/Au$ ($E^0 = -0.60V$).

R : constante de los gases ($8.413J. mol^{-1}. K^{-1}$).

T : temperatura (K).

n : numero de electrones transferidos ($n=1$).

F : constante de Faraday ($96485C. mol^{-1}$).

Q : coeficiente de reacción.

Cociente de reacción

El cociente de reacción se expresa como:

$$Q = \frac{a_{Au(CN)_2^-}}{a_{CN^-}^2 * a_{Au}} \quad (9)$$

Como el oro metálico está en estado sólido, se actividad se considera unidad ($a_{Au} = 1$). Por lo tanto sustituyendo en la ecuación de Nernst se tiene:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_{Au(CN)_2^-}}{a_{CN^-}^2} \right)$$

$$E = E^0 + \frac{2RT}{nF} \ln (a_{Au}) - \frac{RT}{nF} \ln a_{Au(CN)_2^-}$$

$$\frac{2.303RT}{F} = 0.0591V$$

$$E = E^0 + 0.0591(2) \log(a_{CN^-}) - 0.0591 \log a_{Au(CN)_2^-}$$

Simplificando se tiene

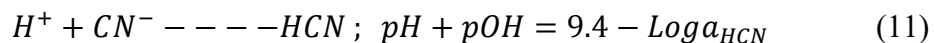
$$E = -0.60 + 0.118 \log(a_{CN^-}) - 0.0591 \log a_{Au(CN)_2^-}$$

Incorporación del efecto de pH el potencial de disolución depende del pH debido a la participación del ion OH^- en las reacciones del equilibrio del medio, experimentalmente se ha

determinado una corrección de 0.116V por unidad de pH por lo tanto la ecuación final queda como:

$$E = -0.60 + 0.116pOH + 0.0591\text{Log}a_{Au}(\text{CN})_2^- \quad (10)$$

Cuando el pH cae por debajo a 9.4, se produce una pérdida significativa de Cianuro, ya que se forma el compuesto HCN, según la reacción:



En la práctica, el contenido total de cianuro (A) se determina con la siguiente expresión:

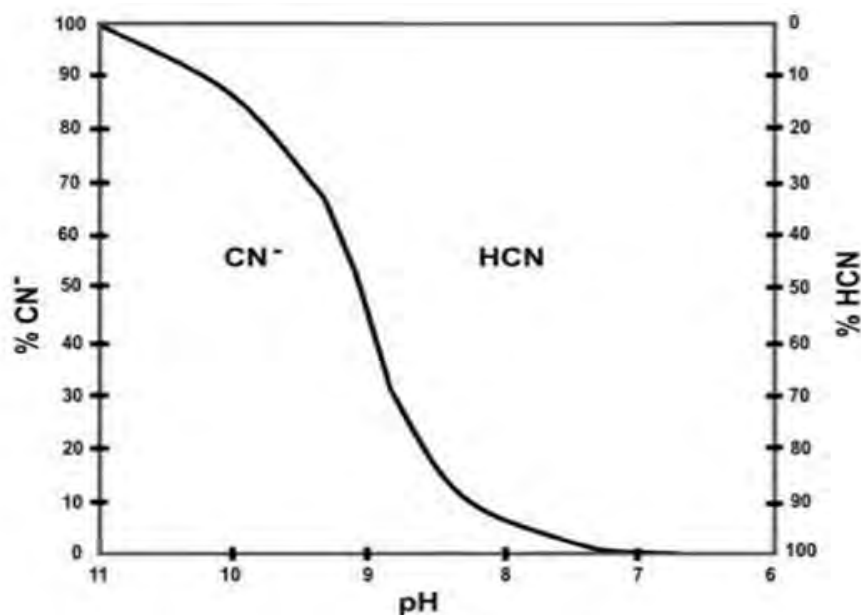
$$A = a_{\text{HCN}} + a_{\text{CN}} \quad (12)$$

Entonces la ecuación del equilibrio ácido-base del ion cianuro (CN^-) es:

$$pH + pOH = 9.4 - \text{Log} A + \text{Log}(1 + 10^{pH-9.4}) \quad (13)$$

Figura 6

Diagrama de equilibrio CN-HCN (pKa=9.3)



Nota: Estabilidad del cianuro libre (Edison Gil Pavas et al., 2005, p.8).

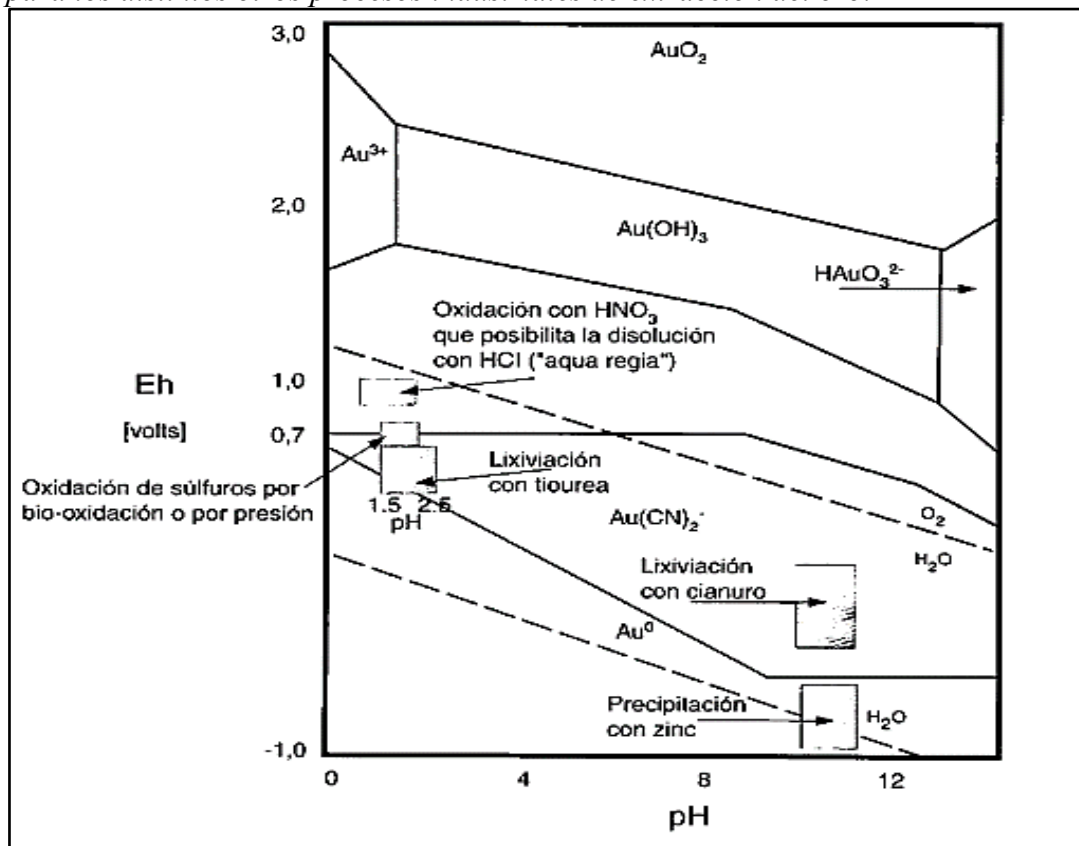
En el caso del Au metálico, como se observa en la figura 7, “el área de estabilidad se encuentra por encima de la línea de reducción de O_2 , lo que indica que el Au es estable en agua cuando no hay complejantes presentes” (Marsden J.O, 2006, p. 159). Las condiciones de Eh–pH que aplican a procesos hidrometalúrgicos e industriales del Au se ilustran en la figura 7.

Del análisis de la figura 7, se muestra claramente que:

- “La cianuración se realiza entre el rango de pH de 10 y 11.5” (Domic, 2001, pág. 196).
- “Para el proceso de cianuración se requiere condiciones oxidantes” (Domic, 2001, pág. 196).

Figura 7

Diagrama Eh-pH para el oro y el aurocianuro, mostrando además las de operación para los distintos otros procesos industriales de extracción del oro.



Nota: La figura presenta las áreas de estabilidad de cada especie en un medio de cianuro.

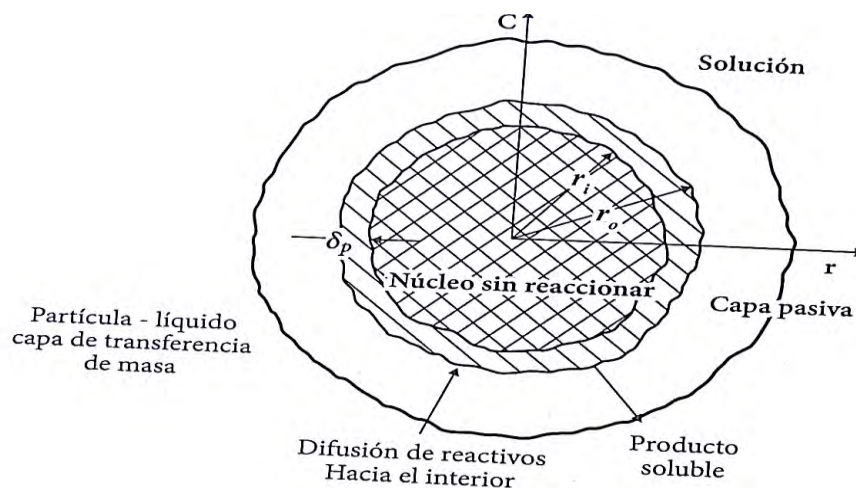
Tomado de (Domic, 2001, pág. 197).

2.4.2 Cinética del Proceso de Cianuración

“El modelo de la cinética de cianuración, tiene en cuenta los efectos de la reacción superficial, la difusión interna y la disminución del área de superficie activa durante la cianuración. Se considera un modelo cinético numérico del núcleo recesivo” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 142). “Para el modelo del núcleo recesivo, la zona de reacción se mueve hacia el sólido, dejando atrás el material completamente convertido. Por lo tanto, en cualquier momento existe un núcleo de material sin reaccionar que se reduce de tamaño durante la reacción” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 142), figura 8.

Figura 8

Representación del modelo cinético del núcleo recesivo.



Nota. La figura muestra una ilustración de la superficie de reacción y la capa pasiva en el modelo cinético del núcleo de contracción. Tomado de (Uceda H. D. A., 2020, pág. 142)

En relación a la ecuación 3, figura 5 y 8 y “según la teoría del núcleo sin reaccionar, es posible plantear la siguiente ecuación para modelar el comportamiento de disolución de oro en medio de cianuro” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 139):

$$\frac{d(P_{O_2})}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ (P_{O_2})_i - (P_{O_2})_l \} \quad (14)$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-]_i - [CN^-]_l \} \quad (15)$$

Dónde:

“ D_{O_2} y D_{CN^-} = Coeficientes efectivos de difusión de O_2 y CN^- respectivamente

$d(P_{O_2})/dt$, y $d(CN^-)/dt$ = Velocidades de difusión de O_2 y CN^- respectivamente

$(P_{O_2})_i$, $(P_{O_2})_l$ = Presiones parciales de O_2 disuelto en el seno de la solución, y la interfase con el sólido

$(CN^-)_i$, $(CN^-)_l$ = Concentraciones del ion CN^- en el seno de la solución y la interfase respectivamente” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 139).

Según el modelo del núcleo recesivo, es posible determinar la velocidad general del proceso de cianuración de oro al juntar las ecuaciones 14 y 15, siendo esta:

$$V = \frac{2AD_{CN^-} D_{O_2} ((O_2)_B (CN^-)_B)}{\delta (D_{CN^-} (CN^-)_B + 4D_{O_2} (O_2)_B)} \quad (16)$$

Donde V: es velocidad de disolución del oro.

2.5 Métodos de Cianuración

2.5.1 Método Tipo “dump leaching”

“Este método consiste en acumular el mineral tal como se obtiene de la mina, con un manejo mínimo del material. Se trabaja con volúmenes muy grandes (millones de toneladas) que se apilan formando capas que pueden superar los 80 m de altura. El riego se realiza mediante goteo utilizando soluciones cianuradas de muy baja concentración. El contenido de Au en este tipo de minerales es reducido, situándose en torno a 1 g por tonelada de mineral” (Mamani Q, 2015, pág. 14).

2.5.2 Método de Lixiviación Tipo “heap leaching”

“Este procedimiento se asemeja al método Dump Leach, ya que consiste en apilar mineral sin concentración previa para luego ser rociado con soluciones cianuradas mediante

riego por goteo o sistemas de aspersión” (Mamani Q., 2015, p. 13). “A diferencia del método anterior, aquí se emplea una menor cantidad de material, pero con leyes de Au superiores a 1 g/t, lo que permite que muchas operaciones incluyan una etapa de chancado hasta alcanzar un tamaño de $\frac{1}{4}$ de pulgada con un porcentaje de paso cercano al 100 %” (Mamani Q., 2015, p. 13). “En distintos países, este sistema se sigue utilizando, incorporando mineral chancado, lo cual favorece la infiltración de la solución debido a la porosidad de la roca” (Mamani Q, 2015, pág. 13).

2.5.3 Método de Lixiviación Tipo “vat leaching”

“En este sistema, el mineral es cargado en recipientes tipo batea, conocidos también como pozas o tanques revestidos. Se realiza una acumulación controlada del mineral, al cual se le agregan soluciones de NaCN por inundación. Estos espacios pueden estar contruidos con concreto o con mantas sintéticas transportables. Las operaciones pueden adaptarse a distintos tamaños y leyes del mineral. Cuando las condiciones lo justifican, se aplica una etapa previa de chancado y aglomerado del material antes de realizar la irrigación con cianuro” (Mamani Q, 2015, pág. 14).

2.5.4 Método de Lixiviación por Agitación

“Este método es empleado para un rango amplio de minerales, con el fin de maximizar la liberación de Au y lograr una elevada recuperación. La agitación mejora la interacción entre las partículas y la solución lixivante, favoreciendo la disolución del metal (Cristina R., 2013, p. 143). La recuperación del Au a partir de las soluciones PLS se lleva a cabo principalmente mediante dos técnicas: la adsorción con carbón activado (CIP) y el método Merrill–Crowe, en el que se utiliza Zn en polvo para precipitar el metal” (Cristina R, 2013, pág. 143).

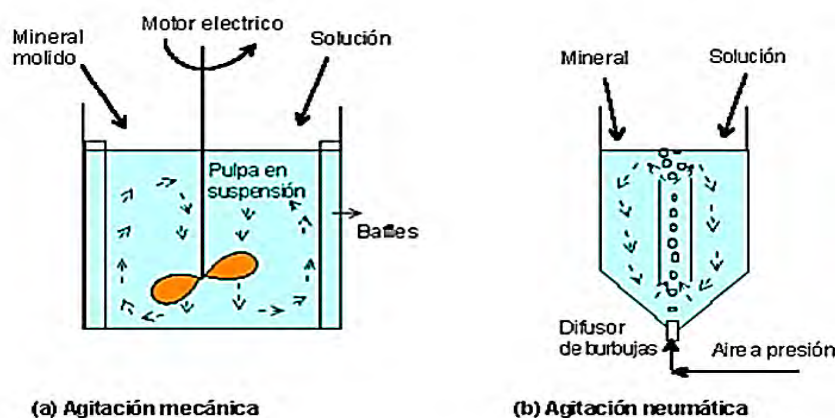
Este método, requiere la etapa de molienda, para que se dé mayor interacción entre la solución lixivante y la especie de interés, y obtener una velocidad de disolución mucho mayor, generalmente, este proceso, se aplica a minerales de alta ley.

2.5.4.1 Agitación Mecánica y Agitación Neumáticas

“La lixiviación por agitación se desarrolla en tanques diseñados para mantener el mineral en suspensión, empleando diferentes sistemas, como agitación neumática, mecánica o combinada (Cristina R., 2013, p. 143). “En el caso de la agitación neumática, se utilizan dispositivos de inyección de aire conocidos como elevadores de aire. Por otro lado, la agitación mecánica se lleva a cabo en recipientes, usualmente de forma cilíndrica, en los que el impulsor puede tener diversas configuraciones, como hélices o álabes. La geometría del agitador se selecciona en función de la granulometría del material y la viscosidad de la pulpa, garantizando un flujo constante en el interior del tanque” (Cristina R, 2013, pág. 143).

Figura 9

Equipos y tipos de agitación



Nota. La figura muestra los tipos de agitadores para un proceso de lixiviación por agitación. Tomado de (Cáceres A., 2007, pág. 64).

La función de ambos sistemas de agitación, es la de mantener en suspensión la pulpa de tal manera se logre la interacción de materia prima con el reactivo lixivante.

2.5.4.2 Ventajas y Desventajas de Lixiviación por Agitación

Como las principales ventajas y desventajas, se puede mencionar:

Ventajas: “Presenta una alta recuperación del metal valioso, con tiempos reducidos de operación. Además, al ser un proceso continuo, facilita un elevado nivel de automatización y permite tratar menas con alteraciones o con generación de finos” (Cáceres A., 2007, pág. 63).

Desventajas: “Implica mayores costos tanto de inversión como de operación, ya que requiere una etapa de molienda previa y una posterior separación sólido-líquido mediante espesamiento y filtración” (Cáceres A., 2007, pág. 63).

2.5.5 Incidencia de las Variables en la Lixiviación por Agitación

2.5.5.1 Efecto de Partícula

“Cuando el Au se presenta libre y en partículas gruesas, se priorizan métodos gravimétricos para su recuperación. En cambio, este tipo de partículas no llega a disolverse por completo en un tiempo de operación estándar dentro de un proceso de cianuración” (Misari Ch., 2010, pág. 2).

“En partículas con tamaños cercanos a 150–180 μm , la aplicación de lixiviación por agitación es poco frecuente, ya que resulta complicado mantener sólidos gruesos en suspensión. Además, bajo estas condiciones, las tasas de abrasión tienden a incrementarse” (Pari Z., 2022, pág. 32).

2.5.5.2 Efecto del Oxígeno

“Por lo general, las concentraciones de oxígeno disuelto se pueden mantener en, o cerca de, los niveles de saturación calculados con aspersion de aire eficaz (es decir, 8,2 mg/L O₂ al nivel del mar a 25 °C)” (Pari Z., 2022, pág. 34). “En algunos casos, particularmente cuando se tratan minerales que contienen minerales que consumen oxígeno, es posible usar oxígeno puro

o peróxido de hidrógeno para aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto por encima de las alcanzables con sistemas simples de aspersión de aire” (Pari Z., 2022, pág. 34).

2.5.5.3 *Modificación de pH*

“En los procesos de lixiviación de minerales auríferos, el rango de pH normalmente se mantiene entre 10 y 11. Para conservar este valor a lo largo del circuito, en especial cuando se procesan minerales con alta demanda de álcalis, puede ser necesaria la dosificación progresiva de agentes alcalinos” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 273).

2.5.5.4 *Densidad de la Pulpa*

“La operación de lixiviación se desarrolla habitualmente con pulpas que presentan concentraciones de sólidos entre 35 % y 50 %. Este valor depende de la gravedad específica de las partículas, el tamaño de las mismas y la presencia de componentes que influyan en la viscosidad, como minerales arcillosos” (Pari Z., 2022, pág. 32).

2.5.5.5 *Tiempo de Residencia*

“El tiempo de residencia en lixiviación puede variar desde unas horas hasta varios días, aunque generalmente se encuentra entre 12 y 36 h (Pari Z., 2022, p. 34). El proceso suele dividirse en tres a seis etapas, cuyo número depende del caudal de pulpa, el tiempo necesario de retención, la eficiencia del equipo de mezcla y el diseño del sistema” (Pari Z., 2022, pág. 34).

2.5.5.6 *Efecto de la Concentración de Lixivante*

“La concentración de la solución de cianuro influye de manera significativa en la cinética de disolución. Un incremento en la concentración puede desplazar el equilibrio hacia los reactivos, compensando la reacción. De forma inversa, cuando la concentración es más

elevada, el equilibrio se desplaza hacia la formación de productos” (Uceda H. D. A., 2020, pág. 274).

2.6 Purificación y Concentración de Solución

En esta etapa se busca concentrar de manera selectiva las soluciones auríferas diluidas para obtener una solución de alta ley, de la cual pueda extraerse el metal de forma más eficiente utilizando los métodos de recuperación.

En primer lugar, el Au contenido en las soluciones de lixiviación se fija en un medio adsorbente, que puede ser carbón activado o resina sintética de intercambio iónico. Una vez cargado, el adsorbente es separado de la corriente del proceso, y los valores metálicos se desorben empleando un volumen reducido de solución, lo que permite su recuperación. El material desorbido puede ser regenerado, en caso necesario, y reincorporado al circuito. Entre los adsorbentes empleados, el carbón activado es el más común para esta finalidad.

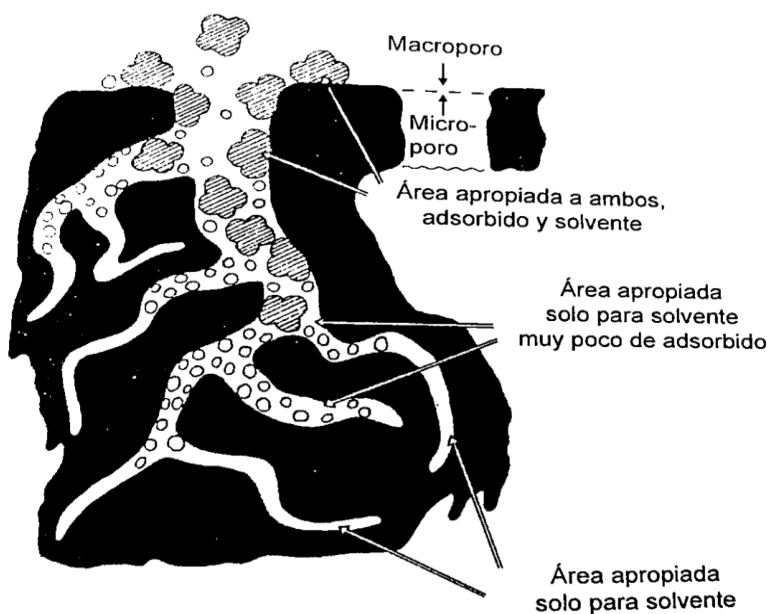
El término carbón activado agrupa una gama de materiales carbonosos con elevada porosidad, los cuales no pueden describirse mediante una fórmula química específica ni caracterizarse completamente por análisis químicos convencionales. La estructura interna del carbón contiene poros de tamaño reducido en los que se retienen moléculas presentes en los fluidos que rodean las partículas. Gracias a esta configuración, el carbón funciona como una malla molecular con elevada especificidad, permitiendo la separación de compuestos con gran selectividad.

