Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Influencia del pH y la concentración de cianuro libre en la formación de complejos de cobre para mejorar la recuperación de oro en procesos de carbón en columnas en la minería aurífera

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geometalurgia

AUTOR

Juan Domingo QUIROZ SANCHEZ

ASESOR

Dr. Daniel Florencio LOVERA DÁVILA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Quiroz, J. (2026). *Influencia del pH y la concentración de cianuro libre en la formación de complejos de cobre para mejorar la recuperación de oro en procesos de carbón en columnas en la minería aurífera*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Juan Domingo Quiroz Sanchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43611942
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-9268-9054
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06450640
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2815-0716
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Ana María Osorio Anaya
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08633698
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Sosimo Isidro Fernandez Salinas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07337008
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Américo Rivera del Valle
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.5.3. Caracterización de materiales C.0.4.16. Lixiviación de minerales C.0.4.1. Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Planta Hidrometalúrgica – Circuito de Carbón en Columna (CIC), Unidad Minera Lagunas Norte País: Perú Departamento: La Libertad Provincia: Santiago de Chuco Distrito: Quiruvilca Urbanización: No aplica Avenida: No aplica Latitud: -7.94223 Longitud: -78.24620
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2019 - 2021
URL de disciplinas OCDE	Mineralogía: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Minería, Procesamiento de minerales: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE **SAN MARCOS**
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los treinta días del mes de junio del año dos mil veintiséis, siendo las catorce horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen Nº 000315-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 18 de junio del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«INFLUENCIA DEL pH Y LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO LIBRE EN LA FORMACIÓN DE COMPLEJOS DE COBRE PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORO EN PROCESOS DE CARBÓN EN COLUMNAS EN LA MINERÍA AURÍFERA»

Presentado por el Bach. **JUAN DOMINGO QUIROZ SANCHEZ**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA.**

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente Nº UNMSM-20210056319, de fecha 26 de julio del 2021, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral Nº 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy Bueno (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA** al Bach. **JUAN DOMINGO QUIROZ SANCHEZ.**

Siendo las 15:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

MG. ANA MARÍA OSORIO ANAYA
Presidente

MG. SOSIMO ISIDORO FERNANDEZ SALINAS
Secretario

DR. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro

DR. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000299-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM **de la tesis**, cuyo título es **«INFLUENCIA DEL pH Y LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO LIBRE EN LA FORMACIÓN DE COMPLEJOS DE COBRE PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORO EN PROCESOS DE CARBÓN EN COLUMNAS EN LA MINERÍA AURÍFERA»,** presentado por el **bachiller** JUAN DOMINGO QUIROZ SANCHEZ, para optar el grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **12%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA.

Lima, 20 de Octubre de 2026

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Daniel Florencio Lovera Dávila

DNI: 06450640

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a mi esposa Joycy y mis hijos Fabio y Enzo quienes han sido siempre mi principal motivación para salir adelante y por ser fuente inagotable de estímulo y superación.

A mis padres y hermanos como muestra de gratitud, por su apoyo, confianza y ayuda en mi formación profesional y logro de mis aspiraciones.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos que me brinda la oportunidad de continuar creciendo profesionalmente en mi carrera profesional y a los profesionales que con sus investigaciones me han permitido consolidar este trabajo.

Al Dr. Daniel Florencio Lovera Dávila, por su dedicación y compromiso durante el asesoramiento de tesis en este trabajo de investigación el cual me ha permitido afianzar mis conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN x
ABSTRACT xi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1 Situación Problemática 1
1.2 Formulación del Problema 2
1.2.1 Problema General 2
1.2.2 Problemas Específicos 2
1.3 Justificación 3
1.3.1 Justificación Teórica 3
1.3.2 Justificación Práctica 4
1.4 Objetivos 5
1.4.1 Objetivo General 5
1.4.2 Objetivos Específicos 5
1.5 Hipótesis de Investigación 5
1.5.1 Hipótesis General 5
1.5.2 Hipótesis Específicas 6
1.5.3 Matriz de Consistencia 7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 8
2.1 Marco Epistemológico de la Investigación 8
2.2 Antecedentes de la Investigación 8
2.3 Bases Teóricas 11
2.3.1 Geología y Mineralogía del Yacimientos de Oro 11
2.3.2 Métodos de Extracción de Oro a partir de Mineral Aurífero . 15
2.3.3 Asociaciones de los Minerales Auríferos 25
2.3.4 Formación de Complejos de Cianuro de Cobre en la Lixiviación 26
2.3.5 Alternativas de Recuperación de Oro a partir de Soluciones Cianuradas 29
2.3.6 Generalidades del Carbón Activado 30
2.3.7 Proceso de Adsorción 34
2.3.8 Proceso de Desorción 40
2.3.9 Proceso de Regeneración del Carbón Activado 42

