



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO CARBÓN EN PULPA PARA
INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA EMPRESA
MINERA SERMETAL S.A.C.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. OWER ALAIN RAMOS CALLISAYA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2024



OWER ALAIN RAMOS CALLISAYA

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO CARBÓN EN PULPA PARA INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA EMPRESA ...

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
inm:8254410445968

135 Páginas

Fecha de entrega
27 nov 2024, 10:54 a.m. GMT-5

32,396 Palabras

Fecha de descarga
27 nov 2024, 10:58 a.m. GMT-5

166,498 Caracteres

Nombre de archivo
OWER ALAIN RAMOS CALLISAYA .pdf

Tamaño de archivo
3.8 MB



H. Córdova
Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
ESPECIALISTA EN LA GESTIÓN Y REGULACIÓN DE LA
INDUSTRIA QUÍMICA Y METALÚRGICA



6% 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 20 palabras)

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

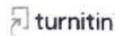
- Texto oculto**
202 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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.



Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA





DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, mis seres más queridos y fundamentales en mi vida. Dedico este trabajo como un tributo a su amor, dedicación y sacrificio. Gracias por ser mi motor impulsor, por creer en mí y por guiarme en el camino hacia el éxito. Su apoyo incondicional y sabiduría me han permitido crecer como profesional y como persona.

También quiero dedicar este trabajo a mis hermanos, por su comprensión y apoyo inquebrantable durante todos estos años. Su amor y su paciencia han sido mi fuente de inspiración y motivación para alcanzar mis metas.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por iluminar mi camino y darme la fortaleza para superar cada obstáculo en este viaje académico.

A mi madre, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante. Gracias por ser mi guía y mi refugio en momentos de necesidad.

A mi padre, por su esfuerzo incansable por el bienestar de nuestra familia y por su amor y apoyo infinito. Gracias por ser un ejemplo de fortaleza y dedicación.

A mis padres, por concederme el privilegio de estudiar esta noble carrera y por dotarme de fortaleza y sabiduría para superar cualquier dificultad.

A la Universidad Nacional del Altiplano. Facultad de Ingeniería Metalúrgica, por brindarme una formación profesional de excelencia, agradezco a todos mis docentes por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo.



ÍNDICE GENERAL

	Pág
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT	18

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1 Problema general	22
1.2.2 Problema específico	22
1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
1.3.1 Hipótesis General.....	23
1.3.2 Hipótesis Específicas	23
1.4 JUSTIFICACIÓN DE ESTUDIO	23
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.5.1 Objetivo General.....	24
1.5.2 Objetivos Específicos.....	24

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1	ANTECEDENTES.....	25
2.2	MARCO TEÓRICO	31
2.2.1	Carbón Activado	31
2.2.2	Adsorción del oro en carbón activado	32
2.2.3	Variables que afectan la adsorción del oro en el carbón activado	34
2.2.3.1	Efecto del carbón	35
2.2.3.2	Efecto de la concentración de oro.....	37
2.2.3.3	Efecto del pH	38
2.2.3.4	Efecto de la concentración de cianuro	40
2.2.3.5	Efecto de la temperatura	41
2.2.4	Cinética de adsorción.....	42
2.2.5	Proceso de Carbón en Pulpa (CIP).....	51
2.2.6	Factores que influyen en el Proceso CIP	53
2.3	DISEÑO EXPERIMENTAL	54
2.3.1	Principios Básicos de un Diseño Experimental	55
2.3.1.1	Repetición o Reiteración.....	55
2.3.1.2	Aleatorización.....	56
2.3.1.3	Control local	57
2.3.2	Ventajas y desventajas del Diseño Experimental	58
2.3.3	Etapas del Diseño Experimental	61
2.3.4	Diseño Factorial	62
2.3.5	Diseño Factorial 2^k	63
2.3.6	Diseño Factorial $2k$ con réplicas en el punto central del diseño.....	66
2.3.7	Cálculo de efectos	68
2.3.8	Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores	69



2.3.8.1	Hipótesis	71
2.3.9	Formulación del modelo matemático.....	73
2.3.9.1	Análisis de residuales.....	75
2.3.9.2	Técnicas gráficas para análisis de residuos.....	76

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	78
3.1.1	Ubicación y acceso	78
3.1.1.1	Ubicación política	78
3.1.1.2	Ubicación geológica	78
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	80
3.2.1	Población.....	80
3.2.2	Muestra	80
3.3	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA MUESTRA	81
3.4	RELACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR LITRO DE PULPA	81
3.4.1	Cálculo del Volumen Útil del Tanque Cilíndrico	81
3.4.2	Relación de carbón activado por litro de pulpa	82
3.4.3	Relación Final	82
3.5	ÍNDICE DE ATRICIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN LA ADSORCIÓN EN EL PROCESO CIP	83
3.5.1	Objetivo.....	83
3.5.2	Condiciones de la Prueba.....	83
3.5.3	Resultados de la Prueba	84
3.5.4	Análisis	84
3.6	DISEÑO ESTADÍSTICO.....	86



3.6.1	Metodología	86
3.6.2	Desarrollo del procedimiento de investigación.....	89
3.7	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERIMENTOS.....	90
3.8	MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO.....	93
3.8.1	Materiales.....	93
3.8.2	Equipos	94
3.8.3	Reactivos.....	94
3.8.4	Equipos de Protección.....	94
3.9	PRUEBAS EXPERIMENTALES CIP	95
3.10	PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS CIP A NIVEL DE LABORATORIO	96
3.10.1	Prueba N° 01	98
3.10.2	Prueba N° 02	99
3.10.3	Prueba N° 03	100
3.10.4	Prueba N° 04.....	101
3.10.5	Prueba N° 05	102
3.10.6	Prueba N° 06.....	103
3.10.7	Prueba N° 07	104
3.10.8	Prueba N° 08	105
3.10.9	Prueba N° 09.....	106
3.10.10	Prueba N° 10.....	107
3.10.11	Prueba N° 11	108
3.11	DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA	111



3.12	CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO.....	112
3.12.1	Carga de bolas.....	112
3.12.2	Volumen del molino	114
3.12.3	Velocidad critica del molino.....	114
3.12.4	Velocidad de operación del molino	115

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	VARIABLES DEL PROCESO	118
4.1.1	Variable Independiente	118
4.1.2	Variable Dependiente.....	118
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL 2k, CON RÉPLICA CENTRAL	118
4.2.1	Cálculo de los efectos de las variables.....	121
4.2.2	Interpretación de los efectos	125
4.2.2.1	Interpretación de los efectos para el carbón tipo Calgon.....	126
4.2.2.1.1	Efectos principales	126
4.2.2.1.2	Efectos de las interacciones	126
4.2.3	Análisis de la varianza del diseño factorial.....	130
4.2.3.1	Suma de cuadrados de los efectos e interacciones.....	131
4.2.3.1.1	Suma de cuadrados del error	132
4.2.3.1.2	Suma de cuadrados para la curvatura.....	134
4.2.4	Aplicación del Teorema de Cochran.....	135
4.2.4.1	Media de cuadrados	136
V.	CONCLUSIONES	143



VI. RECOMENDACIONES.....	144
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
ANEXOS	149



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema de la estructura interna del carbón activado Mostrando la Porosidad.....	34
Figura 2. Efecto de la granulometría en la velocidad de adsorción.....	37
Figura 3. Efecto del pH en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	39
Figura 4. Factores en el proceso CIP (Lixiviación carbón en pulpa).	53
Figura 5. Niveles: Diseño Factorial 2 ^k	64
Figura 6. Diseño factorial para 2k con tres factores y réplicas centrales.	68
Figura 7. Ubicación de la Planta procesadora	79
Figura 8. Índice de atrición de carbón activado en la adsorción en el proceso CIP. 85	
Figura 9. Etapas del trabajo experimental.	88
Figura 10. Diagrama del procedimiento experimental.	110
Figura 11. Molino de laboratorio experimental.	112
Figura 12. % Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.	117
Figura 13. Representación Geométrica de 2 ³ (medias de los datos).....	120
Figura 14. Grafica de Efectos principales.....	128
Figura 15. Grafica de Interacción.	128
Figura 16. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.	139
Figura 17. Normalidad de efectos estandarizados.	141



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Valores de las variables codificadas	65
Tabla 2. Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor- p.	71
Tabla 3. Ubicación política.	78
Tabla 4. Coordenada WGS84 de la Planta procesadora.	79
Tabla 5. Caracterización Mineralógica de la muestra.....	81
Tabla 6. Índice de atrición de carbón activado en la adsorción en el proceso CIP....	85
Tabla 7. Niveles de las variables de estudio.	92
Tabla 8. Valores para realizar las réplicas centrales.	92
Tabla 9. Valores en las pruebas CIP con carbón tipo Calgon.....	92
Tabla 10. Características del molino de bolas de laboratorio.	112
Tabla 11. Características del molino de bolas de laboratorio.	114
Tabla 12. Características del molino de bolas de laboratorio.	116
Tabla 13. Niveles de las variables independientes.	118
Tabla 14. Matriz del diseño factorial a escala natural, con su respectiva ley (mg/L).119	119
Tabla 15. Matriz del diseño factorial para el carbón tipo Calgon.....	120
Tabla 16. Matriz del diseño factorial y respuestas experimentales (codificada), para carbón tipo Calgon.....	123
Tabla 17. Efectos de las variables e interacciones para el carbón tipo Calgon.	125
Tabla 18. Resultado del cálculo de efectos.....	127
Tabla 19. Suma de cuadrados de efectos e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.	132



Tabla 20. Media de cuadrados de efectos e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.	136
Tabla 21. Análisis de varianza del diseño factorial para el carbón tipo Calgon.....	137
Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA).....	139
Tabla 23. Análisis de T-Student.	141



ACRÓNIMOS

%	:	Porcentaje
°C	:	Grados centígrados
µm	:	Micra
Bar	:	Unidad de presión
Cal	:	Caloría
cal/°K	:	Caloría por grado kelvin
Cal/g	:	Caloría por gramo
cm²	:	Centímetro cuadrado
cm²/seg	:	Centímetro cuadrado por segundo
cm³	:	Centímetro cúbico
Eh	:	Potencial rédox
g	:	Gramo
g/ cm³	:	gramo por centímetro cubico
g/lt	:	Gramo por litro
g/TM	:	Gramo por tonelada métrica
g/Tn	:	Gramo por tonelada
K cal	:	kilo caloría
Kg	:	Kilogramo
Kg/h	:	Kilogramos por hora
L/S	:	Relación líquido-sólido
m³/h	:	Metros cúbicos por hora
mg/cm²	:	Miligramo por centímetro cuadrado
mg/cm².h	:	Miligramo por centímetro cuadrado por hora
mg/lt	:	Miligramo por litro
min	:	Minuto
ml	:	Mililitro
mm	:	Milímetro
NP	:	Nitrato de plomo



Oz/TC	:	Onza por tonelada corta
p.p.b	:	Partes por billón
p.p.m	:	Partes por millón
pH	:	Potencial de Hidrógeno
t/h	:	Toneladas por hora
TM	:	Toneladas métricas



RESUMEN

La investigación, bajo el título "**Optimización del proceso carbón en pulpa para incrementar la recuperación de oro en la empresa minera SERMETAL S.A.C.**", se llevó a cabo en la Empresa Minera SERMETAL S.A.C., ubicada comunidad de "Antahuila - Hurampillo", ubicado en distrito de Ananea, provincia de san Antonio de putina, región de Puno. El objetivo primordial de esta investigación fue evaluar la eficiencia del proceso carbón en pulpa CIP, con el propósito de incrementar la recuperación de oro. Para lograr esto, se evaluaron los parámetros de operación óptimos, incluyendo la densidad de pulpa (g/L), el pH y el peso del carbón activado Calgon (g). La metodología utilizada fue experimental, mediante un diseño factorial 2^3 . Se llevaron a cabo 8 pruebas experimentales en el laboratorio. ley de cabeza de 7.067 gr/tm y 1000ppm de cianuro de sodio, con tres réplicas en el punto central. Se consideraron tres factores y dos niveles para cada uno: la densidad de pulpa (de 1250 g/L a 1350 g/L), el pH (de 10.5 a 11.5) y el peso del carbón activado Calgon (de 250 g a 350 g). Los resultados mostraron que la densidad de pulpa óptima fue de 1350 g/L, con un pH de 11.5, peso del carbón activado Calgon de 350 g. Se obtuvo 96.66% de recuperación, en un tiempo de lixiviación de 36h. Los resultados mostraron q la optimización del proceso CIP aumenta significativamente la recuperación de oro. Esta investigación contribuye a la mejora de la eficiencia operativa.

Palabras clave: Recuperación de oro, Eficiencia del proceso, Proceso (CIP), Densidad de pulpa.



ABSTRACT

The research, under the title "Optimization of the carbon-in-pulp process to increase the recovery of gold in the mining company SERMETAL S.A.C.", was carried out in the Mining Company SERMETAL S.A.C., located in the community of "Antahuila - Hurampillo", located in the district from Ananea, province of San Antonio de Putina, Puno region. The primary objective of this research was to evaluate the efficiency of the carbon-in-pulp CIP process, with the purpose of increasing gold recovery. To achieve this, optimal operating parameters were evaluated, including pulp density (g/L), pH and weight of Calgon activated carbon (g). The methodology used was experimental, using a 23 factorial design. 8 experimental tests were carried out in the laboratory. head grade of 7,067 gr/tm and 1000ppm sodium cyanide, with three replicas at the central point. Three factors and two levels for each were considered: pulp density (from 1250 g/L to 1350 g/L), pH (from 10.5 to 11.5) and weight of Calgon activated carbon (from 250 g to 350 g). . The results showed that the optimal pulp density was 1350 g/L, with a pH of 11.5, weight of Calgon activated carbon of 350 g. 96.66% was obtained in a leaching time of 36 hours. The results showed that the optimization of the CIP process significantly increases gold recovery. This research contributes to improving operational efficiency

Keywords: Gold recovery, Process efficiency, Process (CIP), Pulp density.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro ha tenido una importancia económica y social considerable desde épocas remotas. Durante la historia, la obtención de este valioso metal ha promovido el progreso de las civilizaciones y ha sido un soporte fundamental en la economía de numerosas naciones. Sin embargo, la situación actual plantea nuevos retos; el agotamiento de los depósitos de oro de alta pureza ha llevado a la exigencia de extraer minerales de oro refractario. Debido a su composición y características físico-químicas, estos minerales presentan dificultades en su tratamiento, como la existencia de minerales complementarios que complican la obtención del oro.

Se ha consolidado la cianuración como un procedimiento estándar para la obtención de oro de sus minerales. No obstante, su efectividad puede verse afectada cuando el oro está relacionado con minerales sulfurados. En estas situaciones, añadir nitrato de plomo a la mezcla de cianuración puede potenciar notablemente la recuperación del oro, además de reducir el uso de cianuro. Desde 1890, esta técnica ha formado parte de las plantas de cianuración. Otros compuestos, tales como el mercurio, el talio y el bismuto, han probado poseer efectos ventajosos parecidos en la obtención del oro.

En la comunidad de “Antahuila - Hurampillo”, ubicada en el centro poblado de La Rinconada, en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, región de Puno, los procesos de extracción de oro y plata implican el uso de reactivos como el mercurio y el cianuro.

La empresa minera SERMETAL S.A.C., que opera en la comunidad de “Antahuila - Hurampillo” desde junio del 2017, ha mostrado un gran interés en este



proyecto. Actualmente, SERMETAL S.A.C. opera una planta que procesa mineral mediante el proceso CIP (Carbón en Pulpa), con una capacidad de procesamiento de 22 toneladas por guardia. Cabe destacar que en esta planta solo se trabaja una guardia por día. El proceso incluye etapas de adsorción con carbón activado, desorción, electrodeposición y fundición. Además, se llevan a cabo actividades complementarias como la reactivación química y térmica del carbón, siempre con un enfoque riguroso en la seguridad y la protección ambiental.

En los últimos años, la cianuración por agitación ha cobrado rápidamente popularidad en La Rinconada, gracias a los beneficios económicos que proporciona y la eficacia con la que se puede extraer el oro fino de los minerales pesados que se encuentran en los concentrados gravimétricos. Este mecanismo funciona en grupos dentro de tanques de cianuración de 12 x 12 pies (3.66 x 3.66 metros), en los que la pulpa es agitada de manera mecánica. Con un porcentaje de sólidos del 30 al 40%, la agitación se prolonga durante 24 horas empleando una concentración de cianuro de sodio de 3,0 a 4,0 g/L. La solución rica en oro se separa mediante filtración en lechos de arena, seguida de la recuperación del oro disuelto usando zinc en viruta. Los metales preciosos se extraen finalmente mediante fundición en hornos tubulares.

Aunque la cianuración por agitación ha mejorado significativamente la disolución del oro, con tasas de recuperación que oscilan entre el 80% y el 90% en función de la granulometría del mineral, persiste el desafío de pérdidas notables de cianuro y oro durante el proceso de humectación del mineral. Esto ocurre porque la precipitación del oro con zinc requiere la filtración de la solución rica, etapa en la cual los sólidos retienen una cantidad considerable de la solución.



1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo principal en la industria minera es la eficaz recuperación de oro, particularmente en operaciones que emplean el método de Carbón en Pulpa (CIP) para la obtención de oro. En la compañía minera SERMETAL S.A.C., situada en la comunidad de "Antahuila - Hurampillo", en el distrito de Ananea, provincia de san Antonio de putina, región Puno, este procedimiento se ha establecido como el método principal para la extracción de oro. No obstante, la planta concentradora, con una capacidad de 22 toneladas por guardia, ha demostrado variaciones en los resultados de recuperación, lo que indica la necesidad de perfeccionar los parámetros de operación.

El proceso CIP depende de varios factores clave, como la densidad de pulpa, el pH, y el peso del carbón activado utilizado en la adsorción. Estos factores, si no se controlan de manera óptima, pueden limitar la eficiencia del proceso y, por ende, la cantidad de oro recuperado. Hasta el momento, en SERMETAL S.A.C., no se ha realizado una evaluación exhaustiva de cómo estos parámetros

operativos están afectando la eficiencia del proceso y, por consiguiente, el rendimiento general de la planta.

Por lo tanto, se presenta la necesidad de llevar a cabo un estudio que examine la eficacia del proceso CIP en la planta de SERMETAL S.A.C., con un enfoque en los parámetros operativos cruciales, como la densidad de pulpa, el pH, y el peso del carbón activado. Esta evaluación permitirá identificar las condiciones óptimas que maximicen la recuperación de oro.

La investigación se centrará en responder la siguiente pregunta: ¿Como evaluar la eficiencia del proceso carbón en pulpa y su influencia para incrementar la recuperación de oro mediante pruebas a nivel de laboratorio? Al abordar esta pregunta, se busca



desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones operativas, permitiendo a la empresa ajustar sus prácticas para maximizar la eficiencia y, en última instancia, mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la operación.

En conclusión, el problema que surge es la necesidad de perfeccionar el proceso de Carbón en Pulpa en SERMETAL S.A.C. con el fin de aumentar la recuperación de oro, a través de un análisis exhaustivo y experimental de los parámetros operativos esenciales, que faciliten la definición de las condiciones ideales para el proceso.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿Cómo influye la optimización de los parámetros operativos del proceso de carbón en pulpa (CIP) en la mejora de la recuperación de oro en la empresa minera SERMETAL S.A.C.? Específicamente, ¿cómo afectan los siguientes parámetros al proceso y a la recuperación de oro? pH del proceso, densidad de la pulpa y cantidad de carbón.

1.2.2 Problema específico

¿Cuál es el grado de influencia de los siguientes parámetros en el proceso de carbón en pulpa (CIP) sobre la recuperación de oro en la empresa minera SERMETAL S.A.C.? Densidad de pulpa, pH de la pulpa en el proceso y cantidad de carbón utilizado en el proceso.

¿Cuáles son los parámetros operativos óptimos (densidad de pulpa, pH y cantidad de carbón) del proceso de carbón en pulpa que contribuyen al incremento de la recuperación de oro en la empresa minera SERMETAL S.A.C.?



1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis General

Optimizando el proceso carbón en pulpa se incrementa la recuperación de Oro en La Empresa Minera SERMETAL S.A.C.

1.3.2 Hipótesis Específicas

- Evaluar la influencia o intervención del pH en el proceso (CIP)
- Analizar el impacto o la participación del carbón en el proceso (CIP)
- Analizar el impacto o efecto de la densidad en el proceso (CIP)

1.4 JUSTIFICACIÓN DE ESTUDIO

Desde un punto de vista técnico, el proceso de carbón en pulpa (CIP) es famoso por su habilidad para extraer oro de soluciones de cianuro, representando una de las tecnologías más sofisticadas en el sector minero. No obstante, la eficacia de este procedimiento puede fluctuar considerablemente en función de elementos como la calidad del carbón activado empleado, las condiciones de operación y el tipo de mineral tratado. Por ende, es vital evaluar y perfeccionar de manera constante el proceso de recuperación de oro para garantizar la máxima recuperación de oro.

Económicamente, la fluctuación en los precios del oro hace que la optimización de los procesos de recuperación sea aún más relevante. Una mejora en la eficiencia del proceso CIP puede resultar en un aumento significativo en la cantidad de oro recuperado, lo que a su vez puede tener un impacto directo en la rentabilidad de la empresa minera.



Además, desde el punto de vista ambiental, la optimización del proceso CIP puede contribuir a una operación más sostenible. Al mejorar la recuperación de oro, se puede reducir la cantidad de residuos generados y minimizar el impacto ambiental asociado con la extracción de minerales.

Finalmente, esta investigación también tiene un valor académico y metodológico, ya que puede proporcionar datos valiosos para futuros estudios y aplicaciones en el campo de la ingeniería metalúrgica, así como en la gestión de recursos minerales.

En resumen, la justificación para esta investigación radica en su potencial para mejorar la eficiencia operativa, aumentar la rentabilidad económica y promover prácticas de minería más responsables desde un punto de vista ambiental y social.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

Optimizar el proceso carbón en pulpa para incrementar la recuperación de oro en la empresa minera SERMETAL S.A.C

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar el intervalo de pH ideal que incrementa la recuperación de oro en el proceso (CIP)
- Evaluar el aporte del carbón en el proceso (CIP)
- Determinar el parámetro óptimo de trabajo de densidad de pulpa en el proceso (CIP)



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

El estudio.1 de Ibrado y Fuerstenau (1992), investiga la influencia de la estructura de los adsorbentes de carbono en la adsorción de cianuro de oro. A diferencia de investigaciones anteriores que se centraron en la superficie y los grupos funcionales de oxígeno en el carbono, esta investigación destaca la importancia de la estructura del material. Se llevaron a cabo pruebas de adsorción de cianuro de oro en varios adsorbentes carbonosos, como lignito, carbones, antracitas, negros de carbón, grafito y carbón activado, que abarcan una amplia gama de composiciones y características de superficie. Los resultados revelaron que la cantidad de grupos de oxígeno en la superficie o el contenido total de oxígeno no estaban relacionados con la adsorción de cianuro de oro por unidad de área del adsorbente. En cambio, se encontró una fuerte correlación con el grado de grafitización del adsorbente, lo que sugiere que las placas gráficas en el carbón activado desempeñan un papel fundamental en el proceso de adsorción. Estos hallazgos indican que gran parte de la adsorción tiene lugar en las caras de las placas de los cristallitos de grafito presentes en el carbón activado. En resumen, la estructura del adsorbente de carbono es un factor crucial en la ecuación de adsorción de cianuro de oro.

En sus estudios, Stange (1999) se enfocó en diseñar procesos de lixiviación de oro y circuitos de carbón en pulpa (CIP). Dentro de una planta de oro, la lixiviación y el circuito CIP son cruciales para la operación exitosa. Los costos operativos relacionados con estos procesos, que incluyen lixiviación, adsorción, elución y regeneración, representan aproximadamente el 15% de los costos totales de operación, mientras que los costos de capital asociados son aproximadamente el 16% del total. Aunque no son los



más importantes en términos de costo, son esenciales ya que son la base de la recuperación de oro. Durante el diseño de estas secciones, el objetivo principal es lograr la máxima eficiencia técnica y económica, además de asegurar la robustez frente a posibles cambios en el rendimiento del mineral, sus características y su ley de cabeza. En proyectos mineros de mayor duración y mayor ley, incluso pequeñas mejoras en la recuperación y eficiencia pueden tener un impacto significativo a lo largo de la vida del proyecto, especialmente en la industria minera de oro subterránea en Sudáfrica. (Stange, 1999)

Machaca Chuquimamani (2005), llevó a cabo una investigación con el propósito de difundir y consolidar el conocimiento existente sobre la extracción de oro mediante cianuro, centrándose en el proceso de lixiviación por agitación del método CIP (Carbon in Pulp). Evaluó este proceso mediante pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio. Para estas pruebas, consideró inicialmente una etapa de molienda y otra de remolienda, con el objetivo de lograr una granulometría del 85% pasando por malla 200. Además, en las pruebas de cianuración, ajustó el pH de la pulpa en un rango de 11 a 12. Como resultado de estas pruebas, logró un aumento en la recuperación de oro, alcanzando un porcentaje del 94%.