El volumen de poro en carbones activados suele ser superior a 0,2 ml/g, mientras que su superficie interna se sitúa, generalmente, entre 400 y 1 500 m²/g. Esta elevada área superficial proviene de la red de poros, que se clasifica según su tamaño en:

- Macroporos: canales de mayor longitud próximos a la superficie, con diámetros de 500 a 2 000 Å.
- Mesoporos: cavidades intermedias, comprendidas entre 100 y 500 Å.
- Microporos: representan aproximadamente el 95 % del volumen interno, con dimensiones donde la adsorción suele producirse en el rango de 8 a 100 Å.

Figura 10

Esquema de la estructura de oro de carbón activado



Nota. representación esquemática de la estructura del carbón activado (Misari Ch., 2010)

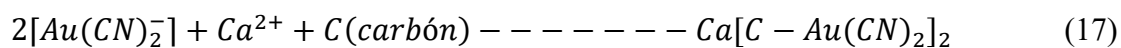
2.6.1 Adsorción en Carbón Activado

El proceso de adsorción consiste en la fijación del complejo aurocianuro, en forma iónica, sobre las microestructuras y superficie del carbón activado. Según Uceda (2020, p. 328), “la adsorción es el mecanismo mediante el cual las moléculas presentes en la solución se adhieren a la superficie sólida gracias a interacciones de tipo químico, físico o la combinación de ambas”.

“En la adsorción física, las fuerzas de Van der Waals de baja intensidad retienen las impurezas en la superficie del carbón, mientras que, en la adsorción química, especialmente al emplear carbones impregnados, se generan interacciones más fuertes en los sitios activos de la superficie” (Uceda, 2020, p. 328).

“En el caso de complejos aurocianuros, la adsorción física predomina y la capacidad de captura depende principalmente de la superficie disponible del carbón” (Uceda, 2020, p. 328).

El proceso de adsorción de complejos aurocianuros se da según la siguiente ecuación:

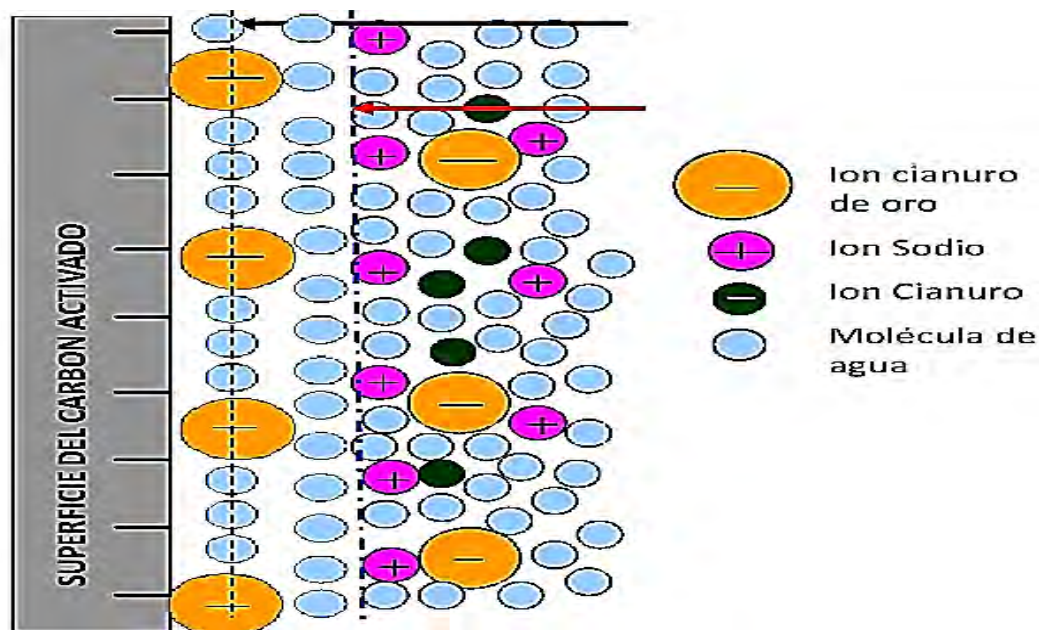


2.6.2 Mecanismo de la Adsorción de Oro en el Carbón Activado

La estructura compleja física y química de los carbones activados permite la adsorción de los complejos aurocianuros por diversos mecanismos, figura 11.

Figura 11

Mecanismo de la adsorción de los complejos aurocianuros en el carbón



Nota. La figura 10 muestra el proceso de adsorción de los complejos aurocianuros en el carbón activado. Adaptado de (Uceda H. D. A., 2020, pág. 333).

A partir de la figura 11, se interpreta lo siguiente:

1. El complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ se fija en los espacios intersticiales del carbón activado.
2. Los cationes Na^+ y Ca^{2+} únicamente se adsorben cuando el complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ está presente, por lo que es probable que queden retenidos en la zona correspondiente a la capa difusa.
3. Cuando existe exceso de $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ en la solución, este puede también ser adsorbido en la región de la capa difusa.
4. El cianuro libre compite por los espacios disponibles en el carbón con el complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$.

El mecanismo de adsorción de los complejos oro-cianuro sobre el carbón activado ocurre sin que se presente una reacción química, formándose un par iónico del tipo $\text{M}^+[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, o mediante un proceso de intercambio iónico.



2.6.3 Efecto de la Presencia de Iones en la Solución Sobre la Adsorción de Complejos Oro-Cianuro

Durante el proceso de cianuración, la solución obtenida contiene diferentes iones que afectan la adsorción de complejos aurocianurados en el carbón activado. De acuerdo con lo expuesto por Uceda (2020), la influencia de estos iones se resume de la siguiente manera:

- La capacidad de adsorción aumenta al incrementarse la concentración de cationes en solución, siguiendo el orden de afinidad: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. El complejo de calcio se fija con mayor fuerza sobre el carbón, mientras que el de potasio muestra menor adherencia.

- El incremento de aniones en la solución reduce la capacidad de adsorción. El orden de interferencia identificado es: $\text{CN}^- > \text{SCN}^- > \text{SO}_3^{2-} > \text{OH}^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, siendo el cianuro libre el que ejerce mayor competencia por los sitios activos del carbón.
- Los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ pueden ser retenidos en la superficie del carbón tanto en presencia como en ausencia del complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$.
- La afinidad de Ca^{2+} y Na^+ hacia el carbón aumenta al elevarse el pH, mientras que la del complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ tiende a disminuir.
- Los iones de mercurio, en forma de $\text{Hg}(\text{CN})_2$, presentan una fuerte adsorción, comparable a la de los complejos aniónicos de plata como $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$.
- En el caso de los complejos cuprocianurados, su adsorción mejora a pH bajos y con concentraciones reducidas de cianuro libre. El orden de afinidad reportado es: $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} > \text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$.

2.6.4 Factores que Afectan la Adsorción de los Complejos Aurocianuros

Los principales factores que afectan la adsorción son:

pH: Dentro de un intervalo de 9 a 11, el efecto sobre la adsorción es limitado, aunque se observa una ligera mejora en valores más bajos dentro de este rango. Es importante evitar niveles menores a pH 10, ya que podría ocurrir la hidrólisis del cianuro y liberarse ácido cianhídrico, lo cual es indeseable.

Concentración de cianuro: Un incremento en la concentración de NaCN tiende a reducir la velocidad de adsorción de oro en el carbón activado, debido a la competencia con otros complejos metálicos presentes en solución. Generalmente, las condiciones de operación industriales trabajan en el rango de 0.1–2 g/L de NaCN.

Temperatura: El aumento de la temperatura reduce la capacidad de adsorción de oro debido al carácter exotérmico del proceso. En consecuencia, temperaturas más elevadas implican menor capacidad de carga en el carbón.

Oro en la solución rica: Una mayor concentración de oro en la solución incrementa la tasa de adsorción y la capacidad de carga del carbón. En operaciones industriales, la velocidad de adsorción suele encontrarse entre 10–100 g Au/ton·h, y la carga final en el carbón alcanza valores típicos de 5–10 kg Au/ton CA.

Oxígeno disuelto: El oxígeno presente en la solución puede oxidar parte del cianuro, reduciendo su concentración. Una menor concentración de cianuro libre favorece la adsorción de oro en el carbón activado.

2.6.5 Métodos de Adsorción de los Complejos Aurocianuros en el Carbón Activado

Entre los métodos principales se tiene: carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) y carbón en columnas (CIC).

2.6.5.1 Método de Adsorción de Carbón en Pulpa (CIP)

En la etapa CIP, el complejo aurocianuro se recupera del carbón activado luego de completado el proceso de lixiviación. “Durante esta fase, la pulpa se mantiene en suspensión dentro de tanques con agitación neumática, comúnmente en una serie de cuatro a seis unidades conocidas como Air Lift” (Linares, 2010).

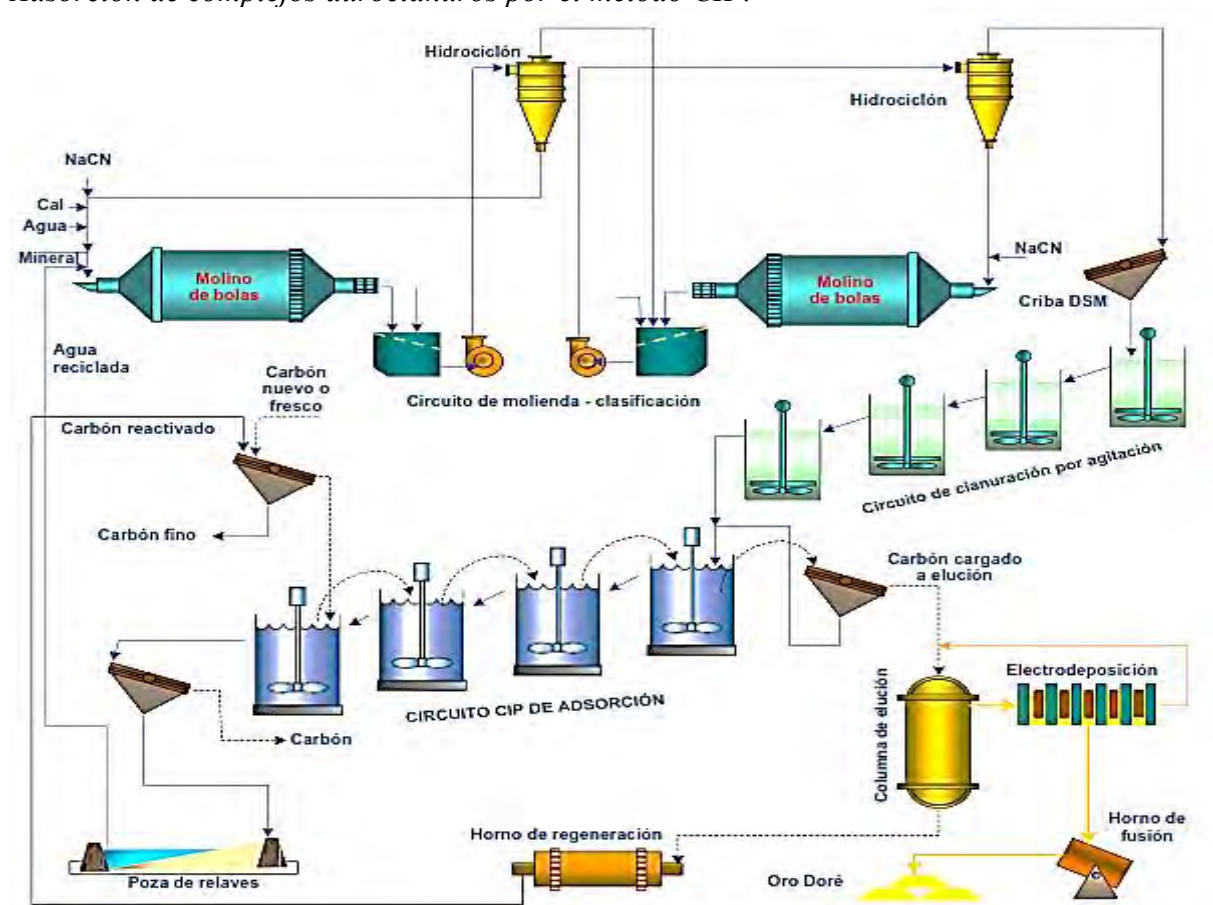
“El uso de este tipo de agitación contribuye a disminuir el desgaste mecánico del carbón activado. En aquellos casos en que se utilizan tanques con agitación por paletas, se emplean velocidades bajas para evitar la ruptura del carbón” (Linares, 2010).

“La adsorción del oro se desarrolla mediante un sistema en contracorriente, donde el carbón activado ingresa en la última unidad de agitación y avanza en sentido contrario a la

pulpa. A medida que el carbón enriquece su carga metálica, la pulpa se empobrece y finalmente es descargada como relave” (Linares, 2010).

Figura 12

Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIP.



Nota La figura, es representación de un diagrama de flujo de adsorción por el método de carbón en pulpa. Tomado de (Linares G., 2010, pág. 18).

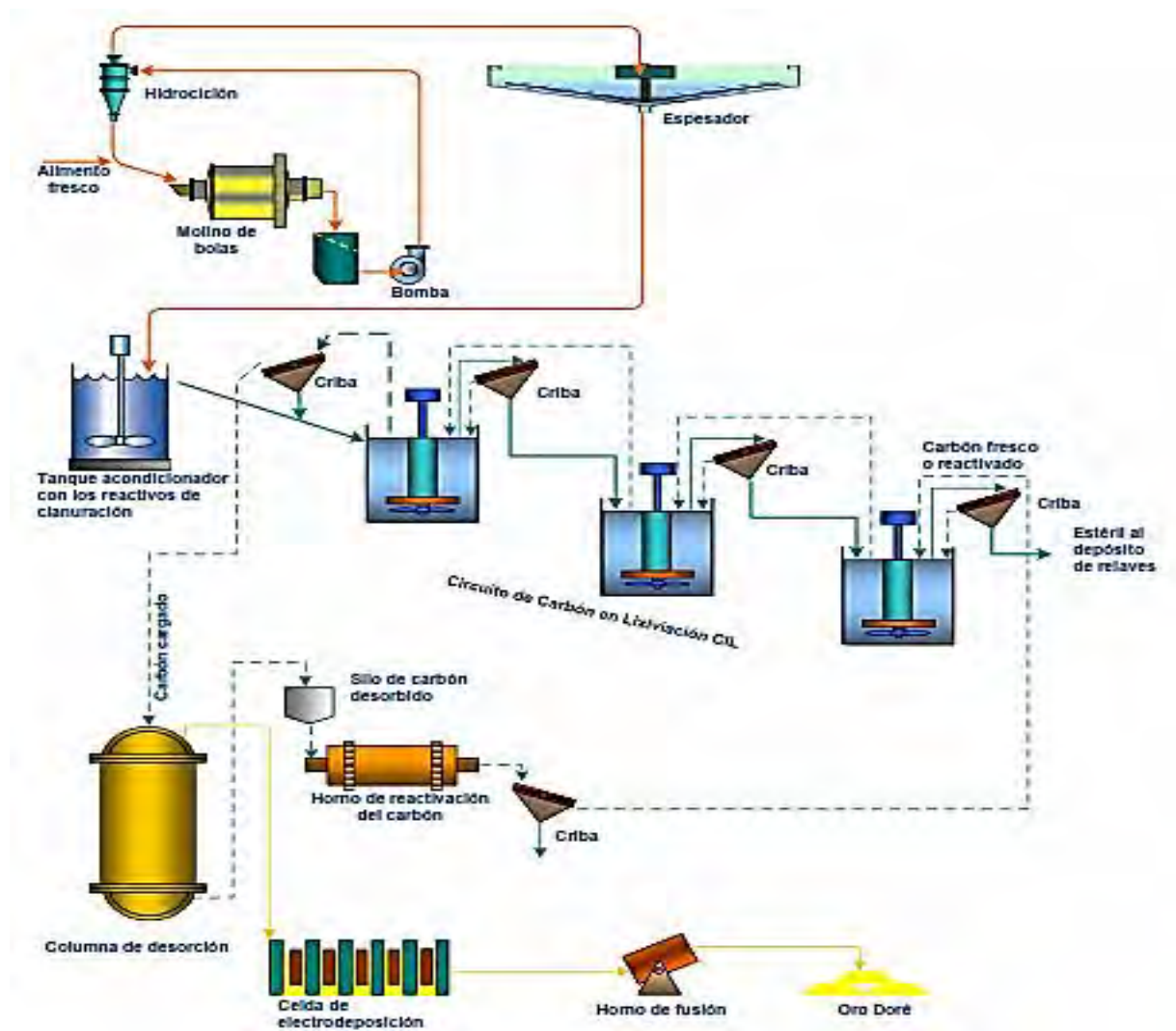
2.6.5.2 Método de Adsorción de Carbón en Lixiviación (CIL)

“En el método CIL, el carbón activado se introduce directamente durante la etapa de lixiviación, lo que permite que la disolución del oro y su adsorción en el carbón ocurran de manera simultánea” (Linares, 2010).

Esta técnica resulta adecuada cuando el mineral presenta compuestos orgánicos o materiales carbonosos que pueden interferir en el proceso, fenómeno conocido como preg-robbing. El diagrama correspondiente a este procedimiento se presenta en la figura 13.

Figura 13

Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIL.



Nota. En la figura se representa un diagrama de flujo de adsorción por el método de carbón en la lixiviación. tomado de (Linares G., 2010, pág. 21).

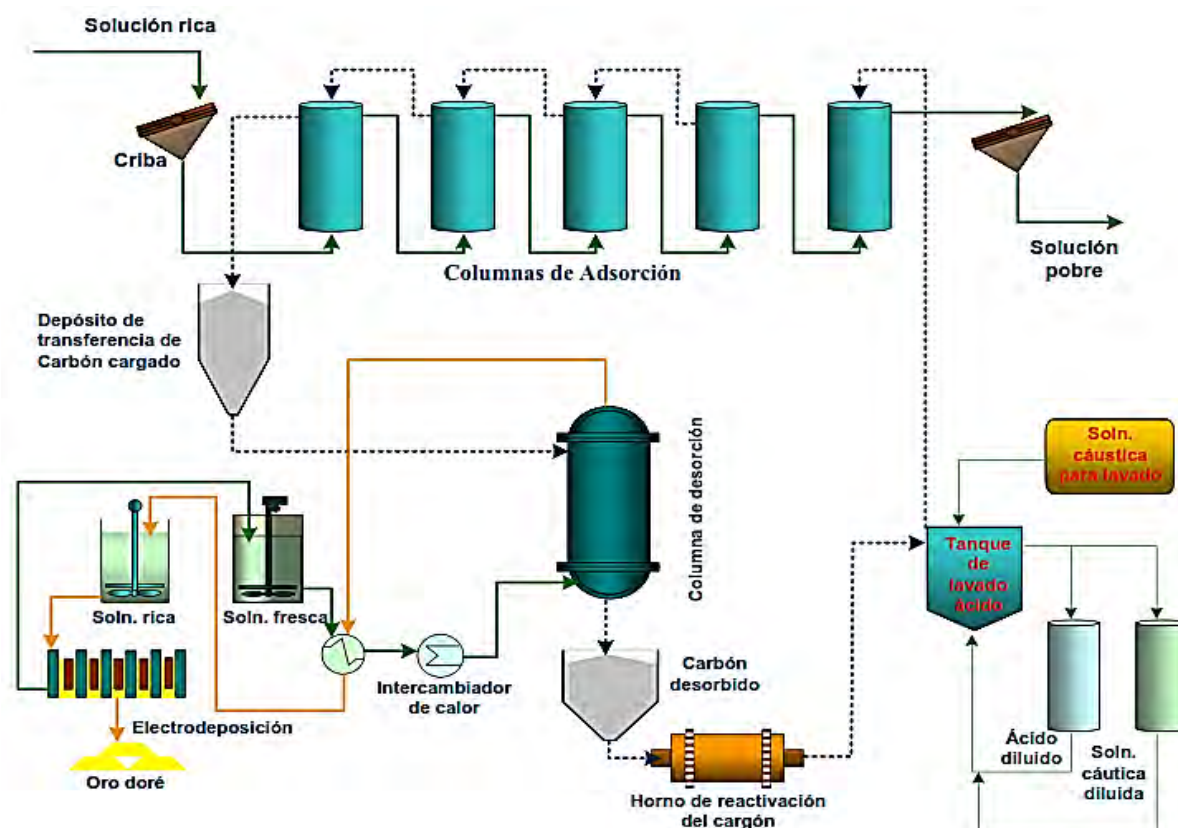
2.6.5.3 Método de Adsorción de Carbón en Columna (CIC)

“En el método CIC, su aplicación es más apropiada cuando el oro disuelto en soluciones claras proviene de procesos como la lixiviación en pila o del sistema CCD. El diseño de este método se observa en la figura 14” (Linares, 2010).

“En esta técnica, la columna se llena parcialmente con carbón activado (aproximadamente un 40 % de su capacidad), y la solución se hace circular desde la parte inferior hacia la superior, provocando la fluidización del lecho de carbón, lo que garantiza un contacto eficiente entre la fase sólida y la líquida” (Linares, 2010).

Figura 14

Adsorción de complejos aurocianuros por el método CIC.



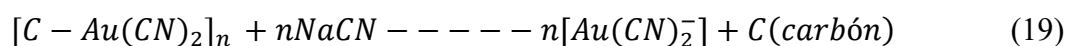
Nota. La figura es una representación del diagrama de proceso de adsorción en columnas de carbón activado. Tomado de (Linares G., 2010, pág. 22).

2.6.6 Métodos de Desorción de los Complejos Aurocianuros del Carbón Activado

Cargado

“La desorción es un proceso de transferencia de masa que opera en sentido contrario a la adsorción. En esta etapa, los compuestos retenidos en el carbón activado son liberados al hacerlo pasar por una solución diseñada específicamente para este fin, atravesando un reactor configurado para optimizar el proceso” (Uceda, 2020).

El procedimiento puede representarse mediante la siguiente reacción:



“Durante esta fase, se utiliza un volumen reducido de solución con alta concentración de cianuro, lo que permite recuperar el oro y reciclar el carbón hacia la etapa de adsorción. En el circuito de desorción (strip), se emplean temperaturas elevadas y condiciones operativas específicas para acelerar el proceso” (Uceda, 2020).

Los principales parámetros que afectan la desorción son:

- Temperatura: La eficiencia mejora notablemente al incrementar la temperatura, ya que la velocidad de elución a 180 °C puede ser hasta ocho veces superior que a 90 °C.
- Concentración de cianuro: Una mayor concentración de NaCN promueve la desorción, debido a que los iones CN⁻ desplazan al oro de los sitios activos del carbón.
- pH: Un pH alto favorece el proceso, ya que los iones OH⁻ previenen la readsorción del oro.
- Concentración de oro en la solución: Un contenido reducido de Au en la solución incrementa la velocidad y eficiencia del proceso.
- Otros metales: “Elementos como Cu, Ag y Hg pueden eluir junto con el oro, por lo que es posible implementar etapas adicionales para su separación” (Uceda, 2020).