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 44
3.1 Tipo y Diseño de Investigación 44
3.2 Identificación de Variables 45
3.2.1 Variable Independiente 45
3.2.2 Variable Dependiente 45
3.2.3 Matriz de Operacionalización de Variables 46
3.3 Unidad de Análisis 46
3.4 Población y Muestra 48
3.4.1 Población 48
3.4.2 Muestra 50
3.4.3 Selección de Muestra 50
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 50
3.5.1 Técnicas de Investigación 50
3.5.2 Instrumentos de Investigación 51
3.5.3 Etapas del Diseño Experimental 51
3.5.4 Diseños Factoriales 52
3.5.5 Aplicación de Minitab 19 52
3.6 Análisis e Interpretación de la Información 52
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 55
4.1 Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados 55
4.1.1 Análisis 55
4.1.2 Interpretación 72
4.1.3 Discusión 75
CONCLUSIONES 77
RECOMENDACIONES 79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80
ANEXOS 85

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Desarrollo del matriz de consistencia de la investigación 7
Cuadro 2 Leyes de Au, Ag y Cu del modelo de bloque de stocks en celdas del pad 13
Cuadro 3 Principales aleaciones naturales del oro..... 26
Cuadro 4 Propiedades físicas y químicas del carbón activado 32
Cuadro 5 Especificaciones técnicas del carbón activado..... 33
Cuadro 6 Factores físicos..... 39
Cuadro 7 Factores químicos 40
Cuadro 8 Desarrollo de la matriz de operacionalización de variables..... 46
Cuadro 9 Promedio diario de la base de datos utilizada para el análisis de variables críticas 47
Cuadro 10 Características y precisión del modelo de regresión por bosque de decisión 59
Cuadro 11 Diseño experimental para la evaluación de la recuperación de oro y cobre en el circuito de adsorción y determinación del rango de análisis a nivel laboratorio 62
Cuadro 12 Planteamiento de diseño de experimentos para evaluar la cinética de adsorción de oro y cobre en el carbón activado 65
Cuadro 13 Concentraciones promedio en las soluciones utilizadas en las pruebas de cinética de adsorción 66
Cuadro 14 Resultados de las pruebas 1 y 2 de cinética de adsorción configuradas para la evaluación del efecto del pH, concentración de cianuro libre y concentración de oro 66
Cuadro 15 Cinética de adsorción configuradas para la evaluación de la concentración de cianuro libre y concentración de cobre 69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa geológico local. 12
Figura 2 Modelo de bloques de zonificación de mineral cuprífero. 13
Figura 3 Modelo de bloques de zonificación de mineral cuprífero. 15
Figura 4 Lixiviación en pilas. 16
Figura 5 Diagrama de Pourbaix del Sistema $Au - CN - H2O$. 18
Figura 6 Representación del mecanismo electroquímico. 20
Figura 7 Cinética de lixiviación de oro de mineral con contenido de cobre. 21
Figura 8 Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata. 23
Figura 9 Efecto de la temperatura en la velocidad de oro con 0.25% de KCN en solución. 24
Figura 10 Equilibrio entre HCN y CN^- en función del pH. 25
Figura 11 Diagramas de distribución de las especies cianuradas de cobre vs la relación molar. 27
Figura 12 Diagrama de distribución para complejos de cianuro de cobre. 28
Figura 13 Diagrama de flujo para el procesamiento de oro. 30
Figura 14 Procedimiento para obtención de carbón activado en laboratorio. 31
Figura 15 Estructura interna del carbón activado. 32
Figura 16 Distribución de poros del carbón activado. 34
Figura 17 Mecanismo de adsorción del oro. 38
Figura 18 Mecanismo de desorción del oro. 41
Figura 19 Regeneración química del carbón activado. 42
Figura 20 Regeneración térmica de carbón activado. 43
Figura 21 Etapas planteadas para el desarrollo de la investigación. 44
Figura 22 Tendencia operativa del efecto de la variación de variables críticas en el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción. 48
Figura 23 Tendencia del efecto de la presencia de Ag en la solución pregnant y la variación de la concentración de Au sobre el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción. 49
Figura 24 Tendencia operativa del efecto de la presencia de Cu en la solución pregnant sobre el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción. 49