Mas et al., (2005), llevaron a cabo un estudio cuyo propósito era realizar una comparación entre el comportamiento de minerales oxidados sometidos a procesos de lixiviación con cianuro, utilizando tanto el método convencional como la técnica de carbón en pulpa (CIP, por sus siglas en inglés, carbon in pulp). En el marco de esta investigación, se examinaron aspectos cruciales relacionados con la hidrometalurgia del oro, la eliminación de residuos de cianuro en desechos operativos, se analizaron los consumos de los reactivos empleados y se evaluó la recuperación del oro obtenida en ambos enfoques. Como resultado de la implementación del método de carbón en pulpa,



se logró un aumento en la recuperación del oro en comparación con el proceso convencional, pasando del 89.3% al 91.7% en un período de lixiviación de 70 horas. Este aumento significativo en la recuperación probablemente se deba a la reducción de pérdidas de oro en solución y a la presencia de lamas que influyen negativamente en el proceso de lixiviación tradicional. (Mas et al., 2005)

El estudio de Oraby y Eksteen (2015), se centra en la lixiviación de oro, plata y sus aleaciones en soluciones alcalinas de peróxido de glicina, así como su adsorción en carbón activado. Descubrieron que este sistema lixivante es efectivo para disolver oro y plata en condiciones neutras y alcalinas a temperaturas moderadas. La tasa de lixiviación de oro en soluciones con glicina 0,5 M y peróxido al 1% a pH 11 después de 48 horas fue comparable a la obtenida con otros sistemas lixiviantes convencionales, como el tiosulfato-EDTA o el tiosulfato-oxalato-tiourea. En el caso de aleaciones de oro y plata, encontraron que la tasa de lixiviación fue aproximadamente 6 veces mayor que la del oro puro, y la tasa de lixiviación de la plata también fue significativa. Se observó un período de inducción de 48 horas antes de una rápida aceleración de la lixiviación. Además, la velocidad de reacción fue altamente sensible a la temperatura, lo que sugiere un mecanismo de control químico en lugar de transferencia de masa, como en la lixiviación con cianuro. El estudio también demostró la eficacia de cargar complejos oro-glicinato en carbón activado, alcanzando una concentración de hasta 13,2 g de oro por kilogramo de carbono en 4 horas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la lixiviación y recuperación de metales preciosos en la industria minera. (Oraby & Eksteen, 2015)

Yampasi Caceres (2017), llevó a cabo una investigación en la que produjo carbón activado a partir de los tallos y hojas de la Cañihua utilizando una activación química con H_3PO_4 al 85%. El carbón activado resultante se caracterizó mediante la determinación de propiedades físicas y químicas. En las pruebas de adsorción de oro a partir de soluciones



cianuradas, utilizando este carbón activado de Cañihua, se logró una adsorción del 98% de oro. Las condiciones óptimas de adsorción incluyeron 1.2 g de carbón activado, un tiempo de 420 minutos y una temperatura de 25°C. (Yampasi Caceres, 2017)

Del Carpio Valencia (2018), se centró en analizar las condiciones de operación en el proceso de Carbon in Pulp (CIP) para la adsorción de oro mediante carbón activado durante la cianuración por agitación. Consideró un contenido de sólidos entre 35% y 45% para un estudio más preciso. Realizó pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio que revelaron que la densidad adecuada para trabajar era de 1300 Kg/m³. Mantener un pH de operación no menor a 10.5 resultó esencial para evitar la formación de ácido cianhídrico y las pérdidas de cianuro. Además, observó que la carga mínima de oro por carbón debía ser de 5 mg Au/g de carbón, lo que implicaba un mínimo de 330 kg de carbón por tanque carbonero, dependiendo de la ley del mineral tratado. (Del Carpio Valencia, 2018)

Piscoya Apaza (2018), se enfocó en el estudio del proceso de cianuración por agitación seguido del proceso de Carbon in Pulp (CIP) para la recuperación de oro. Realizó pruebas de cianuración por agitación a nivel de laboratorio y luego desarrolló una simulación del proceso CIP para la extracción de oro a partir de minerales depositados en los botaderos de la mina Eco Cori. Las pruebas de cianuración lograron una recuperación del 94.6% de oro en 24 horas de tratamiento, demostrando que el mineral era altamente susceptible a la lixiviación con cianuro de sodio. La solución cianurada obtenida se sometió al proceso CIP, donde se lograron cargas de hasta 3,600 kg de oro por tonelada de carbón, lo que resultó en una recuperación de adsorción de oro superior al 99%. (Piscoya

Apaza, 2018)

El estudio de Barazorda Cuellar y Lima Condori (2019), evaluó la capacidad de adsorción de oro utilizando carbón activado obtenido de cáscaras de castaña. El proceso incluyó la preparación de la muestra, impregnación con ácido fosfórico, carbonización y



activación a 400°C en atmósfera inerte. Se realizaron pruebas de adsorción con soluciones cianuradas de la minera Aurífera Retamas S.A., empleando un diseño factorial 23 más tres réplicas del punto central, lo que sumó 11 pruebas. Se evaluaron los efectos de variables como el pH, la dosis de carbón activado y la granulometría en la capacidad de adsorción. Los resultados se ajustaron mejor a la isoterma de Freundlich, con un coeficiente de correlación de 0.986, indicando una adsorción física. (Barazorda Cuellar & Lima Condori, 2019)

Susanibar Kler (2019), realizó una investigación orientada a analizar la adsorción del oro por parte del carbón activado y su influencia en la recuperación de oro. Para ello, llevó a cabo pruebas experimentales en el laboratorio para estudiar la capacidad de adsorción y la recuperación alcanzable. Estas pruebas metalúrgicas se realizaron utilizando soluciones de 50 litros con una concentración promedio de oro de 11.88 ppm (0.01188 g/L). Se utilizó carbón activado con un análisis granulométrico entre mallas -6 y +12. Las pruebas experimentales abarcaron diferentes cantidades de carbón activado, variando entre 15 g (0,3 g/L) y 90 g (1,8 g/L). Los resultados mostraron que se pudo adsorber 8.43 g Au/kg de carbón en 10 horas y 9.60 g Au/kg de carbón en 35 horas. Además, logró una recuperación de oro del 74.58% en 10 horas y del 89.90% en 35 horas al utilizar 90 g de carbón (1.8 g/L). El análisis estadístico demostró la significancia de la adsorción de oro en el carbón activado. (Susanibar Kler, 2019)

El estudio de Xia et al., (2021), presenta una innovadora técnica para la recuperación eficiente de oro a partir de soluciones de cianuro utilizando carbón activado magnético. A pesar de que el carbón activado ha sido ampliamente utilizado en la industria minera para la adsorción de aurocianuro debido a su alta superficie específica y porosidad, este nuevo enfoque resuelve algunos desafíos. Se sintetizó carbón activado magnético mediante un método solvotérmico, lo que resultó en un material con una buena



capacidad de magnetismo y una alta superficie específica. Este carbón activado magnético demostró una eficiencia excepcional al recuperar el 99,1% del oro de una solución de 10 mg/L en solo 5 horas, lo que es mucho más rápido que el carbón activado granular convencional. Además, se puede separar fácilmente de la solución utilizando un imán externo. El estudio también investigó la capacidad de adsorción en diversas condiciones de solución de cianuro, evaluó la isoterma de adsorción y la cinética, y demostró la viabilidad del reciclaje del carbón activado magnético en pruebas de adsorción-desorción. Esta técnica promete una recuperación más eficiente y sostenible de oro a partir de soluciones de cianuro en comparación con los métodos tradicionales. (Xia et al., 2021)

Delao Lezameta (2022), llevó a cabo una investigación cuyo enfoque principal fue analizar cómo una variedad de factores y condiciones operativas inciden en el proceso de recuperación de oro en las instalaciones de la empresa minera Kairos Capital SAC, ubicada en Chimbote, Perú. Esta compañía utiliza el método de lixiviación en pilas para la extracción de oro a partir de sus minerales. En este procedimiento, se aplica una solución de cianuro al material mineral, lo que da lugar a que el oro se disuelva en dicha solución. Posteriormente, se recoge la solución cianurada y se somete a un proceso de recuperación con el fin de obtener el concentrado de oro. La investigación se llevó a cabo en la planta piloto de la empresa, y se evaluaron los siguientes factores: Concentración de cianuro: Los resultados mostraron que la recuperación de oro aumentaba con el aumento de la concentración de cianuro. Temperatura: Los resultados mostraron que la recuperación de oro aumentaba con el aumento de la temperatura. Tiempo de lixiviación: Los resultados mostraron que la recuperación de oro aumentaba con el aumento del tiempo de lixiviación. En base a los resultados, se recomendó a la empresa ajustar las condiciones operativas del proceso de lixiviación. Las sugerencias incluyeron: Utilizar



una concentración de cianuro del 0,03%. Mantener la temperatura a 35 °C. Extender el tiempo de lixiviación a 72 horas. Estos cambios podrían aumentar la recuperación de oro en hasta un 20%, lo que supondría un incremento sustancial en la producción de la empresa. (Delao Lezameta, 2022)

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Carbón Activado

El carbón activado, según (Crittenden, 2005), es una denominación que abarca diversas formas del carbono amorfo. Este material se caracteriza por su estructura microcristalina caótica y mutuamente interconectada, la cual forma una red porosa notable. La singularidad de esta estructura radica en su vasta área superficial, que le confiere una capacidad de adsorción excepcional.

En el análisis molecular, (Trujillo Fajardo, 2008) describen al carbón activado como un pariente cercano de la estructura cristalina del grafito. Sin embargo, es la presencia de imperfecciones en los microcristales lo que potencia su reactividad y le permite interactuar eficazmente con su entorno.

(Yannopoulos, 1991) resalta la porosidad intrínseca del carbón activado, definiéndolo como un material con una extensa superficie interna por unidad de masa. Este término engloba una familia de compuestos con variadas propiedades adsorptivas, sin una fórmula estructural o composición química uniforme.

(Ibragimova et al., 2007) amplía esta definición, señalando que el carbón activado se obtiene a partir de la carbonización de materiales orgánicos, seguida de un tratamiento con agentes oxidantes como CO₂, aire o vapor de agua, o



incluso con productos químicos como el H_3PO_4 . Estos procesos se realizan con el fin de incrementar la porosidad del material.

Además, se destaca que, aunque el carbón activado comparte similitudes estructurales con el grafito, su orden interno es menos perfecto. Esta imperfección contribuye a su extrema porosidad, que puede alcanzar áreas superficiales entre 500 y 1,500 m^2/g . Esta característica es crucial para su función en la adsorción de metales preciosos, como el oro, según (Fernández et al., 2006).

2.2.2 Adsorción del oro en carbón activado

(Misari Chuquipoma, 2010) destaca que, en el proceso de adsorción, el oro disuelto en soluciones cianuradas es efectivamente recuperado mediante el uso de carbón activado. Los iones de calcio presentes en dichas soluciones actúan como catalizadores, mejorando la adsorción del complejo aurocianuro, mientras que los iones de sodio tienden a inhibir este proceso, especialmente en condiciones con un pH superior a 10. Para comprender más a fondo este fenómeno, se han propuesto diversas teorías:

- **Teoría de adsorción física:** Esta teoría sugiere que la adsorción es un proceso físico, principalmente influenciado por las fuerzas de Van der Waals.
- **Teoría química compleja:** Según esta teoría, la adsorción es el resultado de la neutralización de grupos ácidos en la superficie del carbón.
- **Mecanismo electroquímico:** Este mecanismo ocurre cuando el oxígeno entra en contacto con una suspensión acuosa de carbón, resultando en la reducción a grupos hidrófilos y la liberación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).



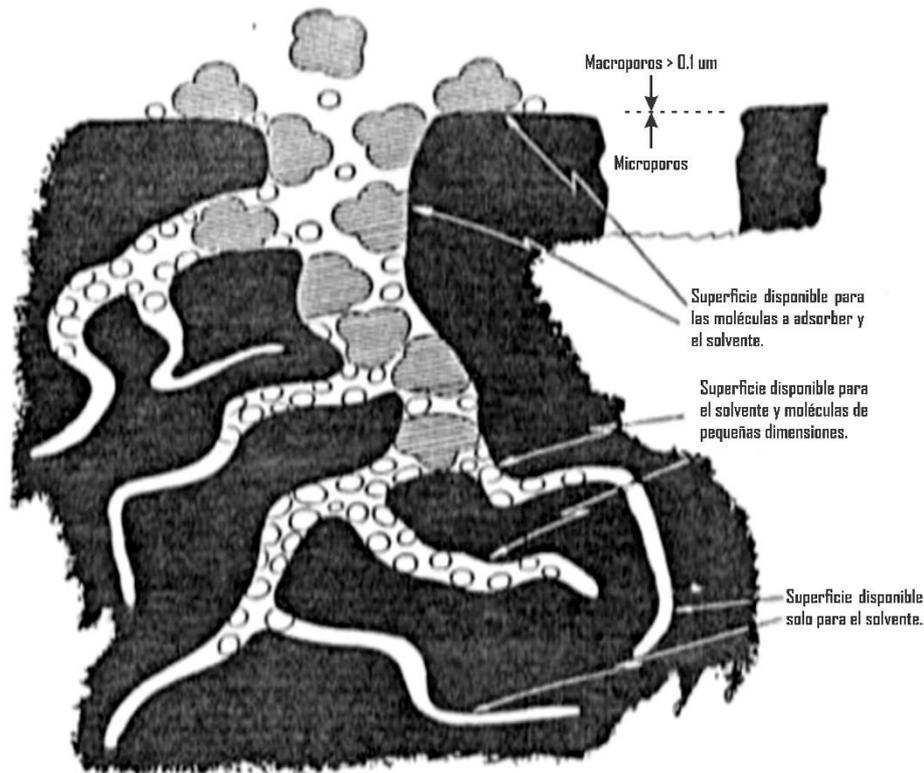
Además, se observa que el carbón activado posee una estructura compuesta tanto por macro como por microporos. Estos poros, a través de la atracción electrostática, capturan los complejos cianurados de oro, entre otros. La etapa en la que ocurre este fenómeno se conoce como Adsorción. La cinética de adsorción del oro es notablemente rápida, y la cantidad de carbón que se introduce en el proceso depende de un balance meticuloso entre los metales presentes y la capacidad del carbón para capturar oro o cualquier otro metal, lo cual está directamente relacionado con la calidad y cantidad del carbón utilizado (Asalde Horna, 2010).

Por su parte, (Apfata Taipe, 2017) señala que el principio de la recuperación de oro mediante carbón activado se basa en la habilidad de las materias carbonáceas activadas para adsorber el oro de las soluciones de cianuro. Aunque esta propiedad es bien conocida, especialmente por los problemas que puede causar durante la cianuración de minerales con contenido de carbón, su aplicación y desarrollo efectivo son relativamente recientes. Esto se debe en gran medida al diseño de un proceso de elusión eficiente que permite extraer el oro del carbón, facilitando así su reciclaje en lugar de su incineración. Una ventaja significativa del carbón activado es su capacidad para procesar no solo las soluciones auríferas sino también la pulpa mineral que ha sido tratada previamente con cianuro.

Figura 1.

Esquema de la estructura interna del carbón activado Mostrando la Porosidad.

Fuente: (Apfata Taipe, 2017)



2.2.3 Variables que afectan la adsorción del oro en el carbón activado

En los últimos diez años, la implementación del carbón activado en la extracción de oro ha experimentado un crecimiento significativo. Este auge ha impulsado numerosas investigaciones y proyectos de desarrollo con el fin de profundizar en la comprensión de la química y los mecanismos subyacentes al proceso de adsorción. El propósito de estos estudios es la creación de modelos predictivos y manejables que optimicen la operatividad de las plantas de procesamiento. Estos modelos buscan garantizar un control eficiente y una reducción al mínimo de las pérdidas de oro. Esto es crucial tanto en la solución barren, que es el líquido residual post-extracción, como en los residuos finos del carbón, donde aún puede haber partículas valiosas. La meta es alcanzar una



eficiencia máxima en la recuperación del oro, minimizando cualquier desperdicio durante el proceso (Villegas Quispe, 2015).

2.2.3.1 Efecto del carbón

Numerosas marcas de carbón se encuentran disponibles comercialmente y estudios recientes fueron llevados a cabo para establecer una relación entre la constante de capacidad de equilibrio del carbón activado para el oro y los parámetros fácilmente determinados, como: contenido de cenizas, área superficial y pH, respectivamente. Se encontró que existe una correlación significativa en la cantidad de oro adsorbido. Las partículas finas aportan una cinética más rápida, pero probablemente ellas causan una alta caída de presión en las columnas. Las partículas finas, también pueden incrementar las pérdidas de oro en las colas de las operaciones del circuito CIP, por lo que se usan tamaños relativamente gruesos de 10 a 20 malla (Villegas Quispe, 2015).

El carbón activado utilizado en los procesos de adsorción de oro presenta una amplia variedad de marcas y características comerciales. Estudios recientes han buscado establecer una correlación entre la capacidad de adsorción de oro del carbón activado y sus propiedades físico-químicas fácilmente determinables, como el contenido de cenizas, el área superficial y el pH (Villegas Quispe, 2015).

Se ha encontrado que existe una correlación significativa entre estas propiedades y la cantidad de oro adsorbido por el carbón activado. El tamaño de partícula del carbón activado también juega un papel crucial en el proceso de adsorción. Las partículas más finas ofrecen una cinética de



adsorción más rápida debido a su mayor área superficial expuesta. Sin embargo, estas partículas finas pueden causar una caída de presión excesiva en las columnas de adsorción, lo que dificulta la operación del proceso, además, las partículas finas de carbón activado pueden incrementar las pérdidas de oro en las colas del circuito de adsorción por carbón en pulpa (CIP, por sus siglas en inglés), ya que estas partículas pueden ser arrastradas junto con el flujo de salida. Por lo tanto, en la industria minera se suelen utilizar tamaños de partícula relativamente gruesos, generalmente entre 10 y 20 mallas (2 mm a 0,84 mm), para evitar estas complicaciones operativas y minimizar las pérdidas de oro (Villegas Quispe, 2015).

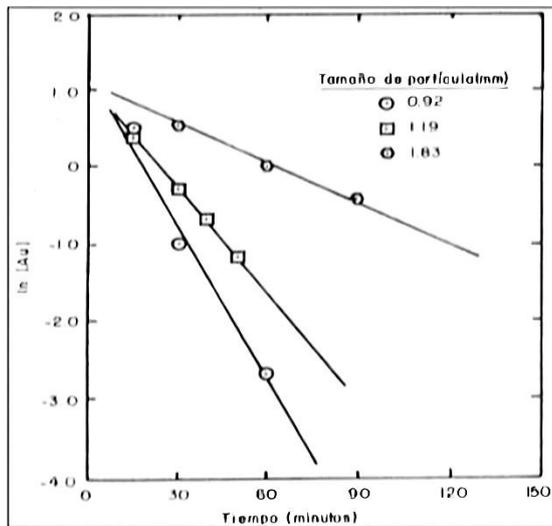
La elección adecuada del carbón activado y la optimización de sus propiedades son fundamentales para maximizar la eficiencia del proceso de adsorción de oro. Además del tamaño de partícula, otros factores como la distribución del tamaño de poros, la química superficial y la resistencia mecánica del carbón activado también deben ser considerados para lograr un rendimiento óptimo en las operaciones de adsorción en columna (Villegas Quispe, 2015).

Es importante destacar que el carbón activado es un material versátil y sus propiedades pueden ser ajustadas y mejoradas mediante procesos de activación y modificación específicos. Por ejemplo, la impregnación del carbón activado con sustancias oxidantes o la oxidación térmica pueden mejorar su afinidad por los iones de oro y plata, incrementando así su capacidad de adsorción (Villegas Quispe, 2015).

Figura 2.

Efecto de la granulometría en la velocidad de adsorción.

Fuente: (Villegas Quispe, 2015)



2.2.3.2 Efecto de la concentración de oro

El **efecto de la concentración de oro** en la capacidad de equilibrio del carbón es un aspecto crucial en el estudio de la adsorción de oro. La capacidad de equilibrio del carbón, que es la cantidad máxima de oro que puede ser adsorbida por el carbón, está directamente relacionada con la concentración de oro presente en la solución.

Se ha observado que la velocidad a la que se alcanza el equilibrio es notablemente más lenta cuando las concentraciones de oro son bajas. Esto significa que, a menor concentración de oro, el proceso de adsorción toma más tiempo para alcanzar un estado de equilibrio.

Por lo tanto, para lograr bajos contenidos de oro en las colas, es decir, la parte residual de la solución después de la adsorción, se requiere un mayor tiempo de residencia o un incremento en la concentración de



carbón en la pulpa. El tiempo de residencia se refiere al tiempo que el oro permanece en contacto con el carbón durante el proceso de adsorción.

La segunda opción, que implica aumentar la concentración de carbón en la pulpa, puede resultar en una carga de oro en el carbón significativamente menor a su capacidad de equilibrio de carga. Esto significa que, aunque el carbón puede adsorber más oro, la cantidad real de oro adsorbido puede ser menor debido a la mayor concentración de carbón.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la concentración de oro y la concentración de carbón en la pulpa al diseñar y optimizar procesos de adsorción de oro.

2.2.3.3 Efecto del pH

El **pH** de una solución juega un papel crucial en la **adsorción**, un proceso que se ve afectado por los cambios en el pH. Cuando el pH de la solución disminuye, se observa un aumento en la tasa de adsorción y la capacidad de carga. Esto significa que a medida que el pH se vuelve más ácido, la solución puede adsorber más sustancias y hacerlo a una velocidad mayor.

Sin embargo, es importante notar que el efecto del pH en la tasa de adsorción no es tan significativo en el rango de pH de 9 a 11. En otras palabras, las variaciones en la tasa de adsorción son relativamente pequeñas dentro de este rango de pH.

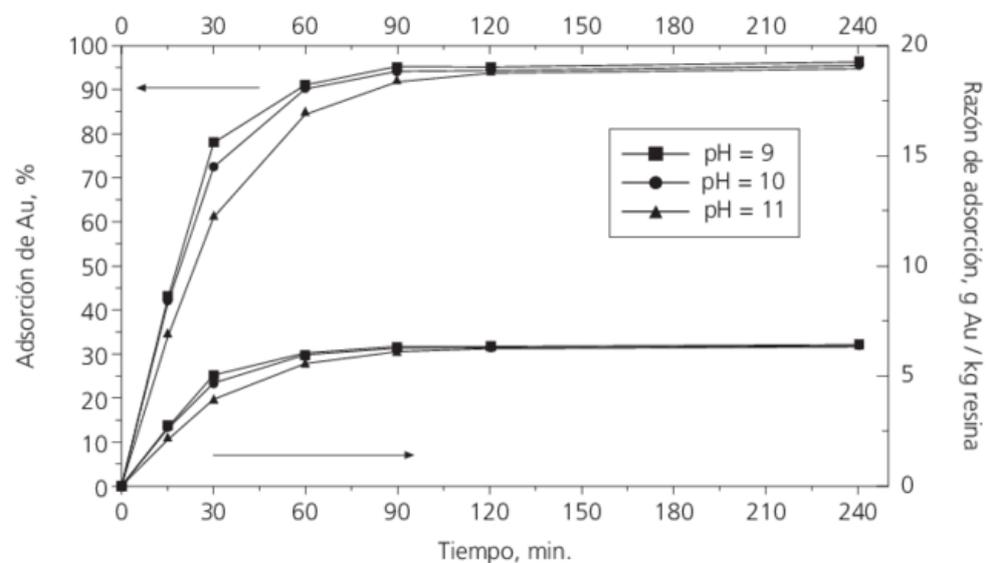
Además, se ha observado que la capacidad de carga de la solución generalmente aumenta en un 10% a medida que el pH disminuye progresivamente desde 11 hasta 9. Esto sugiere que a medida que el pH se acerca a la neutralidad desde el lado alcalino, la solución puede llevar una mayor cantidad de sustancias adsorbidas.

En la práctica, es común mantener el pH por encima de 10. La razón de esto es evitar la pérdida de cianuro a través de la hidrólisis, un proceso químico en el que una molécula de agua se añade a una sustancia. Mantener un pH alto ayuda a prevenir este proceso y, por lo tanto, minimiza la pérdida de cianuro.

Estos hallazgos fueron reportados por Navarro et al., en su estudio del 2006, y han sido fundamentales para entender cómo el pH afecta la adsorción y la capacidad de carga de una solución." (Navarro et al., 2006).

Figura 3

Efecto del pH en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M $(NH_4)_2S_2O_3$.



Fuente: (Navarro et al., 2006)



2.2.3.4 Efecto de la concentración de cianuro

La influencia de la concentración de cianuro en la adsorción de oro es un fenómeno complejo y de gran relevancia en la hidrometalurgia. Se ha observado que a medida que aumenta la cantidad de cianuro libre en la solución, la eficiencia con la que el carbón activado puede cargar oro disminuye. Este efecto se debe a la competencia que surge entre las moléculas de cianuro libre y las especies de aurocianuro por los sitios disponibles en la superficie del carbón activado para la adsorción.

El carbón activado, debido a su estructura porosa y superficie amplia, es altamente efectivo para capturar ciertas especies químicas. En el caso del oro, las especies de aurocianuro son las que típicamente se unen a estos sitios. Sin embargo, cuando la concentración de cianuro libre es alta, estas moléculas interfieren con la adsorción del aurocianuro, ya que ambas compiten por los mismos sitios de adsorción. Como resultado, la tasa y la capacidad de adsorción del oro disminuyen significativamente (Figuroa & Flórez, 2010).

A pesar de este desafío, se ha encontrado que el carbón activado muestra una selectividad incrementada hacia las especies de aurocianuro en comparación con otros cianuros metálicos cuando la concentración de cianuro es más alta. Esto sugiere que, aunque la presencia de cianuro libre puede interferir con la adsorción de oro, el carbón activado aún prefiere selectivamente las especies de aurocianuro sobre otros complejos de cianuro metálico (Figuroa & Flórez, 2010).



Es importante destacar que la concentración óptima de cianuro para la adsorción de oro no solo depende de la competencia por los sitios de adsorción, sino también de otros factores como la granulometría del mineral y la presencia de otros iones en la solución que pueden influir en la velocidad de adsorción. Por ejemplo, se ha reportado que el incremento en la concentración de cationes complementarios puede aumentar la velocidad de adsorción, siguiendo un orden de preferencia específico (Figuroa & Flórez, 2010).

2.2.3.5 Efecto de la temperatura

La temperatura es un factor clave que influye en el proceso de adsorción de oro sobre carbón activado. En general, la capacidad de carga de oro en el carbón activado disminuye a medida que aumenta la temperatura, debido a la naturaleza exotérmica del proceso de adsorción (Figuroa & Flórez, 2010).

La adsorción de oro sobre carbón activado es un proceso exotérmico, es decir, libera calor al medio circundante. Según el principio de Le Chatelier, un aumento en la temperatura desplaza el equilibrio de la reacción hacia el lado endotérmico, lo que favorece la desorción y dificulta la adsorción. En consecuencia, a temperaturas más altas, la capacidad de carga de oro en el carbón activado se ve reducida (Figuroa & Flórez, 2010).

Por esta razón, la mayoría de los circuitos de adsorción de oro en la industria minera operan a temperaturas ambientes, evitando así el calentamiento excesivo de la solución, lo cual podría disminuir la



eficiencia del proceso. Sin embargo, el calentamiento de la solución puede ser beneficioso en ciertas etapas, como la desorción y la regeneración del carbón activado cargado con oro (Figuroa & Flórez, 2010).

En el proceso de desorción, donde se busca remover el oro adsorbido del carbón activado, se aplican temperaturas cercanas al punto de ebullición de la solución. Este aumento de temperatura favorece la desorción de los complejos de aurocianuro del carbón activado, facilitando su recuperación y la posterior regeneración del adsorbente para su reutilización, además de la temperatura, otros factores como el pH de la solución, la concentración de cianuro y la presencia de otros iones metálicos también pueden influir en el proceso de adsorción de oro sobre carbón activado. Por lo tanto, es importante considerar todos estos factores de manera conjunta y optimizar las condiciones de operación para maximizar la eficiencia del proceso (Figuroa & Flórez, 2010).

2.2.4 Cinética de adsorción

La cinética de adsorción describe la velocidad a la que ocurre el proceso de adsorción de una especie química sobre la superficie de un adsorbente, en este caso, la adsorción de cianuro de oro sobre carbón activado. La ecuación presentada representa una forma de expresar la velocidad de esta reacción de adsorción.

$$-\frac{d[Au]}{dt} = A \frac{Km}{v} \quad (1)$$

Donde:



$\frac{d[Au]}{dt}$: Representa la tasa de cambio en la concentración de oro (Au) con respecto al tiempo (t), es decir, la velocidad de adsorción de oro.

A: Es el área superficial disponible del carbón activado para la adsorción.

Km: Es la constante de velocidad de adsorción, que depende de factores como la temperatura, la concentración de reactivos, el pH, entre otros.

V: Representa el volumen de la solución que contiene el cianuro de oro.

Esta ecuación establece que la velocidad de adsorción de oro ($d[Au]/dt$) es directamente proporcional al área superficial del carbón activado (*A*) y la constante de velocidad de adsorción (*Km*), e inversamente proporcional al volumen de la solución (*V*).

Es importante destacar que esta ecuación es una aproximación simplificada del proceso de adsorción, y en la práctica, la cinética puede ser más compleja y depender de varios factores adicionales. Por ejemplo, la difusión de las especies de oro hacia los sitios de adsorción en los poros del carbón activado puede ser un factor limitante y afectar la velocidad de adsorción.

Además, la naturaleza química de la superficie del carbón activado, la presencia de otros iones en la solución y las interacciones específicas entre el adsorbato (cianuro de oro) y el adsorbente (carbón activado) pueden influir en la cinética de adsorción.

Para obtener una descripción más precisa y completa de la cinética de adsorción, a menudo se utilizan modelos cinéticos más detallados, como el modelo de difusión intrapartícula, el modelo de Elovich o el modelo de pseudo-primer y pseudo-segundo orden. Estos modelos consideran factores adicionales,



como la transferencia de masa, la difusión en los poros y las etapas limitantes del proceso de adsorción.

En el contexto de las reacciones químicas, particularmente aquellas que están controladas por la película de difusión, la concentración de oro ($[Au]$) en el núcleo de la partícula se considera tan mínima que se puede despreciar. Esto sugiere que la concentración de $[Au]$ no tiene un efecto significativo en la velocidad o el progreso de la reacción global.

Además, para determinar el área de superficie de una partícula, se puede aplicar la siguiente fórmula matemática:

$$A = \frac{6\psi M}{d.e} \quad (2)$$

Donde:

A : representa el área de superficie, es un factor de forma que depende de la geometría de la partícula.

d : Es el diámetro.

ψ : Es el factor de forma.

e : Es la densidad.

M : Es la masa de partícula de carbón.

Esta ecuación permite calcular con precisión el área de superficie basándose en propiedades físicas fundamentales de la partícula y la película de difusión que la rodea.



En el estudio en cuestión, se ha adoptado un modelo simplificado para las partículas de carbón, tratándolas como si fueran esferas perfectas. Esta suposición permite asignar al factor de forma (ψ) un valor de uno, lo que simplifica significativamente los cálculos matemáticos relacionados con la dispersión de la luz y otras propiedades físicas.

Bajo esta premisa, la Ecuación (1) que describe el fenómeno estudiado puede ser reformulada de manera más directa y sencilla. La ecuación se convierte en una herramienta valiosa para predecir y entender el comportamiento de las partículas de carbón en diversas condiciones experimentales o aplicaciones prácticas.

La ecuación proporcionada en la imagen, que es una expresión diferencial, se puede interpretar de la siguiente manera:

$$-\frac{d[Au]}{dt} = \frac{6M}{d.e} Km[Au] \quad (3)$$

Esta fórmula establece la relación entre la tasa de cambio de la concentración de oro ($[Au]$) con respecto al tiempo y varios parámetros físicos y químicos. Aquí, (M) representa la masa de la partícula de carbón, (d) es la densidad del material, (e) es el espesor de la película de difusión, y (Km) es la constante de la tasa de masa. La ecuación es crucial para comprender la dinámica de la adsorción de oro en la superficie de las partículas de carbón y es fundamental en el diseño y optimización de procesos industriales relacionados con la extracción de oro.