Capítulo III

Hipótesis y Variables

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Se logra una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta la Joya Mining S.A.C. Arequipa

3.1.2 Hipótesis Específicas

HE1: La concentración de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR, por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, será de 0.2%.

HE2: La variable pH favorable en la solución de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR, por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, será de de 10.5.

HE3: El tiempo del proceso para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR, por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, se encuentra en el orden de 4.5 horas.

3.2 Variables

Según la literatura las variables en proceso de recuperación de oro son muchas, en este proyecto de tesis se consideran las variables independientes y la dependiente.

3.2.1 Variables Independientes (X_i)

1. Concentración de cianuro de sodio (X_1).
2. pH del proceso (X_2).
3. Tiempo del proceso (X_3).

Para lograr una recuperación de oro a partir del carbón fino residual, en la planta La Joya Mining S.A.C, se considera las siguientes variables independiente (tabla 3).

Tabla 3

Selección de variables para el proceso

Variables independientes	Nivel de los variables		Unidades
	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)	
X1: Concentración de NaCN en la solución (X ₁):	1000	2000	ppm
X2: pH del proceso (X ₂):	10.5	12.5	pH
X3: Tiempo del proceso (X ₃):	3	6	H

Nota. La tabla muestra las variables independientes que se consideran para el proceso del proyecto.

Elaboración propia.

3.2.2 Variable Dependiente (Y_i)

Recuperación de oro (Y₁).

3.2.3 Variables Intervinientes

- Temperatura atmosférica.
- Presión atmosférica.
- Oxígeno disuelto en la solución de cianuro.
- Granulometría del carbón activado.
- El contenido del oro en el carbón fino.

3.3 Operacionalización de Variables

Tabla 4

Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	DIMENSIÓN	UNIDAD	INSTRUMENTO
Recuperación de oro (Y₁)	Dependiente	Es el porcentaje de oro recuperado a partir del carbón fino residual, referente al 100% que contiene el carbón residual de cabeza.	Calculo del porcentaje de recuperación: (Cantidad de oro recuperado en el carbón nuevo / Cantidad de oro en la muestra inicial)*100.	Presencia de Oro en la solución de cianuro.	0 a 100	%	Análisis de laboratorio. Hoja de cálculo Excel para el balance metalúrgico.
Concentración de cianuro de sodio (X₁)	Independiente	Cantidad de cianuro de sodio que se encuentra disuelto en una determinada cantidad de solución.	Medir la concentración de cianuro libre en la solución mediante la titulación con nitrato de plata, utilizando yoduro de potasio como indicador.	Presencia de cianuro libre en la solución.	0.1 a 0.2	%	Análisis volumétrico por titulación de la solución con nitrato de plata y yoduro de potasio como indicador.
pH del proceso (X₂)	Independiente	Potencial de hidrógeno que expresa el grado de acidez o alcalinidad de la solución de cianuro.	Medir el pH de la solución utilizando un pH-metro calibrado con solución buffer.	Presencia de hidrogeniones en la solución de cianuro.	10.5 a 12.5	pH	Papel tornasol y equipo pH metro.
Tiempo del proceso (X₃)	Independiente	Duración de la interacción de los carbones con la solución de cianuro de sodio para producir la transferencia de oro desde carbón fino residual a carbón fresco grueso.	Medir el tiempo de contacto total del carbón en el reactor agitado con la solución cianurada.	Cantidad de Oro transferido desde carbón fino residual al carbón fresco grueso en función del tiempo.	3 a 6	h	Cronometro

Nota. La tabla muestra la operacionalización de las variables independientes y dependiente. Elaboración propia.

Capítulo IV

Metodología

4.1 Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica

En el marco de esta investigación, se recolectó carbón fino residual generado en la planta de beneficio La Joya Mining S.A.C., localizada en la región y provincia de Arequipa, distrito de La Joya, en el centro poblado San José. La ubicación geográfica se corresponde con las coordenadas (-16.578381, -71.833948) y una altitud aproximada de 1483 m s. n. m. (figura 15) (La Joya Mining S.A.C., 2024).

Figura 15

Ubicación de la planta La Joya Mining S.A.C.



Nota. La figura muestra la ubicación de la planta la Joya. Tomado y recuperado de Google earth 2025.

Las pruebas experimentales se realizaron en los laboratorios de metalurgia pertenecientes a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC),

específicamente en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ubicada en la Av. de la Cultura 773, Cusco. Las coordenadas geográficas corresponden a una latitud de -13.522306901690536 , longitud de -71.9569079382793 y una altitud aproximada de 3400 m s. n. m. (UNSAAC, 2024).

4.2 Metodología de la Investigación

El estudio contempló una investigación experimental, con la utilización de un diseño experimental (DOE) de Factorial (2^3), y los principios basados en el método científico, esto implica, la utilización de conocimientos existentes en la recuperación de oro, las mismas que fueron aplicados para solucionar el problema de recuperación de oro a partir del carbón fino residual en la planta de beneficio La Joya Mining S.A.C. Por lo que, la investigación fue de enfoque cuantitativa, debido a que se manipularon de manera intencional las variables independientes en cada prueba experimental y obtener una respuesta numérica. En consecuencia, se buscó la relación de causa efecto entre variables, con un control adecuado.

4.3 Población de Estudio

La tesis contempló como materia prima, el carbón fino residual que se produce en la planta de beneficio La Joya Mining S.A.C.

4.3.1 Muestra, Tamaño de Muestra y Técnicas de Muestreo

A partir de la producción de carbón fino residual que se produce en la planta de beneficio La Joya Mining S.A.C., se extrajo una muestra que sea representativa de 10 kg, el muestreo fue sistemático del día de producción de carbón fino. Esta muestra fue trasladada al laboratorio metalúrgico de la UNSAAC. Para las pruebas experimentales, según el diseño factorial de tres niveles y 2 réplicas en el punto central.

Para determinar la cantidad de muestra representativa a ser utilizadas en los ensayos de cianuración, se aplicó la fórmula estadística para el cálculo del tamaño de muestra:

$$n = \left(\frac{\sigma Z}{d}\right)^2 \quad (20)$$

Donde:

- n = número de muestras necesarias,
- σ = desviación estándar de la población,
- Z = valor de la distribución normal estándar asociado al nivel de confianza,
- d = error de muestreo permitido.

En este estudio se consideró un nivel de confianza del 95%, correspondiente a $Z = 1.96$. La desviación estándar (σ) se estimó en 0,32, valor referencial tomado de pruebas preliminares de recuperación de oro en carbones residuales y de la variabilidad reportada en la literatura especializada (Gy, 1992). El error de muestreo permitido (d) se fijó en 0,20, acorde a la precisión aceptable para estudios experimentales de laboratorio en metalurgia extractiva.

$$n = \left(\frac{0.32 \times 1.96}{0.20}\right)^2 = 0.83 \cong 10$$

Por lo tanto, se determinó que la cantidad de muestra necesaria es $n = 10$, lo cual asegura un adecuado nivel de representatividad y confiabilidad estadística para los resultados experimentales según el diseño planteado.

4.3.2 Técnicas y Recolección de Datos

Durante el desarrollo del trabajo se utilizaron las técnicas de la observación, la experimentación y el análisis de los resultados asistido de un paquete estadístico. También se recurrió al documental para la parte de balance metalúrgico antes, durante y después de las pruebas experimentales. En todo momento se utilizaron una ficha de datos.

4.4 Materiales, Equipos, Reactivos

4.4.1 Materiales

- Bolsas para muestras.
- Libros, artículos científicos y reactivos químicos.
- Carbón fino residual.
- Carbón nuevo.
- Tamiz # 12.
- Papel indicador de pH.
- Papel filtro.
- Luna de reloj.
- Bandejas.
- Soporte universal con su bureta.
- Materiales de mediciones de volumen de laboratorio.
- Otros.

4.4.2 Equipos

- Manta para el cuarteo de carbones.
- Balanza digital.
- Botellas de dama Juana.
- Cocina eléctrica.
- Rodillos de agitación.
- Cronometro.
- Laptop
- EPPs

- Otros.

4.4.3 Reactivos

- Nitrato de plata.
- Yoduro de potasio.
- Cianuro de sodio.
- Soda caustica.
- Otros.

4.5 Validez y Confiabilidad de Instrumentos.

Los equipos, materiales e instrumentos empleados en el desarrollo de esta investigación pertenecieron al laboratorio metalúrgico de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), cumpliendo con los estándares necesarios para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos (UNSAAC, 2024).

4.6 Técnicas de Procesamiento de Datos y Plan de Análisis de Datos

La información recolectada a partir de las pruebas experimentales fue empleada para elaborar un balance metalúrgico, utilizando como herramienta principal el software Excel.

Asimismo, se aplicaron procedimientos estadísticos para analizar y establecer relaciones entre las variables, considerando un Diseño de Experimentos (DOE) factorial 2^3 (Montgomery, 2019).

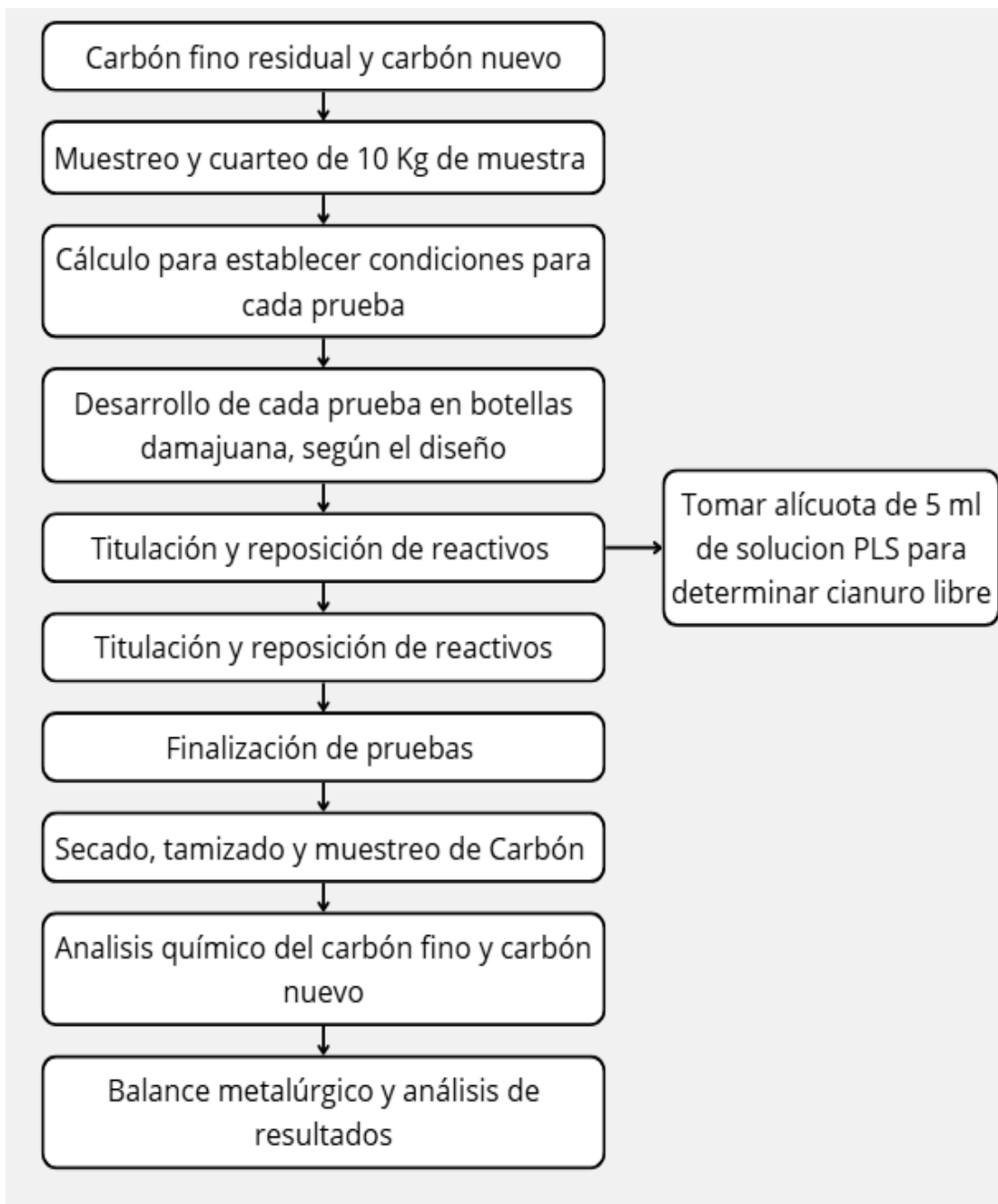
En cuanto al análisis estadístico, se empleó el software Minitab, el cual permitió evaluar efectos e interacciones de las variables, realizar análisis de varianza (ANOVA), construir modelos matemáticos y generar representaciones gráficas para interpretar los resultados de manera adecuada (Montgomery, 2019).

4.7 Metodología Seleccionada y Aplicada al Proyecto de Investigación

La marcha de las actividades se llevó según el siguiente diagrama de flujo propuesto:

Figura 16

Metodología establecida para el desarrollo del proyecto



Nota. En la figura se muestra el diagrama de flujo para la ejecución de la investigación. Elaboración propia.

En el desarrollo del proyecto, las pruebas experimentales se realizaron según diseño factorial 2^3 con dos replicas en el punto central, según la tabla.

Figura 17

Matriz de Diseño factorial 2^3

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	A	B	C
1	1	1	1	1	-1	-1	-1
2	2	2	1	1	1	-1	-1
3	3	3	1	1	-1	1	-1
4	4	4	1	1	1	1	-1
5	5	5	1	1	-1	-1	1
6	6	6	1	1	1	-1	1
7	7	7	1	1	-1	1	1
8	8	8	1	1	1	1	1
9	9	9	0	1	0	0	0
10	10	10	0	1	0	0	0

Nota. La figura presenta el orden y los niveles para cada prueba experimental. Data de Minitab.

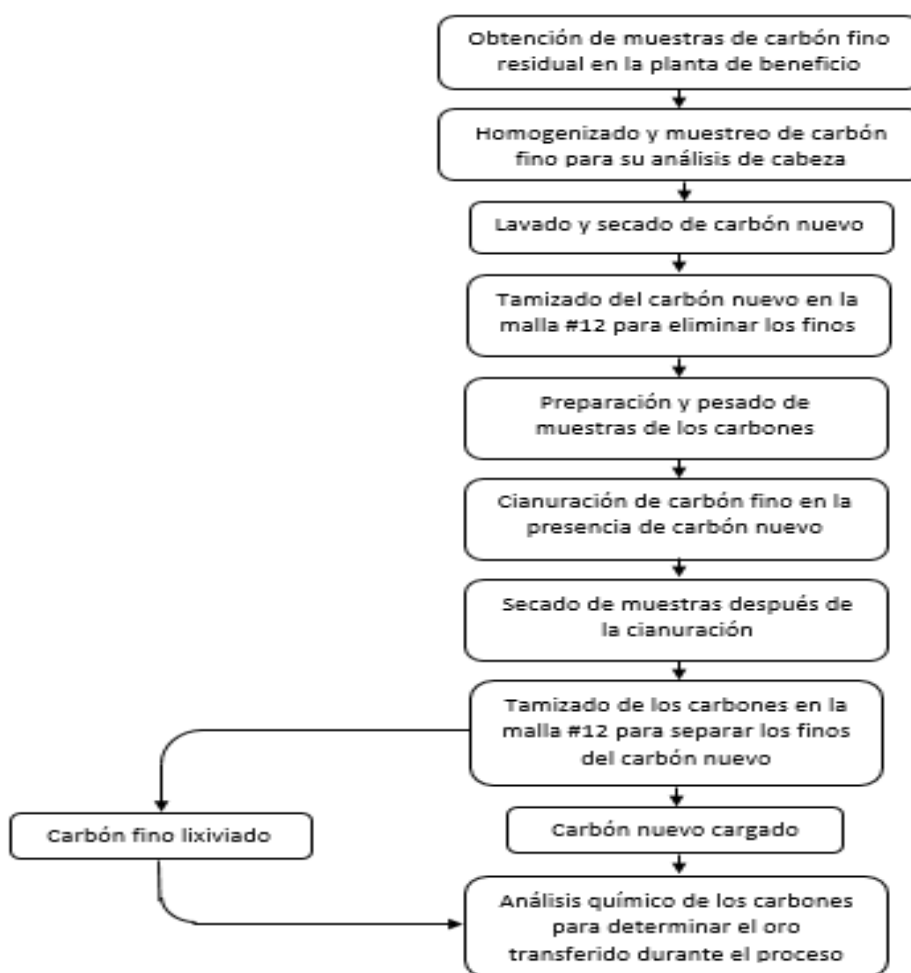
Capítulo V

Desarrollo y Resultados Experimentales

El presente capítulo describe en detalle el desarrollo de las actividades experimentales ejecutadas para la evaluación del proceso, siguiendo rigurosamente la secuencia establecida en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 18. Dicho diagrama sintetiza las etapas clave del procedimiento experimental, desde la preparación de las muestras hasta la obtención y análisis de los resultados, asegurando así la reproducibilidad y validez técnica del estudio.

Figura 18

Diagrama de flujo del procedimiento experimental



Nota: Secuencia del proceso de la metodología utilizada en la investigación. Elaboración propia

5.1 Toma de Muestras del Carbón

Los carbones finos corresponden al material residual generado tras el proceso de tamizado del carbón activado en la planta ADR. Este subproducto es recolectado y almacenado en bolsas tipo Big Bag. Una vez que estos recipientes alcanzan su capacidad máxima, se solicita la intervención del laboratorio químico para llevar a cabo el muestreo correspondiente. Este procedimiento tiene como finalidad la determinación del contenido de oro, plata y humedad presente en el carbón fino. Posteriormente, cada muestra es codificada y pesada con precisión. Tras ello, el material es transportado a la cancha de almacenamiento de carbones finos mediante el uso de un montacargas (Manitour). La cantidad de carbón fino generado mensualmente en la planta de beneficio se presenta en la tabla 5.

Tabla 5

Carbón fino generado por mes

MES	CARBÓN FINO (Kg)	LEY Au (g/Kg)	LEY Ag (g/Kg)	FINO Au (g)	FINO Ag (g)
Ene-23	1859.540	0.069	0.041	128.308	76.241
Feb-23	2717.150	0.090	0.060	244.544	163.029
Mar-23	3287.680	0.081	0.099	266.302	325.480
Abr-23	3516.810	0.083	0.097	291.895	341.131
May-23	2192.880	0.095	0.067	208.324	146.923
Jun-23	1909.920	0.194	0.198	370.524	378.164
Jul-23	1824.850	0.105	0.170	191.609	310.225
Ago-23	2869.000	0.190	0.211	545.110	605.359
Set-23	1914.190	0.122	0.715	233.531	1368.646
Oct-23	2760.450	0.067	0.098	184.950	270.524
Nov-23	1573.800	0.083	0.084	130.625	132.199
Dic-23	1155.200	0.081	0.123	93.571	142.090
TOTAL	27581.470			2889.293	4260.011

Nota: La tabla es una representación de carbón fino producido por mes y sus respectivas leyes en oro, y plata. Información obtenida de la empresa La Joya Mining S.A.C.

La muestra utilizada para esta investigación fue recolectada en la cancha de almacenamiento de carbón fino de la planta de beneficio de La Joya Mining S.A.C. (ver Figura 19). Para esta tarea se empleó un método de muestreo por sonda y calicateo, logrando obtener aproximadamente 10 kilogramos de muestra representativa.

Una vez recolectado el material, este fue debidamente envasado, sellado y trasladado al Laboratorio de Hidrometalurgia de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, donde se realizaron los análisis correspondientes.

Figura 19

Muestreo de carbón fino en la planta de beneficio



Nota. La figura es una figura que muestra el homogenizado del carbón fino producido en la plata y su muestreo posterior. Fotografía obtenida de la empresa La Joya Mining S.A.C.

5.2 Preparación de Muestras en el Laboratorio de Hidrometalurgia

El carbón fino procedente de la planta de beneficio de La Joya Mining S.A.C. presenta una granulometría inferior a la malla # 12. La concentración de oro en este material varía según

el lote o campaña correspondiente al proceso de desorción, situándose en un rango que oscila entre 0.04 y 0.12 gramos de oro por kilogramo de carbón seco (g Au/kg C).

Figura 20

Muestra de carbón fino residual



Nota. La figura muestra una fotografía de la muestra de carbón fino residual. Fotografía tomada de la empresa La Joya Mining S.A.C.

La muestra de carbón fino proveniente de la planta La Joya Mining S.A.C. fue previamente homogenizada en el laboratorio de hidrometalurgia de la UNSAAC, con el fin de obtener una submuestra representativa destinada al análisis de la ley de cabeza y determinación del contenido de humedad.

Por otro lado, el carbón nuevo fue sometido a un proceso de lavado con agua en un sistema de agitación mecánica, con el propósito de eliminar impurezas superficiales y minimizar la atrición durante la prueba de transferencia (ver figura 21). Finalizada la agitación, el carbón fue recolectado en baldes y posteriormente sometido a un proceso de secado controlado.

Figura 21

Carbón nuevo lavado



Nota. La figura muestra una fotografía del carbón nuevo lavado para utilizar en el proceso. Tomado de la empresa La Joya Mining S.A.C.

El carbón nuevo, una vez secado, fue tamizado mediante una malla # 12 (figura 22), con el propósito de eliminar las partículas finas que pudieran estar presentes. El material fino

obtenido fue descartado, mientras que la fracción gruesa retenida en la malla fue seleccionada para ser utilizada en las pruebas experimentales correspondientes.

Figura 22

Tamizado del carbón fresco



Nota. La figura muestra la fotografía de la operación de tamizado del carbón nuevo que se utilizará en el proceso. Fotografía realizada por los tesistas.

5.2.1 Análisis Químico de las Muestras del Carbón Fino Residual

La muestra correspondiente al carbón fino residual, obtenida durante el proceso de muestreo, fue codificada, envasada, sellada adecuadamente y posteriormente enviada al laboratorio químico de LabPerú E.I.R.L. La determinación del contenido de oro se realizó mediante el método de ensayo al fuego (Fire Assay). El valor promedio reportado por el laboratorio fue de 0.127 g Au/Kg Carbón, tal como se detalla en el Anexo 6.

5.3.1 Determinación de la Gravedad Específica del Carbón Fino Residual

La gravedad específica del carbón fino residual se determinó mediante el método del picnómetro (fiola), siguiendo una secuencia metodológica estructurada, como se describe a continuación:

- Se tomaron muestras de 10 gramos tanto de carbón nuevo como de carbón fino residual, las cuales fueron secadas en estufa para eliminar la humedad presente.
- Posteriormente, se pesaron 4.5 gramos de carbón seco para cada prueba individual.
- Se registró el peso de las fiolas vacías.
- Luego, se introdujeron los 4.5 gramos de carbón seco en las fiolas y se realizó el correspondiente pesado.
- Las fiolas se llenaron cuidadosamente con agua destilada hasta el enrase y se procedió a su pesado.
- Finalmente, se registraron todos los datos obtenidos para el cálculo de la gravedad específica de cada muestra.