Figura 25 Tendencia de relación molar CN^-/Cu en las soluciones Pregnant y Barren del circuito de adsorción. 55
Figura 26 Efecto de la concentración de cianuro libre en la selectividad Au/Cu. 56
Figura 27 Efecto de la recuperación de oro (%) en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm). 57
Figura 28 Efecto del pH en la solución del circuito de adsorción para la recuperación de oro (%). 58
Figura 29 Efecto de la concentración de cianuro libre (ppm) en la solución del circuito de adsorción para la recuperación de oro (%). 58
Figura 30 Segmentación del método de árbol de decisión para la regresión del conjunto de datos en análisis. 60
Figura 31 Efectos principales e interacción del pH y la concentración del cianuro libre (ppm) para la recuperación de oro (%) en el circuito de adsorción. 63
Figura 32 Efectos principales e interacción del pH y la concentración del cianuro libre (ppm) para la recuperación de cobre (%) en el circuito de adsorción 64
Figura 33 Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de oro y cobre en el carbón activado en función del Ph y la concentración de cianuro libre (ppm) para la prueba 01. 67
Figura 34 Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de oro y cobre en el carbón activado en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm) para la prueba 02. 68
Figura 35 Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado y la concentración de cianuro libre (ppm). 69
Figura 36 Velocidad de adsorción (k) de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado y la concentración de cianuro libre (ppm) 70
Figura 37 Circuito cerrado del uso de cianuro y su detoxificación cuando hay un exceso de agua en el sistema 70

RESUMEN

La existencia de especies minerales que contienen cobre dentro del proceso de lixiviación aurífera genera diversas dificultades operativas debido al consumo excesivo de cianuro, formando complejos de cianuro de cobre y como mayor especie predominante el dicianuro de cobre ($Cu(CN)_2^-$). Los complejos de cobre cianurados cambian de acuerdo a la concentración de cianuro libre y el pH de la solución, cuando el pH disminuye se produce la formación de complejos de cobre de menor grado ($Cu(CN)_2^-$) que son fácilmente adsorbidos por el carbón. La carga de los complejos de cobre cianurados, bajo algunas condiciones, se carga más que el oro y esto ocasiona que el cianuro de oro ($AuCN_2^-$) no sea adsorbido por el carbón, disminuyendo la recuperación de oro en el proceso de carbón en columnas (CIC).

Esta investigación tiene como objetivo evaluar las causas que influyen en la recuperación de oro debido a la adsorción de cobre sobre el carbón activado y analizar la influencia de la concentración de cianuro libre y el pH en la adsorción de complejos de cobre. Además, esta investigación se realiza en beneficio de las empresas auríferas para incrementar la recuperación en el proceso CIC, reduciendo costos en los procesos posteriores y penalizaciones en la comercialización del producto final (barras dore).

La metodología realizada para esta investigación es de tipo aplicativa con un enfoque cuantitativo, en el estudio se realizaron pruebas en la planta operativa, donde se evaluaron las relaciones entre variables, la variable independiente o predictiva (pH y concentración de cianuro libre) y la variable dependiente o resultado (recuperación de oro).

Los resultados muestran que a un pH > 9.5 y a una concentración de cianuro libre > 30 ppm se logran formar complejos de cobre de mayor tamaño ($Cu(CN)_4^{3-}$) que son adsorbidos en menor proporción sobre el carbón activado. Finalmente se concluye que se logra disminuir notablemente la adsorción de complejos de cobre en el carbón activado y se mejora la recuperación de oro hasta valores de 83% en el proceso CIC.

Palabras claves: Adsorción, Complejos de Cobre, pH, Concentración de Cianuro Libre, Carbón Activado, Oro.