En sistemas donde la densidad de las partículas sólidas y la solución son semejantes, el coeficiente de transferencia de masa, denotado como (km), adquiere

una importancia crítica. Este coeficiente (km) es un parámetro esencial que describe la eficiencia con la que la masa se transfiere entre la partícula y el fluido circundante.

La igualdad en densidades entre las partículas y la solución simplifica la dinámica del sistema y permite que el coeficiente de transferencia de masa se exprese de la siguiente manera:

$$km = \frac{2D}{d} \quad (4)$$

Aquí, (D) representa el coeficiente de difusión del soluto en la solución, y (d) es el diámetro de la partícula sólida. Esta relación es fundamental para modelar y predecir el comportamiento de la transferencia de masa en procesos industriales y experimentos científicos donde las partículas y la solución tienen densidades comparables. La comprensión de este coeficiente facilita el diseño de sistemas más eficientes para la mezcla, reacción y separación de sustancias en diversas aplicaciones de ingeniería química.

Al combinar y reorganizar las ecuaciones (3) y (4), se obtiene la siguiente relación matemática:

$$-\frac{d[Au]}{[Au]} = \frac{12D_m}{d^2e} dt \quad (5)$$

Esta ecuación diferencial describe cómo la concentración de oro ($[Au]$) en la solución cambia con el tiempo. Aquí, (D_m) representa el coeficiente de difusión de masa, (d) es el diámetro de la partícula y (e) es el espesor de la película de difusión. La ecuación es fundamental para entender la cinética de la reacción y la eficiencia del proceso de transferencia de masa en sistemas donde la difusión es el mecanismo controlante.



Para resolver esta ecuación y obtener una expresión para $[Au]$ como función del tiempo, se requeriría integrar ambos lados de la ecuación. Esto proporcionaría una comprensión más profunda de la dinámica de la concentración de oro a lo largo del tiempo en el sistema dado.

La expresión de la velocidad integrada que has proporcionado:

$$\ln [Au] = \ln [Au]_0 - Kt \quad (6)$$

Es una forma de la ley de velocidad integrada para reacciones de primer orden. En esta ecuación, $\ln [Au]$ representa el logaritmo natural de la concentración del reactivo Au en el tiempo t, $\ln [Au]_0$ es el logaritmo natural de la concentración inicial de Au, K es la constante de velocidad de la reacción, y t es el tiempo.

Para ampliar la información sobre esta expresión, podemos decir que es fundamental en la cinética química, ya que permite calcular la constante de velocidad (K) de una reacción basándose en la concentración del reactivo a diferentes intervalos de tiempo. Además, esta ecuación es útil para determinar la vida media de un reactivo, que es el tiempo necesario para que la concentración del reactivo se reduzca a la mitad de su valor inicial.

En el contexto de una reacción de primer orden, la velocidad de reacción depende únicamente de la concentración de un reactivo. Esto significa que, si duplicamos la concentración de A, la velocidad de la reacción también se duplicará. Las reacciones de primer orden son comunes en procesos como la desintegración radiactiva y las reacciones enzimáticas.

Donde $[Au]_0$ es la concentración inicial de oro en la solución:



$$K = \frac{12Dm}{d^{2*e}} = \text{Constante de velocidad observada} \quad (7)$$

se refiere a un parámetro importante en el estudio de las reacciones químicas que involucran oro. La concentración inicial ($[Au]_0$) actúa como un punto de referencia para observar cómo cambia la concentración de oro a lo largo del tiempo durante una reacción. Esto es esencial para entender la cinética de la reacción y para diseñar procesos químicos eficientes.

parece ser una fórmula que relaciona la constante de velocidad observada (K) con el coeficiente de difusión de masa (Dm) y el diámetro efectivo de las partículas (d^{*e}). Esta relación es crucial para comprender cómo los factores físicos, como el tamaño de las partículas y la difusión, afectan la velocidad de una reacción química.

Para ampliar aún más, la constante de velocidad (K) es un indicador de qué tan rápido ocurre una reacción. En el contexto de la ecuación proporcionada, (K) se calcula considerando la difusión de masa, que es el movimiento de las moléculas de oro a través de la solución, y el tamaño de las partículas de oro, que puede influir en la superficie de contacto y, por lo tanto, en la velocidad de la reacción.

Describe un método común en cinética química para analizar la velocidad de reacciones de primer orden. Al graficar el logaritmo natural de la concentración de oro, ($\ln [Au]$), en función del tiempo (t), se espera obtener una línea recta si la reacción sigue una cinética de primer orden. La pendiente de esta línea recta debería ser igual a la negativa de la constante de velocidad ($-K$), y el punto donde la línea corta al eje vertical (la intersección con el eje Y) corresponderá al logaritmo natural de la concentración inicial de oro, ($\ln [Au]$).



Puede ser expresada en términos de la concentración de oro en cualquier momento dado, y se ve así:

$$[Au] = [Au]_0 e^{-Kt} \quad (8)$$

Esta es la ley de velocidad integrada para una reacción de primer orden en forma exponencial. Aquí, $([Au])$ es la concentración de oro en el tiempo (t) , $([Au]_0)$ es la concentración inicial de oro, (e) es la base del logaritmo natural, (K) es la constante de velocidad, y (t) es el tiempo. Esta forma de la ecuación es útil porque muestra directamente cómo la concentración de oro disminuye exponencialmente con el tiempo a una tasa determinada por la constante de velocidad.

Esta relación es fundamental en procesos como la purificación de soluciones que contienen oro, donde el carbón activado se utiliza para capturar el oro debido a su alta afinidad por este metal precioso.

La ecuación proporcionada:

$$[Au]_{ads} = \frac{V}{A} ([Au]_0 - [Au]) \quad (9)$$

Describe matemáticamente esta relación. Aquí, $([Au]_{ads})$ representa la concentración de oro adsorbido sobre el carbón activado, (V) es el volumen de la solución, (A) es el área superficial del carbón activado, $([Au]_0)$ es la concentración inicial de oro en la solución, y $([Au])$ es la concentración de oro que queda en la solución después de la adsorción.

Podemos decir que esta ecuación es un componente clave en la ingeniería de procesos de adsorción. Permite a los ingenieros calcular la eficiencia de la

adsorción y optimizar el diseño de los sistemas de purificación. Por ejemplo, al aumentar el área superficial del carbón activado, se puede mejorar la captura de oro, lo que resulta en una menor cantidad de oro en la solución después del proceso de adsorción, además, esta ecuación también es útil para predecir la capacidad de adsorción del carbón activado en diferentes condiciones, lo que es esencial para la planificación y el control de procesos industriales que involucran la recuperación de oro.

La ecuación que combina las ecuaciones (8) y (9) para expresar la cantidad de oro adsorbido, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$[Au]_{ads} = \frac{V}{A} [Au]_0 (1 - e^{-Kt}) \quad (10)$$

Esta fórmula representa la cantidad de oro adsorbido ($[Au]_{ads}$) en el carbón activado en función del tiempo (t), la concentración inicial de oro ($[Au]_0$), la constante de velocidad (K), el volumen de la solución (V), y el área superficial del carbón activado (A). La ecuación muestra que la cantidad de oro adsorbido aumenta con el tiempo hasta alcanzar un equilibrio, donde toda la capacidad de adsorción del carbón activado se ha utilizado.

Para ampliar la información sobre esta ecuación, es importante entender que la constante de velocidad (K) es un indicador de qué tan rápido el oro se adsorbe en el carbón activado. Un valor más alto de (K) significa que la adsorción ocurre más rápidamente. La exponencial negativa (e^{-Kt}) refleja cómo la probabilidad de que las partículas de oro sean adsorbidas disminuye con el tiempo, ya que menos sitios de adsorción están disponibles en el carbón activado a medida que se acumula más oro.



Esta ecuación es muy útil en la industria de la minería y la metalurgia, ya que permite a los ingenieros calcular la eficiencia de la adsorción de oro y optimizar el proceso para maximizar la recuperación del metal precioso. Además, ayuda a predecir la cantidad de carbón activado necesaria para procesar una solución de oro y determinar cuándo se debe reemplazar o regenerar el carbón para mantener la eficiencia del proceso.

2.2.5 Proceso de Carbón en Pulpa (CIP)

El proceso de recuperación de oro mediante la técnica de Carbón en Pulpa (CIP) representa un avance significativo en la metalurgia extractiva. Esta metodología implica la introducción directa de **carbón activado** en la solución enriquecida con oro, sin necesidad de clarificar previamente la pulpa. Esta innovación ofrece ventajas sustanciales sobre los métodos tradicionales, especialmente en el tratamiento de minerales con mineralización compleja que presenta desafíos en la decantación y filtración (Misari, 1993).

El **proceso CIP** se caracteriza por la alimentación de una solución cianurada que contiene oro disuelto en tanques con carbón activado. La solución se agita mecánicamente, permitiendo que el oro sea adsorbido por el carbón. La pulpa, con oro cada vez más escaso, se transfiere de un tanque a otro hasta llegar al último, donde se separa una solución “barren” con bajos valores de oro, que junto con los desechos sólidos, se dirigen a las áreas de relaves (Villegas Quispe, 2015).

(Misari Chuquipoma, 2010) destaca que la técnica CIP ha demostrado ser un método exitoso para la extracción de oro. El proceso comienza con la



lixiviación del mineral molido en una solución de cianuro en ambientes alcalinos aireados, seguido por la adsorción del oro en el carbón activado.

(Huerta Solano, 2019) resume el Proceso CIP de la siguiente manera:

- La **pulpa rica** proveniente de la cianuración entra al circuito de adsorción, compuesto generalmente por cuatro tanques agitadores con carbón activado.
- Los tanques están diseñados para manejar el volumen de pulpa a tratar y cuentan con un **airlift central**. La pulpa fluye continuamente de un tanque a otro, reteniendo el carbón en cada tanque mediante una zaranda.
- Se añade **carbón fresco** al tanque con la pulpa más agotada y se recolecta el carbón saturado del primer tanque, que contiene la pulpa más rica en oro/plata. El carbón se mueve en dirección contraria a la pulpa.
- El traslado del carbón entre tanques es intermitente y se realiza en ciclos para enriquecer el carbón en el primer tanque hasta alcanzar una concentración de **300 a 400 oz/TM de Au**.
- El **pH operativo** debe mantenerse entre **10 y 11**.
- La **densidad de pulpa** debe ser de **40 – 45% sólidos**.
- La concentración de **cianuro libre** debe ser de **0,05%** dentro del circuito y no más de **0,015%** fuera de él.
- Es crucial mantener la densidad de pulpa adecuada para evitar la sedimentación o flotación del carbón.

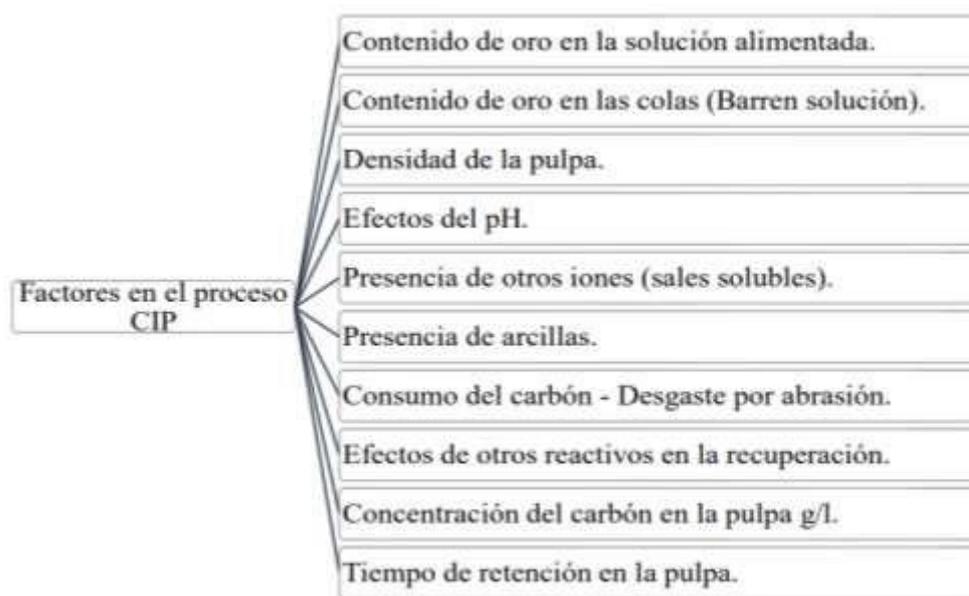
- Bajo las condiciones óptimas de CIP, el oro se adsorberá en el carbón, junto con otros metales como Pb, Zn, As, Sb, Co y Ni, que no representan problemas.
- La cantidad de oro en el carbón debe ser óptima, considerando los costos de operación. Se recomienda mantener una carga de oro en el carbón entre **4 250 - 8 500 g/t** para minimizar las pérdidas y controlar el contenido de oro.

2.2.6 Factores que influyen en el Proceso CIP

Los factores que determinan la eficacia del Proceso de Carbón en Pulpa (CIP) son múltiples y su interacción es crucial para el éxito de la extracción de oro. Entre estos factores, se destacan:

Figura 4.

Factores en el proceso CIP (Lixiviación carbón en pulpa).



Fuente: (Vargas, 1990)

Estos factores deben ser cuidadosamente controlados y optimizados para asegurar que el Proceso CIP sea eficiente y económicamente viable, maximizando la recuperación de oro y minimizando las pérdidas y el impacto ambiental.



2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es una herramienta vital en la optimización de procesos, su meticulosa elaboración es esencial para obtener datos cruciales que satisfagan los requisitos establecidos por las pruebas realizadas. Según (Varela & Reyes, 2011), la precisión en la planificación de un diseño experimental es fundamental para el éxito de cualquier investigación. La literatura científica está repleta de ejemplos donde la falta de atención o el desinterés en el modelo estadístico han llevado al fracaso de experimentos, como señalan (Egan et al., 2016).

Las interrogantes esenciales que se buscan responder en un diseño experimental son: el propósito, la razón, el método, el momento y el lugar de realización del experimento. Es crucial que el diseño sea sencillo y directo. Un diseño experimental eficiente y efectivo se caracteriza por seguir una secuencia lógica de pasos que determinan el número de pruebas a ejecutar, como indica (Fernández Bao, 2020), y establece el orden en que se llevarán a cabo dichas pruebas.

La importancia del diseño experimental radica en su capacidad para proporcionar un marco estructurado que guíe la experimentación. Este marco permite a los investigadores y profesionales no solo ejecutar pruebas de manera ordenada, sino también interpretar los resultados de forma que se puedan tomar decisiones informadas sobre la mejora de procesos. El diseño experimental es una estrategia que, cuando se aplica correctamente, puede conducir a mejoras significativas en la producción y la eficiencia (Fernández Bao, 2020).



2.3.1 Principios Básicos de un Diseño Experimental

2.3.1.1 Repetición o Reiteración

El principio mencionado se refiere a la importancia de realizar réplicas en los experimentos o pruebas experimentales. Las réplicas implican repetir el mismo experimento bajo las mismas condiciones controladas, utilizando diferentes unidades experimentales o muestras. Esto permite al investigador obtener una estimación más precisa del error experimental y de los efectos o interacciones entre los factores estudiados (Gutiérrez Pulido, 2012).

Cuanto más réplicas se realicen, mayor será la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto se debe a que las réplicas permiten cuantificar la variabilidad inherente al proceso o sistema en estudio, lo que a su vez permite realizar inferencias estadísticas más robustas y tomar decisiones mejor fundamentadas (Gutiérrez Pulido, 2012).

Es importante destacar que la replicación del experimento no debe confundirse con la toma repetida de mediciones u observaciones sobre la misma unidad experimental o muestra. Estas mediciones repetidas no constituyen réplicas genuinas, ya que no proporcionan una estimación independiente del error experimental ni permiten evaluar adecuadamente los efectos de los factores estudiados (Gutiérrez Pulido, 2012).

En cambio, las réplicas implican utilizar diferentes unidades experimentales o muestras, independientes entre sí, para cada combinación de los niveles de los factores evaluados. De esta manera, se pueden



capturar las fuentes de variabilidad inherentes al proceso y obtener una estimación más precisa del error experimental, además, las réplicas permiten estimar con mayor exactitud los efectos de interacción entre los factores estudiados. Los efectos de interacción ocurren cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentre otro factor. Estos efectos de interacción pueden ser difíciles de detectar y cuantificar con precisión sin un número adecuado de réplicas (Gutiérrez Pulido, 2012).

2.3.1.2 Aleatorización

La asignación aleatoria de las unidades experimentales a los tratamientos es un aspecto fundamental en el diseño experimental, ya que permite evitar sesgos y garantizar la validez de los resultados obtenidos. Este principio establece que cada unidad experimental (muestra, sujeto, etc.) debe tener la misma probabilidad de ser asignada a cualquiera de los tratamientos o condiciones experimentales evaluadas (Escalante et al., 2014).

Al realizar una asignación aleatoria, se reduce el riesgo de que factores no controlados o variables extrañas influyan de manera sistemática en los resultados, lo que podría sesgar el experimento y llevar a conclusiones erróneas. Esto es especialmente importante cuando existen factores que pueden intervenir de manera indirecta o directa en el rendimiento del proceso en estudio, además de evitar sesgos, la asignación aleatoria también garantiza que todos los niveles de un factor tengan las mismas posibilidades de ser evaluados en combinación con los niveles de otros factores. Esto es crucial cuando se estudian efectos de interacción



entre factores, ya que permite una estimación imparcial y precisa de estos efectos (Escalante et al., 2014).

Es importante destacar que la aleatoriedad en la asignación de tratamientos no significa que las unidades experimentales sean elegidas al azar. Por el contrario, las unidades experimentales deben ser seleccionadas de manera cuidadosa y representativa de la población o proceso en estudio. Una vez seleccionadas, estas unidades se asignan aleatoriamente a los diferentes tratamientos, existen diversos métodos para realizar la asignación aleatoria, como el uso de tablas de números aleatorios, programas informáticos específicos o técnicas de aleatorización estratificada, dependiendo de las características del experimento y los factores involucrados, es importante realizar una planificación adecuada del experimento para garantizar que la asignación aleatoria se lleve a cabo de manera correcta y que se cumplan los supuestos y requisitos necesarios para el análisis estadístico posterior de los datos (Escalante et al., 2014).

2.3.1.3 Control local

En el ámbito del diseño experimental, la implementación de medidas específicas es crucial para mejorar la eficiencia del proceso. Estas medidas están diseñadas para disminuir el error experimental, aumentando así la sensibilidad del experimento frente a las pruebas de significación estadística. El propósito principal de estas acciones es erradicar o, al menos, reducir al mínimo las fuentes de variabilidad no deseadas que puedan afectar los resultados del experimento. Esto se logra mediante la organización de los experimentos en grupos homogéneos, lo que permite



una comparación más precisa y controlada entre las diferentes condiciones experimentales (Antony, 2003).

La homogeneización de los grupos experimentales es una técnica que busca igualar las condiciones de los sujetos o elementos de prueba antes de la aplicación de los tratamientos experimentales. Esto se consigue a través de la **randomización** o asignación aleatoria, que distribuye de manera equitativa las características intrínsecas de los sujetos entre los diferentes grupos, asegurando que cualquier efecto observado sea atribuible al tratamiento y no a diferencias preexistentes, además, el control riguroso de las variables, tanto dependientes como independientes, es esencial para garantizar la validez interna del experimento. Esto incluye la estandarización de procedimientos, la utilización de instrumentación precisa y la capacitación adecuada de los operadores o investigadores para minimizar el sesgo y la variabilidad en la recopilación de datos (Antony, 2003).

2.3.2 Ventajas y desventajas del Diseño Experimental

El diseño experimental es una metodología poderosa que ofrece numerosas ventajas en la investigación y el análisis de procesos. A continuación, se amplían las ventajas y desventajas mencionadas:

- **Ventajas:**
 - Control y manipulación de variables: El diseño experimental permite al investigador controlar y manipular de manera



sistemática las variables de interés, lo que facilita el estudio de su efecto sobre la variable respuesta o el proceso en cuestión.

- **Identificación de interacciones:** Mediante el diseño experimental, es posible detectar e investigar las interacciones entre los diferentes factores o variables involucradas en el proceso. Esto proporciona una comprensión más profunda de las relaciones complejas que pueden existir entre los factores.
- **Análisis e interpretación estadística:** Al utilizar métodos estadísticos apropiados, el diseño experimental permite analizar e interpretar los datos obtenidos de manera rigurosa, lo que conduce a conclusiones más sólidas y confiables.
- **Planificación sistemática:** El diseño experimental implica una planificación cuidadosa y sistemática de los experimentos, lo que asegura que se lleven a cabo de manera ordenada y eficiente, abordando todos los aspectos relevantes del estudio.
- **Estimación y cuantificación de la variabilidad:** Uno de los principales objetivos del diseño experimental es estimar y cuantificar las fuentes de variabilidad presentes en los resultados obtenidos, lo que permite tomar decisiones más informadas y mejorar la calidad del proceso.
- **Identificación de alternativas óptimas:** El análisis de los resultados experimentales puede revelar combinaciones óptimas de los factores o condiciones que maximizan o minimizan la variable



respuesta, lo que permite identificar las mejores alternativas para el proceso en estudio.

- **Desventajas:**

- **Complejidad técnica:** Algunos diseños experimentales y sus análisis correspondientes pueden involucrar conceptos y terminología estadística técnica, lo que puede dificultar su comprensión y aplicación para personas sin formación en estadística.
- **Costo económico:** Dependiendo de la complejidad del estudio y el número de experimentos requeridos, el diseño experimental puede ser costoso en términos de recursos materiales, humanos y de tiempo.
- **Duración prolongada:** En algunos casos, la ejecución completa de un diseño experimental puede llevar un tiempo considerable, especialmente cuando se requieren múltiples réplicas o cuando se estudian procesos lentos o de larga duración.
- **Dificultad en la implementación:** Ciertos diseños experimentales pueden ser complicados de implementar en entornos industriales o en situaciones donde existen restricciones prácticas o limitaciones de recursos.

Según (Fernández Bao, 2020), es crucial reconocer que, aunque existen ciertas desventajas, el diseño experimental continúa siendo una herramienta esencial y de gran valor en el campo de la investigación científica y en la



optimización de procesos. A través de una planificación meticulosa, una formación exhaustiva y una distribución eficiente de los recursos, es posible reducir al mínimo las desventajas inherentes a este enfoque. Las ventajas que ofrece el diseño experimental, tales como la capacidad para establecer relaciones causales y la precisión en la medición de efectos, superan con creces las limitaciones que presenta. Esta metodología permite a los investigadores controlar de manera efectiva las variables y obtener resultados confiables y replicables, lo que constituye un pilar fundamental para el avance del conocimiento científico y la mejora continua de los procesos industriales y productivos.

2.3.3 Etapas del Diseño Experimental

Las etapas del Diseño Experimental son fundamentales para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos en cualquier investigación. Para preparar adecuadamente las condiciones de prueba y control, es imprescindible seguir un proceso sistemático que evite errores en los resultados, tal como señalan (Chok et al., 2005). Este proceso se compone de varias fases clave:

- **Establecimiento del problema:** Definir claramente el problema o la pregunta de investigación que se desea abordar.
- **Selección de la variable independiente:** Identificar la variable que será manipulada o controlada durante el experimento.
- **Determinación de factores y niveles:** Establecer los factores que podrían influir en los resultados y decidir los diferentes niveles en los que se probará cada factor.



- **Diseño de la ejecución del experimento:** Planificar cómo se llevará a cabo el experimento, incluyendo la selección de sujetos, la asignación de tratamientos y la definición de procedimientos.
- **Recolección de datos:** Implementar el experimento y recopilar los datos necesarios para el análisis.
- **Interpretación de los análisis estadísticos:** Analizar los datos recogidos utilizando métodos estadísticos para determinar si los resultados son significativos y qué implicaciones tienen para la hipótesis o problema planteado.

(Montgomery & Verbeek, 2004) enfatizan la importancia de una ejecución meticulosa en cada una de estas etapas para asegurar la integridad del diseño experimental. Además, es esencial considerar aspectos como la replicabilidad del experimento y la posibilidad de generalizar los resultados a una población más amplia.

2.3.4 Diseño Factorial

El concepto de **Diseño Factorial** se refiere a un enfoque sistemático utilizado en investigaciones experimentales donde múltiples factores influyen en el resultado de interés. Este tipo de diseño es particularmente útil cuando los resultados no son el producto de una sola variable, sino de la interacción de varias, cada una con distintos niveles que pueden afectar el resultado final. Según (Chok et al., 2005), la implementación de un diseño factorial permite a los investigadores evaluar no solo el efecto individual de cada factor, sino también cómo estos



interactúan entre sí, lo cual es crucial para comprender la complejidad de los fenómenos estudiados.

Una vez que se han identificado los factores relevantes y sus respectivos niveles, se procede a establecer una matriz de tratamientos. Esta matriz es esencial para planificar las pruebas experimentales de manera que se puedan observar las consecuencias de cada combinación de factores. El diseño factorial es altamente eficiente, ya que reduce el número de experimentos necesarios para examinar las posibles interacciones, en comparación con la realización de pruebas individuales para cada combinación posible, además, el diseño factorial es invaluable para optimizar procesos y productos, ya que permite a los investigadores identificar las condiciones bajo las cuales se obtienen los mejores resultados. Esto se traduce en una toma de decisiones más informada y en la posibilidad de predecir el comportamiento de los sistemas bajo estudio con mayor precisión (Chok et al., 2005).

2.3.5 Diseño Factorial 2^k

El **Diseño Factorial 2^k** es un método de diseño experimental que se caracteriza por su simplicidad y eficacia. Se utiliza para examinar las interacciones entre **K** factores, cada uno a dos niveles (generalmente alto y bajo), lo que resulta en un total de 2^k posibles combinaciones experimentales. Este diseño es considerado de primer orden debido a que se centra en el efecto principal de los factores sin considerar interacciones de orden superior.

La fórmula para determinar el número de experimentos necesarios en un diseño factorial 2^k es la siguiente:

$$N = 2^k \quad (11)$$

Donde:

K representa el número de factores a estudiar.

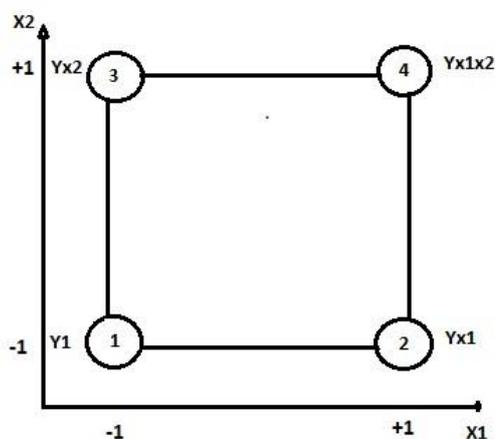
N es el número total de experimentos a realizar.

Esta fórmula asegura que se realice un número de ensayos que es exponencialmente proporcional al número de factores, lo cual es una característica distintiva de la eficiencia del diseño factorial 2^k . Por ejemplo, si se estudian tres factores (**K = 3**), se necesitarán ocho experimentos (**N = $2^3 = 8$**).

En la representación gráfica, como la mencionada Figura 5, los niveles de los factores en un diseño factorial 2^k se pueden visualizar en un sistema de coordenadas bidimensional, donde cada eje representa un factor y los puntos en el espacio representan las combinaciones de niveles de los factores. Esto facilita la interpretación de los datos y ayuda a visualizar las relaciones entre los factores y sus efectos en los resultados experimentales.

Figura 5.

Niveles: Diseño Factorial 2^k .



Fuente: (Montgomery & Verbeek, 2004)

Donde:

En el contexto del diseño experimental, $K=2$ indica que se están considerando dos factores o variables independientes. Las variables $X1$ y $X2$ representan estos factores, con $X1=1$ y $X2=2$ siendo sus valores codificados asignados. La variable Y es la variable de respuesta, la cual es el resultado que se desea predecir o analizar en función de los niveles de $X1$ y $X2$.

El nivel $+1$ se asigna al nivel superior de cada variable, lo que generalmente representa una condición más alta o un estado más deseable, dependiendo del contexto del experimento. Por otro lado, el nivel -1 se asigna al nivel inferior, indicando una condición más baja o menos deseable.

En la Tabla N° 1 se puede observar los valores de estas variables en una escala codificada. Esta codificación es una práctica común en el diseño experimental para simplificar el análisis estadístico, permitiendo una interpretación más clara y directa de los datos.

Tabla 1.