Por último, se procedió a calcular las gravedades específicas con los datos obtenidos mediante la siguiente ecuación N° 18.

$$GE = \frac{W(m)}{(W(fa) - W(f)) - (W(ma) - W(fm))} \quad (21)$$

Donde:

W(m): peso de la muestra del carbón.

W(fa): Peso de la fiola con agua.

W(f): Peso de la fiola-

W(ma): Peso de la muestra de carbón más agua.

W(fm): Peso de la fiola más muestra de carbón.

En la tabla 6 se detallan los resultados de cada una de las pruebas determinadas, se realizó la prueba por triplicado para la muestra según la ecuación 21, los resultados de muestran en la tabla.

Tabla 6

Recopilación de datos para la determinación de gravedad específica

Peso del carbón (g)	M	4.5	4.5	4.5
Peso de la fiola (g)	F	53.42	53.74	45.74
Peso de la fiola más agua (g)	FA	153.03	153.25	145.49
Peso de fiola más mineral (g)	FM	58.42	58.74	50.74
Peso de la fiola, agua y mineral (g)	FAM	154.77	155.19	147.28
Gravedad específica	G.E.	1.38	1.47	1.40

Nota. La tabla muestra los datos y los resultados del cálculo de la gravedad específica del carbón residual. Elaboración propia. Realizado en el laboratorio de hidrometalurgia de la UNSAAC. La gravedad específica promedio del carbón fino es de 1.42 g/cc.

5.4 Diseño de las Pruebas Metalúrgicas

Las pruebas de cianuración se llevaron a cabo siguiendo un diseño factorial 2^k , incluyendo dos réplicas en el punto central. Los detalles experimentales correspondientes se presentan en las tablas 7 y 8.

Para el desarrollo del experimento se definieron variables independientes y una variable dependiente, según se indica a continuación:

Variables independientes:

- Concentración de cianuro de sodio (NaCN).
- Valor de pH.
- Tiempo de cianuración (horas).

Variable dependiente:

- Porcentaje de recuperación de oro (% Au)

Este enfoque experimental permitió evaluar la influencia individual y combinada de las variables operativas sobre la eficiencia del proceso de cianuración del carbón fino residual.

Tabla 7

Niveles (-1) y (+1) de las variables independientes

Variab les	-1	0	+1
Conc NaCN	0.1	0.15	0.2
pH	10.5	11.5	12.5
Tiempo	3	4.5	6

Nota: La tabla muestra los niveles inferiores y superiores de las variables independientes. Desarrollado con el Software Minitab.

Tabla 8

Matriz del Diseño Factorial 2³, variables codificadas y decodificadas

Nº de pruebas	Variab les codificadas			Variab les decodificadas		
	X1	X2	X3	NaCN (%)	pH	Tiempo (h)
Prueba 01	-1	-1	-1	0.1	10.5	3
Prueba 02	+1	-1	-1	0.2	10.5	3
Prueba 03	-1	+1	-1	0.1	12.5	3
Prueba 04	+1	+1	-1	0.2	12.5	3
Prueba 05	-1	-1	+1	0.1	10.5	6
Prueba 06	+1	-1	+1	0.2	10.5	6
Prueba 07	-1	+1	+1	0.1	12.5	6
Prueba 08	+1	+1	+1	0.2	12.5	6
Prueba 09	0	0	0	0.15	11.5	4.5
Prueba 10	0	0	0	0.15	11.5	4.5

Nota: La tabla muestra las variables codificadas y decodificadas. Desarrollado con el Software Minitab.

5.5 Condiciones Operativas para las Pruebas Metalúrgicas

Las condiciones operativas de las pruebas metalúrgicas fueron establecidas en función del diseño factorial propuesto, el cual consideró la manipulación de variables independientes especificadas en la tabla 9. Paralelamente, se mantuvieron constantes otros parámetros operativos, definidos previamente mediante cálculos técnicos y condiciones controladas de laboratorio, con el objetivo de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados experimentales.

Tabla 9

Matriz del diseño factorial 2^3 y condiciones operativas para la prueba experimental

ITEMS	PARAMETROS						PESO MUESTRA		DE
	Código de la prueba	N° de prueba	G.E.	Densidad	Sólidos	Líquidos	Dilución	Carbón (g)	
CF1	1	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF2	2	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF3	3	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF4	4	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF5	7	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF6	8	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF7	9	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF8	10	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF9 P. C.	9	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000
CF10 P.C.	10	1.42	1078.30	20%	80%	4	200	800	1000

Nota: La tabla muestra la matriz del diseño factorial para las pruebas experimentales. Elaborada con el Software Minitab.

Para el desarrollo de las pruebas experimentales, se trabajó con un porcentaje de sólidos al 20%. Esta concentración fue seleccionada considerando que una mayor carga sólida incrementa la fricción entre partículas, lo cual podría provocar una mayor abrasión y desgaste del carbón. En base a esta premisa, se realizaron los cálculos necesarios para definir con precisión la cantidad de carbón y agua en cada reactor.

La determinación de estas cantidades se basó en la capacidad total y la capacidad de trabajo de los reactores utilizados (del 1 al 10). La capacidad total fue establecida mediante ensayos directos con agua, mientras que la capacidad de trabajo se ajustó al 80% del volumen total para evitar derrames y permitir una agitación eficiente.

A continuación, se presentan (tabla 10) los parámetros operativos considerados:

Tabla 10

Parámetros operativos considerados para las pruebas experimentales

Parámetros	Valor
Volumen total del reactor (cc)	1176,25
Volumen de trabajo (cc)	941
Gravedad específica del carbón	1,42
Porcentaje de sólidos	20%

Nota. La tabla muestra los parámetros considerados en las pruebas experimentales. Elaboración propia.

Para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas, se trabajó con un volumen útil de 941.00 cc y con 20% de sólidos en peso, lo cual permite un equilibrio entre buena agitación y baja abrasión del carbón. A partir de este volumen de trabajo y el porcentaje de sólidos definido, se

calculó la masa correspondiente de carbón y agua, manteniendo la proporción constante en todas las pruebas.

El cálculo de las cantidades necesarias se realizó en función de la gravedad específica del carbón (1.42) y aplicando la relación porcentual entre sólidos y líquidos:

$$\text{Peso del Carbon al 20\%} = \frac{1000 * 20}{100} = 200.0 \text{ g}$$

$$\text{Peso del agua al 80\%} = \frac{1000 * 80}{100} = 800.1 \text{ g}$$

Además, para propósitos de estandarización, se elaboró la tabla 11 de conversión desde una base de 100 g hacia la cantidad requerida para las pruebas reales:

Tabla 11

Estandarización de proporciones para la preparación de pulpas

Componente	Base de 100 g		Prueba en laboratorio para 1000.10g	
	Peso (g)	Volumen cc	Peso (g)	Volumen cc
Carbón (G.E=1.42g/cc)	20,00	14,08	200,03	140,87
Agua	80,00	80,00	800,13	800,13
Carbón + agua	100,00	94,08	1000,16	941,00

Nota. La tabla presenta la conversión de una base de 100 g hacia las cantidades reales utilizadas en laboratorio (1000.10 g). Elaboración propia.

Para las pruebas experimentales, se determinó la cantidad de NaCN necesaria para cada nivel del diseño experimental (bajo, alto y punto central), considerando una base de preparación de 800 g de solución. A continuación, se detallan los cálculos correspondientes para cada concentración:

Nivel bajo (0.10%):

$$\text{Peso del NaCN} = \frac{800.13 * 0.10}{100} = 0.80 \text{ g}$$

Nivel alto (0.20%):

$$\text{Peso del NaCN} = \frac{800.13 * 0.20}{100} = 1.60 \text{ g}$$

Punto central (0.15%):

$$\text{Peso del NaCN} = \frac{800.13 * 0.15}{100} = 1.2 \text{ g}$$

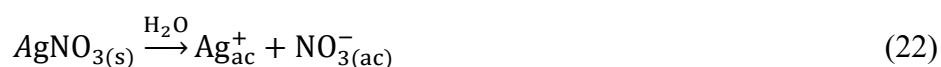
Estos valores fueron empleados para preparar las soluciones cianuradas en cada prueba, asegurando precisión y coherencia con el diseño factorial establecido.

5.5.1 Preparación de Solución de Nitrato de Plata.

En esta etapa del procedimiento analítico, se preparó una solución de nitrato de plata con una concentración de 4.333 g/L. Esta concentración fue establecida en función de la relación estequiométrica necesaria para reaccionar con los iones cianuro presentes en la muestra.

Dado que la solución cianurada se expresó en mililitros, se estableció que cada litro de solución contenía 4.3333 gramos de AgNO_3 , lo que equivale a 0.0043333 gramos por mililitro.

Para su preparación, el nitrato de plata sólido fue disuelto en agua destilada, generando una disociación completa en iones plata (Ag^+) y nitrato (NO_3^-), debido a la alta solubilidad del compuesto. Esta disociación se representa mediante la siguiente ecuación química:



En esta reacción, el AgNO_3 corresponde al nitrato de plata en estado sólido, que se transforma en iones disueltos. La Ag^+ representa el ion que actúa como agente valorante durante la titulación, ya que reacciona directamente con los iones cianuro presentes en la muestra. Por su parte, el NO_3^- no participa directamente en la reacción, desempeñando el papel de ion acompañante o espectador.

Esta solución valorante de AgNO_3 fue utilizada en la titulación del cianuro disuelto en la muestra, permitiendo una determinación precisa de la concentración de CN^- .

5.5.2 Preparación de Solución Indicador de Yoduro de Potasio al 5%

La solución de yoduro de potasio (KI) se emplea como reactivo indicador en el análisis cuantitativo del cianuro libre presente en soluciones cianuradas, particularmente en el método de titulación argentométrica con nitrato de plata. Su función principal es evidenciar el punto final de la valoración mediante la formación de un precipitado visible cuando el ion plata (Ag^+) excede al cianuro en la muestra.

Para preparar una solución al 5% p/v, se procedió pesando 5,00 g de yoduro de potasio, que fueron incorporados en un matraz aforado de 100 mL, previamente parcialmente lleno con agua destilada. La disolución se agitó manualmente hasta lograr la completa solubilización del soluto, y luego se completó el volumen con agua destilada hasta la marca de aforo.

La solución obtenida fue transferida a un frasco de vidrio color ámbar, con el objetivo de protegerla de la luz, ya que el yoduro es sensible a la foto degradación, lo que podría alterar su efectividad como indicador.

Durante su aplicación en las pruebas experimentales, la dosificación se realizó con un gotero, agregando la solución de manera controlada para asegurar una respuesta precisa. El viraje se observa al generarse un precipitado blanco de yoduro de plata (AgI), lo que señala la presencia de Ag^+ libre en solución, y por ende, el final de la titulación. Disociación del yoduro de potasio en solución acuosa:



En esta ecuación, KI representa al yoduro de potasio sólido, que, al entrar en contacto con agua, se disocia completamente en sus iones constituyentes: el ion potasio (K^+) y el ion

yoduro (I^-), siendo este último el que reacciona con el ion plata para formar el precipitado indicativo.

5.6 Ejecución de las Pruebas Metalúrgicas

- Para empezar las pruebas metalúrgicas se realizó el homogenizado y muestreo de carbón fino residual, se envió una muestra representativa al laboratorio externo (LabPeru) lo cual nos dio como resultado un contenido metálico de $0.127 \text{ g/Kg } ^\circ\text{C}$.
- Se prepararon los materiales y equipos necesarios como: botellas de dama juanas, pizetas, probetas, vasos precipitados, agitador de rodillos, balanza analítica, etc. Todas limpias sin ningún rastro de contaminación.
- Lavamos el carbón nuevo hasta eliminar material carbonoso y posteriormente se hace el secado de este mismo carbón.
- Tamizamos el carbón nuevo en la malla # 12 para eliminar finos.
- Agregamos 800 ml de H_2O a las botellas, seguidamente se agrega 100 gr de carbón fino residual y 100 gr de carbón nuevo.
- Se agrega soda caustica para llegar al pH establecido para cada prueba que indica la tabla 9.
- Una vez estabilizado el pH agregamos el cianuro de sodio necesario para llegar a la fuerza de cianuro establecido al número de prueba que nos indica la tabla 8 y comenzamos a agitar en la mesa de rodillos.
- Pasado una hora se saca una muestra de solución 20 ml, se filtra en un vaso precipitado y se determina el pH, luego de esta solución filtrada se saca 5 ml en la probeta.

- Los 5 ml de solución en la probeta se pasan a un vaso precipitado, se agrega 2 a 3 gotas de yoduro de potasio preparado al 5 %, luego se titula con la solución de nitrato de plata con un factor de 0.025 para saber cuánto está la fuerza de cianuro libre en la solución.
- Los valores de los parámetros de soda caustica y cianuro de sodio deben mantener el valor indicado de cada prueba metalúrgica, de otro modo reponer los reactivos.
- El control de parámetros se hace 1, 2, 4 y 6 horas.
- Una vez finalizada las horas de agitación de cada prueba metalúrgica empezaremos a precipitar la solución de la botella dama juana hasta quedarnos solo con el carbón.
- El carbón se procede a secar en la cocina eléctrica sobre una bandeja.
- Una vez seco el carbón se procede a separar el fino y el grueso utilizando un tamiz de malla # 12.
- Obtenemos el retenido que es el carbón nuevo y el pasante con el carbón fino residual.
- Se alista las muestras por separado para analizar la ley de oro en un laboratorio externo.
- Se procede de más misma manera con todas las muestras.

5.5 Control de Parámetros Durante la Prueba

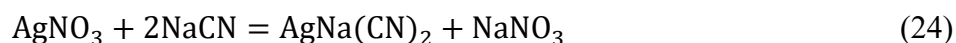
En el control de los parámetros se toma en cuenta, la concentración de cianuro libre, el pH y los tiempos.

5.5.1 Determinación de Cianuro Libre

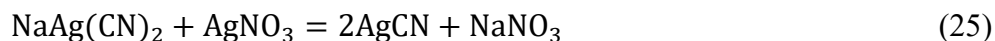
La cuantificación del cianuro libre (o fuerza de cianuro) se llevó a cabo mediante titulación volumétrica con una solución patrón de nitrato de plata (AgNO_3) a una concentración

de 0.1 N, empleando como indicador una solución de yoduro de potasio (KI) al 5 %. Este método es esencial para monitorear la concentración de cianuro en solución durante el proceso de lixiviación y determinar las necesidades de reposición del reactivo.

Para cada prueba, se tomaron 5 ml de solución lixivante en distintos intervalos de tiempo (1, 2, 4 y 6 horas) a fin de realizar la valoración correspondiente. La reacción principal que ocurre entre el cianuro y el nitrato de plata es la siguiente:



Esta reacción conduce a la formación del complejo soluble $\text{AgNa}(\text{CN})_2$, lo que permite que la titulación se realice en medio homogéneo. El punto final se detecta visualmente mediante la formación de un precipitado blanco de AgI , resultante de la reacción del ion Ag^+ excedente con el ion yoduro (I^-) presente en el indicador:



La ecuación empleada para calcular el porcentaje de cianuro libre en la solución es:

$$\% \text{NaCN} = \text{Factor} \times \text{Gasto de } \text{AgNO}_3 \text{ (mL)} \quad (27)$$

Donde el factor de titulación se determinó previamente como:

$$\text{Factor} = \frac{\text{Peso de } \text{AgNO}_3 * 2\text{PM NaCN} * 100}{(\text{Vol. Solución } \text{AgNO}_3, \text{mL}) * \text{PM } \text{AgNO}_3 * (\text{Vol. Solución CN, mL})} \quad (28)$$

Con la fórmula 25, hallamos el factor para 5 ml de solución madre, siendo:

$$\text{Factor} = \frac{4.33 * 2(49) \text{ g/mol} * 100}{(1000 \text{ mL}) * 169.9 \text{ g/mol} * (5 \text{ mL})} = 0.05\%$$

Durante la ejecución de las pruebas, se observó la disminución progresiva de la fuerza de cianuro a medida que avanzaba el tiempo de contacto con el carbón fino. Esto permitió establecer el perfil de consumo del reactivo y realizar las reposiciones correspondientes para mantener condiciones adecuadas de lixiviación.

Las tablas 12, 13 y 14 presentan el comportamiento cuantitativo del cianuro libre a lo largo del proceso, reflejando la dinámica de consumo y proporcionando información valiosa para el control operativo del proceso de cianuración.

Tabla 12

Cianuro libre y reposición de cianuro para la primera hora

Prueba	Con Inicial (%)	Factor	Gasto de $AgNO_3$ (ml)	Con de NaCN (%)	Reposición de NaCN (g)
1	0,1	0,05	0,6	0,030	0,56
2	0,2	0,05	2,0	0,100	0,80
3	0,1	0,05	0,9	0,045	0,44
4	0,2	0,05	2,2	0,110	0,72
5	0,1	0,05	0,9	0,045	0,44
6	0,2	0,05	2,0	0,100	0,80
7	0,1	0,05	0,9	0,045	0,44
8	0,2	0,05	2,0	0,100	0,80
9 Punto C.	0,15	0,05	1,5	0,075	0,60
10 Punto C.	0,15	0,05	1,5	0,075	0,60

Nota. La tabla muestra el cianuro libre en cada prueba experimental y la reposición de cianuro después de una hora de proceso. Elaboración propia.

Tabla 13*Cianuro libre y reposición de cianuro para dos horas*

Prueba	Con Inicial (%)	Factor	Gasto de $AgNO_3$ (ml)	Conc de NaCN (%)	Reposición de NaCN (g)
1	0,1	0,05	1,70	0,085	0,12
2	0,2	0,05	3,30	0,165	0,28
3	0,1	0,05	1,60	0,08	0,16
4	0,2	0,05	3,60	0,18	0,16
5	0,1	0,05	1,20	0,06	0,32
6	0,2	0,05	2,90	0,145	0,44
7	0,1	0,05	1,60	0,08	0,16
8	0,2	0,05	3,60	0,18	0,16
9 Punto C.	0,15	0,05	2,40	0,12	0,24
10 Punto C.	0,15	0,05	2,40	0,12	0,24

Nota. La tabla muestra el cianuro libre en cada prueba experimental y la reposición de cianuro después de dos horas de proceso. Elaboración propia.

Tabla 14*Cianuro libre y reposición de cianuro para cuatro horas*

Prueba	Con Inicial (%)	Factor	Gasto de $AgNO_3$ (ml)	Conc de NaCN (%)	Reposición de NaCN (g)
5	0,1	0,05	1,75	0,0875	0,10
6	0,2	0,05	1,75	0,0875	0,09
7	0,1	0,05	1,83	0,0915	0,07
8	0,2	0,05	3,66	0,183	0,14
9 Punto C.	0,15	0,05	2,84	0,142	0,06
10 Punto C.	0,15	0,05	2,84	0,142	0,06

Nota. La tabla muestra el cianuro libre en cada prueba experimental y de cianuro después de cuatro horas de proceso. Elaboración propia.

En la tabla 15 se presenta el resumen de consumo de NaCN de cada prueba, y también se establece el consumo de NaCN por tonelada de carbón.

Tabla 15*Resumen de las reposiciones de cianuro de cada prueba*

Prueba	Cianuro al inicio de prueba	Reposición de NaCN (g) para 1 hora	Reposición de NaCN (g) para 2 horas	Reposición de NaCN (g) para 4 horas	Consumo total de NaCN por prueba (g)	Consumo kg NaCN/Tn de C)
1	0.8	0.56	0.12	0	1.48	7.4
2	1.6	0.8	0.28	0	2.68	13.4
3	0.8	0.44	0.16	0	1.4	7
4	1.6	0.72	0.16	0	2.48	12.4
5	0.8	0.44	0.32	0.1	1.66	8.3
6	1.6	0.8	0.44	0.09	2.93	14.65
7	0.8	0.44	0.16	0.07	1.47	7.35
8	1.6	0.8	0.16	0.14	2.7	13.5
9	1.2	0.6	0.24	0.06	2.1	10.5
10	1.2	0.6	0.24	0.06	2.1	10.5

Nota. La tabla muestra el consumo de cianuro de cada prueba y la estimación el consumo por tonelada. Elaboración propia.

5.5.2 Control del pH

El control de pH se realizó junto con el cianuro de sodio en los mismos tiempos, se determinó utilizando la cinta de pH en caso se baje se le agrega el hidróxido de sodio necesario para aumentar alcalinidad en la solución. El comportamiento del pH durante el proceso se muestra en la tabla 16.

5.5.3 Tiempo

Para el estudio se consideró 3 tiempos y son: 4 pruebas de duración de 3 horas, 4 pruebas de duración de 6 horas, y 2 pruebas del punto central que duran de 4.5 horas

Tabla 16*Comportamiento de pH durante el proceso*

Prueba	pH			
	Inicio	01 hora	02 horas	04 horas
1	10.5	9.500	10.5	-
2	10.5	9.300	10.5	-
3	12.5	11.000	12.5	-
4	12.5	11.000	12.5	-
5	10.5	9.500	10.5	10.5
6	10.5	9.500	10.5	10.5
7	12.5	11.000	12.5	12.5
8	12.5	11.000	12.5	12.5
9 P.C.	11.5	10.00	11.5	11.5
10 P.C.	11.5	10.00	11.5	11.5

Nota: En la tabla se muestra el comportamiento del pH durante las pruebas experimentales.

Datos obtenidos de las pruebas de experimentación

5.5.4 Resultados

En la Tabla 17 se muestran las condiciones experimentales establecidas para cada una de las diez pruebas realizadas, así como los resultados obtenidos en términos de la ley de oro en el carbón de cabeza y en el carbón final (cola), expresadas en gramos por kilogramo (g Au/kg). Asimismo, se presenta el cálculo correspondiente al porcentaje de recuperación de oro en función de la diferencia entre ambas leyes.

Los ensayos se desarrollaron bajo diferentes combinaciones de concentración de cianuro de sodio (NaCN), pH y tiempo de contacto, con el objetivo de evaluar la eficiencia del proceso de transferencia de oro desde el carbón fino residual. Se destaca que la mayor recuperación se logró en la prueba 10, con un 45.67 % de recuperación, empleando una concentración de 1500 ppm de NaCN, pH de 11.5 y un tiempo de residencia de 4.5 horas. Este resultado corresponde

al punto central del diseño experimental y representa la condición más favorable dentro del rango de estudio.