ABSTRACT

The presence of copper minerals in the gold leaching causes problems due to the excessive consumption of cyanide, forming copper complexes and as a greater predominant species the copper dicyanide ($Cu(CN)_2^-$). The cyanide copper complexes change according to the concentration of free cyanide and the pH of the solution, when the pH decreases the formation occurs of lower grade copper complexes ($Cu(CN)_2^-$) that are easily adsorbed by carbon. The charge of cyanide copper complexes, under some conditions, is charged more than gold and this causes the gold cyanide ($AuCN_2^-$) is not adsorbed by the carbon, decreasing the recovery of gold in the process carbon in columns (CIC).

This research aims to evaluate the causes that influence gold recovery due to copper adsorption on carbon activated and to analyze the influence of free cyanide concentration and pH on the adsorption of copper. Also, this investigation is carried out for the benefit of gold companies to increase recovery in the CIC process, reducing costs in subsequent processes and penalties in the commercialization of the final product (dore bars).

The methodology carried out for this investigation is of an applicative type with a quantitative approach, in the study tests were carried out in the operating plant, where they were evaluated relation between variables, the independent or predictive variable (pH and concentration of free cyanide) and the dependent variable were evaluated. or result (gold recovery).

The results show that at a pH > 9.5 and a free cyanide concentration > 30 ppm, larger copper complexes are formed ($Cu(CN)_4^{3-}$) that are adsorbed to a lesser proportion on the activated carbon. Finally, it is concluded that the adsorption of copper complexes in activated carbon is significantly reduced, and the recovery of gold is improved to values of 83% in the CIC process.

Keywords: Adsorption, Copper Complexes, pH, free Cyanide Concentration, Activated Carbon, Gold

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación Problemática

La presencia significativa de cobre y/o plata en las soluciones de oro cianurado, son interferentes en los procesos con carbón activado para recuperar el metal precioso, por las siguientes causas: La plata se adsorbe al igual que el oro, aumentando los requerimientos de carbón; bajo algunas condiciones el cobre se adsorbe sobre el carbón constituyéndose en un contaminante problemático: el proceso global demanda mayores costos y complejidades (Dai et al., 2012).

La adsorción metales que no tienen valor económico reduce la eficiencia en la recuperación de oro, ya que estas especies compiten por los sitios activos del carbón y se fijan junto con el complejo aurífero. Además, los metales diferentes al oro que quedan retenidos en el carbón suelen presentar dificultades para ser desorbidos mediante los métodos convencionales utilizados en minerales auríferos, lo que provoca la acumulación de componentes indeseables en el carbón activado. La presencia de estos metales termina afectando la pureza del producto final (Hilari, 2018).

El manejo de soluciones cianuradas que contienen elevadas cantidades de cobre genera efectos desfavorables en la capacidad del carbón activado para adsorber oro. Diversos estudios reconocen que los complejos cianurados de cobre actúan como especies interferentes, ocupando o bloqueando los sitios activos del carbón (Souza et al., 2014).

La adsorción de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado depende fuertemente de la química de la solución. En determinadas condiciones, estos complejos pueden retenerse en mayor proporción que el propio oro, impidiendo la adsorción del complejo aurocianurado y provocando una disminución en la recuperación de oro (Tauetsile et al., 2019).

Las soluciones que drenan de las plataformas de lixiviación en pilas contienen una concentración significativa de metales de penalización junto con el oro. Los metales

de penalización como iones metálicos individuales también se cargan sobre el carbón activado afectando la recuperación del oro. El cobre forma los complejos dicianuro, tricianuro y tetracianuro de cobre. Cuando el pH y la concentración de cianuro son bajos, la especie predominante es el complejo dicianurado de cobre, $Cu(CN)_2^-$, el cual presenta una alta afinidad por el carbón activado. Esta adsorción preferencial del cobre ocasiona dificultades en la recuperación de oro (Cousins, 2009).

El efecto perjudicial del cobre sobre la adsorción de oro y concentraciones de cobre bajas como 100 mg/L interfieren gravemente en los procesos de adsorción. Asimismo, soluciones que contienen altas concentraciones de cobre mayor a 200 mg/L son inadecuados para el tratamiento por adsorción (Marsden & House, 2009).

La presencia de minerales de cobre en la lixiviación de oro causa problemas debido al consumo excesivo de cianuro, formando complejos de cianuro de cobre y como mayor especie predominante el di cianuro de cobre $(Cu(CN)_2^-)$. Esto afecta la economia del proceso al obtener recuperaciones de oro deficientes en CIC (Tauetsile et al., 2019).