Valores de las variables codificadas

N° DE PRUEBA	VALORES CODIFICADOS		RESPUESTA
1	-	-	Y1
2	+	-	Yx1
3	-	+	Yx2
4	+	+	Yx1x2

Fuente: (Fernández Bao, 2020)

En el ámbito del diseño experimental, $Yx1$ se define como la variable de respuesta cuando la variable $X1$ está en su nivel alto ($+1$) y $X2$ en su nivel bajo (-1). Por otro lado, $Y1$ se considera la variable de respuesta cuando ambas variables, $X1$ y $X2$, están en su nivel más bajo (-1). De manera similar, $Yx1x2$ se identifica como la variable de respuesta cuando tanto $X1$ como $X2$ se encuentran en su nivel superior ($+1$), según lo explica (Gutiérrez Pulido, 2012).



Esta nomenclatura es parte de un diseño factorial, donde **Y** representa la variable de respuesta que se desea investigar o predecir. Los subíndices **x1**, **x2**, y **x1x2** indican las condiciones bajo las cuales se mide la variable de respuesta. Por ejemplo, **Yx1** se refiere a la medición de **Y** cuando **X1** está en su nivel alto y **X2** en su nivel bajo, lo que permite a los investigadores entender el efecto de **X1** independientemente de **X2**. La notación **Y1** se utiliza para describir la variable de respuesta bajo la condición de que ambos factores están en su nivel más bajo, lo que podría representar el punto de referencia o control en el experimento. Finalmente, **Yx1x2** representa la variable de respuesta cuando ambos factores están en su nivel más alto, lo que puede ser crucial para comprender el efecto combinado de **X1** y **X2** en **Y** (Gutiérrez Pulido, 2012).

Este sistema de codificación facilita la interpretación de los datos y ayuda a los investigadores a identificar cómo diferentes niveles de factores afectan la variable de respuesta. Además, permite una comparación sistemática entre los diferentes estados de los factores y sus interacciones, lo que es esencial para el análisis estadístico y la toma de decisiones basada en evidencia en la investigación científica y la mejora de procesos (Gutiérrez Pulido, 2012).

2.3.6 Diseño Factorial 2k con réplicas en el punto central del diseño

En el contexto de este diseño experimental, se propone incrementar el número de réplicas en el punto central más allá de una sola instancia. Este enfoque tiene como objetivo fortalecer la confiabilidad de los datos obtenidos de las pruebas experimentales. Al hacerlo, se facilita una evaluación más robusta del impacto que tiene la curvatura en los resultados. Según (Escalante et al., 2014), esta metodología es crucial para comprender mejor el fenómeno estudiado.

Para cuantificar el efecto de la curvatura, (Mina & Mercado, 1995) sugieren calcular la suma de cuadrados que mide la discrepancia entre los promedios obtenidos en los puntos factoriales y centrales. La fórmula para este cálculo es la siguiente:

$$SC_{curvatura} = \frac{n_F n_C (\hat{Y}_F - \hat{Y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (12)$$

Donde:

(\hat{Y}_C) es el promedio observado de la variable de respuesta en los puntos centrales.

(\hat{Y}_F) es el promedio observado de la variable de respuesta en los puntos factoriales.

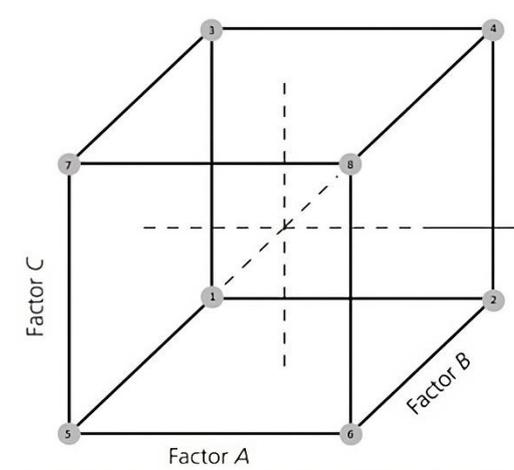
(n_C) y (n_F) representan la cantidad de puntos centrales y factoriales, respectivamente.

Si el valor de p resulta ser inferior a 0.05, se concluye que existe al menos un factor que muestra una relación no lineal significativa con la variable de respuesta, según lo indicado por (Escalante et al., 2014).

Finalmente, la determinación del número total de réplicas a realizar se basará en los recursos disponibles. Es importante tener en cuenta que las réplicas no son meras repeticiones, sino corridas experimentales distintas que se ejecutan bajo las mismas condiciones de factores y niveles, tal como lo explica (Gutiérrez Pulido, 2012). Esta práctica es esencial para garantizar la precisión y la reproducibilidad de los resultados experimentales.

Figura 6.

Diseño factorial para 2k con tres factores y réplicas centrales.



Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.3.7 Cálculo de efectos

El análisis de cálculo de efectos es un proceso estadístico que permite evaluar cómo las variables independientes influyen cuantitativamente en el criterio de optimización de un proceso. La matriz de efectos es una representación esquemática que muestra los experimentos y los efectos estimados, los cuales se calculan a través de una ecuación matemática específica. Esta ecuación es fundamental para entender la relación entre las variables y el resultado del proceso.

La ecuación para el cálculo de efectos es la siguiente:

$$E = \frac{(\Sigma\gamma_+ - \Sigma\gamma_-)}{\binom{N}{2}r} \quad (13)$$

Donde:

$(\Sigma\gamma_+)$ es la sumatoria de las respuestas para el nivel superior del factor o variable en estudio.



$(\Sigma\gamma_-)$ es la sumatoria de las respuestas para el nivel inferior del factor o variable en estudio.

(N) es el número total de pruebas experimentales realizadas.

(r) es el número de réplicas en el diseño experimental.

En el caso de un diseño factorial (2^k) con réplicas en el punto central, el valor de (r) es igual a 1. Este diseño permite evaluar la presencia de efectos principales y de interacción entre las variables.

El valor de (E) representa la magnitud del efecto de las variables independientes sobre la respuesta del proceso. Un valor de (E) significativamente distinto de cero indica que la variable correspondiente tiene un efecto notable en el criterio de optimización. Este análisis es crucial para identificar qué variables requieren ajustes para mejorar el proceso y alcanzar los resultados deseados de manera más eficiente.

2.3.8 Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores

El **Análisis de Varianza (ANOVA)** es una herramienta estadística fundamental que se utiliza para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos independientes. Es especialmente útil en experimentos donde se comparan los resultados analíticos de muestras que han sido sometidas a distintos métodos o que provienen de diferentes lugares y han sido evaluadas por varios analistas. Según (Montgomery & Verbeek, 2004), el ANOVA para un diseño factorial de dos factores es esencial para establecer la base de los análisis estadísticos, permitiendo a través de la teoría estadística,



derivar procedimientos para la construcción y organización de pruebas basadas en el modelo de respuesta.

En un diseño factorial de dos factores, se evalúan simultáneamente los efectos principales de cada factor y la interacción entre ellos. Esto proporciona una comprensión más profunda de cómo las variables independientes afectan la variable dependiente, tanto individualmente como en combinación. Por ejemplo, en un estudio que examina los métodos de análisis y la ubicación geográfica, un diseño factorial podría revelar no solo el impacto de cada uno de estos factores por separado, sino también cómo interactúan y si esa interacción es estadísticamente significativa.

La Tabla 2 que se menciona probablemente contenga fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F, que es una medida de cuánto varían los grupos entre sí en relación con la variabilidad dentro de los grupos. El cálculo del estadístico F se realiza a través de la siguiente fórmula general:

$$F_0 = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_{error}} \quad (14)$$

Donde ($MS_{tratamientos}$) es el cuadrado medio de los tratamientos y (MS_{error}) es el cuadrado medio del error. El valor-p asociado con el estadístico F nos indica la probabilidad de obtener un valor de F tan extremo o más, asumiendo que la hipótesis nula es verdadera. Un valor-p bajo sugiere que las diferencias observadas entre los grupos son poco probables que sean debido al azar, y por lo tanto, se consideran estadísticamente significativas.

Es importante destacar que el ANOVA es una técnica robusta que asume ciertas condiciones sobre los datos, como la normalidad, la homogeneidad de

varianzas y la independencia de las observaciones. Si estas condiciones no se cumplen, los resultados del ANOVA podrían no ser válidos, y sería necesario considerar métodos alternativos o transformaciones de los datos.

(Montgomery & Verbeek, 2004) enfatizan la importancia de comprender bien los principios del ANOVA y su aplicación correcta para obtener conclusiones válidas en el diseño factorial y en la investigación estadística en general.

Tabla 2

Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor- p .

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y^2}{N}$	(k - 1)	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P (F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	(N - k)	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{N}$	(N - 1)			

Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.3.8.1 Hipótesis

Las hipótesis en los diseños factoriales experimentales son declaraciones que se formulan para ser probadas estadísticamente, con el objetivo de determinar si los efectos observados en los datos son reales o si se deben al azar. En un diseño factorial de dos factores, estas hipótesis se centran en tres aspectos principales: el efecto del factor A, el efecto del factor B y el efecto de la interacción entre ambos factores.

La **hipótesis nula (H0)** establece que no hay diferencias significativas entre las medias de los grupos que se están comparando. Matemáticamente, se expresa como:

$$H0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (15)$$

Esto significa que cualquier variación observada en los resultados experimentales se atribuye a la variabilidad aleatoria inherente a los datos y no a los efectos de los tratamientos o factores estudiados.

Por otro lado, la **hipótesis alternativa (H1)** sugiere que al menos una de las medias de los grupos es diferente de las otras. Se formula como:

$$H1: \exists \mu_i \neq \mu_j \quad (16)$$

Donde ($\exists \mu_i$) denota “existe al menos un”. Esta hipótesis implica que las diferencias observadas son lo suficientemente grandes como para no ser atribuidas al azar, indicando que uno o más tratamientos tienen un efecto real y significativo.

En el contexto de un diseño factorial, la hipótesis de interacción es particularmente importante, ya que examina si el efecto de un factor depende del nivel del otro factor. Por ejemplo, podría ser que el factor A solo tenga un efecto significativo en presencia de un cierto nivel del factor B, y viceversa. Esto se denomina efecto de interacción y se formula como:

$$H1_{interacción}: \mu_{A_i B_j} \neq \mu_{A_i} + \mu_{B_j} - \mu_{general} \quad (17)$$

Donde ($\mu_{A_i B_j}$) representa la media del grupo bajo la combinación del nivel (i) del factor A y el nivel (j) del factor B, (μ_{A_i}) y (μ_{B_j}) son las

medias de los niveles individuales de cada factor, y $(\mu_{general})$ es la media general de todos los grupos.

Estas hipótesis son fundamentales en el análisis estadístico y guían la interpretación de los resultados de ANOVA en los diseños factoriales. La confirmación o refutación de estas hipótesis permite a los investigadores entender mejor la dinámica de los factores en estudio y sus posibles interacciones.

2.3.9 Formulación del modelo matemático

La formulación de un modelo matemático en el contexto de un diseño factorial a dos niveles implica identificar los efectos que son significativos para la investigación. Este proceso es crucial para desarrollar un modelo que refleje adecuadamente la realidad del fenómeno estudiado. La ecuación lineal general para un modelo factorial a dos niveles se puede expresar como:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{u=j}^k b_{uj} X_u X_j \quad (18)$$

Donde:

(\hat{Y}) es la respuesta predicha por el modelo.

(b_0) es el término independiente o intercepto.

(b_j) son los coeficientes que representan el efecto principal de cada factor.

(b_{uj}) son los coeficientes de interacción entre los factores.

Para estimar los coeficientes (b_0) , (b_j) , y (b_{uj}) , se utiliza una fórmula matricial basada en el método de mínimos cuadrados, que se representa como:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (19)$$

Esta ecuación matricial permite calcular los valores de los coeficientes que minimizan la suma de los cuadrados de los residuos, proporcionando así la mejor aproximación lineal a los datos observados.

Una vez que se ha obtenido el modelo matemático, es esencial decodificarlo para interpretar los resultados en el contexto del estudio. Las fórmulas para la decodificación de los términos del modelo son:

Término independiente:

$$a_0 = b_0 - \sum_{j=1}^k b_j \epsilon_j + \sum_{ij=1}^k b_{ij} \epsilon_{ij} (i \neq j) \quad (20)$$

Término lineal:

$$a_j Z_j = \Delta b Z_j \sum_{i=1}^k \Delta b_{ij} Z_{ij} (i \neq j) \quad (21)$$

Término de interacción:

$$a_{ij} Z_j Z_i = \left(\frac{b_{ij}}{\Delta Z_j \Delta Z_i} \right) \quad (22)$$

Estas ecuaciones permiten transformar los coeficientes del modelo matemático a una forma que es más interpretable y aplicable a la realidad del fenómeno bajo estudio. Es importante recordar que la precisión del modelo depende de la calidad de los datos y de la correcta especificación de los efectos significativos. Además, la interpretación de los coeficientes debe hacerse con cuidado, considerando el contexto y las limitaciones del diseño experimental.

2.3.9.1 Análisis de residuales

El análisis de residuales es un componente esencial en la evaluación de modelos estadísticos, ya que proporciona información sobre la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Los residuales, representados por (ϵ_i) , se calculan como la diferencia entre el valor observado (Y) y el valor predicho (\hat{Y}), según la ecuación:

$$\epsilon_i = Y - \hat{Y} \quad (23)$$

El valor predicho (\hat{Y}), también conocido como (Y) o Y estimada, se obtiene a través de la relación entre la matriz de diseño (X) y el vector de coeficientes (B), que se estima mediante la ecuación:

$$\hat{Y} = XB \quad (24)$$

El análisis de residuales no solo mide la distancia entre las predicciones y los valores reales, sino que también ayuda a verificar la adecuación del modelo. Un buen modelo tendrá residuales pequeños y distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, lo que indica que el modelo se ajusta bien a los datos. Por otro lado, si los residuales muestran patrones sistemáticos o tendencias, esto puede ser una señal de que el modelo no captura completamente la estructura subyacente de los datos o que hay variables importantes que no se han incluido.

Además, el análisis de residuales puede revelar la presencia de puntos atípicos o datos influyentes que podrían afectar la precisión del modelo. Estos puntos son aquellos cuyos residuales son inusualmente



grandes en magnitud y pueden indicar errores de medición, errores de entrada de datos o condiciones experimentales anómalas.

2.3.9.2 Técnicas gráficas para análisis de residuos

Las **técnicas gráficas para el análisis de residuos** son herramientas esenciales en la estadística para verificar los supuestos subyacentes en modelos de regresión. A continuación, se presenta una versión ampliada y reescrita del texto proporcionado:

Gráfica de Probabilidad para la Normalidad de Residuos La gráfica de probabilidad es una herramienta gráfica fundamental para la evaluación del supuesto de normalidad en los residuos de un modelo estadístico. Esta técnica permite inspeccionar si los residuos se distribuyen de manera que se ajusten a una línea recta, lo cual indicaría una distribución normal. Es importante notar que, aunque se espera un ajuste general a la línea, no es necesario que sea perfecto. En la práctica, debido a la naturaleza del análisis de varianza, es común observar desviaciones leves y moderadas que no comprometen la validez del modelo (Antony, 2003).

Gráfica de Dispersión para la Homocedasticidad Para verificar la homocedasticidad, o varianza constante de los residuos, se utiliza una gráfica de dispersión donde se comparan los valores ajustados (\hat{Y}_{ij}) con los residuos (ε_i). La expectativa es que los puntos se dispersen aleatoriamente y de manera uniforme a lo largo de un eje horizontal, sin mostrar tendencias o patrones discernibles. Esta distribución aleatoria es indicativa



de que la varianza de los residuos es constante a través de las diferentes predicciones del modelo (Gutiérrez Pulido, 2012).

Gráfica de Residuos para la Independencia El supuesto de independencia se puede explorar mediante una gráfica que relaciona el orden de recolección de los datos con los residuos correspondientes. Para confirmar la independencia, los puntos deben aparecer distribuidos de forma aleatoria dentro de una banda horizontal. La ausencia de patrones o correlaciones en esta distribución sugiere que los residuos son independientes entre sí, lo cual es crucial para la fiabilidad de las inferencias estadísticas.

Estas técnicas gráficas son parte integral del diagnóstico de modelos estadísticos y son fundamentales para asegurar la precisión y la validez de los resultados obtenidos en la investigación.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

3.1.1 Ubicación y acceso

3.1.1.1 Ubicación política

El acceso a **SERMETAL PERU S.A.C.** desde Lima es posible tanto por vía aérea como terrestre, y el viaje por carretera desde Juliaca. Desde esta última puede llegarse a la mina siguiendo la carretera afirmada Juliaca - Putina - Ananea - la Rinconada con un recorrido de 161,6 km. La distancia y el periodo de viaje son:

Tabla 3.

Ubicación política.

DESDE	HACIA	KILOMETROS	CARRETERA	TIEMPO
PUNO	JULIACA	42	asfaltada	45 min
JULIACA	HUANCANE	59	asfaltada	70 min
HUANCANE	PUTINA	40	asfaltada	46 min
PUTINA	ANANEA	58	asfaltada	60 min
ANANEA	RINCONADA	15	trocha	22 min
RINCONADA	SERMETALS.A.C	7	trocha	20 min
TOTAL		221		4 horas

Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.

3.1.1.2 Ubicación geológica

SERMETAL PERU S.A.C. se ubica en un lugar estratégico en el corazón de la comunidad de "Antahuila - Hurampillo", que forma parte del centro poblado de La Rinconada, situado en el distrito de Ananea Provincia de San Antonio de Putina, en el departamento de Puno. La empresa se encuentra en una región geográfica de gran relevancia debido

a su abundante presencia de recursos minerales, particularmente en lo que respecta a la extracción de oro, sus coordenadas geográficas y la elevación son:

Tabla 4.

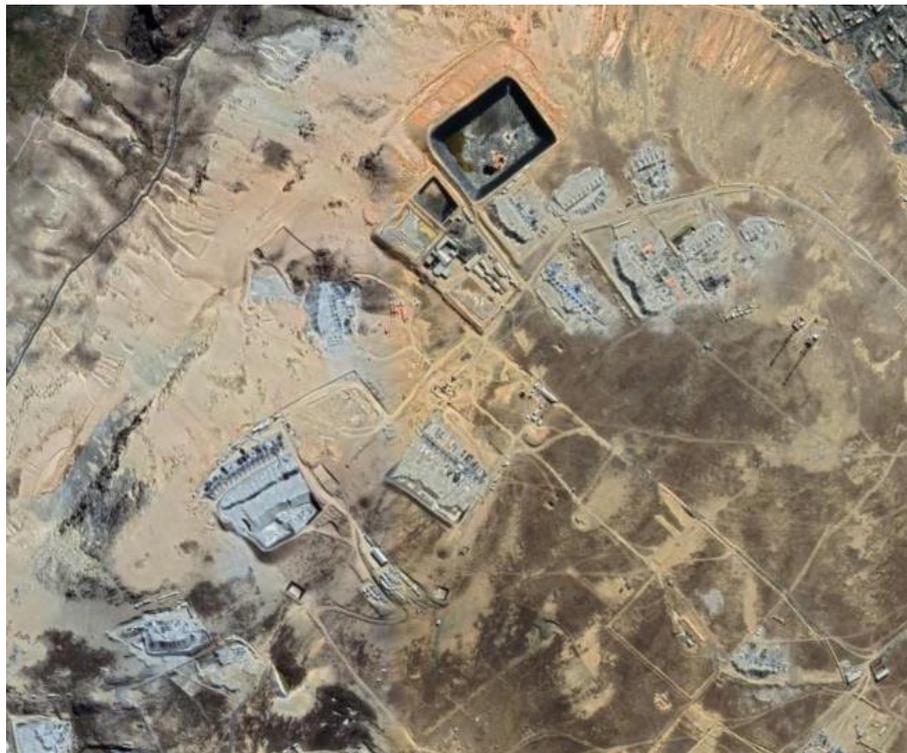
Coordenada WGS84 de la Planta procesadora

COORDENADAS WGS84 (GPS)	
Longitud	-69.45096680 °
Latitud	-14.63337710 °
Elevación	4973 m.s.n.m.

Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.

Figura 7.

Ubicación de la Planta procesadora.



Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.



3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.2.1 Población

Para fines de análisis y evaluación, se definirá como "población" al conjunto del mineral que ha sido procesado en la Planta de Beneficio. Este mineral, que actualmente se encuentra acumulado en las instalaciones, ha sido objeto de un proceso de extracción meticuloso. De esta población, se seleccionó una muestra representativa de **50 kilogramos**. Esta muestra fue sometida a un riguroso procedimiento de homogeneización y separación, asegurando así que cada fracción sea uniforme y esté adecuadamente diferenciada para los análisis subsiguientes.

Este proceso es esencial para garantizar la integridad y la precisión de los datos que se obtendrán. La homogeneización permite que las características del mineral sean consistentes en toda la muestra, mientras que la separación adecuada es crucial para identificar y categorizar las distintas calidades o tipos de mineral presentes. Estos pasos son fundamentales para la evaluación correcta del mineral y para la toma de decisiones basada en información confiable y detallada sobre su composición y calidad.

3.2.2 Muestra

Tras implementar un procedimiento de separación meticulosamente calibrado, se logró obtener una muestra precisa de **1 kilogramo** para cada uno de los experimentos planificados. Esta cantidad específica fue determinada considerando las limitaciones y la capacidad operativa del equipo de agitación disponible en nuestro laboratorio. Este paso es crucial para asegurar que las condiciones de cada experimento se mantengan consistentes y controladas.



Además, con el mismo cuidado y precisión, se extrajo una muestra adicional destinada exclusivamente para análisis detallados. Este proceso garantiza que los resultados obtenidos sean representativos y fiables, reflejando con exactitud las características y comportamientos del material bajo estudio. La selección de la muestra es un componente fundamental en la investigación científica, ya que de ella depende la validez de los datos y, por ende, la credibilidad de las conclusiones finales.

3.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA MUESTRA

Se tomó una muestra representativa para el análisis químico, luego de realizado el ensayo respectivo se pudo obtener los siguientes resultados.

Tabla 5.

Análisis químico de la muestra.

Composición	Oro (g/t)	Plata (g/t)	Cobre (g/t)
Contenido	7.067	221.07	52

Fuente: Elaboración Propia (Análisis por gravimetría y volumetría).

3.4 RELACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR LITRO DE PULPA

Para calcular la relación de carbón activado por litro de pulpa, teniendo en cuenta que se utilizan 500 kg de carbón activado en un tanque cilíndrico cuyo volumen útil es el 70% del total, procedemos de la siguiente manera:

3.4.1 Cálculo del Volumen Útil del Tanque Cilíndrico

a) Volumen total del tanque cilíndrico:

- **Diámetro:** 12 pies (3.66 metros)
- **Altura:** 12 pies (3.66 metros)



La fórmula para el volumen V de un cilindro es:

$$V = \pi \times (D/2)^2 \times h$$

• **Sustituyendo los valores:**

$$V = 3.1416 \times (3.66 \text{ m} / 2)^2 \times 3.66 \text{ m}$$

$$V = 3.1416 \times 1.83^2 \text{ m}^2 \times 3.66 \text{ m}$$

$$V = 38.5 \text{ m}^3 = 38,500 \text{ L}$$

b) Volumen útil del tanque (70% del volumen total):

$$\text{Volumen útil} = 38,500 \text{ L} \times 0.70 = 26,950 \text{ L}$$

c) Cálculo de la Relación de Carbón Activado por Litro de Pulpa:

Carbón activado disponible:

- **Peso del carbón activado:** 500 kg = 500,000 g

3.4.2 Relación de carbón activado por litro de pulpa

Si se utilizan 500,000 g de carbón activado para 26,950 litros de pulpa, la relación es:

$$500,000 \text{ g} / 26,950 \text{ L} \approx 18.55 \text{ g/L}$$

3.4.3 Relación Final

La relación de carbón activado es **18.55 g/L** de pulpa. Esto significa que para cada litro de pulpa en el volumen útil del tanque cilíndrico, se utilizan aproximadamente 18.55 gramos de carbón activado.



3.5 ÍNDICE DE ATRICIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN LA ADSORCIÓN EN EL PROCESO CIP

El proceso de Carbón en Pulpa (CIP) es un método ampliamente utilizado en la industria minera para la recuperación de oro. Una de las consideraciones críticas en este proceso es la durabilidad y eficiencia del carbón activado utilizado para adsorber el oro disuelto. El índice de atrición del carbón activado es un parámetro importante, ya que indica la resistencia del carbón a la ruptura y desgaste durante el proceso de agitación, lo que puede afectar la eficiencia de la adsorción y la vida útil del carbón.

El presente informe evalúa el índice de atrición de una muestra de carbón activado bajo condiciones específicas de agitación en el proceso CIP.

3.5.1 Objetivo

Determinar el índice de atrición del carbón activado durante el proceso de adsorción en condiciones simuladas de agitación, con el fin de evaluar la resistencia mecánica del carbón y su adecuación para su uso continuo en el proceso CIP.

3.5.2 Condiciones de la Prueba

- **Tipo de Carbón:** Carbón C
- **Cantidad de Carbón Muestra:** 100 g
- **Volumen de Agua Destilada:** 900 ml
- **Tiempo de Agitación:** 20 minutos
- **Velocidad de Revolución:** 1200 rpm
- **Peso Inicial del Carbón:** 100.01 g



- **Peso Final del Carbón:** 94.66 g

3.5.3 Resultados de la Prueba

- **Pérdida de Peso (Atrición):**
 - **Peso Inicial:** 100.01 g
 - **Peso Final:** 94.66 g
 - **Pérdida de Peso:** $100.01 \text{ g} - 94.66 \text{ g} = 5.35 \text{ g}$
 - **Porcentaje de Atrición:** $(5.35 \text{ g} / 100.01 \text{ g}) \times 100 = 5.35\%$
 - **Relación carbón / agua:** 1.9(100g de carbón / 900ml de agua)
- **Índice de Atrición:**
 - El índice de atrición es calculado considerando la pérdida de peso por unidad de tiempo durante el proceso de agitación:
 - **Índice de Atrición (mg/min):** 267.5 mg/min

3.5.4 Análisis

El índice de atrición obtenido es de 5.35%, lo que representa la pérdida de peso del carbón activado debido a la fricción y desgaste durante el proceso de agitación. El índice de atrición de 267.5 mg/min indica que, bajo las condiciones de prueba, el carbón activado exhibe un nivel moderado de desgaste.

Este nivel de atrición puede considerarse aceptable en operaciones donde el desgaste del carbón no impacte significativamente la eficiencia de adsorción y el costo operativo. Sin embargo, si la atrición es elevada, puede llevar a una

reducción en la capacidad de adsorción del carbón y un aumento en la necesidad de reposición de carbón nuevo, lo que incrementa los costos operativos.

Tabla 6.

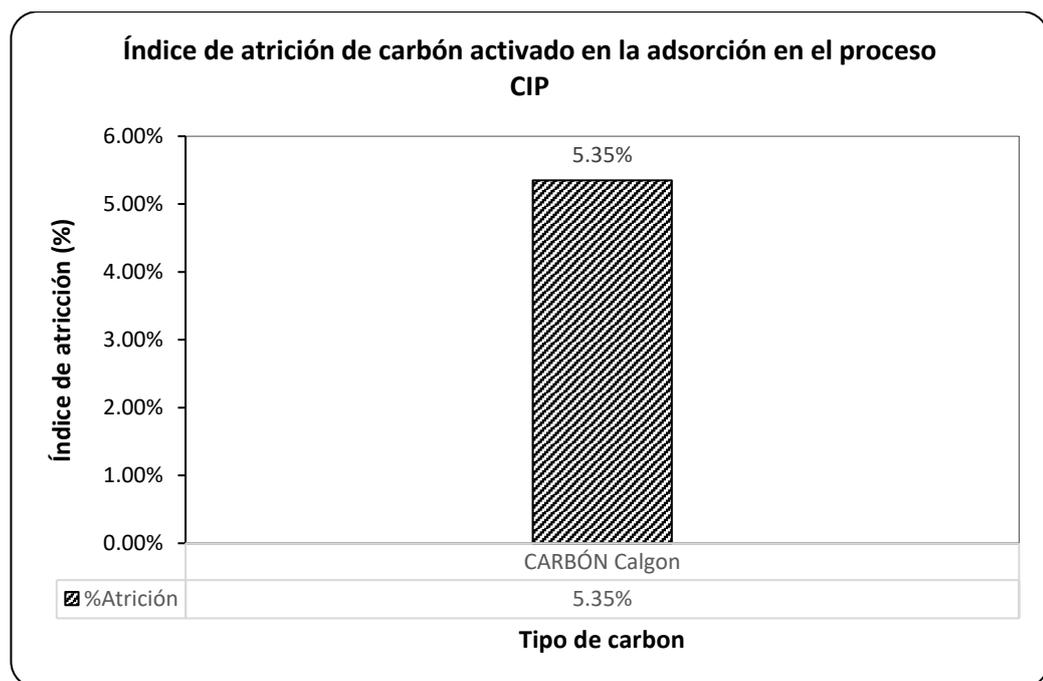
Índice de atrición de carbón activado en la adsorción en el proceso CIP.