El cálculo de la recuperación final (%) proviene de la diferencia entre la ley de cabeza (contenido inicial de oro) y la ley de cola (contenido final de oro en el carbón), aplicando esta fórmula general de recuperación metalúrgica:

$$\text{Recuperación final} = \frac{(\text{Ley de cabeza} - \text{Ley de cola})}{\text{Ley de cabeza}} \times 100 \quad (29)$$

Donde:

Ley de cabeza: contenido inicial de oro en el carbón (g Au/kg C)

Ley de cola: contenido final de oro en el carbón después de la prueba (g Au/kg C)

Aplicamos la fórmula (29) para cada prueba:

$$\text{Prueba 1: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.071)}{0.127} \times 100 = 44.09 \%$$

$$\text{Prueba 2: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.070)}{0.127} \times 100 = 44.88 \%$$

$$\text{Prueba 3: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.083)}{0.127} \times 100 = 34.65 \%$$

$$\text{Prueba 4: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.073)}{0.127} \times 100 = 42.52 \%$$

$$\text{Prueba 5: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.078)}{0.127} \times 100 = 38.58 \%$$

$$\text{Prueba 6: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.075)}{0.127} \times 100 = 40.94 \%$$

$$\text{Prueba 7: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.070)}{0.127} \times 100 = 44.88 \%$$

$$\text{Prueba 8: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.076)}{0.127} \times 100 = 40.16 \%$$

$$\text{Prueba 9: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.071)}{0.127} \times 100 = 44.09 \%$$

$$\text{Prueba 10: } \text{Recuperación final} = \frac{(0.127 - 0.069)}{0.127} \times 100 = 45.67 \%$$

Tabla 17*Condiciones y resultados experimentales*

Número de prueba	Variables			Ley de carbones g Au/Kg "C"		Recuperación final (%)
	Concentración de NaCN ⁻	pH	Tiempo	Ley de cabeza	Ley de "C" en cola	
1	0.1	10.5	3	0.127	0.071	44.09
2	0.2	10.5	3	0.127	0.07	44.88
3	0.1	12.5	3	0.127	0.083	34.65
4	0.2	12.5	3	0.127	0.073	42.52
5	0.1	10.5	6	0.127	0.078	38.58
6	0.2	10.5	6	0.127	0.075	40.94
7	0.1	12.5	6	0.127	0.07	44.88
8	0.2	12.5	6	0.127	0.076	40.16
9(P central)	0.15	11.5	4.5	0.127	0.071	44.09
10 (P central)	0.15	11.5	4.5	0.127	0.069	45.67

Nota. La tabla muestra los resultados del porcentaje de recuperación de oro a partir del carbón fino residual. Elaboración propia.

Capítulo VI

Análisis y Discusión de Resultados

6.1. Matriz de Diseño 2³ para el Análisis y Discusión de Resultados por Minitab

Con el propósito de analizar y discutir de manera rigurosa los resultados experimentales, se elaboró una matriz de diseño factorial 2³ con dos réplicas en el punto central, tal como se muestra en las tablas 8 y 9. Las condiciones operativas establecidas (tabla 9) sirvieron de base para la construcción de la matriz experimental (tabla 18), la cual fue generada utilizando el software estadístico Minitab 19.

El uso de Minitab permitió no solo la construcción estructurada del diseño experimental, sino también la realización de un análisis estadístico preciso y confiable de los datos obtenidos. La matriz factorial 2³ facilita la evaluación del efecto individual de cada variable independiente (concentración de NaCN, pH y tiempo), así como de sus posibles interacciones, sobre la variable de respuesta (% de recuperación de oro).

Tabla 18

Arreglos de diseño Factorial con puntos centrales según Minitab

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
OrdenEst	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	Conc. NaCN	pH	Tiempo
1	1	1	1	0.1	10.5	3.0
2	2	1	1	0.2	10.5	3.0
3	3	1	1	0.1	12.5	3.0
4	4	1	1	0.2	12.5	3.0
5	5	1	1	0.1	10.5	6.0
6	6	1	1	0.2	10.5	6.0
7	7	1	1	0.1	12.5	6.0
8	8	1	1	0.2	12.5	6.0
9	9	0	1	0.15	11.5	4.5
10	10	0	1	0.15	11.5	4.5

Nota. La tabla representa la matriz de diseño factorial con réplicas en los puntos centrales. Tomado de la data de Minitab.

6.2. Análisis de Resultados con Minitab Según el Diseño Factorial

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos conforme al diseño factorial 2^3 con dos réplicas en el punto central, elaborado para evaluar el efecto de tres variables independientes: concentración de cianuro de sodio (X1), pH (X2) y tiempo de cianuración (X3) sobre la variable de respuesta: porcentaje de recuperación de oro ($Y=\%Ext$).

Cada corrida experimental fue ejecutada bajo condiciones específicas establecidas en la matriz de diseño (tabla 18), y los datos fueron procesados y analizados utilizando el software estadístico Minitab 19. Esta información constituye la base para el análisis estadístico posterior, permitiendo identificar la influencia individual y combinada de los factores sobre la eficiencia del proceso de lixiviación.

Los puntos experimentales del 1 al 8 corresponden a las combinaciones factoriales completas, mientras que los puntos 9 y 10 representan las réplicas del punto central, fundamentales para evaluar la curvatura del modelo, la misma que se muestra en la tabla 18.

Tabla 19

Resultados Experimentales del Diseño Factorial 2^3 con Punto Central

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
OrdenEst	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	X1 Conc. NaCN(%)	X2 pH	X3 Tiempo(h)	Y %Rec.
1	1	1	1	0.1	10.5	3.0	44.09
2	2	1	1	0.2	10.5	3.0	44.88
3	3	1	1	0.1	12.5	3.0	34.65
4	4	1	1	0.2	12.5	3.0	42.52
5	5	1	1	0.1	10.5	6.0	38.58
6	6	1	1	0.2	10.5	6.0	40.94
7	7	1	1	0.1	12.5	6.0	44.88
8	8	1	1	0.2	12.5	6.0	40.16
9	9	0	1	0.15	11.5	4.5	44.09
10	10	0	1	0.15	11.5	4.5	45.67

Nota. La tabla presenta los resultados del experimento diseñado bajo un esquema factorial 2^3 con dos puntos centrales. Tomado de la data de Minitab.

Del conjunto de pruebas experimentales presentadas en la tabla 19, se observa que la mayor recuperación de oro alcanzada fue del 45.67%, correspondiente al Ensayo N° 10, que forma parte del punto central del diseño factorial. Las condiciones asociadas a la mayor recuperación: concentración de NaCN (X1): 0.15%, pH (X2): 11.5 y tiempo (X3): 4.5 horas.

Estas condiciones corresponden a los valores medios de cada uno de los factores dentro del rango experimental, y su repetición en el punto central (corridas 9 y 10) no solo permitió detectar la presencia de curvatura en el modelo, sino también identificar una región operativa favorable para maximizar la recuperación de oro.

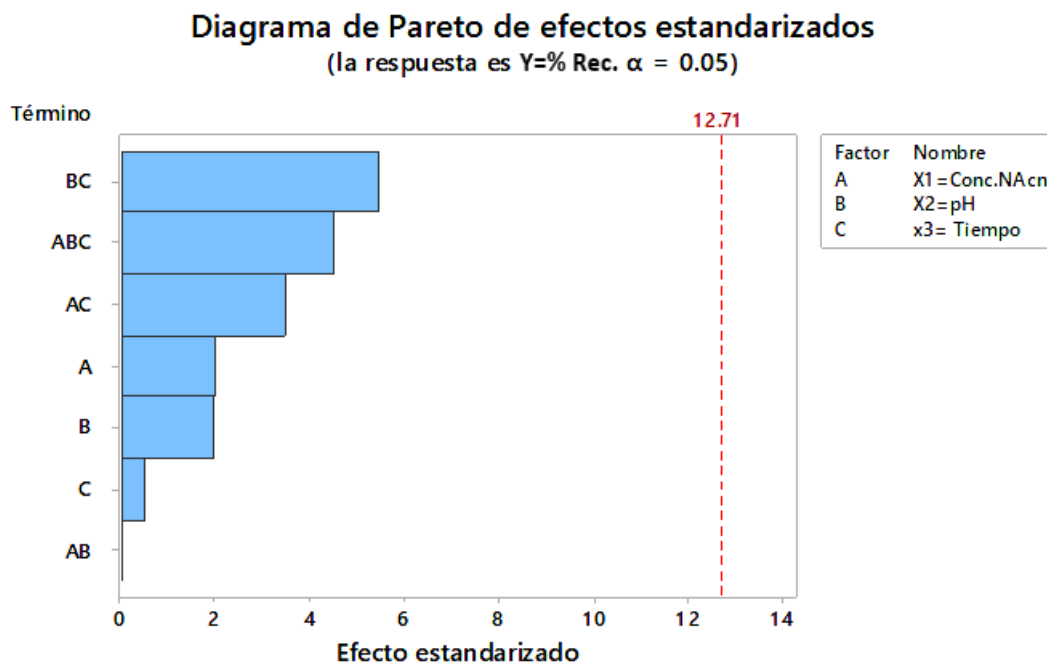
Comparando con las demás pruebas, se nota que: A pesar de que niveles altos de NaCN (0.20%), pH (12.5) y tiempo (6 h) muestran mejoras, el punto central proporciona un equilibrio entre eficiencia operativa y recuperación, con un desempeño superior incluso respecto a los extremos del diseño.

6.2.1. Análisis de los Resultados Predeterminados por el diseño factorial 2³

La figura 23 muestra el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, generado a partir del análisis estadístico realizado en Minitab 19, en el marco del diseño factorial 2³ aplicado al estudio de recuperación de oro a partir del carbón fino residual. Este gráfico permite identificar visualmente los efectos más importantes (tanto individuales como combinados) de las variables experimentales: concentración de NaCN (A), pH (B) y tiempo (C), así como sus interacciones.

Figura 23

Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados y predeterminados por el diseño



Nota. La figura ilustra los efectos estandarizados de las variables y sus efectos de sus interacciones en la recuperación del oro a partir del carbón residual. Tomado de la data de Minitab.

Al analizar la figura 23, se observa que ninguno de los efectos estandarizados supera el umbral de significancia estadística de 12.71. Sin embargo, es importante resaltar que la interacción AB (Conc. NaCN * pH) presenta el menor efecto estandarizado de todos los términos evaluados, ubicándose muy por debajo del resto de interacciones y efectos individuales.

Esto indica que la combinación de concentración de NaCN con el pH tiene una incidencia mínima en la variabilidad del porcentaje de recuperación de oro, dentro del rango experimental evaluado. Asimismo, el efecto individual del factor C (Tiempo) también muestra una influencia limitada, apenas superior al efecto AB, lo cual sugiere que su impacto por sí solo

es poco determinante, aunque puede volverse relevante al combinarse con otros factores, como se evidenció en la interacción significativa BC.

Estos hallazgos permiten descartar con mayor certeza la interacción AB como un factor clave y advierten que las decisiones operativas no deben basarse en dicho término, reforzando la importancia de focalizar el análisis en interacciones con mayor impacto, como BC y ABC.

Para corroborar los patrones observados en el diagrama de Pareto, se procede al análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se muestran en la tabla 20. Este análisis permitirá validar si algunos efectos, especialmente las interacciones, alcanzan significancia estadística desde el enfoque del modelo completo, aportando así una visión más robusta sobre las variables que realmente inciden en el proceso de cianuración del oro a partir del carbón residual.

Tabla 20

Análisis de Varianza (ANOVA) Predeterminada por el diseño²³

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	108.023	13.5029	10.82	0.231
Lineal	3	10.203	3.4010	2.72	0.413
X1=Conc.NaCN	1	4.961	4.9613	3.97	0.296
X2=pH	1	4.930	4.9298	3.95	0.297
x3= Tiempo	1	0.312	0.3121	0.25	0.705
Interacciones de 2 términos	3	52.678	17.5593	14.07	0.193
X1=Conc.NaCN*X2=pH	1	0.000	0.0000	0.00	1.000
X1=Conc.NaCN*x3= Tiempo	1	15.180	15.1801	12.16	0.178
X2=pH*x3= Tiempo	1	37.498	37.4978	30.04	0.115
Interacciones de 3 términos	1	25.063	25.0632	20.08	0.140
X1=Conc.NaCN*X2=pH*x3= Tiempo	1	25.063	25.0632	20.08	0.140
Curvatura	1	20.079	20.0789	16.09	0.156
Error	1	1.248	1.2482		
Total	9	109.271			

Nota. La tabla muestra el análisis de la varianza y el grado de significancia de las variables y sus interacciones en la recuperación del oro tomado de la data de Minitab.

La tabla 20 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el modelo generado a partir del diseño factorial 2^3 , orientado a evaluar la influencia de variables operativas sobre la recuperación de oro a partir del carbón fino residual.

De acuerdo con los valores de "Valor p", se observa que: ningún efecto individual ni interacción alcanza significancia estadística al nivel de $\alpha = 0.05$. Sin embargo, las interacciones de mayor impacto siguen siendo: $X2 * X3$ ($p = 0.114$) y $X1 * X2 * X3$ (interacción triple) ($p = 0.140$)

Estas interacciones, aunque no significativas, presentan valores "p" relativamente bajos comparados con los demás efectos, lo que confirma su mayor influencia relativa, tal como ya se indicó en el Diagrama de Pareto, donde aparecieron en los primeros lugares.

En contraste, la interacción $X1 * X2$ (AB) presenta un valor p de 1.000, confirmando su nula incidencia estadística sobre la variable de respuesta, lo que concuerda con su posición más baja en el Pareto. Este resultado sugiere que incluir este término en el modelo matemático no aporta valor explicativo, sino que introduciría ruido, redundancia y sobreajuste. Su permanencia en el modelo podría afectar negativamente la parsimonia y precisión predictiva, por lo que es recomendable eliminarlo del modelo final.

La Tabla 21 muestra que el modelo estadístico ajustado presenta un R-cuadrado elevado (98.86%), lo cual sugiere, en apariencia, una excelente capacidad para explicar la variabilidad del porcentaje de recuperación de oro. Sin embargo, al observar el R-cuadrado ajustado (89.72%), se evidencia una reducción significativa, lo que indica que el modelo incluye términos que no contribuyen significativamente a la explicación del comportamiento del sistema. Esta pérdida de eficiencia se confirma con la ausencia del R-cuadrado predicho, lo cual denota que el modelo carece de capacidad predictiva confiable sobre nuevos datos.

Tabla 21*Resumen del modelo en función al grado de ajuste*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.11723	98.86%	89.72%	*

Nota. Nota. La tabla contiene el resumen del grado de ajuste de los resultados en función

de la incidencia de cada variable independiente y sus interacciones en la recuperación de oro a partir del carbón residual. Tomado de la data de Minitab.

Esta situación guarda coherencia con lo observado en el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, donde se identificó que la interacción AB (Conc. NaCN * pH) y el efecto individual de C (Tiempo) fueron los de menor incidencia, y con lo reportado en la tabla ANOVA (Tabla 20), donde dichos términos presentan valores $p = 1.000$ y $p > 0.70$, respectivamente, es decir, no aportan significancia estadística al modelo.

En conjunto, los indicadores de ajuste y los análisis estadísticos (tabla 21) confirman que el modelo debe ser ajustado, eliminando los efectos de mínima relevancia como AB y C, para así mejorar su parsimonia, capacidad predictiva y confiabilidad estadística del modelo matemático. El enfoque debe centrarse en las interacciones de mayor impacto, como BC y ABC, que, aunque no alcanzaron significancia al 95%, mostraron los efectos más relevantes dentro del contexto experimental.

6.2.2. Análisis de los Resultados Ajustados en el Diseño Factorial 2³

Dado que el análisis de varianza (Tabla 20) y el diagrama de Pareto evidenciaron que la interacción AB (Conc. NaCN * pH) y el efecto individual de C (Tiempo) no son estadísticamente significativos (valor $p = 1.000$ y > 0.70 , respectivamente), se justifica su eliminación del modelo. La presencia de estos términos sin relevancia aporta ruido, reduce el R^2 ajustado, y

elimina la posibilidad de calcular un R^2 predicho, afectando la capacidad explicativa y predictiva del modelo.

Por ello, se realiza un nuevo análisis ajustado, excluyendo dichos efectos, con el fin de obtener un modelo más preciso, parsimonioso y estadísticamente sólido, centrado en las variables e interacciones que realmente inciden en la eficiencia del proceso de recuperación.

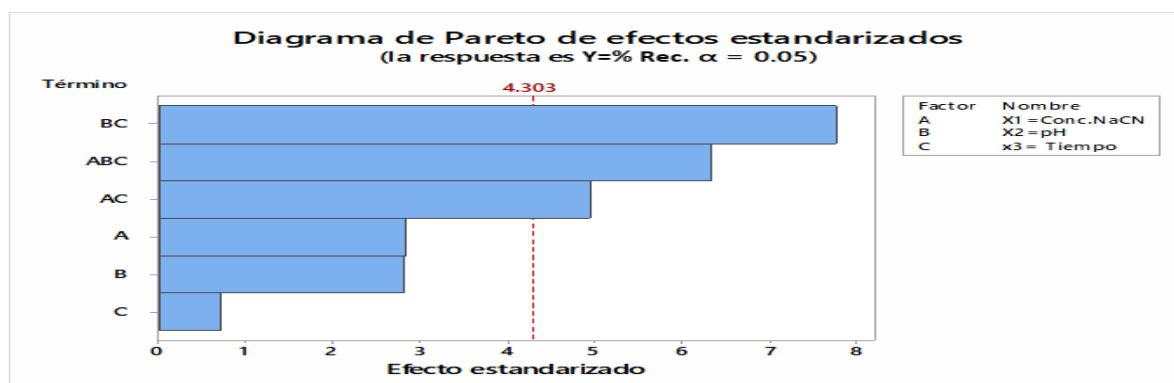
6.2.2.1. Análisis y Determinación de las Variables más Incidentes en el Proceso

Luego de identificar que la interacción AB (Conc. NaCN * pH) no presenta significancia estadística (valor $p = 1.000$ y efecto estandarizado mínimo en el diagrama de Pareto), se procedió a eliminar dicho término del modelo, con el objetivo de depurarlo y mejorar su capacidad explicativa.

A partir de esta modificación, se generó un nuevo Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (figura 24), considerando únicamente los factores e interacciones con mayor potencial de incidencia. Este gráfico actualizado permite visualizar con mayor claridad la relevancia relativa de los efectos restantes, sin la distorsión generada por variables irrelevantes.

Figura 24

Diagrama de Pareto corregido de los efectos Estandarizados



Nota. La figura es una representación de los efectos de las variables independientes y de sus interacciones en la recuperación del oro después de realiza una corrección el grado de ajuste del modelo. Tomado de la data de Minitab.

La Figura 24 muestra el Diagrama de Pareto corregido de los efectos estandarizados, generado luego de eliminar la interacción AB (Conc. NaCN * pH), que en el análisis previo se identificó como estadísticamente irrelevante (valor $p = 1.000$). Esta depuración permitió reducir el ruido estadístico del modelo y mejorar su estructura predictiva.

En el nuevo gráfico, se observa claramente que:

- La interacción BC (pH * Tiempo) es el efecto más incidente, con un valor estandarizado por encima de 7, superando ampliamente el umbral de significancia (4.303).
- Le sigue en importancia la interacción ABC (Conc. NaCN * pH * Tiempo), también por encima del umbral, indicando que la combinación simultánea de las tres variables tiene un efecto significativo sobre la recuperación de oro.
- La interacción AC (Conc. NaCN * Tiempo) también es significativo y los efectos individuales de A (NaCN), B (pH) y C (Tiempo) se encuentran por debajo del límite crítico.

Este resultado confirma y refuerza la importancia de las interacciones entre variables en el comportamiento del sistema, especialmente BC, ABC y AC, y valida la decisión de eliminar AB, que en el análisis anterior no aportaba valor al modelo.

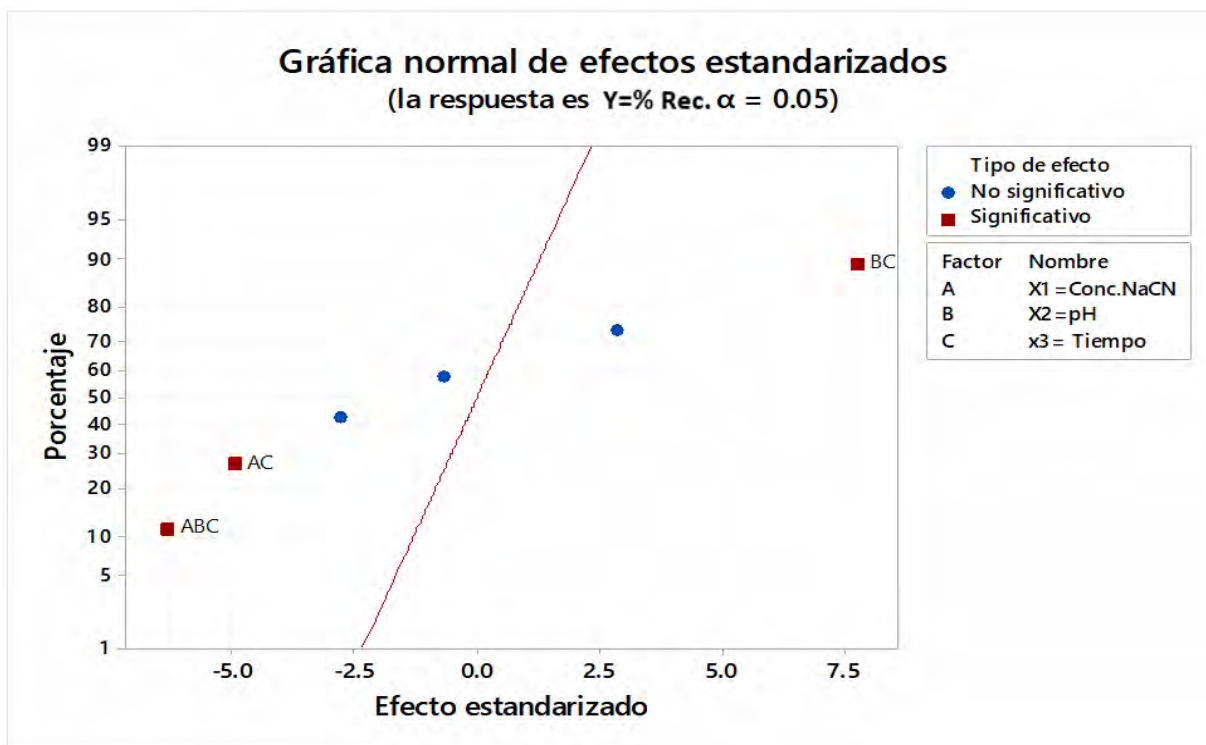
Además, al eliminar el efecto no significativo, se logra un modelo más parsimonioso y estadísticamente eficiente.

6.2.2.2. Análisis y Gráfica Normal de los Efectos en la Recuperación de Oro

La figura 25 complementa el análisis anterior mediante la representación gráfica normal de los efectos estandarizados. Esta gráfica permite visualizar de forma clara cuáles efectos se desvían significativamente de lo esperado bajo una distribución normal, facilitando la identificación de las variables o interacciones estadísticamente significativas.