PRUEBA DE ATRICIÓN			
Condiciones de prueba		CARBÓN Calgon	
Carbón muestra (g)	100	Peso Inicial (g)	100.01
Agua proceso (ml)	900	Peso Final (g)	94.66
Agitación (min)	20	%Atrición	5.35%
Revolución (rpm)	1200	Índice de Atrición (mg/min)	267.5

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 8.

Índice de atrición de carbón activado en la adsorción en el proceso CIP.



Fuente: Elaboración Propia.

El carbón activado analizado presenta un índice de atrición del 5.35% y un índice de atrición de 267.5 mg/min bajo condiciones de agitación intensa. Estos resultados sugieren que el carbón Calgon tiene una resistencia mecánica razonable para su uso en el proceso CIP, aunque podría beneficiarse de un monitoreo

constante para garantizar que la eficiencia de adsorción no se vea comprometida por la pérdida de material debido a la atrición.

Se recomienda continuar con pruebas adicionales para evaluar el desempeño del carbón activado en condiciones reales de operación y determinar si este índice de atrición es sostenible a largo plazo en el proceso CIP.

3.6 DISEÑO ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados se realizó con la ayuda del Software estadístico Minitab 19 y hojas de cálculo Excel.

3.6.1 Metodología

En el presente trabajo de investigación desarrollado con la finalidad de encontrar las condiciones favorables del estudio, se utilizó una investigación experimental y descriptiva.

Tipo de investigación

En el campo de la metalurgia del oro, la evaluación de la eficiencia en la extracción del metal precioso es fundamental. Para ello, se llevó a cabo un estudio de investigación experimental, centrado en la tasa de extracción de oro durante el proceso de lixiviación por agitación utilizando Cianuro de Sodio (NaCN). Este tipo de investigación es crucial, ya que permite la manipulación precisa de variables en un entorno controlado para observar su influencia directa en los resultados obtenidos.

La metodología experimental se caracteriza por su rigor y estructura, donde cada variable es cuidadosamente alterada y monitoreada para determinar su



impacto en la lixiviación del oro. Se reproducen fenómenos específicos bajo condiciones estandarizadas, lo que permite una observación detallada y sistemática del comportamiento de las variables y su relación con la tasa de extracción.

En este estudio, se establecieron parámetros controlados para la concentración de cianuro, el tiempo de contacto entre el mineral y el reactivo, y la intensidad de agitación. Estos factores son esenciales, ya que una variación en cualquiera de ellos puede alterar significativamente la eficiencia del proceso de extracción. La observación de estas variables y su interacción proporciona una comprensión más profunda de los mecanismos que rigen la lixiviación por agitación y permite optimizar el proceso para maximizar la recuperación del oro.

El análisis de los datos recopilados revela la relación entre la concentración de cianuro y la tasa de disolución del oro, así como la importancia de un equilibrio adecuado entre la intensidad de agitación y el tiempo de exposición al reactivo. Con estos hallazgos, se busca mejorar las prácticas de extracción de oro, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la rentabilidad de la operación minera.

Este enfoque experimental es un pilar en la investigación metalúrgica, ya que proporciona la base científica para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en la industria del oro.

VI:(Causa) “X”

VD (Efecto) “Y”

Nivel de investigación

Para desarrollar el presente trabajo de investigación se utilizó el nivel de investigación descriptivo-explicativo por las siguientes razones.

- **Descriptivo:** porque intenta o pretende identificar las principales características de uno o más fenómenos objeto de análisis y representar con precisión sus dimensiones.
- **Explicativo:** Busca o intentar determinar las causas de un evento o fenómeno que es objeto de análisis de investigación.

Diseño de la investigación

Se utilizó el diseño descriptivo experimental porque permite determinar la causalidad de manera más confiable. Este estudio se llevó a cabo en tres etapas:

Etapa I: Análisis químico

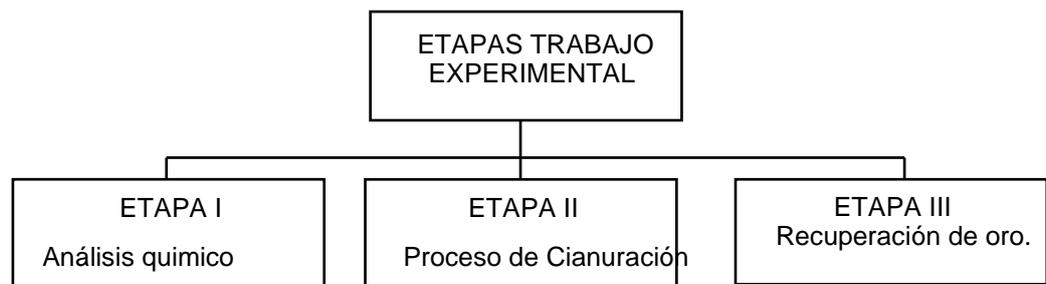
Etapa II: Proceso de Cianuración.

Etapa III: Recuperación de oro.

La actividad de investigación se propuso y diseñó para alcanzar los objetivos descritos en la siguiente figura:

Figura 9.

Etapas del trabajo experimental.



Fuente: Elaboración Propia.



3.6.2 Desarrollo del procedimiento de investigación

Durante la fase actual del proyecto, se ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva de los parámetros críticos en el proceso de cianuración de minerales de oro. El objetivo principal de esta etapa ha sido el de incrementar significativamente el porcentaje de recuperación del oro a nivel de laboratorio, lo que podría tener implicaciones positivas para la eficiencia y rentabilidad en la escala de producción.

Para lograr este fin, se han establecido condiciones experimentales óptimas que permiten una valoración precisa del proceso de recuperación de oro utilizando **Cianuro de Sodio (NaCN)**. Estas condiciones se han definido meticulosamente y se presentarán en la sección de resultados. En esta parte del estudio, se ha dado prioridad al tratamiento que demostró ser el más efectivo entre todos los ensayos realizados, con el fin de alcanzar la máxima extracción posible del precioso metal.

El proceso de cianuración se ha optimizado mediante la variación controlada de variables como la concentración de NaCN, el pH de la solución, la temperatura, el tiempo de lixiviación, la granulometría del mineral, la densidad de pulpa y el peso de carbón activado de tipo Calgon. Se ha prestado especial atención a la selección del tratamiento que maximiza la recuperación de oro, minimizando al mismo tiempo el consumo de reactivos.

Los resultados obtenidos de esta investigación proporcionarán una guía valiosa para la implementación de las mejores prácticas en la industria minera. Además, los hallazgos podrían contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías y



métodos que mejoren la eficacia de la cianuración, asegurando una recuperación de oro más sostenible y económicamente viable a largo plazo.

Este enfoque metódico y detallado en la evaluación de parámetros es un paso crucial hacia la mejora continua en la metalurgia del oro, y se espera que los resultados de esta etapa sean un referente en la investigación y práctica de la cianuración de minerales de oro.

3.7 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERIMENTOS

En la fase de planificación de nuestro estudio experimental, se ha adoptado un enfoque sistemático para determinar el número óptimo de experimentos. Se seleccionó el **diseño factorial 2^k** por su capacidad para evaluar múltiples variables y sus interacciones de manera eficiente. Este diseño es particularmente valioso cuando se trabaja con un número limitado de factores, permitiendo una comprensión profunda de su impacto en el sistema estudiado.

La fórmula utilizada para calcular el número de experimentos necesarios es la siguiente:

$$N = 2^k \quad (25)$$

Donde:

2: representa los niveles de prueba para cada factor, indicando la presencia o ausencia de cada uno.

k: es el número de factores o variables independientes consideradas en el estudio, que en este caso son tres.

N: es el número total de experimentos a realizar.



Al aplicar la fórmula con $k = 3$, obtenemos:

$$N = 2^3 = 8$$

Esto indica que, bajo un diseño factorial simple, se requieren **ocho experimentos**. Sin embargo, para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados, y para proporcionar una estimación del efecto de curvatura, se añadieron tres réplicas en el punto central del diseño. Esto eleva el número total de pruebas a **once**.

El desglose es el siguiente:

Número de experimentos factoriales: 8

Número de pruebas centrales: 3

Número total de pruebas: 11

Estas pruebas adicionales en el punto central sirven para aumentar la robustez del diseño experimental y para asegurar que los resultados sean representativos y replicables. En la **Tabla 6**, se ilustran los niveles de las variables para cada uno de los ocho experimentos del diseño factorial. La **Tabla 7** detalla las condiciones específicas de las tres réplicas centrales.

Este enfoque meticuloso en la determinación del número de experimentos es esencial para garantizar la integridad y la calidad de los datos obtenidos, lo que a su vez, facilita la toma de decisiones basadas en evidencia en el campo de estudio correspondiente.

Variables del proceso

Variables Independientes

- Densidad de pulpa (g/L)
- pH
- Carbón activado (g): Tipo Calgon

Variable Dependiente

- Porcentaje de Recuperación de Au.

Los parámetros de las pruebas experimentales serán los siguientes:

Tabla 7.

Niveles de las variables de estudio.

VARIABLES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
Densidad de pulpa (g/L)	1250	1350
pH	10.5	11.5
Carbón Activado: Calgon (g)	250	350

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8.

Valores para realizar las réplicas centrales.

Densidad de pulpa (g/L)	pH	Carbón Activado Calgon (g)
1300	11	300

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de las variables que se utilizaron en las pruebas CIP a nivel de laboratorio, para el tipo de carbón Calgon, se muestran los valores empleados en la Tabla 8.

Tabla 9.

Valores en las pruebas CIP con carbón tipo Calgon.

Prueba (N)	VARIABLES		
	Densidad de pulpa (g/L)	pH	Carbón Tipo Calgon (g)
1	1250	10.5	250
2	1350	10.5	250
3	1250	11.5	250



Prueba (N)	VARIABLES		
	Densidad de pulpa (g/L)	pH	Carbón Tipo Calgon (g)
4	1350	11.5	250
5	1250	10.5	350
6	1350	10.5	350
7	1250	11.5	350
8	1350	11.5	350
9	1300	11	300
10	1300	11	300
11	1300	11	300

Fuente: Elaboración Propia.

3.8 MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO

3.8.1 Materiales

- Manta de Cuarteo
- Bolsas de plásticos
- Baldes de plástico
- Pala metálica
- Plumones indelebles, lápices y lapiceros
- Calculadora
- Cronómetro
- Cuaderno
- Probeta de 1 litro
- Pizeta de 500 ml
- Brocha
- Jeringa de 10 ml (10)
- Vaso de precipitados
- Papel filtro
- Pissetas
- Bandejas



- Espátula
- Botellas de plástico
- Luna reloj (vidrio)
- Embudos

3.8.2 Equipos

- Balanza de kilogramos
- Balanza de precisión
- Equipos de agitación
- Papel panpeha
- Balanza analítica
- Balanza Marcy o Bascula Marcy
- Reloj Cronómetro

3.8.3 Reactivos

- Cal (CaO)
- Cianuro de Sodio (NaCN)
- Agua del proceso
- Agua destilada
- Carbón activado tipo Calgon

3.8.4 Equipos de Protección

- Mameluco
- Tapón de oídos



- Mascarilla de silicona
- Guantes de jebe
- Gafas de seguridad
- Calzado de seguridad

3.9 PRUEBAS EXPERIMENTALES CIP

El propósito central de las pruebas experimentales CIP (Carbón en Pulpa) es profundizar en el entendimiento de cómo diversos factores afectan la eficacia en la extracción de oro. Uno de los aspectos clave bajo estudio es la influencia del **tipo de carbón activado** utilizado en el proceso. Diferentes calidades y orígenes del carbón activado pueden tener un impacto significativo en la adsorción del oro, y es esencial identificar el más adecuado para optimizar el rendimiento.

Además, se evaluará la **densidad de la pulpa**, un parámetro crítico que puede alterar la dinámica del proceso CIP y, por ende, la recuperación del oro. Un equilibrio óptimo entre la densidad de la pulpa y la capacidad de adsorción del carbón es vital para maximizar la eficiencia.

Otro factor determinante es el **pH de la solución**, que debe ser controlado cuidadosamente para favorecer la lixiviación del oro. Un pH adecuado es crucial para mantener la estabilidad del complejo oro-cianuro y para la efectividad del carbón activado en la captura del metal.

Las pruebas se llevarán a cabo en un laboratorio especializado, situado en la **Planta de Beneficio** de la comunidad de “**Antahuila - Hurampillo**”. Este laboratorio está equipado con la tecnología y los instrumentos necesarios para simular y monitorear



las condiciones del proceso CIP a escala de laboratorio, lo que permite una evaluación precisa y detallada de los resultados.

La realización de estas pruebas en un entorno controlado y especializado es fundamental para asegurar la validez y la reproducibilidad de los datos. Los resultados obtenidos contribuirán significativamente al conocimiento científico y técnico necesario para mejorar las prácticas de extracción de oro, haciendo el proceso más eficiente y sostenible desde un punto de vista ambiental y económico.

Con estas pruebas, se espera no solo comprender mejor la interacción entre el carbón activado, la densidad de la pulpa y el pH, sino también establecer protocolos de operación que resulten en una recuperación de oro más efectiva y rentable en la industria minera.

3.10 PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS CIP A NIVEL DE LABORATORIO

En las instalaciones del laboratorio de la Planta de Beneficio, localizada en la comunidad de “**Antahuila - Hurampillo**”, se han llevado a cabo pruebas críticas de CIP (Carbón en Pulpa). Estas pruebas son esenciales para optimizar la recuperación de oro y para evaluar la eficacia del carbón activado tipo Calgon en el proceso. La preparación meticulosa para estas pruebas experimentales incluyó varias etapas clave:

Selección y Preparación de la Muestra: Se inició con la cuidadosa separación de muestras de **1 Kg de mineral aurífero**. Este paso es crucial para garantizar que las pruebas reflejen condiciones reales y proporcionen datos fiables. La selección de muestras representa la diversidad mineralógica del yacimiento, asegurando que los resultados sean aplicables a una amplia gama de escenarios de la planta.



Montaje del Equipo de Agitación: Posteriormente, se procedió con el ensamblaje del equipo de agitación necesario para las pruebas CIP. Este equipo es fundamental para simular las condiciones dinámicas dentro de los tanques de lixiviación y para garantizar una interacción efectiva entre el mineral y la solución lixivante.

Acondicionamiento del Mineral: Luego, se acondicionó el mineral según los parámetros estimados para el carbón activado tipo Calgon. El acondicionamiento adecuado del mineral es vital para asegurar que la superficie del mineral esté preparada para una interacción óptima con la solución de cianuro, lo que afecta directamente la eficiencia de la extracción de oro.

Condiciones Experimentales: Las condiciones experimentales se establecieron con precisión para evaluar la capacidad de adsorción del carbón tipo Calgon bajo diferentes escenarios. Estas condiciones incluyeron variables como la concentración de cianuro, el tiempo de contacto entre el carbón y la solución, y la temperatura de operación. Se diseñaron para replicar lo más fielmente posible las condiciones de la planta a escala de laboratorio, permitiendo así una extrapolación precisa de los resultados a la operación real.

Estos procedimientos preliminares son fundamentales para el éxito de las pruebas CIP y para obtener resultados que puedan influir significativamente en la mejora de los procesos de recuperación de oro en la planta. Con una planificación y ejecución cuidadosas, las pruebas CIP proporcionan información valiosa que puede llevar a una mayor eficiencia y rentabilidad en la extracción de oro.



3.10.1 Prueba N° 01

PARAMETROS DE PRUEBA:

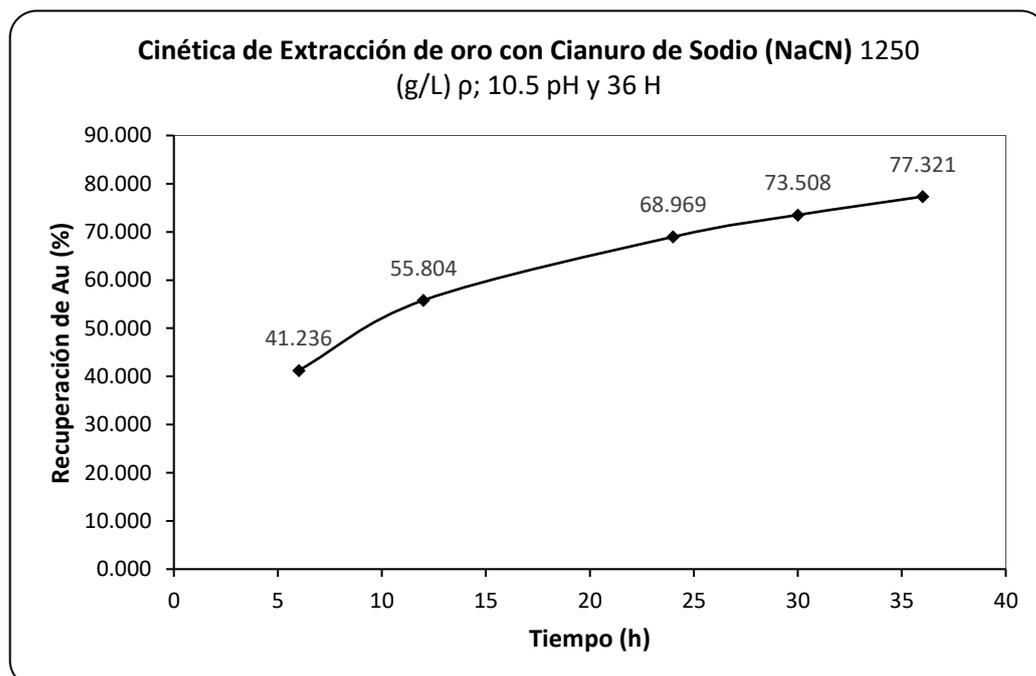
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
Carbón Tipo Calgon:	250 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.807	3.615	41.236
Solución 12 h	2.00	2.446	4.892	55.804
Solución 24 h	2.00	3.023	6.046	68.969
Solución 30 h	2.00	3.222	6.444	73.508
Solución 36 h	2.00	3.389	6.778	77.321
Relave	1	1.988	1.988	22.679
Cabeza calc.	1	8.766	8.766	100.000

% Recuperación Ensayada 71.869

% Recuperación Calculada 77.321





3.10.2 Prueba N° 02

PARAMETROS DE PRUEBA:

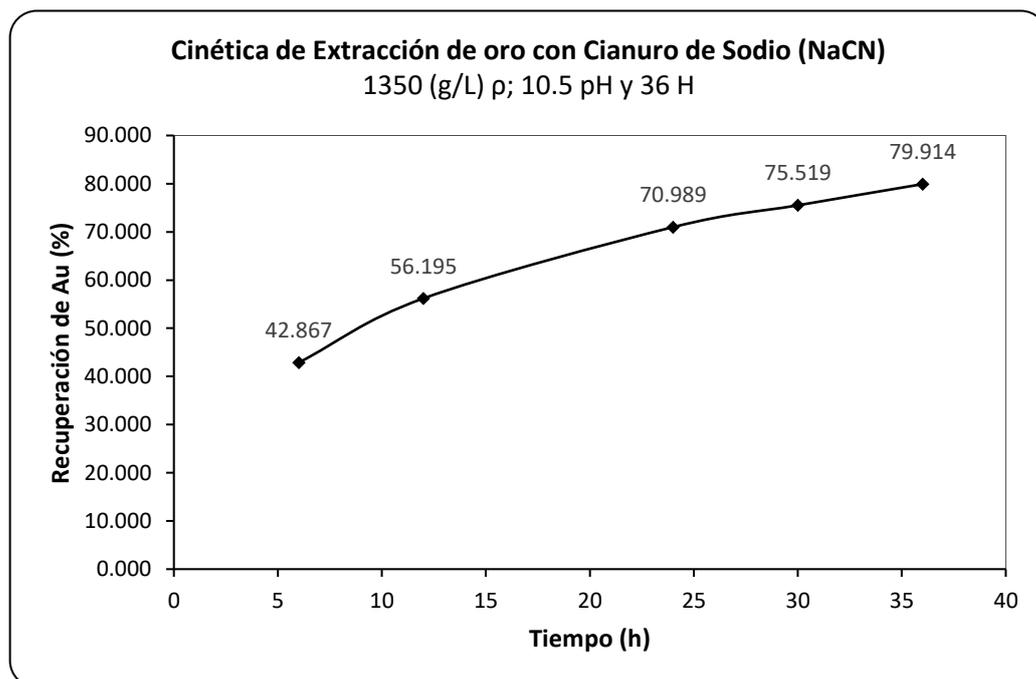
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	10.5
Carbón Tipo Calgon:	250 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.809	3.618	42.867
Solución 12 h	2.00	2.372	4.743	56.195
Solución 24 h	2.00	2.996	5.992	70.989
Solución 30 h	2.00	3.187	6.374	75.519
Solución 36 h	2.00	3.373	6.745	79.914
Relave	1	1.695	1.695	20.086
Cabeza calc.	1	8.441	8.441	100.000

% Recuperación Ensayada 76.010

% Recuperación Calculada **79.914**





3.10.3 Prueba N° 03

PARAMETROS DE PRUEBA:

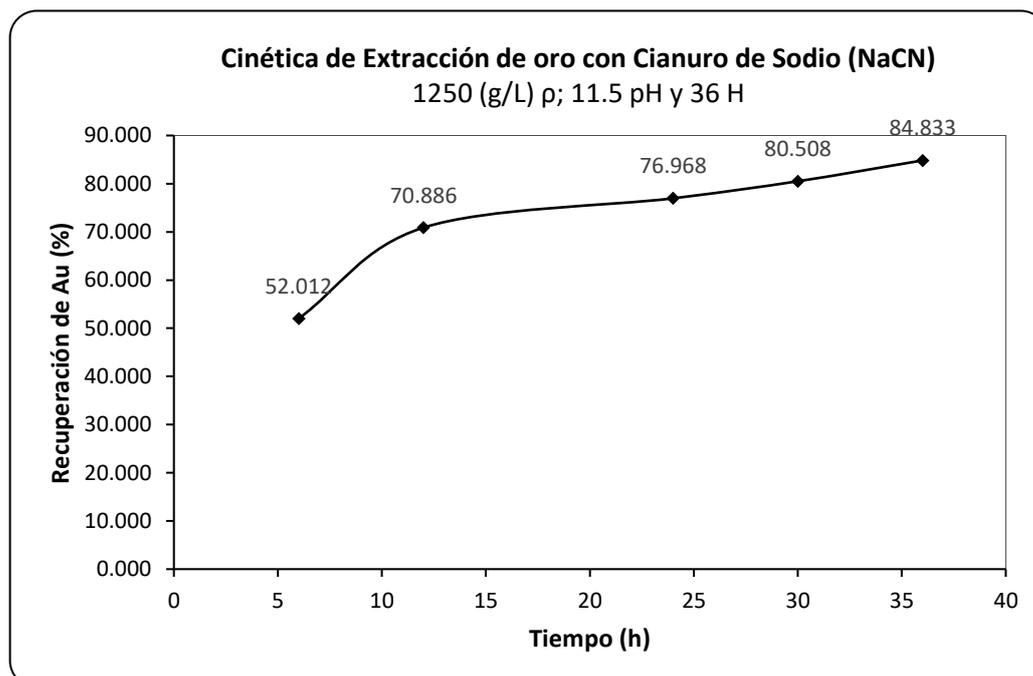
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	11.5
Carbón Tipo Calgon:	250 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.082	4.164	52.012
Solución 12 h	2.00	2.837	5.675	70.886
Solución 24 h	2.00	3.081	6.162	76.968
Solución 30 h	2.00	3.223	6.445	80.508
Solución 36 h	2.00	3.396	6.791	84.833
Relave	1	1.214	1.214	15.167
Cabeza calc.	1	8.006	8.006	100.000

% Recuperación Ensayada 82.819

% Recuperación Calculada 84.833





3.10.4 Prueba N° 04

PARAMETROS DE PRUEBA:

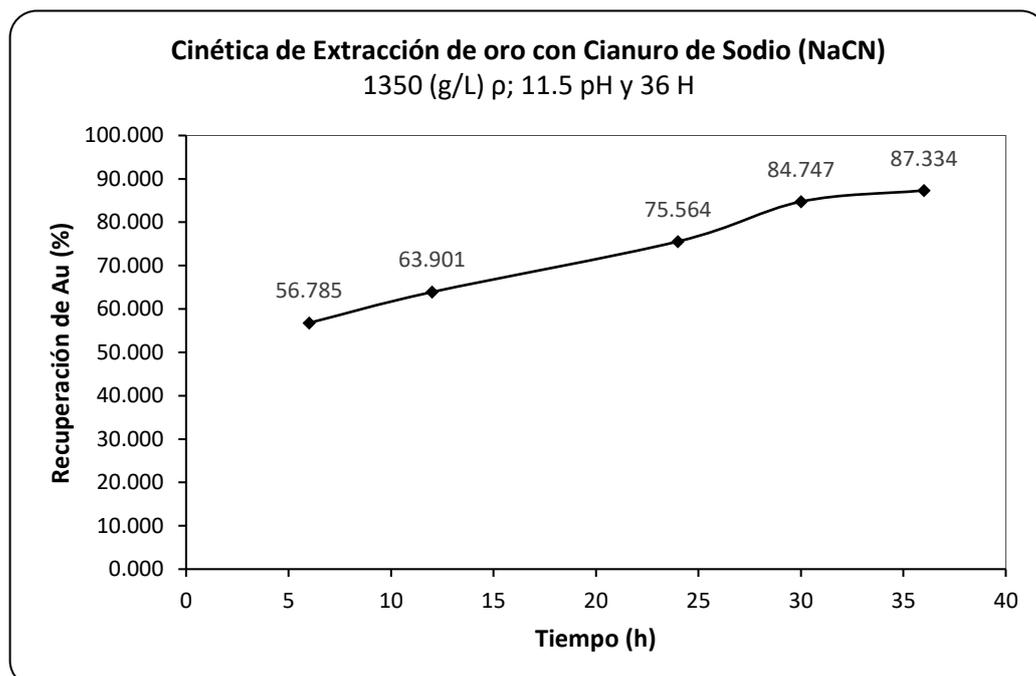
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
Carbón Tipo Calgon:	250 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.233	4.466	56.785
Solución 12 h	2.00	2.513	5.026	63.901
Solución 24 h	2.00	2.972	5.943	75.564
Solución 30 h	2.00	3.333	6.666	84.747
Solución 36 h	2.00	3.435	6.869	87.334
Relave	1	0.996	0.996	12.666
Cabeza calc.	1	7.865	7.865	100.000

% Recuperación Ensayada 85.903

% Recuperación Calculada 87.334





3.10.5 Prueba N° 05

PARAMETROS DE PRUEBA:

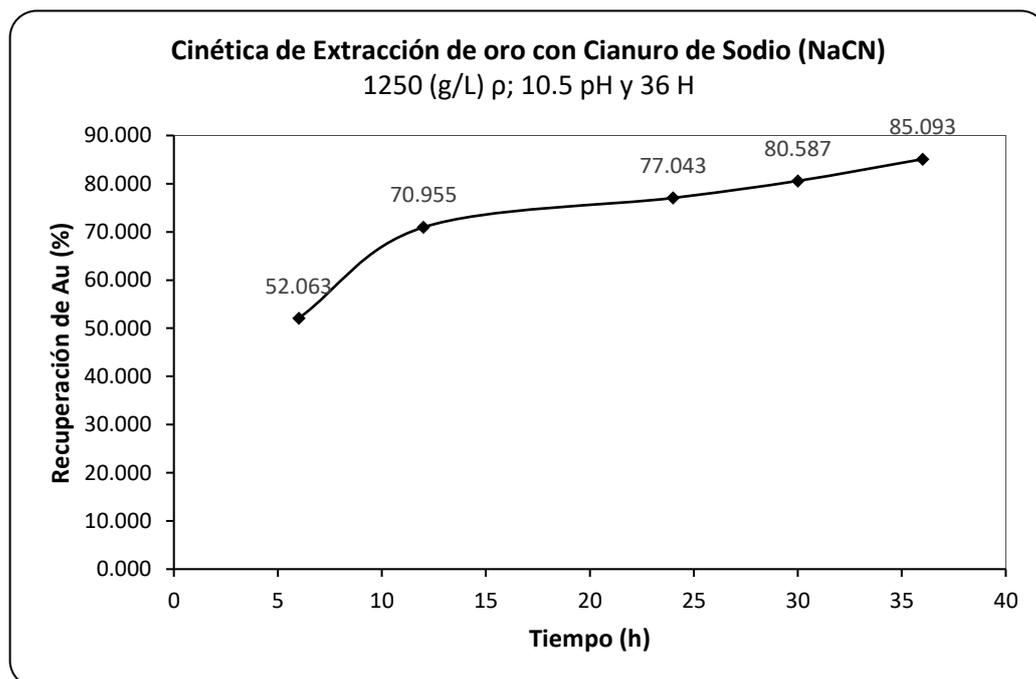
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	10.5
Carbón Tipo Calgon:	350 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.082	4.164	52.063
Solución 12 h	2.00	2.837	5.675	70.955
Solución 24 h	2.00	3.081	6.162	77.043
Solución 30 h	2.00	3.223	6.445	80.587
Solución 36 h	2.00	3.403	6.806	85.093
Relave	1	1.192	1.192	14.907
Cabeza calc.	1	7.998	7.998	100.000

% Recuperación Ensayada 83.130

% Recuperación Calculada 85.093





3.10.6 Prueba N° 06

PARAMETROS DE PRUEBA:

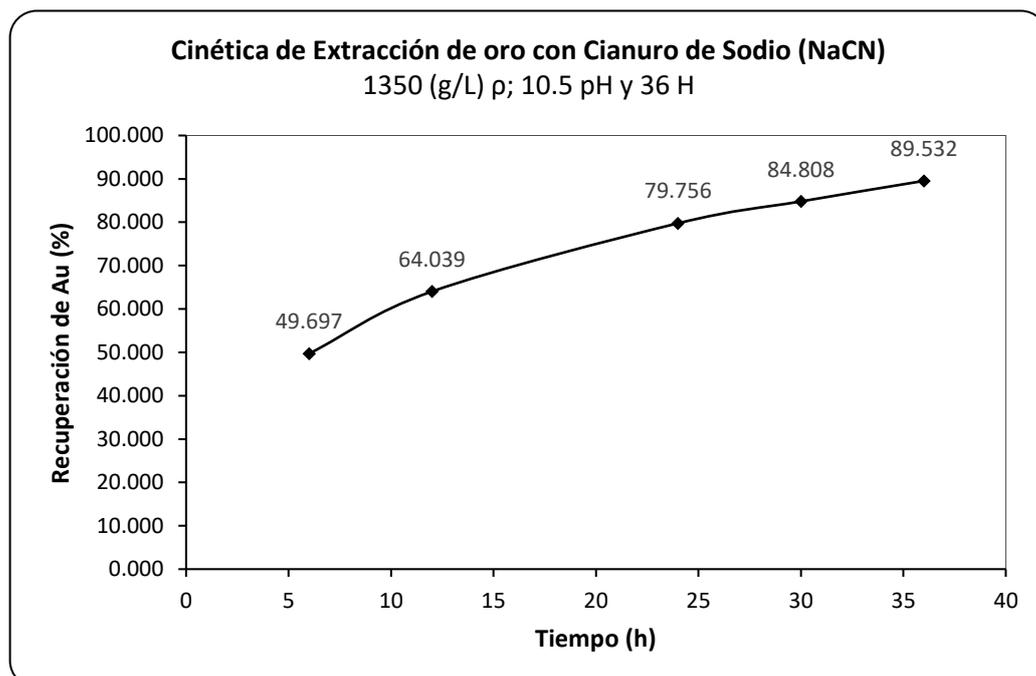
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	10.5
Carbón Tipo Calgon:	350 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.877	3.754	49.697
Solución 12 h	2.00	2.419	4.837	64.039
Solución 24 h	2.00	3.012	6.025	79.756
Solución 30 h	2.00	3.203	6.406	84.808
Solución 36 h	2.00	3.382	6.763	89.532
Relave	1	0.791	0.791	10.468
Cabeza calc.	1	7.554	7.554	100.000

% Recuperación Ensayada 88.811

% Recuperación Calculada 89.532





3.10.7 Prueba N° 07

PARAMETROS DE PRUEBA:

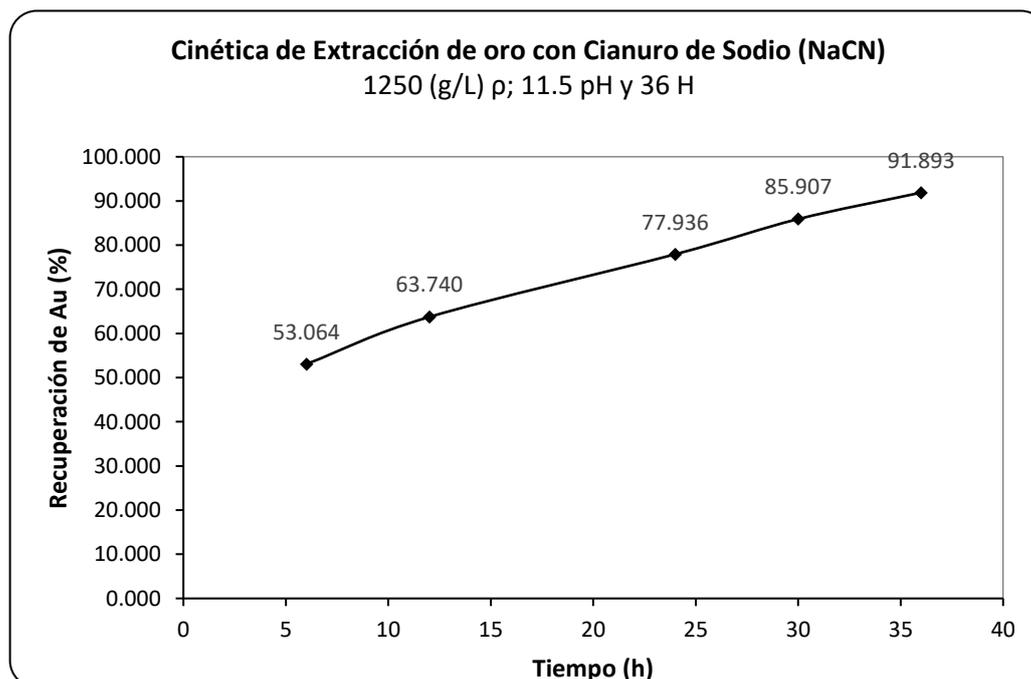
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1250 g/L
pH	11.5
Carbón Tipo Calgon:	350 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.955	3.909	53.064
Solución 12 h	2.00	2.348	4.696	63.740
Solución 24 h	2.00	2.871	5.742	77.936
Solución 30 h	2.00	3.165	6.329	85.907
Solución 36 h	2.00	3.385	6.770	91.893
Relave	1	0.597	0.597	8.107
Cabeza calc.	1	7.367	7.367	100.000

% Recuperación Ensayada 91.548

% Recuperación Calculada 91.893





3.10.8 Prueba N° 08

PARAMETROS DE PRUEBA:

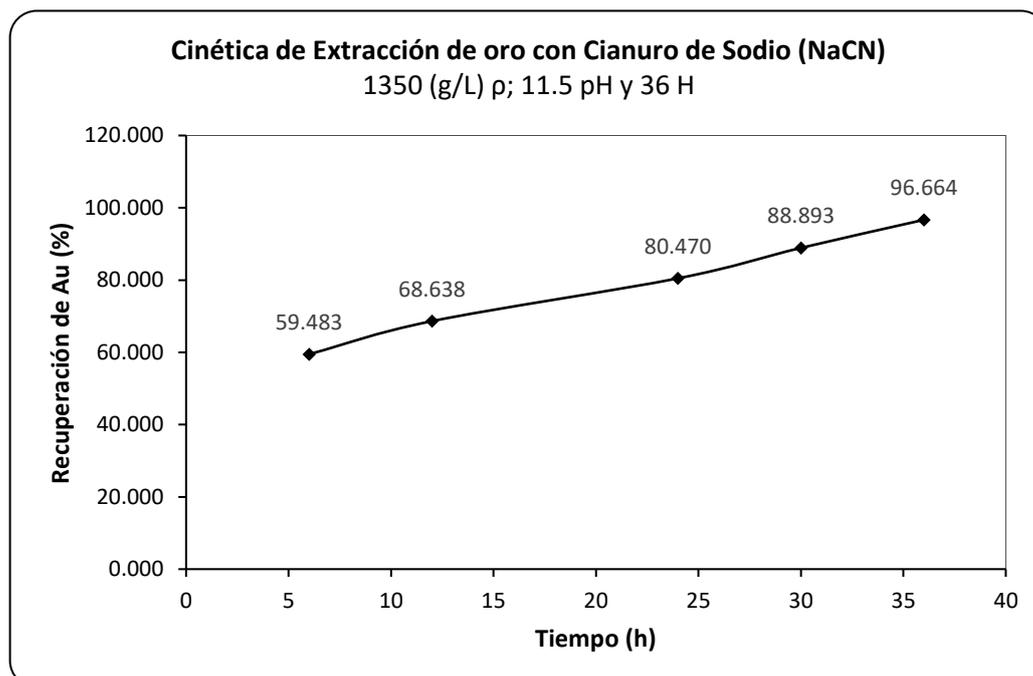
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1350 g/L
pH	11.5
Carbón Tipo Calgon:	350 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.096	4.192	59.483
Solución 12 h	2.00	2.419	4.837	68.638
Solución 24 h	2.00	2.836	5.671	80.470
Solución 30 h	2.00	3.132	6.265	88.893
Solución 36 h	2.00	3.406	6.813	96.664
Relave	1	0.235	0.235	3.336
Cabeza calc.	1	7.048	7.048	100.000

% Recuperación Ensayada 96.673

% Recuperación Calculada 96.664





3.10.9 Prueba N° 09

PARAMETROS DE PRUEBA:

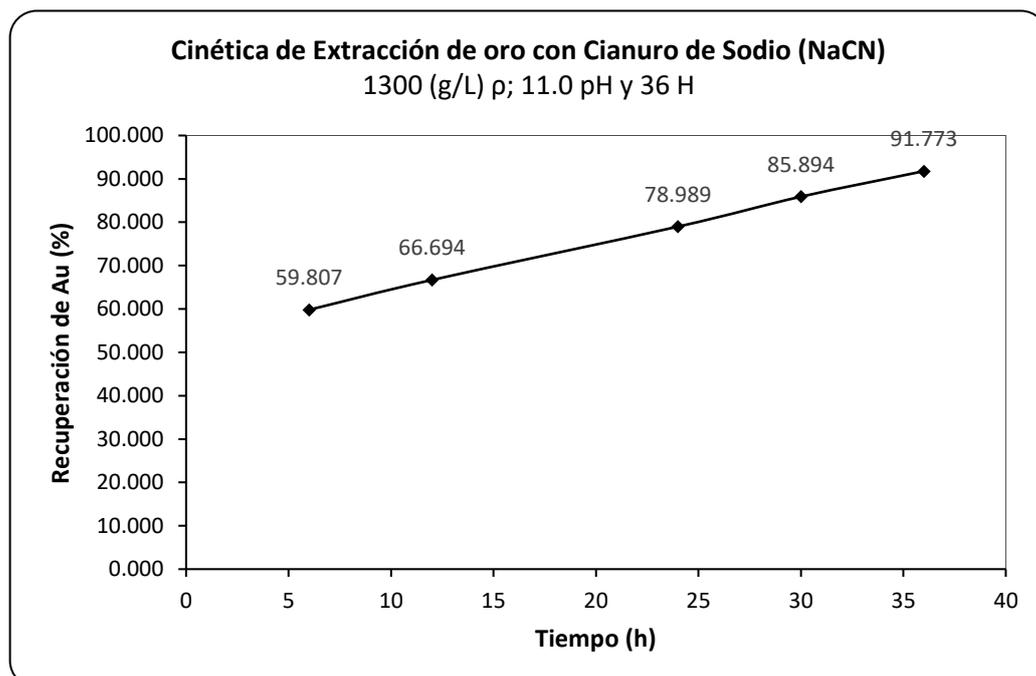
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
Carbón Tipo Calgon:	300 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.203	4.407	59.807
Solución 12 h	2.00	2.457	4.914	66.694
Solución 24 h	2.00	2.910	5.820	78.989
Solución 30 h	2.00	3.165	6.329	85.894
Solución 36 h	2.00	3.381	6.762	91.773
Relave	1	0.606	0.606	8.227
Cabeza calc.	1	7.369	7.369	100.000

% Recuperación Ensayada 91.422

% Recuperación Calculada **91.773**





3.10.10 Prueba N° 10

PARAMETROS DE PRUEBA:

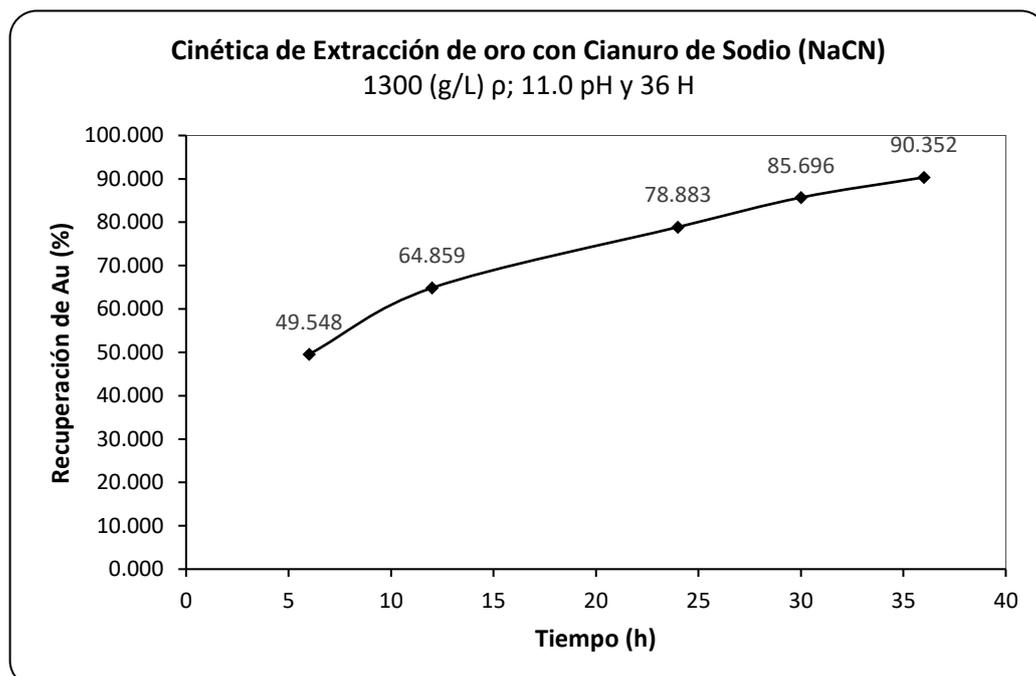
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
Carbón Tipo Calgon:	300 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (mg)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	1.850	3.700	49.548
Solución 12 h	2.00	2.422	4.844	64.859
Solución 24 h	2.00	2.946	5.891	78.883
Solución 30 h	2.00	3.200	6.400	85.696
Solución 36 h	2.00	3.374	6.748	90.352
Relave	1	0.721	0.721	9.648
Cabeza calc.	1	7.468	7.468	100.000

% Recuperación Ensayada 89.805

% Recuperación Calculada **90.352**





3.10.11 Prueba N° 11

PARAMETROS DE PRUEBA:

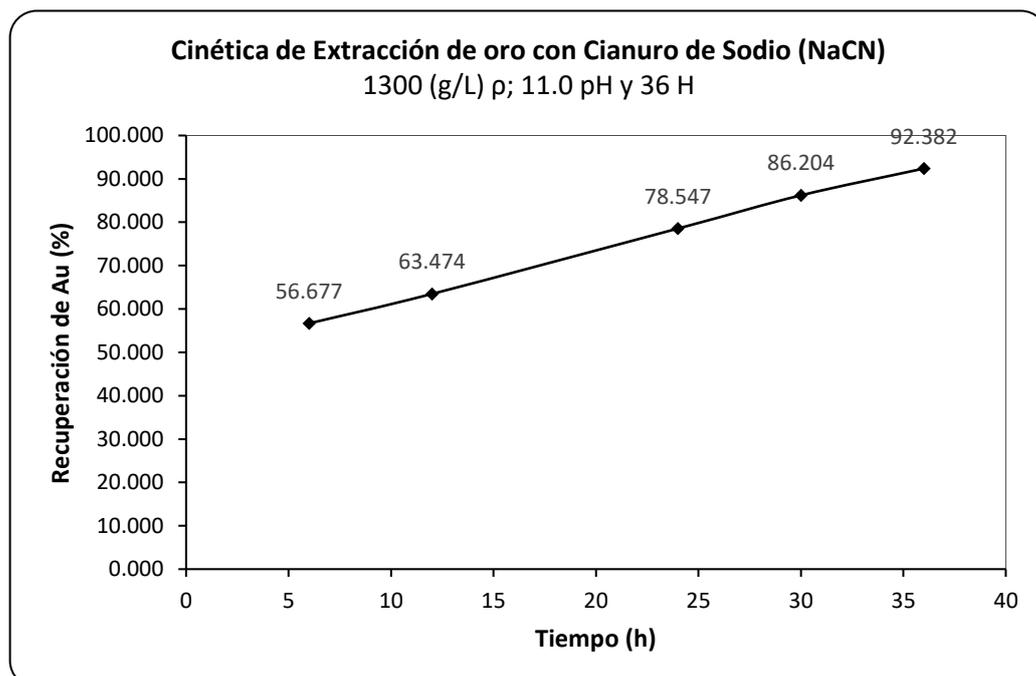
Mineral:	Sulfuro
Granulometría:	85% -#200
Acidez del mineral:	6
Peso Mineral (Kg):	1
Agua (L):	2
FNaCN(ppm):	1000
Densidad de pulpa:	1300 g/L
pH	11
Carbón Tipo Calgon:	300 g
CaO (g)	1.70
Tiempo de agitación:	36
Fecha de inicio:	12/03/2024
Hora	9:00 a. m.

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

Mineral	Peso o volumen	Ley Au(ppm)	Au (g)	Recuperación de Au (%)
Cabeza	1.00	7.067	7.067	100.000
Solución 6 h	2.00	2.071	4.143	56.677
Solución 12 h	2.00	2.320	4.639	63.474
Solución 24 h	2.00	2.871	5.741	78.547
Solución 30 h	2.00	3.150	6.301	86.204
Solución 36 h	2.00	3.376	6.753	92.382
Relave	1	0.557	0.557	7.618
Cabeza calc.	1	7.309	7.309	100.000

% Recuperación Ensayada 92.121

% Recuperación Calculada **92.382**





Análisis de la Cinética de Extracción:

- **Efectividad en el Tiempo:** Los datos recopilados a lo largo de las 36 horas de prueba demuestran una mejora constante en la recuperación del oro utilizando cianuro de sodio (NaCN). Esta tendencia ascendente es claramente visible en la línea negra que une los puntos de datos en cada gráfico, culminando cerca del término del experimento. La progresión indica una cinética de extracción altamente favorable, lo que sugiere que las condiciones experimentales están bien optimizadas para la recuperación del Au.
- **Convergencia de Curvas de Lixiviación:** A medida que el proceso de lixiviación avanza, se observa una notable convergencia de las curvas. Esto implica que, independientemente de las variaciones iniciales, las tasas de extracción tienden a uniformarse, aproximándose a un punto de extracción final donde los porcentajes de recuperación son comparables entre las diferentes muestras.
- **Relación Concentración-Velocidad:** Un patrón interesante emerge al analizar las curvas de extracción del oro; se hace evidente que un incremento en la concentración de NaCN correlaciona con una aceleración en la velocidad de extracción. Este fenómeno resalta la importancia de la concentración de cianuro como un factor crítico en la eficiencia del proceso.

Post-Proceso Experimental:

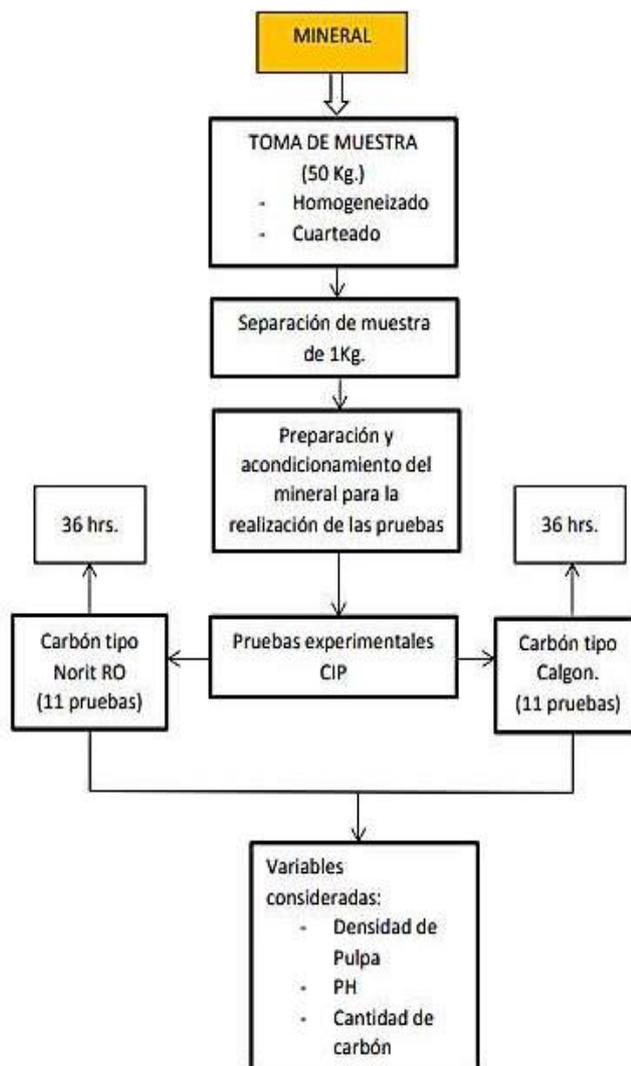
Preparación de Muestras: Tras concluir las pruebas experimentales de Carbono en Pulpa (CIP) planificadas, se procedió a la preparación meticulosa de todas las muestras para su análisis detallado.

Análisis Estadístico: Con la totalidad de los datos en mano, se llevó a cabo un análisis estadístico exhaustivo. Utilizando un diseño experimental factorial completo 2^k , se analizaron los resultados para identificar posibles factores significativos y sus interacciones que podrían influir en la recuperación del oro.

Este análisis detallado no solo confirma la efectividad del NaCN en la recuperación del Au a lo largo del tiempo, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones y optimizaciones del proceso de lixiviación.

Figura 10.

Diagrama del procedimiento experimental.



Fuente: Elaboración Propia.



3.11 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA

Las pruebas de molienda son una parte integral del proceso de preparación de la muestra. Estas pruebas se utilizan para determinar las curvas de cinética de moliendabilidad, que son esenciales para entender cómo se comporta el mineral durante el proceso de molienda. Para obtener estos datos, se llevaron a cabo diversas pruebas de molienda, cada una diseñada para proporcionar información valiosa sobre las propiedades de moliendabilidad del mineral.

La determinación de las curvas de molienda es un proceso que permite estimar los tiempos que deben pasar las partículas dentro del molino para alcanzar la granulometría requerida. La granulometría, o el tamaño de las partículas del mineral, es un factor crítico que puede afectar la eficacia de las pruebas de cianuración. Por lo tanto, es crucial asegurarse de que las partículas del mineral sean del tamaño correcto antes de realizar estas pruebas.

Para llevar a cabo las pruebas de molienda, se utilizó un molino estándar de laboratorio experimental. Este molino, que tiene un diámetro de 22 cm y una longitud de 27 cm, es ideal para este tipo de pruebas debido a su tamaño

Y capacidad.

Figura 11.

Molino de laboratorio experimental.



Fuente: (Farfan Chicca & Huaracallo Choque, 2019)

3.12 CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO

Tabla 10.

Características del molino de bolas de laboratorio.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLINO DE BOLAS		
Dimensiones	0.7 ϕ x 0.9 pies	
Diámetro	20 cm	0.66 pies
Largo	26 cm	0.85 pies

Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.

3.12.1 Carga de bolas

Para calcular la carga de bolas en un molino, utilizamos una expresión matemática específica. Esta expresión nos permite determinar la cantidad y el



tamaño de las bolas que se deben utilizar en el molino para lograr una molienda eficiente.

La distribución de tamaños de las bolas es un aspecto crucial en este proceso. Para determinar esta distribución, recurrimos al método de Taggart, un enfoque ampliamente reconocido en el campo de la ingeniería metalúrgica.

El método de Taggart considera varios factores, incluyendo el tamaño del mineral, la dureza del mineral, y las características específicas del molino. Al tener en cuenta estos factores, el método de Taggart nos permite seleccionar una distribución de tamaños de bolas que maximiza la eficiencia de la molienda.

El cálculo de la carga de bolas y la determinación de la distribución de tamaños de bolas son pasos esenciales en el proceso de molienda. Estos pasos nos permiten optimizar el proceso de molienda y mejorar la recuperación de minerales valiosos. A continuación, se detalla la expresión matemática utilizada para estos cálculos.

$$W = 80 \times D^2 \times L \quad (26)$$

Cuando introducimos los datos correspondientes a las dimensiones del molino en la ecuación 29, obtenemos un resultado específico. Este resultado es el producto de un cálculo matemático que toma en cuenta las dimensiones particulares del molino que estamos utilizando. Es importante recordar que cualquier cambio en estas dimensiones podría alterar el resultado, lo que a su vez podría tener un impacto en nuestras conclusiones o decisiones posteriores. Por lo tanto, es crucial asegurarse de que los datos de las dimensiones del molino se midan y se registren con precisión antes de realizar este cálculo. A continuación,

presentamos el resultado obtenido al reemplazar los datos de las dimensiones del molino en la ecuación 29.

$$W = 80 \times [0.656168]^2 \times 0.853018$$

$$W = 29.381792 \text{ lbs}$$

$$W = 13.34 \text{ Kg}$$

Tabla 11.

Características del molino de bolas de laboratorio.

Diámetro de bola (cm)	% Distribución	Peso Kg	Peso de cada bola	N° de bolas
3.81	54.25	7.27	0.32	23.00
2.54	31.72	4.25	0.25	17.00
1.91	14.03	1.88	0.19	10.00
	100.00	13.40		

Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.

3.12.2 Volumen del molino

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L \quad (27)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 30 se obtiene el siguiente resultado:

$$V = \pi * (10)^2 * 25$$

$$V = 8168.134 \text{ cm}^3$$

3.12.3 Velocidad crítica del molino

$$V_c = \frac{76.8}{\sqrt{D}} \quad (28)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 31 se obtiene el siguiente resultado:



$$V_c = \frac{76.8}{\sqrt{20}}$$

$$V_c = 94.81 \text{ RPM}$$

3.12.4 Velocidad de operación del molino

$$V_o = 0.8 * V_c \quad (29)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 18 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_o = 0.80 * 94.81$$

$$V_o = 75.85 \text{ RPM}$$

Procedimiento

- 1) **Preparación de las muestras:** Para cada una de las pruebas que se van a realizar, se debe pesar 1 Kg de mineral. En total, se realizarán 8 pruebas, por lo que necesitarás 8 Kg de mineral.
- 2) **Preparación del molino:** Una vez pesado, el mineral se vierte en el molino. A continuación, se añaden 750 ml de agua para facilitar el proceso de molienda. También se deben añadir los reactivos necesarios para el tipo de mineral que se está moliendo. Una vez añadidos el agua y los reactivos, se tapa el molino para evitar la pérdida de material durante la molienda.
- 3) **Molienda:** El proceso de molienda se realiza a diferentes tiempos para observar cómo afecta el tiempo de molienda al tamaño de las partículas del mineral. En este caso, se realizarán moliendas de 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5 minutos.
- 4) **Tamizado:** Después de cada molienda, se pesan 100 gramos del mineral molido y se tamizan utilizando una malla # - 200. Este proceso permite



separar las partículas según su tamaño y obtener una distribución de tamaños de partículas para cada tiempo de molienda.

- 5) **Análisis de los resultados:** Por último, se grafican los resultados obtenidos. En el eje Y se coloca el porcentaje de material que pasa a través de la malla # -200, y en el eje X se coloca el tiempo de molienda. De esta manera, se obtiene una curva que muestra cómo varía la distribución de tamaños de partículas con el tiempo de molienda para cada una de las 8 pruebas realizadas.

Este procedimiento detallado y cuidadoso asegura que se obtengan resultados precisos y reproducibles, lo que es fundamental para entender el comportamiento del mineral durante la molienda y optimizar el proceso de cianuración.

Tabla 12.