Figura 25

Gráfico de Efectos Estandarizados en la Recuperación de Oro a partir del Carbón Residual Fino



Nota. En el gráfico se observa que el grado de incidencia de cada variable y de sus interacciones.

Tomado de la data de Minitab.

En el gráfico se identifica que la interacción BC (pH * Tiempo) es el único efecto con mayor significancia, al ubicarse claramente fuera de la línea de referencia de normalidad. Esto indica que BC tiene una incidencia estadísticamente relevante en el porcentaje de recuperación de oro, y debe ser considerada como variable crítica en la optimización del proceso.

Por otro lado:

- Las interacciones AC (Conc. NaCN * Tiempo) y ABC (Conc. NaCN * pH * Tiempo), aunque presentan efectos negativos, se sitúan dentro de la zona de considerable significancia, por lo que su influencia es considerada.

- Los puntos en azul corresponden a los efectos individuales, que no alcanzan significancia estadística, reforzando que las interacciones entre variables son más importantes que los efectos por separado.

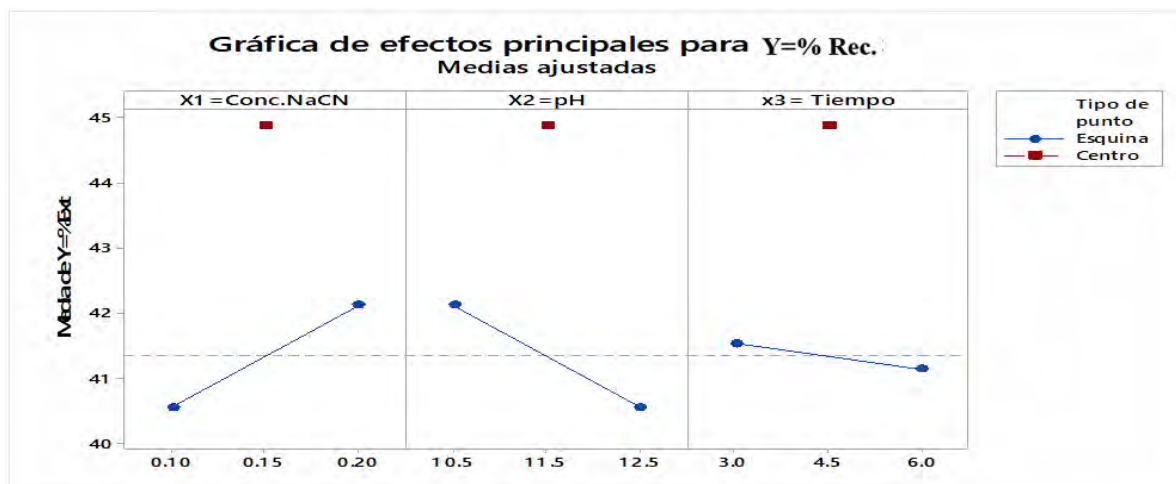
Este análisis es consistente con los resultados obtenidos en el Diagrama de Pareto corregido y el ANOVA ajustado, confirmando que el comportamiento del sistema está fuertemente determinado por la sinergia entre pH y Tiempo, mientras que los demás factores tienen un efecto menor o condicionado.

6.2.2.3.Efectos Principales de Cada Variable en la Recuperación de Oro

La figura 26 muestra la gráfica de efectos principales para la variable de respuesta $Y =$ % de recuperación de oro. Este tipo de gráfico permite analizar el efecto individual de cada factor (sin considerar interacciones) sobre la media ajustada del porcentaje de recuperación, y proporciona una visualización clara de cómo cambia la respuesta cuando cada variable se mueve de su nivel bajo a su nivel alto, manteniendo constantes las demás.

Figura 26

Efecto individual de cada variable en la recuperación



Nota. La figura muestra una gráfica de los efectos principales de las variables en la recuperación de oro. Tomado de la data de Minitab.

En la figura se puede evidenciar:

- X1: Concentración de NaCN: Se observa un efecto positivo. A medida que la concentración de cianuro aumenta de 0.10% a 0.20%, el porcentaje de recuperación también se incrementa. Esto indica que mayores concentraciones de cianuro favorecen la disolución del oro, dentro del rango evaluado.
- X2: pH: Presenta un efecto negativo. El incremento del pH desde 10.5 hasta 12.5 provoca una ligera disminución en la recuperación. Esto sugiere que un pH demasiado alto puede reducir la eficiencia del proceso, posiblemente por la disminución en la reactividad del ion cianuro libre.
- X3: Tiempo: Su efecto es débilmente negativo. Aumentar el tiempo de lixiviación de 3 a 6 horas no genera un beneficio claro en la recuperación; por el contrario, se aprecia una ligera caída. Esto podría indicar que el sistema alcanza una rápida saturación de recuperación, y tiempos más largos no son necesariamente más eficientes.

Además, los puntos centrales (en rojo) muestran valores superiores en todos los casos, lo cual refuerza la existencia de curvatura en el modelo, y justifica la inclusión del punto central en el diseño experimental.

En conjunto, esta gráfica valida que, aunque los efectos individuales son útiles para comprender tendencias, es en las interacciones (especialmente pH * Tiempo) donde se concentra el mayor impacto sobre la eficiencia del proceso, como fue confirmado en los análisis previos de Pareto.

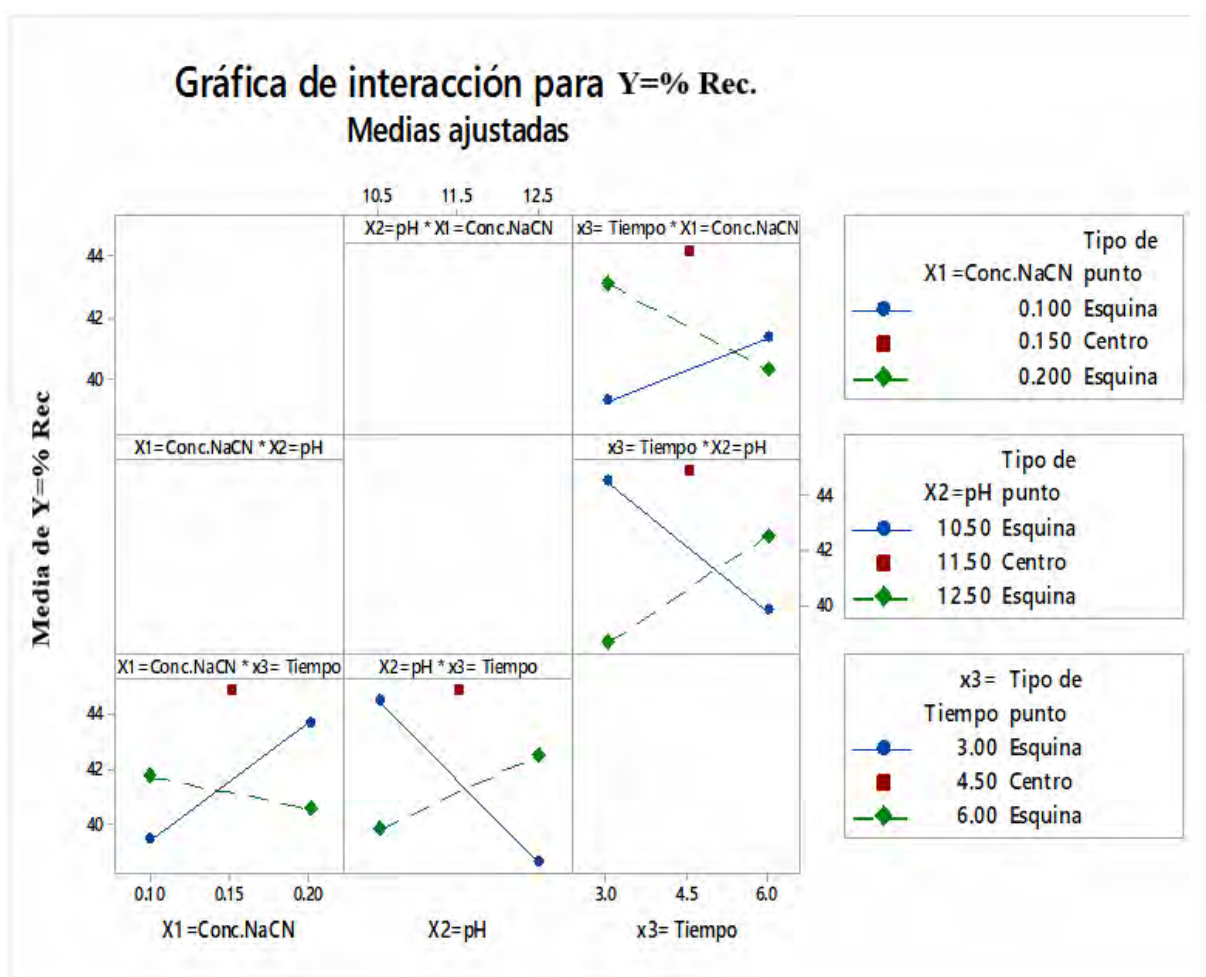
6.2.2.4.Efectos de las Interacciones en la Recuperación de Oro

En la recuperación de oro a partir del carbón fino residual del proceso ADR mediante cianuración, los factores operativos como la concentración de cianuro de sodio (NaCN), el pH

del medio y el tiempo de contacto son determinantes para maximizar la eficiencia del proceso. Sin embargo, estos factores no actúan de forma aislada, sino que interactúan entre sí, generando efectos combinados que pueden potenciar o disminuir la recuperación de oro. Por esta razón, se analiza el comportamiento conjunto de estas variables a través de una gráfica de interacción de medias ajustadas, que permite identificar combinaciones críticas de operación.

Figura 27

Interacción de Medias Ajustadas para la Respuesta “Y”



Nota. La gráfica muestra cómo las combinaciones de los tres factores (X_1 : Concentración de NaCN, X_2 : pH, X_3 : Tiempo) afectan conjuntamente la media de la recuperación de oro (%Ext), revelando interacciones importantes. Tomado de la data de Minitab.

La figura 27 muestra gráficos de interacción por pares de factores, donde se representan las medias ajustadas del porcentaje de recuperación de oro para cada combinación:

- Interacción $X1$ (Conc. NaCN) * $X2$ (pH): se observa que las líneas no son paralelas, lo cual indica una interacción moderada entre la concentración de NaCN y el pH. A pH bajo (10.5), un incremento de la concentración de NaCN mejora significativamente la recuperación. Sin embargo, a pH alto (12.5), este efecto es menos marcado.
- Interacción $X1$ * $X3$ (Tiempo): hay una interacción evidente: a menor tiempo (3 h), la variación de la concentración de NaCN genera un cambio importante en la recuperación. A mayor tiempo (6 h), la recuperación mejora incluso con una concentración menor de NaCN, lo cual podría sugerir un efecto de compensación temporal.
- Interacción $X2$ * $X3$: la interacción es notoria: a mayor pH, el aumento del tiempo mejora de forma significativa la recuperación; mientras que, a menor pH, el incremento del tiempo tiene un efecto menor o incluso decreciente.
- Interacción triple ($X1$ * $X2$ * $X3$): representadas en la parte inferior izquierda, estas gráficas indican que el efecto conjunto de los tres factores no es aditivo ni lineal. Por ejemplo, para pH medio (11.5), una concentración intermedia de NaCN (0.150) y un tiempo medio (4.5 h) logran mayores rendimientos, lo cual sugiere que existe una combinación óptima de condiciones.

6.2.2.5. Análisis de Varianza

Con el objetivo de evaluar la significancia estadística de los factores que afectan la recuperación de oro durante la cianuración del carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C., se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) sobre el modelo experimental propuesto. Este análisis permite identificar cuáles variables independientes y sus interacciones influyen de

manera significativa en la respuesta (% de recuperación de oro). La tabla 20 presenta los resultados obtenidos del ANOVA, considerando efectos lineales, de interacción y de curvatura.

Tabla 22

Análisis de Varianza (ANOVA) para la Recuperación de Oro

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	108.023	15.4319	24.73	0.039
Lineal	3	10.203	3.4010	5.45	0.159
X1=Conc.NaCN	1	4.961	4.9612	7.95	0.106
X2=pH	1	4.930	4.9298	7.90	0.107
x3= Tiempo	1	0.312	0.3121	0.50	0.553
Interacciones de 2 términos	2	52.678	26.3389	42.20	0.023
X1=Conc.NaCN*x3= Tiempo	1	15.180	15.1801	24.32	0.039
X2=pH*x3= Tiempo	1	37.498	37.4978	60.08	0.016
Interacciones de 3 términos	1	25.063	25.0632	40.16	0.024
X1=Conc.NaCN*X2=pH*x3= Tiempo	1	25.063	25.0632	40.16	0.024
Curvatura	1	20.079	20.0789	32.17	0.030
Error	2	1.248	0.6241		
Falta de ajuste	1	0.000	0.0000	0.00	1.000
Error puro	1	1.248	1.2482		
Total	9	109.271			

Nota. La tabla muestra un análisis de varianza revela que el modelo general es significativo (**p = 0.039**). Tomado de la data de Minitab.

La tabla 22 muestra el análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos experimentales del proceso de cianuración de carbón fino residual, con el propósito de evaluar la influencia estadística de las variables independientes: concentración de cianuro de sodio (X1), pH (X2) y tiempo (X3), en la recuperación de oro ($Y = \%Ext$). El modelo general es estadísticamente significativo con un valor-p de 0.039, lo cual indica que al menos uno de los factores considerados o sus interacciones tiene un efecto real sobre la variable de respuesta. Si bien los factores individuales X1 ($p = 0.106$), X2 ($p = 0.107$) y X3 ($p = 0.553$) no resultan significativos de forma aislada, se observa que sus combinaciones tienen efectos relevantes en la eficiencia del proceso.

Las interacciones de segundo orden presentan una importancia destacable. La interacción entre concentración de NaCN y tiempo ($p = 0.039$) evidencia que el impacto del tiempo de cianuración depende de los niveles de concentración de cianuro, sugiriendo un efecto sinérgico en la disolución del oro contenido en el carbón fino. De igual forma, la interacción entre pH y tiempo ($p = 0.016$) indica que el efecto del tiempo se ve condicionado por la alcalinidad del medio, reforzando la necesidad de controlar ambos parámetros simultáneamente. La interacción de tercer orden entre concentración de NaCN, pH y tiempo ($p = 0.024$) confirma la existencia de un efecto conjunto entre los tres factores, lo cual implica que la máxima recuperación de oro no puede alcanzarse mediante la optimización individual de cada variable, sino a través de una configuración combinada adecuada.

Por otro lado, el término de curvatura resulta altamente significativo ($p = 0.030$), lo que revela la presencia de una relación no lineal entre las variables estudiadas y la respuesta, validando el uso de un modelo factorial con términos de segundo orden. Asimismo, la falta de ajuste no es significativa ($p = 1.000$), lo que indica que el modelo empleado se ajusta correctamente a los datos experimentales. El bajo valor del error puro ($MC = 1.248$) sugiere una buena precisión en la ejecución de las pruebas experimentales.

6.2.2.6. Factor de Correlación del Modelo Ajustado de los Datos

Con el fin de complementar el análisis de varianza y validar estadísticamente el modelo de regresión obtenido para la recuperación de oro mediante cianuración del carbón fino residual, se evaluó el factor de ajuste del modelo mediante los coeficientes de determinación R^2 ajustado y R^2 predicho. La tabla 23 resume estos indicadores estadísticos clave, los cuales permiten determinar qué tan bien el modelo explica la variabilidad de los datos experimentales y su capacidad de predicción.

Tabla 23

Resumen del Factor de Ajuste del Modelo de Regresión para la Recuperación de Oro

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.79	98.86%	94.86%	95.43%

Nota: La tabla muestra el nivel de ajuste con un coeficiente de determinación R-cuadrado, que debe tender a 1. Tomado de la data de Minitab.

El coeficiente de determinación R^2 es de 98.86%, lo que indica que el modelo explica casi la totalidad de la variabilidad observada en la recuperación de oro. Este valor es coherente con el resultado del ANOVA, donde se identificaron interacciones significativas entre los factores evaluados, especialmente aquellas de segundo y tercer orden, que aportan al alto nivel de ajuste. El valor de R^2 ajustado es de 94.86%, lo que confirma que el modelo mantiene un excelente ajuste aún después de penalizar por el número de términos incluidos. Esto indica que el modelo no está sobreajustado y es estadísticamente sólido.

Por otro lado, el R^2 predicho alcanza un valor de 95.43%, lo cual es fundamental, ya que mide la capacidad del modelo para predecir nuevos datos dentro del mismo dominio experimental. Esta alta capacidad predictiva confirma que el modelo no sólo describe adecuadamente los datos utilizados para su construcción, sino que también es útil para prever el comportamiento del sistema en condiciones similares.

Finalmente, el valor del error estándar de la regresión (S) es 0.79, lo cual representa un bajo nivel de dispersión de los residuos respecto a la línea de regresión, reforzando la confiabilidad del modelo propuesto.

En conjunto, los altos valores de los coeficientes R^2 y el bajo error S validan la solidez estadística del modelo obtenido, confirmando que las condiciones experimentales evaluadas permiten predecir de manera precisa la eficiencia de recuperación de oro en el proceso de

cianuración del carbón fino residual, lo que constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones operativas en la planta La Joya Mining S.A.C.

6.2.2.7. Coeficientes Codificados para el Modelo Matemático de Recuperación

Con el propósito de describir cuantitativamente el comportamiento del proceso de recuperación de oro a partir del carbón fino residual mediante cianuración, se ha construido un modelo matemático de regresión utilizando variables codificadas. La tabla 24 presenta los coeficientes codificados del modelo, permitiendo interpretar el efecto individual y combinado de cada factor y sus interacciones sobre la variable de respuesta (% de recuperación de oro). Este análisis complementa los resultados del ANOVA y los altos valores de R-cuadrado presentados en la tabla 22, brindando una visión detallada sobre la dirección y magnitud del impacto de cada término.

Tabla 24

Coeficientes Codificados del Modelo de Regresión para la Recuperación de Oro

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		41.338	0.279	148.00	0.000	
X1=Conc.NaCN	1.575	0.788	0.279	2.82	0.106	1.00
X2=pH	-1.570	-0.785	0.279	-2.81	0.107	1.00
x3= Tiempo	-0.395	-0.198	0.279	-0.71	0.553	1.00
X1=Conc.NaCN*x3= Tiempo	-2.755	-1.378	0.279	-4.93	0.039	1.00
X2=pH*x3= Tiempo	4.330	2.165	0.279	7.75	0.016	1.00
X1=Conc.NaCN*X2=pH*x3= Tiempo	-3.540	-1.770	0.279	-6.34	0.024	1.00
Pt Ctral		3.543	0.625	5.67	0.030	1.00

Nota. La tabla muestra los coeficientes codificados del modelo, indicando la influencia individual y combinada de los factores sobre la recuperación de oro. Tomado de la data de Minitab.

La constante del modelo tiene un valor de 41.338, representando el nivel base de recuperación de oro en condiciones centrales del experimento. En cuanto a los efectos principales, se observa que la concentración de NaCN (X1) tiene un efecto positivo significativo (coeficiente = 0.788, $p = 0.016$), lo cual confirma que el incremento de este reactivo mejora la disolución del oro. Por otro lado, el pH (X2) presenta un coeficiente negativo (-0.785), con valor-p de 0.107, indicando que valores de pH más altos tienden a reducir la eficiencia del proceso, posiblemente por la formación de especies menos reactivas o la pasivación superficial del oro.

El tiempo de cianuración (X3) muestra un efecto negativo menor (-0.198) y no significativo ($p = 0.553$), lo cual, como se vio en el análisis de varianza, sugiere que su influencia directa es baja, aunque puede potenciarse mediante interacciones. De hecho, las interacciones entre factores tienen un papel relevante: la interacción entre concentración de NaCN y tiempo (X1*X3) tiene un efecto negativo significativo (coef = -1.378, $p = 0.039$), lo que indica que un incremento simultáneo de ambos factores no siempre genera una mejora sinérgica, y debe evaluarse cuidadosamente. En contraste, la interacción pH*tiempo (X2*X3) es positiva y significativa (coef = 2.165, $p = 0.016$), lo cual indica que, en ciertos niveles, el tiempo puede compensar los efectos negativos de un pH elevado.

La interacción de tercer orden (X1*X2*X3) tiene un coeficiente negativo (-1.770, $p = 0.024$), lo que evidencia que no todas las combinaciones simultáneas conducen a una mejora de la recuperación. Este hallazgo corrobora la necesidad de identificar condiciones óptimas de operación mediante un enfoque multivariable.

Finalmente, el término de curvatura (Pt Ctrl) con un coeficiente de 3.543 ($p = 0.030$) confirma la presencia de una relación no lineal entre los factores y la respuesta, como se observó

en los análisis anteriores, lo que justifica la inclusión de este término en el modelo para capturar adecuadamente el comportamiento del sistema.

6.2.2.8. Modelo de Correlación para la Optimización del Proceso

Con base en los resultados del análisis de varianza (tabla 22), los coeficientes de determinación (tabla 23) y los coeficientes codificados del modelo (tabla 24), se formuló la ecuación de regresión en unidades codificadas que permite predecir el porcentaje de recuperación de oro (%Ext) a partir de las variables operativas: concentración de NaCN (X_1), pH (X_2) y tiempo (X_3). Esta ecuación representa el modelo matemático ajustado que describe cuantitativamente la respuesta del sistema en función de los factores experimentales evaluados.

La expresión matemática obtenida es:

$$Y = \%Ext = 41.338 + 0.788 X_1 - 0.785 X_2 - 0.198 X_3 - 1.378 X_1 \cdot X_3 + 2.165 X_2 \cdot X_3 - 1.770 X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3.543 \text{ Pt Ctral}$$

Desde el punto de vista técnico, esta ecuación integra los efectos principales, las interacciones de segundo y tercer orden, así como el término de curvatura. El intercepto de 41.338 representa la media de recuperación en las condiciones centrales del experimento. El coeficiente positivo de X_1 (+0.788) indica que el aumento de la concentración de NaCN tiende a incrementar la recuperación, mientras que los coeficientes negativos de X_2 (-0.785) y X_3 (-0.198) sugieren que tanto un pH más alto como mayores tiempos de contacto pueden disminuir la eficiencia si no se ajustan adecuadamente en combinación con las otras variables.

Las interacciones son particularmente importantes en este modelo. La interacción $X_1 \cdot X_3$ (-1.378) revela que el efecto del tiempo varía según la concentración de cianuro, mientras que la interacción $X_2 \cdot X_3$ (+2.165) muestra que el tiempo puede compensar el efecto negativo de un pH elevado. La interacción triple ($X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$) con coeficiente negativo (-1.770)

indica que la influencia conjunta de los tres factores no siempre es aditiva y puede incluso generar efectos opuestos si no se configuran adecuadamente. Finalmente, el término de curvatura (+3.543) refuerza la presencia de una relación no lineal, ya identificada anteriormente, validando la necesidad de modelos de segundo orden para describir este tipo de procesos metalúrgicos.