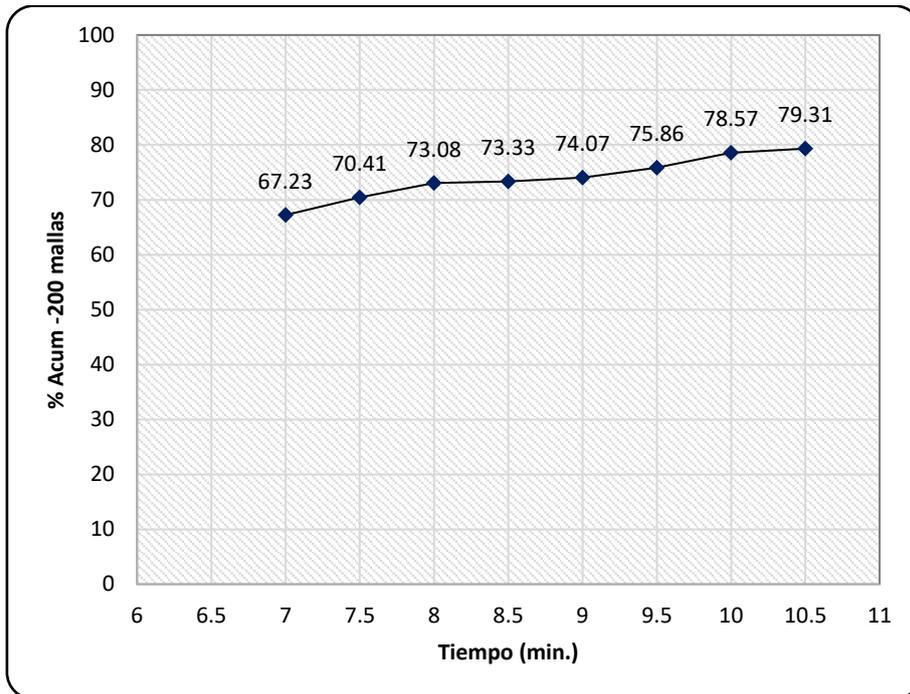
Características del molino de bolas de laboratorio.

Tiempo (min.)	% -200 mallas
7	67.23
7.5	70.41
8	73.08
8.5	73.33
9	74.07
9.5	75.86
10	78.57
10.5	79.31

Fuente: Empresa SERMETAL PERU S.A.C., abril del 2024.

Figura 12.

% Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 VARIABLES DEL PROCESO

A continuación, se muestran los factores o variables que se consideró en las pruebas de cianuración.

4.1.1 Variable Independiente

- Densidad de pulpa (g/L)
- pH
- Carbón activado Calgon (g)

4.1.2 Variable Dependiente

- Porcentaje de extracción de Au.

Tabla 13.

Niveles de las variables independientes.

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Densidad de pulpa (g/L)	1250	1300	1350
pH	10.5	11	11.5
Carbón Activado Calgon (g)	250	300	350

Fuente: Elaboración Propia.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL 2^k, CON RÉPLICA CENTRAL

El diseño y ejecución de las pruebas de Carbono en Pulpa (CIP) se estructuraron meticulosamente siguiendo un **diseño factorial 2^k**. Este enfoque estadístico avanzado, complementado con una réplica central, permitió la realización de **ocho pruebas**

distintas. Estas pruebas fueron esenciales para evaluar la interacción entre los niveles superiores e inferiores de las variables seleccionadas, proporcionando una visión integral de cómo cada variable influye en el proceso.

Además, se llevaron a cabo **tres pruebas adicionales** que se centraron en el promedio de los niveles de cada variable, lo que ayudó a establecer un punto de referencia para la comparación de los resultados. En total, se completaron **once pruebas CIP**, todas utilizando el carbón activado de tipo Calgon, conocido por su alta eficiencia en la adsorción de oro.

Los resultados obtenidos de estas pruebas son de gran valor, ya que ofrecen una perspectiva detallada sobre la eficacia del proceso CIP bajo diferentes condiciones operativas. Estos hallazgos están meticulosamente documentados en la **Tabla 13**, donde se presentan los datos de manera clara y concisa, permitiendo una interpretación y análisis fácil de los mismos.

Este enfoque sistemático no solo asegura la precisión en la recopilación de datos sino que también facilita la optimización del proceso de recuperación de oro, asegurando que se logren los mejores resultados posibles con el carbón tipo Calgon.

Tabla 14.

Matriz del diseño factorial a escala natural, con su respectiva ley (mg/L).

N	Escala natural			Y respuesta (%)	mg/L
	Densidad de pulpa (g/L)	pH	Carbón Tipo Calgon (g)		
	Z ₁	Z ₂	Z ₃		
1	1250	10.5	250	77.321	5.464
2	1350	10.5	250	79.914	5.648
3	1250	11.5	250	84.833	5.995
4	1350	11.5	250	87.334	6.172
5	1250	10.5	350	85.093	6.014
6	1350	10.5	350	89.532	6.327
7	1250	11.5	350	91.893	6.494
8	1350	11.5	350	96.664	6.831

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15.

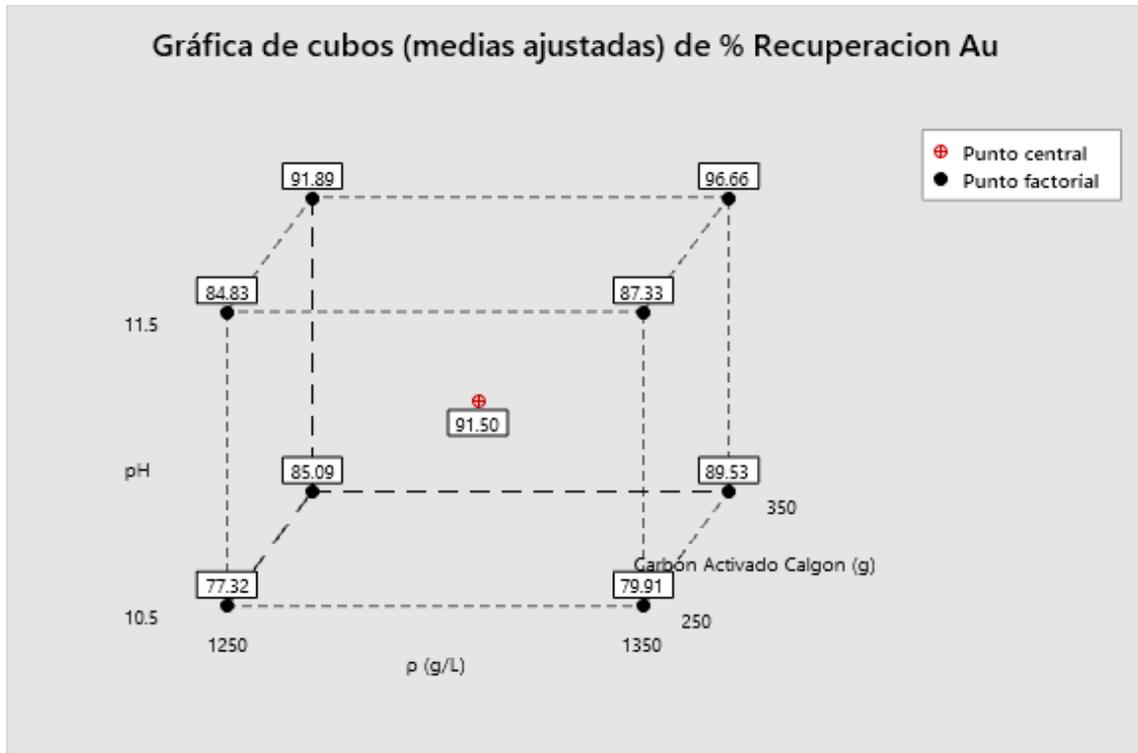
Matriz del diseño factorial para el carbón tipo Calgon.

N	Escala codificada			Escala natural			Y respuesta
	X ₁	X ₂	X ₃	Densidad de pulpa (g/L)	pH	Carbón Tipo Calgon (g)	
				Z ₁	Z ₂	Z ₃	
1	-1	-1	-1	1250	10.5	250	77.321
2	1	-1	-1	1350	10.5	250	79.914
3	-1	1	-1	1250	11.5	250	84.833
4	1	1	-1	1350	11.5	250	87.334
5	-1	-1	1	1250	10.5	350	85.093
6	1	-1	1	1350	10.5	350	89.532
7	-1	1	1	1250	11.5	350	91.893
8	1	1	1	1350	11.5	350	96.664
9	0	0	0	1300	11	300	91.773
10	0	0	0	1300	11	300	90.352
11	0	0	0	1300	11	300	92.382

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 13.

Representación Geométrica de 23 (medias de los datos).



Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Cálculo de los efectos de las variables

El análisis de los efectos de las variables es un componente crítico en el diseño experimental, permitiendo a los investigadores entender cómo diferentes factores influyen en una respuesta de interés.

Análisis de Efectos Principales e Interacciones En el contexto de un diseño experimental, es posible examinar tres efectos principales, denotados como **X1**, **X2**, y **X3**. Además, se consideran tres interacciones dobles: **X1X2**, **X1X3**, y **X2X3**, así como una interacción triple **X1X2X3**. Estas interacciones son fundamentales para comprender cómo la combinación de variables puede afectar la respuesta de manera que no es evidente al observar solo los efectos principales.

Cálculo Cuantitativo de los Efectos Para determinar cuantitativamente el impacto de las variables sobre la respuesta, se calculan los efectos. Este cálculo se define como la diferencia entre los valores promedio de las respuestas cuando las variables están en su nivel más bajo y más alto. La fórmula para calcular los efectos es la siguiente:

$$EX = \frac{\Sigma Y^+ - \Sigma Y^-}{\binom{N}{2} \cdot r} \quad (30)$$

Donde:

(*EX*) representa el efecto calculado de una variable o interacción.

(ΣY^+) es la suma de las respuestas cuando la variable está en su nivel superior.

(ΣY^-) es la suma de las respuestas cuando la variable está en su nivel inferior.



(N) es el número total de observaciones o puntos de datos.

(r) es una constante específica o variable relacionada con el estudio.

Interpretación de la Fórmula La expresión matemática proporciona una medida clara del efecto que cada variable o combinación de variables tiene sobre la respuesta. Al calcular la diferencia entre las sumas de las respuestas en los niveles superior e inferior y normalizarla por el número de observaciones y un factor de ajuste (r), se obtiene un valor que refleja la magnitud del impacto de las variables en estudio.

Este enfoque cuantitativo es esencial para identificar las variables que tienen el mayor efecto en la respuesta y para optimizar los procesos o sistemas bajo estudio. Además, permite a los investigadores tomar decisiones informadas basadas en datos empíricos sólidos.

En el contexto de un diseño factorial 2^k con réplica central, donde $r = 1$ y el número total de experimentos (N) es 8, la estructura de la matriz de diseño factorial es fundamental para el análisis estadístico. Esta matriz se compone de una cantidad de filas equivalente al número de experimentos realizados y de columnas que representan los efectos estimados. La disposición de esta matriz es crucial, ya que cada fila corresponde a un conjunto único de condiciones bajo las cuales se llevó a cabo cada experimento, y cada columna refleja un efecto particular que se desea evaluar.

La Tabla 14 ilustra esta matriz de diseño factorial, proporcionando una visión clara de cómo se organizan los experimentos y los efectos correspondientes. En esta tabla, se pueden observar los diferentes niveles de las variables

independientes y cómo estos se combinan en cada experimento para evaluar su impacto en la respuesta medida.

La matriz de diseño factorial es una herramienta poderosa que permite a los investigadores y científicos descubrir relaciones complejas entre múltiples factores y sus efectos en los resultados experimentales. Al analizar los datos recopilados y presentados en la Tabla 14, se pueden identificar patrones, tendencias y posibles interacciones que son esenciales para optimizar procesos y mejorar la toma de decisiones basada en evidencia.

Tabla 16.

Matriz del diseño factorial y respuestas experimentales (codificada), para carbón tipo Calgon.

N	X_0	Efectos principales			Efecto de las interacciones dobles			Efecto de las interacciones triples	Vector respuesta
		X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	77.321
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	79.914
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	84.833
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	87.334
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	85.093
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	89.532
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	91.893
8	1	1	1	1	1	1	1	1	96.664
9	1	0	0	0	0	0	0	0	91.773
10	1	0	0	0	0	0	0	0	90.352
11	1	0	0	0	0	0	0	0	92.382

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla en cuestión está diseñada para establecer la matriz de variables independientes, la cual es fundamental en el análisis de diseño factorial. Dentro de esta matriz, se destaca la inclusión del vector (X_0), que se compone exclusivamente de términos con signo positivo. Este vector es esencial, ya que facilita la determinación del promedio de las respuestas obtenidas de todos los puntos experimentales. Este promedio no solo es indicativo del comportamiento



general del sistema bajo estudio sino que también es crucial para evaluar el efecto de la curvatura en la superficie de respuesta.

Además, la matriz incorpora vectores que representan las interacciones entre las variables. Estas interacciones son vitales para comprender cómo la combinación de diferentes niveles de variables puede influir en el resultado del experimento.

Para ampliar la información sobre EX_0 , que es el promedio de las respuestas de los puntos experimentales (excluyendo los puntos centrales), se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$EX_0 = \frac{\sum Y}{N} \quad (31)$$

Cálculo para el carbón tipo Calgon

$$EX_0 = \frac{668.911}{8} = 83.6138$$

Después de aplicar la **ecuación 31**, se inicia el proceso de cálculo de los efectos principales de las variables y sus interacciones. Es importante destacar que, para este cálculo, se excluyen los puntos replicados, ya que no contribuyen a la determinación de los efectos. La metodología empleada para calcular los efectos se basó en el uso de **Microsoft Excel**, lo que permitió una manipulación eficiente y precisa de los datos. Los resultados obtenidos se presentan de manera detallada en la **Tabla 15**, donde se puede apreciar la magnitud e importancia de cada efecto en el modelo estudiado. Este análisis es crucial para entender cómo cada variable y combinación de variables afecta el resultado final, permitiendo así optimizar el diseño experimental.

$$EX_1 = \frac{(16.703 + 15.600)}{\frac{8}{2} * 1} = 8.0759$$

$$EX_2 = \frac{((-8.898) + (-12.798))}{\frac{8}{2} * 1} = -5.4240$$

$$EX_3 = \frac{(345.306 - 323.605)}{\frac{8}{2} * 1} = 5.4254$$

Tabla 17.

Efectos de las variables e interacciones para el carbón tipo Calgon.

Variables e Interacciones	Efectos
EX ₀	83.6138
EX ₁	8.0759
EX ₂	-5.4240
EX ₃	5.4254
EX ₁ X ₂	-0.6761
EX ₁ X ₃	0.2758
EX ₂ X ₃	0.9751
EX ₁ X ₂ X ₃	1.5272

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 Interpretación de los efectos

La **interpretación de los efectos** en un contexto experimental implica comprender el impacto físico que tiene el cambio de una variable desde su nivel más bajo hasta su nivel más alto. Este análisis es fundamental para identificar cómo las modificaciones en las condiciones experimentales afectan la variable de respuesta. Al ajustar una variable y observar la variación resultante, se puede determinar la relación causal y la intensidad de la influencia de dicha variable en el sistema estudiado. Este proceso no solo revela la sensibilidad de la respuesta ante cambios en las variables, sino que también proporciona información valiosa para la optimización de procesos y la mejora de la calidad de los resultados. La

interpretación correcta de estos efectos es crucial para la toma de decisiones informadas y el diseño eficiente de futuros experimentos.

4.2.2.1 Interpretación de los efectos para el carbón tipo Calgon

4.2.2.1.1 Efectos principales

- Cantidad de densidad de pulpa (g/L) (EX_1): Al aumentar de 1250 a 1350 g/L, aumenta la recuperación de oro en 3.575.
- Cantidad de pH (EX_2): Al aumentar de 10.5 a 11.5 pH, aumenta la recuperación de oro en 7.215.
- Cantidad de carbón tipo Calgon (g) (EX_3): Al aumentar de 250 a 350 g, aumenta la recuperación de oro en 8.445.

4.2.2.1.2 Efectos de las interacciones

Los efectos de las interacciones X_1X_2 , X_1X_3 y X_2X_3 determinan el grado de influencia que tiene una combinación de factores sobre la variable respuesta.

- Interacción de la cantidad de densidad de pulpa (g/L) y cantidad de pH (EX_1X_2): El efecto de la interacción es 0.060, el signo positivo nos indica que si existe interacción entre ellos.
- Interacción de la cantidad de densidad de pulpa (g/L) y cantidad de carbón tipo Calgon (g) (EX_1X_3): El efecto de la interacción es 1.030, el signo positivo nos indica que si existe interacción entre ellos.



- Interacción de la cantidad de pH y cantidad de carbón tipo Calgon (g) (EX_2X_3): El efecto de la interacción es -0.250, el signo negativo nos indica que no existe interacción entre ellos.
- Interacción de la cantidad de densidad de pulpa (g/L), cantidad de pH y cantidad de carbón tipo Calgon (g) ($EX_1X_2X_3$): El efecto de la interacción es 0.105, el signo negativo nos indica que no existe interacción entre ellos.

En la Figura 13, que muestra los efectos principales, se pueden identificar los efectos individuales de cada uno de los tres factores, así como las interacciones entre ellos. Esta figura es una herramienta poderosa para visualizar y entender cómo cada factor y sus interacciones contribuyen al resultado final.

Tabla 18

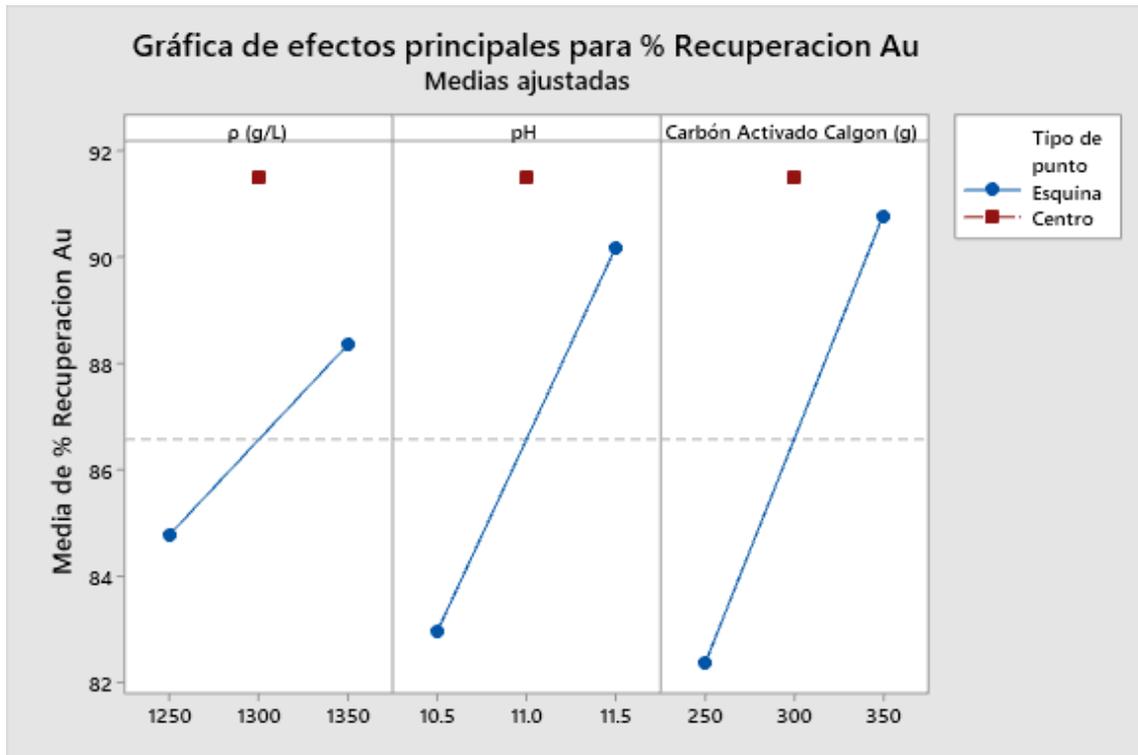
Resultado del cálculo de efectos.

Término	Efecto	Coef	EE del coef.
Constante		86.570	0.368
ρ (g/L)	3.575	1.788	0.368
pH	7.215	3.608	0.368
Carbón Activado Calgon (g)	8.445	4.223	0.368
ρ (g/L)*pH	0.060	0.030	0.368
ρ (g/L)*Carbón Activado Calgon (g)	1.030	0.515	0.368
pH*Carbón Activado Calgon (g)	-0.250	-0.125	0.368
ρ (g/L)*pH*Carbón Activado Calgon (g)	0.105	0.053	0.368
Pt Ctral		4.930	0.705

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14.

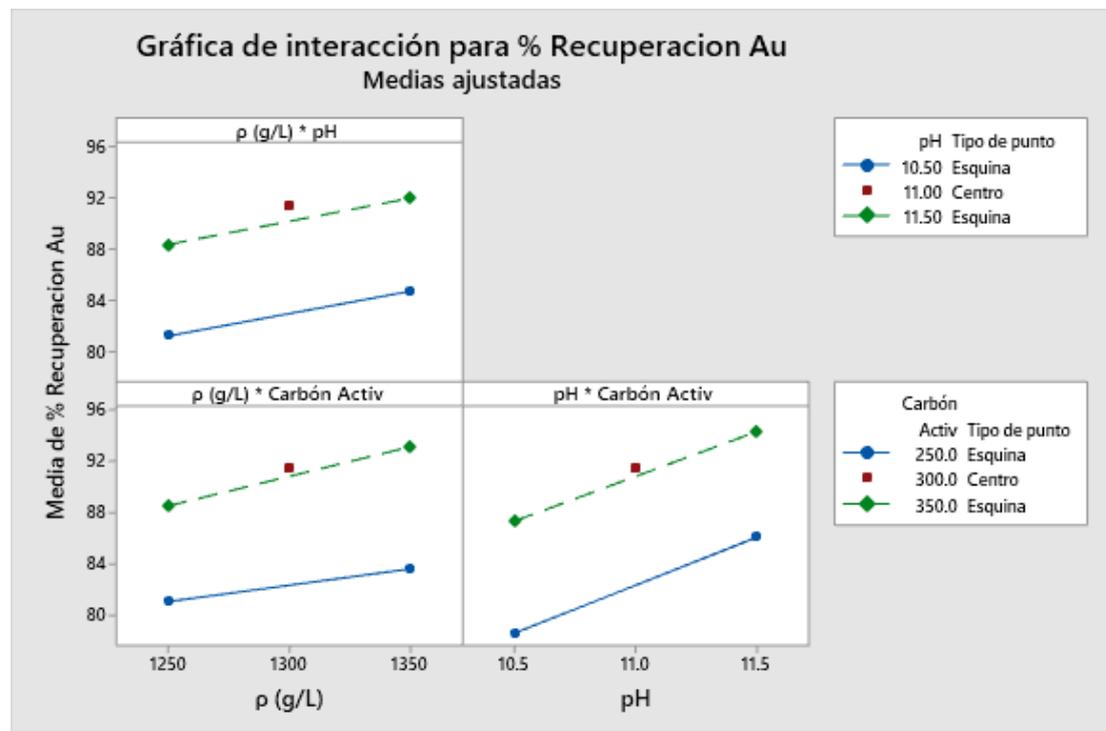
Grafica de Efectos principales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15.

Grafica de Interacción.



Fuente: Elaboración propia.



- **Carbón Activado Calgon (g):** Este factor juega un papel crucial en la variable de respuesta, que es el porcentaje de recuperación de oro (% de recuperación Au). Se ha observado que cuando el peso de carbón Activado Calgon aumenta desde su nivel más bajo (250 gramos) hasta su nivel más alto (350 gramos), tiene un impacto positivo en la recuperación de oro. Este aumento de peso de carbón Activado Calgon se traduce en un incremento significativo del 8.445% en la recuperación de oro. Esto sugiere que el peso de carbón Activado Calgon es un parámetro crítico en el proceso de cianuración.
- **El pH:** El pH es otro factor que tiene un efecto significativo en la variable de respuesta (% de recuperación Au). Se ha encontrado que cuando el pH aumenta desde su nivel más bajo (10.5) hasta el más alto (11.5), se observa un impacto positivo en la recuperación de oro. Este cambio en el pH resulta en un aumento del 7.215% en la recuperación de oro. Esto indica que el pH es un factor importante a considerar en el proceso de cianuración.
- **Densidad de Pulpa ρ (g/L):** En contraste, la densidad de Pulpa tiene un efecto menos pronunciado en la variable de respuesta (% de recuperación Au). Un cambio en la densidad de Pulpa, desde el nivel más bajo hasta el más alto, tiene una influencia relativamente leve en la recuperación del oro, que se traduce en un aumento del 3.575% en la recuperación. Aunque este efecto es menor en comparación con los otros dos factores, sigue siendo relevante para el proceso de cianuración.



- **Comportamiento del Gráfico:** Al observar las relaciones entre los factores principales y el punto central en el gráfico, se nota una curvatura muy pronunciada. Esto sugiere que los cambios en los niveles de estos factores tienen un impacto significativo en la recuperación de oro. Además, su efecto no es lineal, lo que implica que deben ser considerados cuidadosamente al diseñar y optimizar el proceso de cianuración de. Esta observación subraya la importancia de un análisis cuidadoso de los datos y la necesidad de considerar todas las variables y sus interacciones al optimizar el proceso de cianuración.

En resumen, la gráfica muestra que la optimización de estas tres variables es crucial para maximizar la recuperación de Au. Un pH más alto y una cantidad óptima de carbón activado, junto con una densidad de pulpa controlada, parecen ser las condiciones más favorables para la recuperación de oro.

4.2.3 Análisis de la varianza del diseño factorial

El análisis de varianza, conocido comúnmente por su acrónimo ANOVA, es una técnica estadística fundamental que permite evaluar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos independientes. Esta herramienta es de gran valor en la inferencia estadística, ya que facilita la comparación de múltiples grupos simultáneamente para determinar si al menos uno de ellos difiere de los demás.

En el contexto del diseño experimental, el ANOVA es aplicado para probar la significancia de los efectos que las variables independientes pueden tener sobre

una variable dependiente. Por ejemplo, en un experimento que busca optimizar la recuperación de oro (Au), se podrían considerar variables como la densidad de pulpa (g/L), el nivel de pH y la cantidad de carbón activado (g). El ANOVA permitiría a los investigadores determinar cuál de estas variables, dentro del rango investigado, tiene un impacto real y estadísticamente significativo en el porcentaje de recuperación de Au.

El análisis de varianza implica el cálculo de:

$$SS_{TOTAL} = SS_{EFECTOS} + SS_{ERROR} + SS_{CURVATURA}$$

(32)

Donde:

SS_{TOTAL}: Suma total de cuadrados.

SS_{EFECTOS}: Suma de cuadrados debida a los efectos o tratamientos.

SS_{ERROR}: Suma de cuadrados debida al error.

SS_{CURVATURA}: Suma de cuadrados para la curvatura.

4.2.3.1 Suma de cuadrados de los efectos e interacciones.

La suma de cuadrados de los efectos e interacciones, está definida por la ecuación 9:

$$SS_{EFECTOS} = \frac{(\Sigma Y^+ - \Sigma Y^-)^2}{(N) \cdot r} \quad (33)$$

Siendo $r = 1$ para el diseño factorial 2K con replicas en el punto central del diseño, y $N = 8$.

a. Cálculo de la suma de cuadrados de los efectos para el carbón tipo Calgon

El cálculo de la suma de cuadrados de los efectos se realizó con la ayuda Microsoft Excel.

$$SS_{EFECTOS_{Densidad\ de\ pulpa\ (g/L)}} = \frac{(16.703 + 15.600)^2}{8 \cdot 1} = 130.441$$

$$SS_{EFECTOS_{pH}} = \frac{((-8.898) + (-12.798))^2}{8 \cdot 1} = 58.840$$

$$SS_{EFECTOS_{Cantidad\ de\ carbon\ tipo\ Calgon\ (g)}} = \frac{(329.39 - 363.17)^2}{8 \cdot 1} = 58.869$$

Tabla 19.

Suma de cuadrados de efectos e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.

Función de variación	SS_{EFECTOS}
SS _{X1}	130.441
SS _{X2}	58.840
SS _{X3}	58.869
SS _{X1X2}	0.914
SS _{X1X3}	0.152
SS _{X2X3}	1.902
SS _{X1X2X3}	4.664

Fuente: Elaboración Propia.

$$SS_{EFECTOS} = 274.5858$$

4.2.3.1.1 Suma de cuadrados del error

La **suma de cuadrados del error** (SS_{ERROR}) es un concepto estadístico que se utiliza para medir la variabilidad dentro de un conjunto de datos respecto a un modelo estadístico. La ecuación para calcular este valor es la siguiente:



$$SS_{ERROR} = \sum_{i=1}^n (Y_i^0 - Y^0)^2 \quad (34)$$

Donde:

(SS_{ERROR}) representa la suma de cuadrados del error.

($\sum_{i=1}^n$) denota la sumatoria desde ($i = 1$) hasta (n), donde (n) es el número total de observaciones.

(Y_i^0) es el valor observado de la variable dependiente para la (i)-ésima observación.