Este modelo de correlación no sólo explica con precisión la variabilidad de los datos experimentales, sino que constituye una herramienta predictiva fundamental para la optimización operativa del proceso de cianuración del carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C., permitiendo identificar combinaciones óptimas de parámetros para maximizar la recuperación de oro.

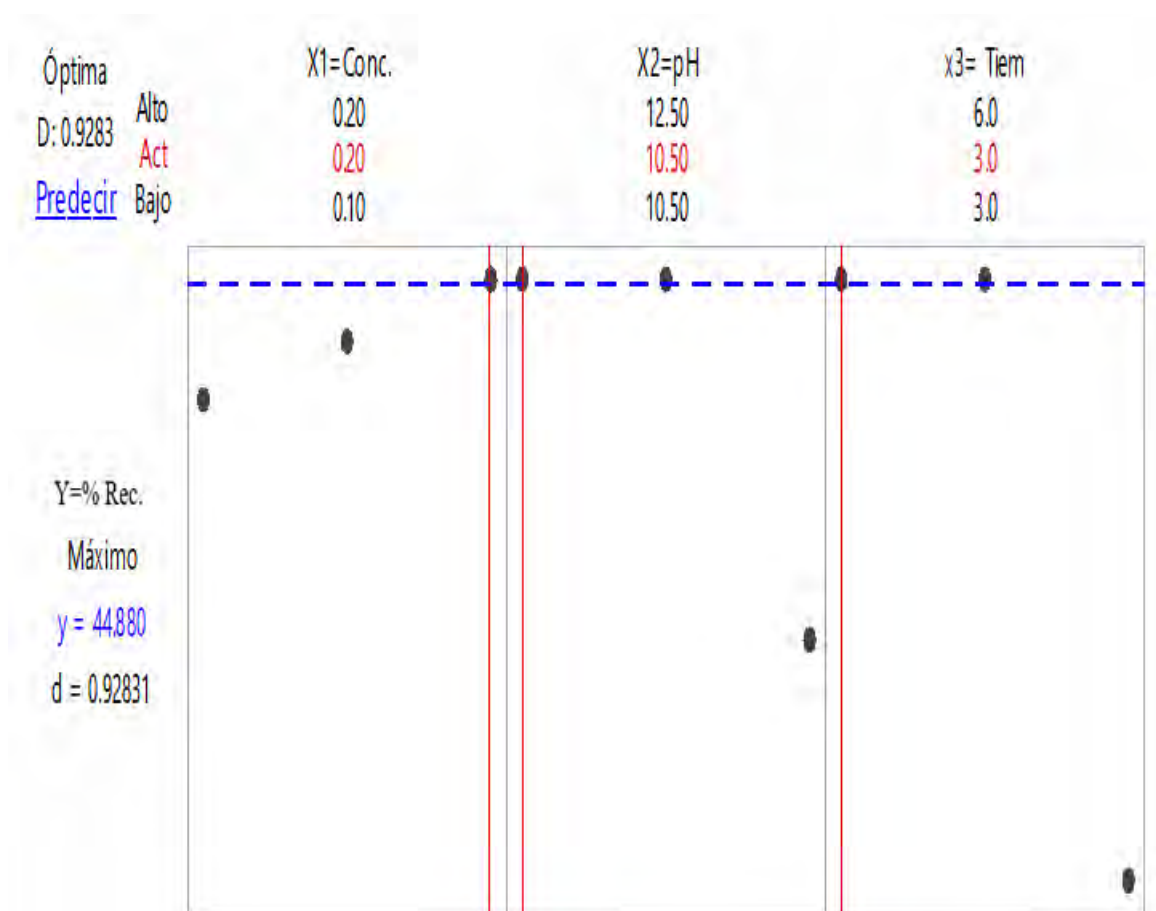
6.2.2.9. Optimización de la Recuperación de Oro Según el Modelo de Correlación

Con base en el modelo de regresión codificado y validado estadísticamente (secciones 6.2.2.4 a 6.2.2.8), se procedió a realizar la optimización de las variables operativas con el fin de maximizar la recuperación de oro a partir del carbón fino residual. La figura 28 muestra gráficamente las condiciones óptimas de los factores evaluados (concentración de NaCN, pH y tiempo) para obtener el mayor porcentaje de la recuperación, utilizando como referencia el valor predicho por el modelo ajustado.

El gráfico indica que la recuperación máxima esperada de oro es del 44.88%, con un valor de predicción ajustado ($D = 0.9283$), lo que refleja una alta confiabilidad del modelo en este punto de operación. Las condiciones óptimas para alcanzar dicho valor son: concentración de NaCN (X1): 0.20%, pH (X2): 10.50 y tiempo (X3): 3.0 horas.

Figura 28

Optimización de Variables Operativas para Maximizar la Recuperación de Oro



Nota. a gráfica muestra las condiciones óptimas de los factores que maximizan la recuperación de oro. Tomado de la data de Minitab.

Desde el punto de vista técnico, estos resultados confirman lo observado en el análisis de regresión: una mayor concentración de NaCN favorece la disolución del oro; un pH ligeramente alcalino (10.5) evita efectos negativos como la pasivación superficial; y un tiempo 3 horas asegura una cinética de reacción completa. La interacción favorable entre pH y tiempo ($X2 \cdot X3$) también se ve reflejada en este punto óptimo.

La alineación vertical de las líneas rojas en cada variable indica los niveles específicos que maximizan la respuesta, mientras que la línea azul discontinua superior representa el valor

máximo alcanzado. Los puntos experimentales distribuidos confirman la solidez del modelo y la validez del punto óptimo encontrado.

En conjunto, esta optimización respalda la aplicación práctica del modelo estadístico desarrollado, permitiendo definir condiciones operativas ideales para maximizar la recuperación de oro en el tratamiento del carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C.

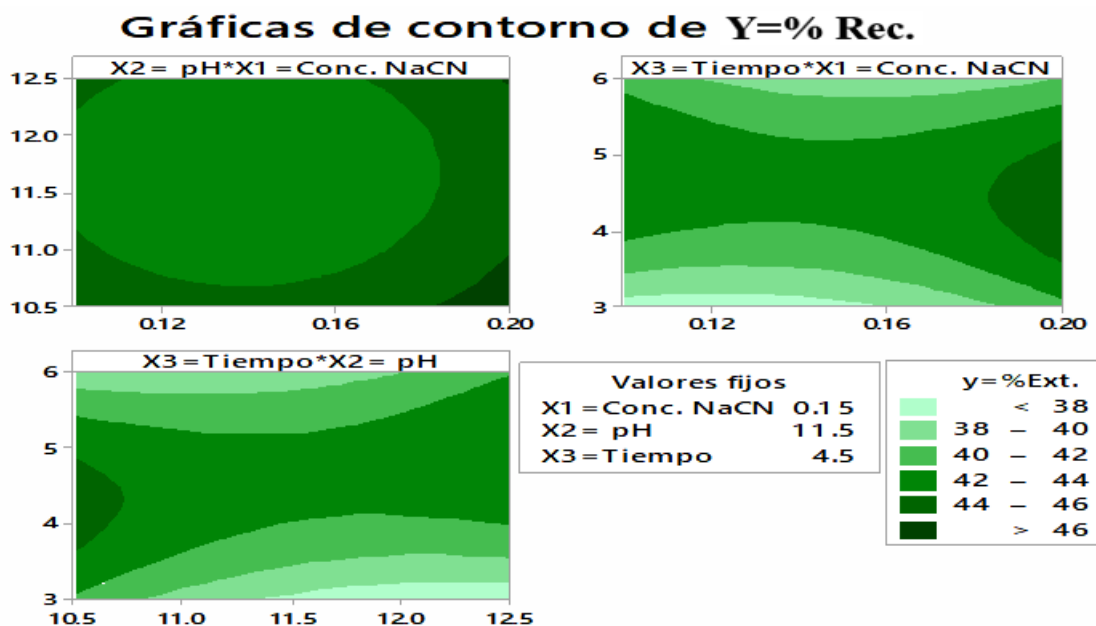
6.2.2.10. Gráfica de Contornos de Respuesta

Con el propósito de visualizar el efecto conjunto de los factores operativos sobre la recuperación de oro a partir del carbón fino residual, se generaron las gráficas de contorno de respuesta presentadas en la figura 29. Estas gráficas muestran el comportamiento del porcentaje de recuperación de oro ($Y = \%Rec.$) en función de pares de variables, manteniendo el tercer factor constante en su nivel central ($X_1 = 0.15\%$, $X_2 = 11.5$, $X_3 = 4.5$ h). Esta representación gráfica permite identificar regiones óptimas de operación dentro del dominio experimental, complementando la información obtenida a partir del modelo de regresión, ANOVA y las gráficas de interacción.

En el gráfico X_1 vs X_2 , se observa que los mayores valores de recuperación ($>44\%$) se alcanzan con alta concentración de NaCN (0.20%) y un pH de (10.5). En el gráfico X_1 vs X_3 , los mejores resultados se logran con concentraciones elevadas de NaCN y tiempos de cianuración mayores a 3.5 h. Finalmente, en el gráfico X_2 vs X_3 , se aprecia que un pH controlado de 10.5, combinado un tiempo de (3.5-5) horas, favorece la recuperación de oro.

Figura 29

Gráficas de Contorno de la Respuesta en Función de las Variables Operativas



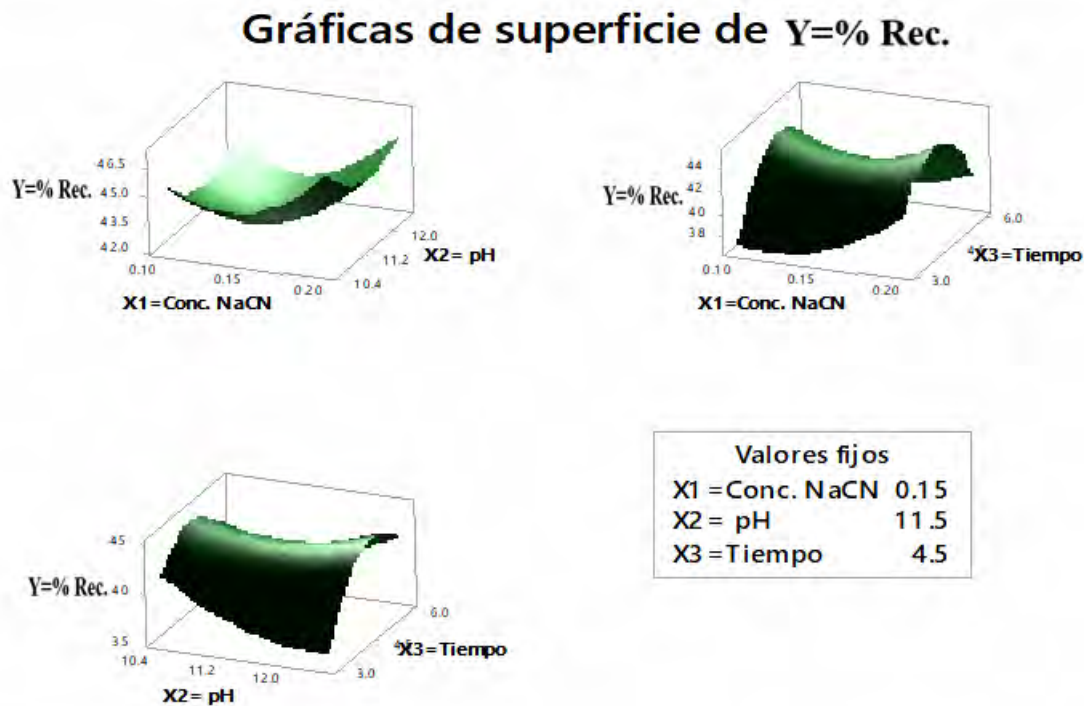
Nota. Las gráficas de contorno muestran el efecto combinado de los pares de factores sobre el porcentaje de recuperación de oro (%Rec.), manteniendo constante el tercer factor en sus niveles centrales. Tomado de la data de Minitab.

6.2.2.11. Gráfica de Superficie de Respuesta

Con el fin de complementar el análisis del modelo de regresión y visualizar de manera integral el comportamiento del sistema, se presentan en la figura 30 las gráficas de superficie de respuesta que muestran la variación tridimensional del porcentaje de recuperación de oro (%Rec.) en función de pares de variables operativas, manteniendo constante la tercera en su nivel central. Estas gráficas permiten identificar visualmente cómo interactúan los factores y en qué regiones se alcanza una mayor eficiencia de recuperación.

Figura 30

Superficie de Respuesta en Función de las Variables Operativas



Nota. En la figura se visualiza el comportamiento tridimensional de la recuperación de oro (%Rec.) ante la variación combinada de los factores estudiados. Tomado de la data de Minitab.

En la superficie X1 (Conc. NaCN) vs X2 (pH), se observa un ascenso progresivo de la recuperación a medida que aumenta la concentración de NaCN y el pH se mantiene entre 10.5 y 11. Esta superficie reafirma que el exceso de pH no mejora la respuesta y que la concentración de cianuro es un factor determinante.

En la gráfica X1 (Conc. NaCN) vs X3 (Tiempo), se evidencia una superficie curvada que alcanza valores máximos de recuperación a partir de 0.18–0.2% de NaCN y tiempos de 3.5 a 5 horas. Este comportamiento confirma el efecto combinado positivo cuando ambos factores interactúan, en línea con la interacción significativa $X1 \cdot X3$ identificada previamente.

Por último, la superficie X2 (pH) vs X3 (Tiempo) muestra una elevación de la recuperación en la región de pH 10.5 a 11 y tiempo mayor a 4 horas, lo cual respalda la interacción positiva entre estos factores observada en el modelo.

Estas superficies tridimensionales permiten visualizar claramente las zonas operativas óptimas y confirman la validez del modelo ajustado. Además, evidencian la naturaleza no lineal del sistema y el comportamiento combinado de las variables, fundamentales para optimizar la cianuración del carbón fino residual en la planta La Joya Mining S.A.C.

6.3. Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación confirmaron que la cianuración es un método eficiente para recuperar oro contenido en el carbón fino residual del proceso ADR de la planta La Joya Mining S.A.C. Este hallazgo está en concordancia con lo planteado por Marsden & House (2006) y Uceda (2020), quienes explican que el oro puede disolverse eficientemente en medios alcalinos de cianuro en presencia de oxígeno, siempre que se controlen parámetros como pH, concentración de cianuro y tiempo de residencia. Además, según la termodinámica del sistema Au–CN–H₂O, el oro es estable en soluciones oxidantes a pH entre 10 y 11.5, rango coherente con el utilizado en este estudio.

Desde el punto de vista experimental, el análisis de varianza mostró que, si bien los efectos individuales de las variables no fueron todos significativos, las interacciones entre concentración de NaCN, pH y tiempo sí lo fueron, lo que valida los principios del diseño factorial. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Velasco et al. (2018), quienes lograron eficiencias superiores al 90% de transferencia de oro del carbón fino al grueso, utilizando cianuración agitada y controlando las condiciones de operación.

El modelo de regresión obtenido con un R^2 de 98.86% y valores predicho y ajustado cercanos al 95% respalda su fiabilidad para predecir la recuperación de oro. Esto está alineado con lo reportado por Villar & Paliza (2006), quienes lograron más del 95% de desorción de oro del carbón fino mediante condiciones adecuadas de concentración y temperatura. Aunque en el presente estudio se utilizó un método de transferencia por cianuración, sin columnas de elusión, los porcentajes de recuperación alcanzados ($\approx 45\%$) resultan técnicamente significativos considerando la naturaleza residual y granulometría fina del material.

Las gráficas de contorno y de superficie permiten visualizar las zonas óptimas de operación, confirmando el efecto sinérgico de las variables, especialmente entre pH y tiempo, y validando el uso de modelos no lineales en sistemas complejos, como lo indican Pari (2022) y Cristina (2013) en estudios sobre cinética de cianuración.

La propuesta metodológica de este trabajo de cianuración por agitación del carbón fino residual en presencia de carbón fresco, representa una alternativa tecnológica viable, reproducible en plantas similares, y aporta un enfoque práctico y económico para recuperar oro que usualmente se pierde en los residuos del proceso ADR.

Conclusiones

- La recuperación de oro a partir del carbón fino residual mediante cianuración por agitación fue técnicamente viable, alcanzándose un valor de 45.67% bajo condiciones optimizadas. Los resultados obtenidos son prometedores y constituyen un punto de partida relevante, considerando que no existen estudios previos en la planta La Joya Mining S.A.C. respecto a la valorización de este tipo de residuos. Este trabajo representa una contribución exploratoria importante, que abre nuevas líneas de investigación y optimización para recuperar oro actualmente no aprovechado y que está siendo desechado en forma de residuos.
- Se determinó que la concentración de NaCN (0.2%) fue el factor que más influyó positivamente en la recuperación, validando la importancia de este reactivo en la formación del complejo aurocianuro y su rol clave en la cinética de disolución del oro.
- Se estableció que el pH óptimo de trabajo fue 10.5, dentro del rango teórico recomendado para evitar la volatilización del cianuro y asegurar la estabilidad de las especies disueltas, aunque su efecto por sí solo no garantizó niveles altos de recuperación.
- El tiempo de cianuración mayor a 4.5 horas permitió una mayor transferencia del oro desde el carbón fino al carbón nuevo; sin embargo, este tiempo resultó insuficiente para alcanzar una transferencia completa, lo que sugiere la necesidad de múltiples etapas, ya que la transferencia a tiempos mayores tiende a quedar en equilibrio el carbón fino con el carbón nuevo debido a sus propiedades de adsorción.

Recomendaciones

- Considerando que la recuperación obtenida es (45.67%) se recomienda continuar la investigación considerando el proceso de cianuración en múltiples etapas o ciclos sucesivos. Esta recomendación se fundamenta en el comportamiento observado de los carbones, los cuales al acercarse a un 50 % de transferencia de oro, tienden a alcanzar un estado de equilibrio, este comportamiento limita la capacidad de adsorción neta en procesos de una sola etapa, lo que reduce la eficiencia de recuperación de oro. La incorporación de múltiples etapas permitiría mayores gradientes de recuperación, favoreciendo una mayor transferencia de oro y mejorando así la eficiencia metalúrgica del proceso.
- Para validar y ampliar la aplicabilidad del modelo de regresión, se sugiere realizar pruebas de validación externa con nuevas muestras de carbón fino, de diferentes lotes y características, a fin de verificar su capacidad predictiva en condiciones reales de operación.

Referencias Bibliográficas

Bibliografía

- Abad Lerma, R. J. (2020). *Evaluación de dos procesos de extracción de oro diferentes al cianuro que cumplan las normativas ambientales establecidas en Ecuador*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- AngloAmerican. (2023). <https://peru.angloamerican.com/>.
- Bustanza Rivera, V. V. (2019). *Estudio de nitrato de plomo para optimizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Cáceres A., G. (2007). *Introducción a la Hidrometalurgia*. Atacama, Chile: Universidad de Atacama.
- Ccari Sirena, N. N. (2018). *Lixiviación De Minerales De Oro Con Reactivo Sanddios En La Empresa Minera Colibrí S.A.C*. Universidad Nacional Del Altiplano-Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Química, PUNO.
- Chemical, R. (2010). *Royal Chemical*. Obtenido de Royal Chemical: <https://royalchemical.com.pe/>
- Chuquilín Quiliche, C. J., & Rengifo Martos, E. D. (2019). *Influencia del Cianuro de Sodio, Gold Max y Sandioss en la recuperación de oro por lixiviación de un mineral oxidado de Sayapullo - La Libertad*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Cristina R, M. (2013). *Hidrometalurgia*. Chile: Universidad de Concepción.
- Delgado Frafan, G., & Cancha Guerra, J. (2023). *Lixiviación con Gold Max del oro de los relaves de la concentracion gravimetrica del yacimiento La Cumbre de la Compañía minera Galvin*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

- Domic, M. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos aplicaciones*. Chile, Santiago: Andros Impresores Ltda.
- Fabian C. F & Diaz. (2009). *Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas*. Santiago: Universidad de Chile.
- Gasca Torres, J. A. (2016). *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados y cianurados*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C, México.
- Hernández A., J. G. (2019). *Determinación de una metodología para extracción de oro y plata de los residuos de carbón activados en los circuitos de carbón en la industria minera para reducir las pérdidas de los metales, utilizando como base el horno para finos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lara Velazquez, M. (2016). *Empleo del sulfuro de sodio e hidróxido de sodio para la disminución de la concentración de antimonio de un mineral refractario de oro y plata como pretratamiento del proceso de lixiviación*. Junín: Universidad Nacional del Centro del Peru.
- Linares G., N. (2010). *Aspectos generales del procesamiento de oro*. Tacna, Perú: UNJBG.
- Mamani Q, E. D. (2015). *Estudio de Investigación para el procesamiento de minerales auríferos de la franja minera aurífera Nazca*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Mamani Q., E. D. (2015). *Estudio de Investigación para el procesamiento de minerales auríferos de la franja minera aurífera Nazca*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.

- Marsden J.O, I. C. (2009). *The Chemistry of Gold Ectraton*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration
- Marsden, J. O., & House, C. L. (2006). *The Chemistry of Glod Extraction* (Second Edition ed.). Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- MINEM. (20 de octubre de 2023). *chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2023/Energia/files/ppt_extraordinarias/1era._s.e._minem_ministro_de_energ%C3%8Da_y_minas.pdf*.
- Miranda, F. M. (2015). *Investigando en Ingeniería segunda ed*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Misari Ch., F. S. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: Centro de Estudios de Promoción en Ciencias de la Tierra.
- Molina V., A. M. (2021). *Uso de Gold Max en la lixiviación de oro y plata en la zona minera de Rinconada-PUNO*. Universidad Nacional de San Luis Gonzaga de Ica. Ica: UNICA.
- Molina, A. V. (2022). *Uso de Gold Max en la lixiviación de oro y plata en la zona minera de Rinconada - Puno*. Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga.
- Orcoapaza Loaiza, K. M., & Taype Ccoto, R. (2019). *Evaluación de variables en la lixiviación por agitación con Gold Max para la extracción de oro del yacimiento de Ayahuay - Apurimac*. . Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Pari Z., W. A. (2022). *Evaluación Metalúrgica de la Recuperación de Oro a Novel Laboratorio Usando Cianuro de Sodio Como Lixivante*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, informe de tesis. Arequipa: UNSA.