(Y^0) es el valor predicho por el modelo para la (i)-ésima observación.

La suma de cuadrados del error proporciona una medida cuantitativa de la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Un valor más bajo de (SS_{ERROR}) indica un mejor ajuste del modelo a los datos. Este cálculo es fundamental en el análisis de regresión y otros métodos estadísticos para evaluar la precisión de un modelo.

Cálculo de la suma de cuadrados del error para el carbón tipo

Calgon

$$Y^0 = \frac{(91.77 + 90.35 + 92.38)}{3} = 91.500$$

$$SS_{ERROR} = (91.77 - 91.500)^2 + (90.35 - 91.500)^2 \\ + (92.38 - 91.500)^2$$

$$SS_{ERROR} = 2.170$$

4.2.3.1.2 Suma de cuadrados para la curvatura.

La **suma de cuadrados para la curvatura** es una medida estadística que se utiliza para evaluar la presencia de curvatura en un diseño experimental. La ecuación para calcular esta suma de cuadrados es la siguiente:

$$SS_{\text{CURVATURA}} = \frac{N \cdot n_1 \cdot (\bar{Y} - Y_0)^2}{N + n_1} \quad (35)$$

En esta fórmula:

$(SS_{\text{CURVATURA}})$ representa la suma de cuadrados debido a la curvatura.

(N) es el número total de puntos en el diseño.

(n_1) es el número de puntos en el centro del diseño.

(\bar{Y}) es la media de las respuestas en los puntos extremos del diseño.

(Y_0) es la media de las respuestas en el punto central del diseño.

Esta suma de cuadrados se utiliza para determinar si existe una diferencia significativa entre la respuesta en los puntos extremos y en el centro del diseño, lo cual indicaría la presencia de curvatura en la superficie de respuesta. Un valor alto de $(SS_{\text{CURVATURA}})$ sugiere que la curvatura es un factor importante en el modelo y no debe ignorarse.

Cálculo de la suma de cuadrados de la curvatura para el carbón tipo Calgon

$$\bar{Y} = \frac{692.560}{8} = 86.570$$



$$SS_{CURVATURA} = \frac{8 * 3 * (86.570 - 91.500)^2}{(8 + 3)}$$

$$SS_{CURVATURA} = \frac{583.318}{(11)}$$

$$SS_{CURVATURA} = 53.029$$

La suma total de cuadrados para el carbón tipo Calgon es:

$$SS_{TOTAL} = SS_{EFECTOS} + SS_{ERROR} + SS_{CURVATURA}$$

$$SS_{TOTAL} = 274.5858 + 2.170 + 53.029 = 329.785$$

4.2.4 Aplicación del Teorema de Cochran

Según este teorema, Una variable, interacción o la curvatura es significativa si se cumple la siguiente condición:

$$F_0 > F(\alpha, f_1, f_2) \quad (35)$$

Donde:

α : Grado de confiabilidad (0.05).

f_1 : Grado de libertad de efectos e interacciones, es igual a 1 en diseños factoriales a dos niveles ($2-1=1$).

f_2 : Grado de libertad del error es igual al número de réplicas en el centro del diseño menos 1, ($3-1=2$)

Para el nivel de confianza de 95%, F de tabla (ver Anexo 1), para uno y dos grados de libertad, respectivamente es:

$$F(\alpha, f_1, f_2) = F(0.05, 1, 2) = 18.513$$

4.2.4.1 . Media de cuadrados

La media de cuadrados, está definida por las ecuaciones 36 y 37:

$$MS_{EFECTOS} = \frac{SS_{EFECTOS}}{f_1} \quad (36)$$

$$MS_{ERROR} = \frac{SS_{ERROR}}{f_2} \quad (37)$$

Siendo $f_1 = 1$ y $f_2 = 2$.

a) Cálculo para el carbón tipo Calgon

Tabla 20.

Media de cuadrados de efectos e interacciones para el proceso de Carbón en Pulpa.

Función de variación	SS_{EFECTOS}
SS _{X1}	25.561
SS _{X2}	104.112
SS _{X3}	142.636
SS _{X1X2}	0.007
SS _{X1X3}	2.122
SS _{X2X3}	0.125
SS _{X1X2X3}	0.022

Fuente: Elaboración Propia.

$$MS_{EFECTOS} = \frac{25.561}{1} = 25.561$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{104.112}{1} = 104.112$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{142.636}{1} = 142.636$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{0.007}{1} = 0.007$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{2.122}{1} = 2.122$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{0.125}{1} = 0.125$$

$$MS_{EFECTOS} = \frac{0.022}{1} = 0.022$$

Tabla 21.

Análisis de varianza del diseño factorial para el carbón tipo Calgon.

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad	Media de cuadrados (MS)	F ₀	F(α, f1, f2)	Significativo
				$\frac{MS_{EFECTOS}}{MS_{ERROR}}$	F(0.05, 1, 2)	
X ₁	25.561	1	25.561	23.56	18.513	SI
X ₂	104.112	1	104.112	95.97	18.513	SI
X ₃	142.636	1	142.636	131.47	18.513	SI
X ₁ X ₂	0.007	1	0.007	0.01	18.513	NO
X ₁ X ₃	2.122	1	2.122	1.96	18.513	NO
X ₂ X ₃	0.125	1	0.125	0.12	18.513	NO
X ₁ X ₂ X ₃	0.022	1	0.022	0.02	18.513	NO
Curvatura	53.029	1	53.029	48.88	18.513	SI
Error	2.170	2	1.085			
TOTAL	329.784	10				

Fuente: Elaboración Propia.

Del valor obtenido de tabla F (18.513) y el valor calculado F₀, se deduce que las variables más significativas son las que cumplen $F_0 > F$.

- X₁ (Densidad de pulpa (g/L)) ya que: $23.56 > 18.513$
- X₂ (pH) ya que: $95.97 > 18.513$
- X₃ (Cantidad de carbón tipo Calgon (g)) ya que: $131.47 > 18.513$
- También se observa que el efecto de la curvatura es muy significativo, ya que $48.88 > 18.513$.

La Figura 15 nos ofrece una visión jerárquica de cómo los distintos factores afectan a la variable de respuesta, que en este contexto es el porcentaje de recuperación de oro. Esta representación jerárquica nos



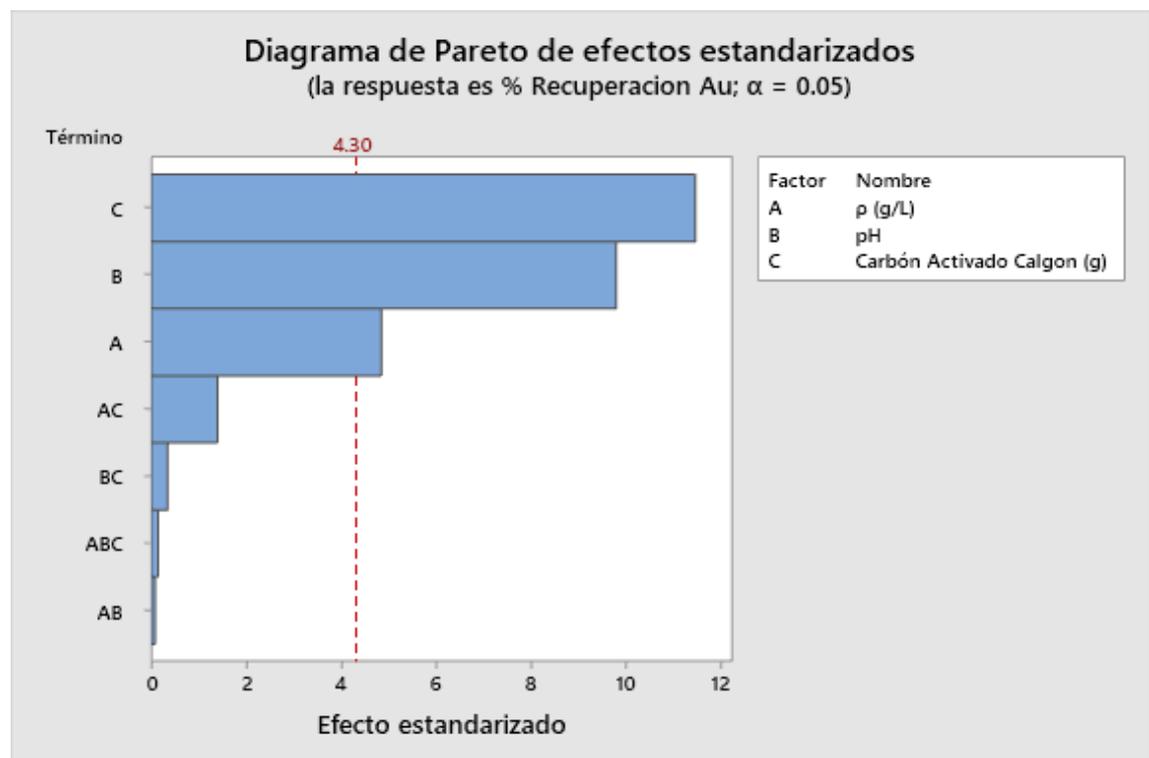
permite identificar de manera clara y ordenada los factores que ejercen un mayor impacto en la variable de respuesta.

En el proceso de cianuración, las variables e interacciones que resultan ser significativas son: la Densidad de pulpa (g/L), el pH y la Cantidad de carbón tipo Calgon (g). Estos factores son los que más influyen en el porcentaje de recuperación de oro. Esto implica que estas variables son cruciales en la optimización del proceso de cianuración de oro. Por lo tanto, cualquier cambio en estos factores puede tener un efecto considerable en la recuperación de oro.

Para corroborar estas observaciones, se puede hacer referencia al valor de probabilidad que se encuentra en la Tabla 19 del Análisis de Varianza (ANOVA). Este análisis proporciona información adicional sobre la relevancia estadística de estos factores. El análisis de ANOVA es una herramienta útil que ayuda a confirmar la importancia de estos factores en el proceso y respalda la conclusión de que las interacciones mencionadas tienen un impacto significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos factores al buscar optimizar el proceso de cianuración.

Figura 16.

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22.

Análisis de varianza (ANOVA).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	327.615	40.952	37.75	0.026
Lineal	3	272.310	90.770	83.67	0.012
ρ (g/L)	1	25.561	25.561	23.56	0.040
pH	1	104.112	104.112	95.97	0.010
Carbón Activado Calgon (g)	1	142.636	142.636	131.47	0.008
ρ (g/L)*pH	1	0.007	0.007	0.01	0.942
ρ (g/L)*Carbón Activado Calgon (g)	1	2.122	2.122	1.96	0.297
pH*Carbón Activado Calgon (g)	1	0.125	0.125	0.12	0.767
ρ (g/L)*pH*Carbón Activado Calgon (g)	1	0.022	0.022	0.02	0.900
Curvatura	1	53.029	53.029	48.88	0.020
Error	2	2.170	1.085		
Total	10	329.784			

Fuente: Elaboración propia

El diseño factorial 2k con réplicas centrales, que se utiliza en este estudio, no cumple con la suposición de linealidad. Esto significa que el comportamiento

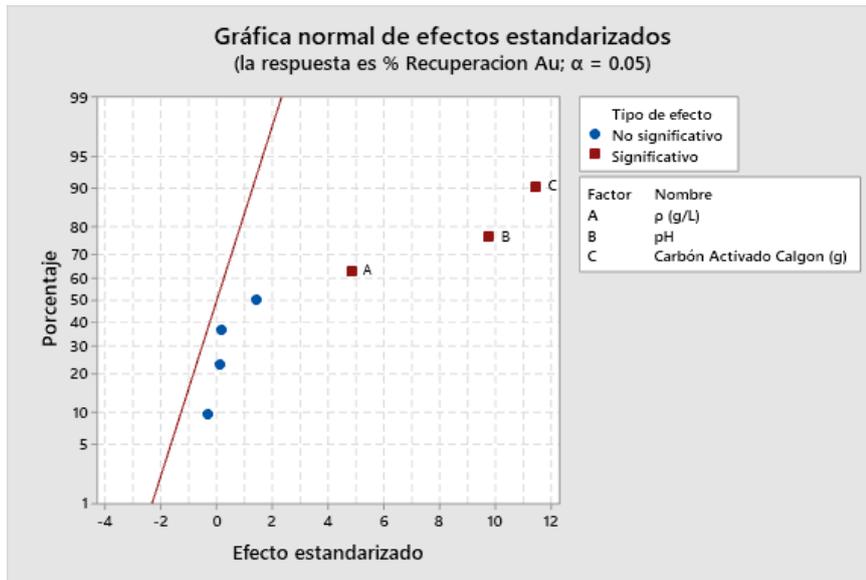


del proceso de cianuración no sigue una relación lineal con los cambios en los factores. Esta observación se confirma mediante una prueba de curvatura, cuyos resultados se pueden encontrar en la Tabla 19 del análisis de varianza (ANOVA). Es importante destacar que el valor de probabilidad asociado al efecto de curvatura es de 0.020, lo cual es significativamente inferior al límite de valor de significancia estándar de 0.05. Esto proporciona una evidencia estadística sólida de que la suposición de linealidad no se cumple en el proceso de cianuración estudiado.

Estos hallazgos indican que el proceso de cianuración estudiado es no lineal y que todos los factores específicos son críticos para determinar la recuperación de oro. Por lo tanto, es esencial considerar estas no linealidades y factores significativos al optimizar y controlar el proceso de cianuración para lograr una recuperación de oro óptima. Estos resultados subrayan la importancia de un enfoque más complejo y matizado en la optimización del proceso de cianuración, que tenga en cuenta tanto los factores individuales como sus interacciones.

Figura 17.

Normalidad de efectos estandarizados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23.

Análisis de T-Student.

Término	Valor T	Valor p	FIV
Constante	235.08	0.000	
ρ (g/L)	4.85	0.040	1.00
pH	9.80	0.010	1.00
Carbón Activado Calgon (g)	11.47	0.008	1.00
ρ (g/L)*Ph	0.08	0.942	1.00
ρ (g/L)*Carbón Activado Calgon (g)	1.40	0.297	1.00
pH*Carbón Activado Calgon (g)	-0.34	0.767	1.00
ρ (g/L)*pH*Carbón Activado Calgon (g)	0.14	0.900	1.00
Pt Ctral	6.99	0.020	1.00

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 20 presenta el valor de T, que es un indicador de la significancia de los factores en el proceso de cianuración. Este valor nos permite entender la importancia de cada factor y su influencia positiva en la respuesta del proceso.

En particular, el Carbón Activado Calgon (g) tiene un valor de T de 11.47, lo que indica una alta significancia en el proceso. Esto sugiere que el Carbón Activado Calgon (g) es un factor crítico en la recuperación de oro y que cualquier



cambio en este parámetro puede tener un impacto considerable en la eficiencia del proceso.

Por otro lado, el pH tiene un valor de T de 9.80, lo que también indica una significancia importante. Esto implica que a mayor pH en la pulpa tiene un efecto notable en la recuperación de oro.

Finalmente, la densidad de pulpa (g/L) tiene un valor de T de 4.85. Aunque este valor es menor que los otros dos, todavía indica una significancia relevante. Esto significa que la densidad de pulpa (g/L) es un factor a tener en cuenta en el proceso de cianuración.

Estos valores de T, por lo tanto, resaltan la importancia de estos tres factores en el proceso de cianuración y sugieren que deben ser cuidadosamente controlados y optimizados para maximizar la recuperación de cobre.



V. CONCLUSIONES

- Las pruebas de cianuración permitieron determinar que la mejora del pH es esencial para mantener una cianuración más eficaz y una recuperación del oro más efectiva. Una correcta regulación del pH no garantiza la sostenibilidad y la rentabilidad de la actividad minera.
- Durante las pruebas de carbón en pulpa llevadas a cabo en el laboratorio, cuando se utilizó el carbón, se consiguió una recuperación máxima del 96.6% de Au. Se consigue esto al trabajar con una densidad de pulpa ideal de 1350 g/L, con un pH de 11.5, un peso del carbón de 350 g y un período de agitación de 36 horas. En otras palabras, para el tipo de mineral tratado, el carbón facilita el aumento de la recuperación oro en el proceso de carbón en pulpa.
- La densidad de pulpa es un parámetro vital que impacta significativamente la eficiencia y efectividad en la recuperación de minerales. Mantenerla alrededor de 1350 g/L no solo asegura una alta tasa de recuperación, sino que también optimiza todo el proceso operativo. Implementar estrategias adecuadas para su control y ajuste puede resultar en mejoras sustanciales en el rendimiento general del sistema.



VI. RECOMENDACIONES

- Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para medir la densidad de pulpa puede ayudar a ajustar las condiciones operativas rápidamente y mantener la densidad dentro del rango óptimo.
- Regular el contenido de agua en la pulpa es fundamental. Demasiada agua puede disminuir la densidad, mientras que muy poca puede incrementar el riesgo de obstrucciones..
- Se recomienda llevar a cabo estudios experimentales que abarquen un espectro más amplio de variables operacionales. Se debe investigar la influencia de la temperatura, la adición de cal para ajustar el pH y el uso de peróxido de hidrógeno como agente oxidante. Estos estudios permitirán afinar las condiciones del proceso para incrementar significativamente la recuperación del oro.
- Se recomienda que la empresa minera SERMETAL S.A.C., implemente reglamentos internos de seguridad y salud, así como un sistema de gestión ambiental. Estos deben estar en conformidad con el nuevo Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS 024-2016-EM y su modificatoria D.S. N° 023-2017-EM. La adhesión a estos reglamentos garantizará un entorno de trabajo seguro y saludable para los empleados, al tiempo que minimizará el impacto ambiental de las operaciones mineras.
- Se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo de las máquinas operativas de la planta. Un programa de mantenimiento regular puede prevenir paradas no planificadas y extender la vida útil de los equipos, asegurando una operación continua y eficiente.
- Se recomienda una capacitación continua de los trabajadores ya que es fundamental para mantener un alto nivel de competencia en todas las áreas del



proceso. Los programas de capacitación deben ser integrales, cubriendo desde conocimientos técnicos hasta prácticas de seguridad y operación, para fomentar un entorno laboral seguro y eficaz.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antony, J. (2003). Fundamentals of design of experiments. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, 6–16.
- Apfata Taipe, W. (2017). *Optimización de la recuperación de Au en la planta de beneficio de la Compañía Refinadora del Pacífico SAC*.
- Asalde Horna, R. M. (2010). *Optimización de un Proceso de Recuperación de Oro mediante carbón activado*.
- Barazorda Cuellar, K. R., & Lima Condori, E. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña*.
- Chok, J. T., Harper, J. M., & Luiselli, J. K. (2005). *Introduction to functional analysis*.
- Crittenden, J. C. (2005). *Water Treatment Principles and Design Hoboken John Wiley Sons*.
- Del Carpio Valencia, G. A. (2018). *Estudio de la adsorción en la Planta de Cianuración CIP Corire-Caraveli SAC*.
- Delao Lezameta, D. A. (2022). *Optimización del proceso de lixiviación en la recuperación de oro, en minera Kairos Capital SAC–Chimbote 2020*.
- Egan, J., Bazin, C., & Hodouin, D. (2016). Effect of particle size and grinding time on gold dissolution in cyanide solution. *Minerals*, 6(3), 68.
- Escalante, V., Domínguez, J. D., López, J. A. D., Botero, G. J., Paenza, A., Botero, G. J., Solomons, G., Anton, H., Rorres, C., & Anton, H. (2014). Diseño y análisis de experimentos. *Editorial Limusa*.
- Farfan Chicca, N. P., & Huaracallo Choque, C. S. (2019). *Optimización del proceso de concentración por flotación de sulfuros de plomo con presencia de óxidos de plomo, utilizando la sulfurización en la concentradora de la minera bateas*.
- Fernández, A., Castillo, C., Muñiz, R., & García, I. (2006). Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. *Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba*.
- Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial*.



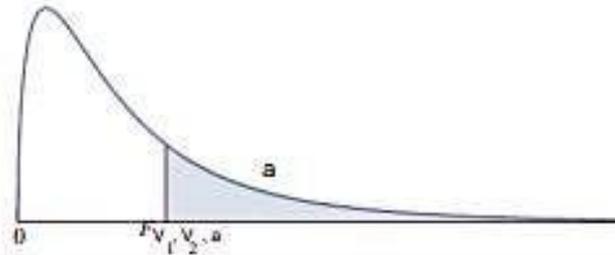
- Figuroa, H., & Flórez, S. (2010). *Aplicación de carbón activado a la recuperación de oro en la mina la providencia.*
- Gutiérrez Pulido, H. (2012). *Análisis y diseño de experimentos.*
- Huerta Solano, C. R. (2019). *Evaluación del cianuro de sodio para la optimización del proceso metalúrgico de la planta de beneficio SantaFilomena II de la empresa Sotrami SA.*
- Ibrado, A. S., & Fuerstenau, D. W. (1992). Effect of the structure of carbon adsorbents on the adsorption of gold cyanide. *Hydrometallurgy*, 30(1–3), 243–256.
- Ibragimova, R. I., Mil'chenko, A. I., & Vorob'ev-Desyatovskii, N. V. (2007). Criteria for choice of a brand of activated carbon for hydrometallurgical recovery of gold from ore pulps in carbon-in-leaching and carbon-in-pulp processes. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80, 891–903.
- Machaca Chuquimamani, R. F. (2005). *Optimización de la recuperación de oro mediante el control de la densidad y el pH por el método carbón en pulpa en la procesadora NEAL SAC. Chala-Arequipa.*
- Mas, M. A., Aguirre, F. L., & Amaya, G. (2005). Evaluación de los Procesos de Lixiviación por Agitación Convencional y Carbón en Pulpa en la Hidrometalurgia del Oro. *Información Tecnológica*, 16(5), 27–33.
- Mina, J. A., & Mercado, R. P. (1995). Optimización por Diseños Experimentales. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC, Impreso En Lima-Perú.*
- Misari Chuquipoma, F. S. (2010). *Metalurgia del oro. Lima: San Marcos EIRL.*
- Misari, F. S. (1993). *Metalurgia del oro* (Vol. 1). Centro de Estudios y Promoción en Ciencias de la Tierra.
- Montgomery, D. C., & Verbeek, D. V. (2004). *Control estadístico de la calidad* (Issue 658.562 M66 2004.). Limusa Wiley.
- Navarro, P., Vargas, C., Reveco, V., & Orellana, J. (2006). Recuperación de oro desde un medio amoniaco-tiosulfato con resina de intercambio iónico Amberlite IRA-410. *Revista de Metalurgia*, 42(5), 354–366.



- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine–peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*, 152, 199–203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.015>
- Piscocoya Apaza, K. L. (2018). *Estudio de la lixiviación por agitación empleando el proceso CIP para la recuperación de oro de la minera de ECO CORI SA Juliaca.*
- Stange, W. (1999). The process design of gold leaching and carbon-in-pulp circuits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 99(1), 13–25.
- Susanibar Kler, A. W. (2019). *Evaluación de la adsorción de carbón activado para la recuperación de oro a nivel experimental.*
- Trujillo Fajardo, L. A. (2008). *Diseño de la unidad de desorción de carbón activado cargado con oro.*
- Varela, P. D. M., & Reyes, A. M. L. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados. *Scientia et Technica*, 1(47), 101–106.
- Vargas, J. (1990). *Metalurgia del oro y la plata. San Marcos*, 2.
- Villegas Quispe, A. F. R. (2015). *Optimización del tratamiento de minerales auríferos por el método de carbón en pulpa (CIP) en la planta de beneficio doble “D” minera COLIBRI.*
- Xia, J., Mahandra, H., & Ghahreman, A. (2021). Efficient gold recovery from cyanide solution using magnetic activated carbon. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(40), 47642–47649.
- Yampasi Caceres, O. (2017). *Adsorción del carbón activado de tallos y hojas de cañihua (Chenopodium pallidicaule), para la recuperación del oro en la minera Colibrí SAC.*
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The extractive metallurgy of gold. Edition.* Van Nostrand Reinhold. New York. Pesada del oro. Anexo.

ANEXOS

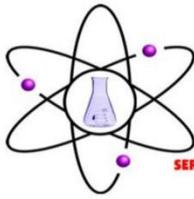
Anexo N° 1. Tabla de puntos porcentuales superiores para la distribución F



F_2	α	F_1								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.100	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86
	0.050	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
	0.010	4052.18	4999.5	5403.35	5624.58	5763.65	5858.99	5928.36	5981.07	6022.47
	0.001	405284	50001	540382	562501	576405	585938	592874	598144	603040
2	0.100	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38
	0.050	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
	0.010	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39
	0.001	998.50	999.00	999.17	999.25	999.30	999.33	999.36	999.37	999.39
3	0.100	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24
	0.050	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
	0.010	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35
	0.001	167.03	148.50	141.11	137.10	134.58	132.85	131.58	130.62	129.86
4	0.100	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94
	0.050	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
	0.010	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66
	0.001	74.14	61.25	56.18	53.44	51.71	50.53	49.66	49.00	48.47
5	0.100	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32
	0.050	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
	0.010	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16
	0.001	47.18	37.12	33.20	31.09	29.75	28.83	28.16	27.65	27.24
6	0.100	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96
	0.050	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
	0.010	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98
	0.001	35.51	27.00	23.70	21.92	20.80	20.03	19.46	19.03	18.69
7	0.100	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72
	0.050	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
	0.010	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72
	0.001	29.25	21.69	18.77	17.20	16.21	15.52	15.02	14.63	14.33
8	0.100	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56
	0.050	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
	0.010	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91
	0.001	25.41	18.49	15.83	14.39	13.48	12.86	12.40	12.05	11.77
9	0.100	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44
	0.050	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
	0.010	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35
	0.001	22.86	16.39	13.90	12.56	11.71	11.13	10.70	10.37	10.11



Anexo N° 3. Informe de ensayo ley de cabeza.



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M120-0308

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE : **OWER ALAIN RAMOS CALLISAYA**
ASUNTO : Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA
CANTIDAD DE MUESTRAS : 01
SOLICITUD DE ENSAYO : Análisis Químico elemento Oro (Au), Reconocimiento
RECEPCION DE MUESTRAS : Bolsa de plástico
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO : 10/11/2023 al 12/11/2023
DETALLE DEL INFORME

RESULTADO DE ENSAYO

N°	N° RH	Código de Cliente	Au	
			Gr/Tm	Oz/Tc
1	RH-M134317	Mineral-Cabeza	7.067	0.208

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

METODOS DE REFERENCIA

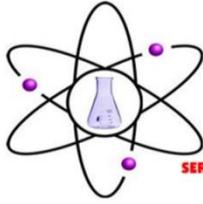
* Determinación de Oro (Au) en mineral - Método por Vía seca

RHLAB S.A.C.

Inga Evelyn Huaynapata Luque
GERENTE GENERAL
CIP: 187756



Anexo N° 4. Informe de ensayo ley de cabeza.



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M120-0307

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE : OWER ALAIN RAMOS CALLISAYA
 ASUNTO : Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra
 CARACTERISTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA :
 CANTIDAD DE MUESTRAS : 08
 SOLICITUD DE ENSAYO : Análisis Químico elemento Oro (Au).
 En Solución
 RECEPCION DE MUESTRAS : Botella de Plástico
 FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO : 10/11/2023 al 13/11/2023
 DETALLE DEL INFORME

RESULTADO DE ENSAYO

N°	N° RH	Código de Cliente	Au	
			Gr/Tm	Oz/Tc
1	RH-M134309	Prueba 1	5.464	0.161
2	RH-M134310	Prueba 2	5.648	0.166
3	RH-M134311	Prueba 3	5.995	0.176
4	RH-M134312	Prueba 4	6.172	0.182
5	RH-M134313	Prueba 5	6.014	0.177
6	RH-M134314	Prueba 6	6.327	0.186
7	RH-M134315	Prueba 7	6.494	0.191
8	RH-M134316	Prueba 8	6.831	0.201

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

METODOS DE REFERENCIA

* Determinación de Oro (Au), en solución - Método absorción Atómica

RHLAB S.A.C.

 Ing. Félix Huaymapata Luque
 GERENTE GENERAL
 CIP: 107756



Anexo N° 5. Imágenes de las pruebas.































Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Juan Alain Ramos Callizaya
identificado con DNI 70138829 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Metalúrgica

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"Optimización del proceso carbon en pulpa para incrementar
la recuperación de oro en la Empresa minera Sarmetal SAC"

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

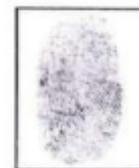
Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Oscar Alain Ramos Callizaya
identificado con DNI 70138829 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Metalúrgica

informo que he elaborado el la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Optimización del Proceso Carbon en Pulpa para incrementar
la recuperación de oro en la empresa minera sermetel SAC"

"Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de Diciembre del 2024



FIRMA (obligatoria)



Huella