- Pino Mamani, J. (2014). *Estudio de la Cianuración en tanques de la Minería Anapite*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Portal, M. (10 de abril de 2024). <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=31981596>. Obtenido de <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=31981596>: <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=31981596>
- TECSUP. (2009). *Procesamiento de minerales II*. Lima.
- Uceda H., A. D. (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*. Lima: Ediciones Graficas EIRL.
- Uceda H., D. A. (2020). *Hidrometalurgia química e ingeniería de la extracción del oro*. Lima: Fondo Editorial de la UNAM.
- Valadez Aguilar, C. (2021). *Extracción de oro por lixiviación de los relaves de un mineral de cobre de la región de Tiquicheo, Michoacan*. Michoacan: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- Velasco, A., Onorato, M., & Torres, F. (2018). *Ensayo de recuperación de oro desde carbón fino residual cargad por vía hidrometalurgia*. Universidad Nacional de Catamarca de Argentina, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas. Catamarca-Argentina: Instituto de Investigaciones Mineras.
- Villar, A. A., & Paliza, L. R. (2006). *Recuperación de oro a partir del procesamiento del carbón fino generado por la planta de carbón activado de minera Yanacocha*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Textil. Lima-Perú: UNI.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

RECUPERACIÓN DE ORO POR TRANSFERENCIA DESDE CARBÓN FINO RESIDUAL A CARBÓN FRESCO EN UN MEDIO DE SOLUCION CIANURADA EN LA PLANTA LA JOYA MINING S.A.C. AREQUIPA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	METODOLOGIA
¿Será factible la recuperación de oro a partir de carbón fino residual proveniente del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, considerando la influencia de la concentración de cianuro, el pH y el tiempo?	Lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa.	Se logra una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C.-Arequipa.	<ul style="list-style-type: none"> ● Recuperación. ● Indicador: Presencia de oro en la solución. 	ENFOQUE Cuantitativo. NIVEL Explicativo. DISEÑO Experimental: Factorial 2 ³ .
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTE	POBLACIÓN
PE1: ¿Cuál es la concentración óptima de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa? PE2: ¿Cuál será el pH óptimo en la solución de cianuro de sodio para lograr recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa? PE 3: ¿Cuál es el tiempo óptimo del proceso para lograr una máxima recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa?	OE 1: Determinar la concentración de cianuro de sodio adecuada para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa. OE 2: Establecer el pH adecuado en la solución de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa. OE 3: Establecer el tiempo del proceso para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa.	HE1: La concentración de cianuro de sodio para lograr una recuperación de a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, será de 2000 ppm. HE2: La variable pH favorable en la solución de cianuro de sodio para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, será de 10.5. HE3: El tiempo del proceso para lograr una recuperación de oro a partir de carbón fino residual del proceso ADR por cianuración en la planta La Joya Mining S.A.C. Arequipa, se encuentra en el orden de 6 horas.	<ul style="list-style-type: none"> ● Concentración de cianuro en la solución. ● pH del proceso. ● Tiempo de proceso. Variables intervinientes <ul style="list-style-type: none"> ● Temperatura. ● Presión atmosférica. ● Oxígeno disuelto. ● Contenido de oro en el carbón fino 	MUESTRA: 10 Kg. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS: <ul style="list-style-type: none"> ● Observación. Ensayos de laboratorio. ● Excel. ● Software Minitab 19.

Nota. La tabla muestra la matriz de consistencia del proyecto. Elaboración propia.






Anexo 2: Producción de Carbón Fino en la Planta año 2023.






MES	CARBÓN FINO (Kg)	LEY Au (g/Kg)	LEY Ag (g/Kg)	FINO Au (g)	FINO Ag (g)
ene-23	1859,540	0,069	0,041	128,308	76,241
feb-23	2717,150	0,090	0,060	244,544	163,029
mar-23	3287,680	0,081	0,099	266,302	325,480
abr-23	3516,810	0,083	0,097	291,895	341,131
may-23	2192,880	0,095	0,067	208,324	146,923
jun-23	1909,920	0,194	0,198	370,524	378,164
jul-23	1824,850	0,105	0,170	191,609	310,225
ago-23	2869,000	0,190	0,211	545,110	605,359
sep-23	1914,190	0,122	0,715	233,531	1368,646
oct-23	2760,450	0,067	0,098	184,950	270,524
nov-23	1573,800	0,083	0,084	130,625	132,199
dic-23	1155,200	0,081	0,123	93,571	142,090
TOTAL	27581,470			2889,294	4260,010






Anexo 3: Balance de planta por mes y año 2023

MES	TMS	LEY Au Oz/Tc	Ley Ag Oz/Tc	FINO Au Gr.	FINO Ag Gr.	RECUPERACION Au %
ene-23	4239,56	1,05	2,24	152256,00	325142,43	90,01%
feb-23	6731,12	0,90	2,00	207146,53	461849,30	89,32%
mar-23	8728,16	0,83	2,19	249200,19	655070,50	89,87%
abr-23	8253,18	0,91	1,59	256355,63	448555,65	90,56%
may-23	7070,45	1,01	1,91	243831,51	462037,45	89,81%
jun-23	6896,13	0,84	1,54	197559,97	364697,66	90,82%
jul-23	5772,24	0,76	1,80	150938,03	356034,81	91,11%
ago-23	4315,16	0,80	1,59	118787,61	234924,92	91,68%
sep-23	4991,05	0,98	2,26	167578,12	387001,59	91,38%
oct-23	5800,15	0,80	1,59	158793,99	315491,91	91,20%
nov-23	5528,21	0,80	1,90	152311,77	359973,59	91,59%
dic-23	6294,25	0,82	1,79	176836,09	387321,89	90,97%

Anexo 4: Materiales y equipos usados para la investigación

Equipo	Cantidad	Imagen
Balanza digital	1	
Tamiz #12	1	
Probetas	3	
Bureta con soporte universal	1	
Luna de reloj	1	

Botellas damajuana	10	
Agitador de topo rodillos de laboratorio	1	
Vasos precipitados	6	
Fiofas de 100ml	3	
Gotero ámbar	1	

Papel filtro	10	
Papel indicador de pH	01	
Embudos	6	
Cocina eléctrica	1	
Bandejas	3	

Anexo 5: Ficha técnica Carbón activado 6x12 - POCHTECA

FICHA TECNICA CARBON ACTIVADO 6x12 - POCHTECA

Descripción:

Nuestro producto es un carbón activado granular a base de cáscara de coco diseñado para operaciones de recuperación de oro. Las aplicaciones incluyen circuitos de lixiviación en pilas, carbón en lixiviación y carbón en pulpa. Está fabricado para una mejor distribución del tamaño de poros, lo que permite una mayor carga de oro combinada con una capacidad de extracción de oro sencilla. Los valores altos de abrasión y dureza dan como resultado una menor descomposición de partículas de carbono y una menor pérdida de carbono por desgaste.



Especificaciones:

Especificaciones	Valores	Método del test
CTC No.	50	ASTM D- 3467
Iodine Number (numero de carga)	1000 mg/g min.	ASTM D- 4607
Surface Area (area superficial)	1000- 1100 m2/g	N2 BET
Total Ash Content (contenido total de ceniza)	3 % max.	ASTM D- 2866
Moisture Content (contenido total de humedad)	3 % max.	ASTM D- 2867
Hardness No. (N° dureza)	99	ASTM D- 3802
Densidad Aparente	0.50- 0.54 g/cc	ASTM D- 2854
Platelet Content	1% max.	AARL Method

Distribución de tamaños interna:

- +63% max.
- 123% max.

Packing

- Bolsas de polipropileno poliñizado de 25 kg
- Maxisacos de 500 kg.

Anexo 6: Cuarteo y Muestreo de la Muestra Representativa del Carbón Fino Residual



Anexo 7: Reporte de Análisis Químico del Carbón Fino Residual



INFORME DE ENSAYO N° MN 2410244104A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE POR CUENTA DE ASUNTO PRODUCTO DESCRITO COMO CANTIDAD DE MUESTRAS INSTRUCCIONES DE ENSAYO LUGAR Y FECHA DE RECEPCION CARACTERISTICAS Y CONDICIONES RECEPCION DE LAS MUESTRAS FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO	TUIRO QUISPE JORGE LUIS CUSCO TUIRO QUISPE JORGE LUIS PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO Carbon Activado 1 Tipo Triplicado Vista Alegre, 24/10/2024 Bolsa Plastica Sellada MUESTRA GRANULADO, 0.10 Kg Aproximado Vista Alegre - Nasca 25/10/2024
---	--

ENSAYO RESULTADO

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	ELEMENTOS
CABEZA CARBON FINO	Au
	Oz/Tc
	3.608

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	ELEMENTOS			Promedio
	g Au/Kg "C"			g Au/Kg "C"
CABEZA CARBON FINO	0.128	0.123	0.130	0.127

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACIÓN	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 .Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-23299-24

Emitido en Nasca, 25 de Octubre del 2024



Ing. Nabor Mucha
Reg. GP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L., Y si el servicio lo requiere, las muestras (s) del producto serán conservadas por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según nuestros procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una declaración de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Esta Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
 WhatsApp: 955506006. WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com

Anexo 8: Fotografía del Inicio de las Pruebas Experimentales



Anexo 9: Control de parámetros de las pruebas metalúrgicas



Anexo 10: Secado y tamizado del carbón**Anexo 11: Preparación de la Muestras de Resultados Experimentales para Laboratorio**

Anexo 12: Reporte de los resultados de cada Prueba experimental.



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240690A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS CUSCO

POR CUENTA DE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO: PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO: Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS: 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION: Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES: Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS: MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO: Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg °C°
CF1	2.077	0.071

METODOS DE ENSAYO	
DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03_Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES: Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024



Ing. Nabor Mucha
REG. GP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo correspondiente por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se entregará el producto según las especificaciones técnicas y/o requerimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240691A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS CUSCO

POR CUENTA DE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO: PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO: Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS: 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION: Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES: Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS: MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO: Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg °C°
CF2	2.051	0.070

METODOS DE ENSAYO	
DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03_Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES: Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024



Ing. Nabor Mucha
REG. GP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo correspondiente por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se entregará el producto según las especificaciones técnicas y/o requerimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240692A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS CUSCO

POR CUENTA DE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO: PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO: Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS: 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION: Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES: Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS: MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO: Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg °C°
CF3	2.392	0.082

METODOS DE ENSAYO	
DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03_Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES: Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024



Ing. Nabor Mucha
REG. GP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo correspondiente por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se entregará el producto según las especificaciones técnicas y/o requerimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240693A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS CUSCO

POR CUENTA DE: TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO: PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO: Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS: 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO: Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION: Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES: Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS: MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO: Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg °C°
CF4	2.135	0.073

METODOS DE ENSAYO	
DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03_Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES: Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024



Ing. Nabor Mucha
REG. GP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo correspondiente por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se entregará el producto según las especificaciones técnicas y/o requerimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240697A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg "C"
CFS	0.286	0.078

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev 01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024


Ing. Nabor Mucha
 Reg. CIP 20300


Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio de control de calidad del producto serán conservados por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán los mismos procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 2410244103A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION Vista Alegre, 24/10/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO Vista Alegre - Nasca 25/10/2024


ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg "C"
CF6	2.199	0.075

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev 01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-23299-24

Emitido en Nasca, 25 de Octubre del 2024


Ing. Nabor Mucha
 Reg. CIP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio de control de calidad del producto serán conservados por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán los mismos procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240694A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg "C"
CF7	2.224	0.076

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev 01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024


Ing. Nabor Mucha
 Reg. CIP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio de control de calidad del producto serán conservados por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán los mismos procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



INFORME DE ENSAYO N° MN 2410244102A

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE TUIRO QUISPE JORGE LUIS

ASUNTO PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS 1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION Vista Alegre, 24/10/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS MUESTRA GRANULADO, 0.05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO Vista Alegre - Nasca 25/10/2024

ENSAYO RESULTADO		
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au	g Au/Kg "C"
CF8	2.224	0.076

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev 01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-23299-24

Emitido en Nasca, 25 de Octubre del 2024


Ing. Nabor Mucha
 Reg. CIP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio de control de calidad del producto serán conservados por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán los mismos procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras enviadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

Página 1 de 1

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com

 **INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240695A**

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE
TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE ASUNTO
TUIRO QUISPE JORGE LUIS
PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO
Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS
1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO
Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION
Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES
Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS
MUESTRA GRANULADO, 0,05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO
Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au Oz/TC	g Au/Kg "C"
CF9	2.069	0.071

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024



Ing. Nabor Mucha
LAB. Q. Reg. CIP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo consiguiera, el producto será conveniado por un periodo de tiempo determinado y acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com

 **INFORME DE ENSAYO N° MN 0512240696A**

A SOLICITUD DE DIRECCION DEL SOLICITANTE
TUIRO QUISPE JORGE LUIS
CUSCO

POR CUENTA DE ASUNTO
TUIRO QUISPE JORGE LUIS
PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO

PRODUCTO DESCRITO COMO
Carbon Activado

CANTIDAD DE MUESTRAS
1

INSTRUCCIONES DE ENSAYO
Tipo Reconocimiento

LUGAR Y FECHA DE RECEPCION
Vista Alegre, 05/12/2024

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES
Bolsa Plastica Sellada

RECEPCION DE LAS MUESTRAS
MUESTRA GRANULADO, 0,05 Kg Aproximado

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO
Vista Alegre - Nasca 07/12/2024

ENSAYO RESULTADO


IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ELEMENTOS	
	Au Oz/TC	g Au/Kg "C"
CF10	2.021	0.069

METODOS DE ENSAYO

DETERMINACION	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-03 Rev.01 / Determinación de Oro y Plata en Carbón por Fire Assay - Método Gravimétrico.

OBSERVACIONES. Referencia : RA-01-26748-24

Emitido en Nasca, 07 de Diciembre del 2024


Ing. Nabor Mucha
LAB. Q. Reg. CIP 20300

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo consiguiera, el producto será conveniado por un periodo de tiempo determinado y acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com

Anexo 13: Balance Metalúrgico.

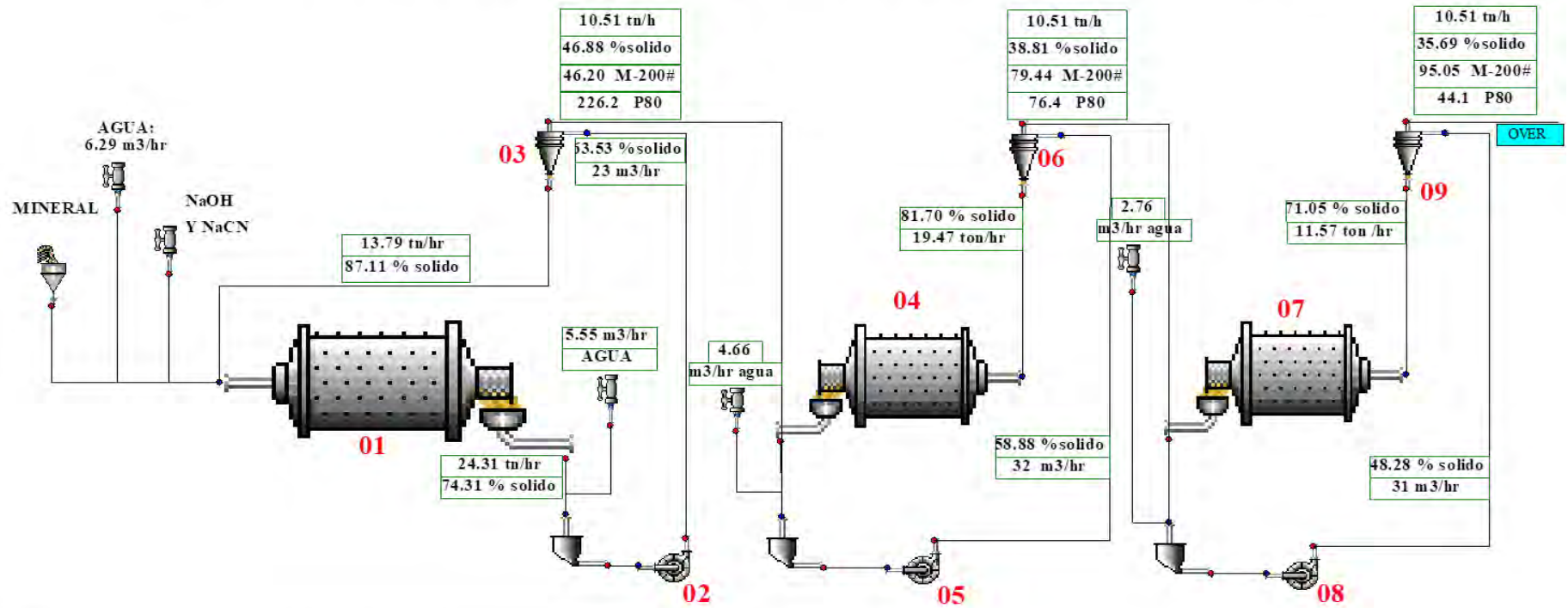
Prueba	Ley cabeza (g Au/kg)	Ley cola (g Au/kg)	Oro en cabeza (g)	Oro en cola (g)	Oro recuperado (g)	Recuperación (%)
1	0.127	0.071	0.127	0.071	0.056	44.09
2	0.127	0.07	0.127	0.07	0.057	44.88
3	0.127	0.083	0.127	0.083	0.044	34.65
4	0.127	0.073	0.127	0.073	0.054	42.52
5	0.127	0.078	0.127	0.078	0.049	38.58
6	0.127	0.075	0.127	0.075	0.052	40.94
7	0.127	0.07	0.127	0.07	0.057	44.88
8	0.127	0.076	0.127	0.076	0.051	40.16
9(P central)	0.127	0.071	0.127	0.071	0.056	44.09
10(P central)	0.127	0.069	0.127	0.069	0.058	45.67

Nota: Balance metalúrgico de la recuperación de oro. Elaboración propia.

- Promedio de recuperación: 42.05 %
- Oro recuperado promedio: 0.053 g Au por kg de carbón

Anexo 14: Diagrama de Flujo del circuito de molienda La Joya Mining S.A.C.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA DE LA PLANTA DE BENEFICIO LA JOYA MINING SAC

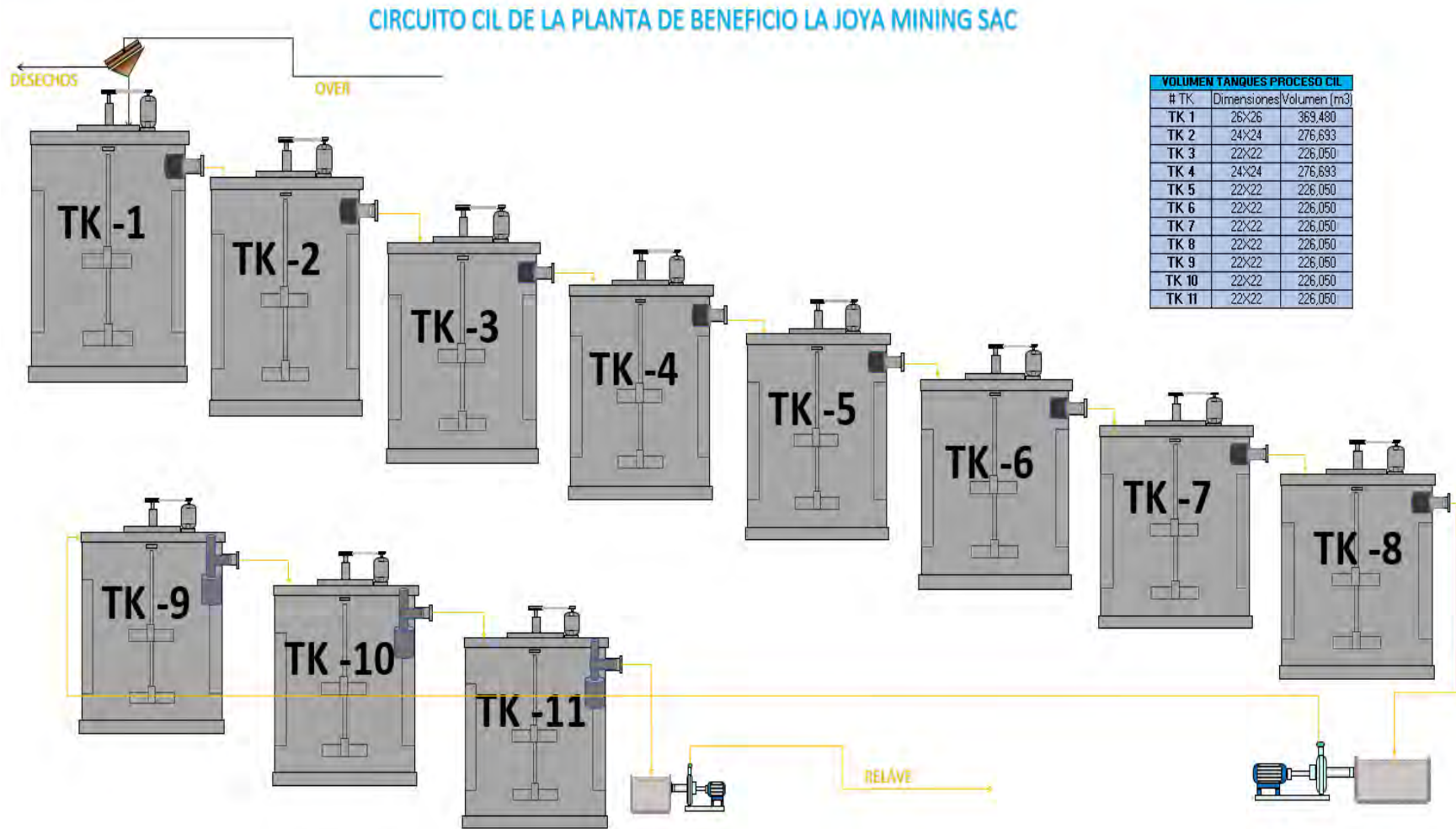


LEYENDA DE EQUIPOS				
ITEM	CANT	DESCRIPCION DEL EQUIPO	TAMAÑO	HP
1	1	MOLINO DE BOLAS CHINO	6'X10'	250
2	1	BOMBA DE PULPA	4"X3"	25
3	1	HIDROCICLON PRIMARIO	D-6	
4	1	MOLINO DE BOLAS MOSERVIN	6'X8'	200

5	1	BOMBA DE PULPA	4"X3"	25
6	2	HIDROCICLON SECUNDARIO	D-6	
7	1	MOLINO DE BOLAS DELTA	6'X8'	200
8	1	BOMBA DE PULPA	4"X3"	25
9	2	NIDO DE HIDROCICLONES	D-6	

Nota. Diagrama de flujo del circuito de molienda de la planta La Joya Mining SAC-2023. Elaboración propia mediante el uso de software JKSIMMET.

Anexo 15: diagrama de flujo del circuito CIL La Joya Mining SAC.



Nota. Diagrama de flujo del circuito del proceso CIL de la planta La Joya Mining SAC-2023. Elaboración propia.