La disolución del cobre durante la lixiviación resulta perjudicial, ya que incrementa el consumo tanto de cianuro como de oxígeno disuelto. Posteriormente, este cobre disuelto afecta la etapa de recuperación de oro en el proceso CIC y contribuye a la contaminación del producto final (Rojas, 2003).

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cuáles son las causas que afectan la baja recuperación de oro en procesos de carbón en columnas para soluciones de lixiviación con contenido de cobre?

1.2.2 Problemas Específicos

¿En qué condiciones químicas ingresa la solución cianurada al proceso de adsorción en columnas?

¿En qué medida la adsorción de complejos de cobre de menor grado influye en la deficiente recuperación de oro en los procesos de carbón en columnas?

¿De qué manera el pH y la concentración de cianuro limitan la recuperación de oro en los procesos de carbón en columnas?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

El carbón activado se utiliza en la extracción de oro por ser selectivo para el oro y menos para otros metales, como el cobre. Sin embargo, el cobre tiene la capacidad de adsorberse sobre el carbón activado impidiendo la adsorción del oro cuando está en forma de dicianuro y en una concentración alta. Cuando el cobre está en forma de tetracianuro, la carga de cobre se inhibe significativamente, esto permite la máxima recuperación de oro. Para asegurar que se forme el complejo de tetracianuro, debe estar presente una combinación de cianuro disponible y pH elevado (Cousins, 2009).

La proporción de la producción mundial de oro obtenida mediante procesos basados en carbón activado pasó de prácticamente inexistente en la década de 1970 a alcanzar alrededor del 70% en los últimos diez años. Este incremento refleja un notable nivel de adopción tecnológica dentro de la industria minera. El motivo principal de esta rápida incorporación fue la evidencia generada por grandes operaciones en Sudáfrica, las cuales demostraron de forma contundente que esta tecnología permite lograr mayores recuperaciones de oro junto con costos de operación y de inversión significativamente menores (Fleming et al., 2011).

El empleo de carbón activado para recuperar oro y plata desde soluciones cianuradas de lixiviación ha demostrado un desempeño altamente eficiente, especialmente en los sistemas de adsorción en columnas, cuando se compara con la precipitación de zinc convencional, el carbón activado tiene una importante consideración económica, con ahorros significativos tanto en capital y en costos operativos (Kim et al., 2024).

El presente trabajo realiza la evaluación de la adsorción de cobre sobre el carbón activado disuelto en soluciones de cianuro, el cobre se adsorbe sobre el carbón activado reduciendo la recuperación de oro en el proceso de carbón en columnas. Se analizará la implicancia del pH, la concentración de cianuro y el contenido de cobre para que otras empresas auríferas con procesos de carbón en columnas mejoren la recuperación de oro (Ilyas & Lee, 2018).

El valor de esta investigación radica en disminuir la retención de cobre en el carbón activado y, al mismo tiempo, mejorar la eficiencia de recuperación de oro dentro del proceso de carbón en columnas, para esta investigación se identificarán los factores que influyen en la adsorción de complejos de cobre.

1.3.2 Justificación Práctica

Esta investigación busca aportar beneficios a las empresas dedicadas a la producción de oro que emplean lixiviación en pilas y posterior adsorción mediante carbón en columnas (CIC). El objetivo es optimizar la recuperación de oro desde soluciones cianuradas al disminuir la fijación de cobre en el carbón activado, lo cual se logra trabajando a valores elevados de pH y con altas relaciones cianuro/cobre en la solución (Xie et al., 2013).

La investigación reducirá la adsorción de cobre sobre el carbón activado para mejorar la recuperación de oro en procesos CIC, el cobre es un elemento que está presente en los minerales de oro a procesar, debido al proceso de lixiviación este elemento se disuelve en soluciones de cianuro junto con el oro que es el metal de interés, por lo tanto, este metal acompaña al oro en la solución pregnant que es transferido hacia el proceso de CIC (Mahmood et al., 2021).

Los complejos cianurados de cobre dependen tanto de la concentración de cianuro como del pH de la solución. A valores bajos de pH predominan especies de menor coordinación, como $Cu(CN)_2^-$, que presentan una alta afinidad por el carbón activado. En contraste, los complejos $Cu(CN)_3^{2-}$ y $Cu(CN)_4^{3-}$ muestran una adsorción significativamente menor y no interfieren en la captura del complejo aurocianurado, lo que favorece la recuperación de oro. Este comportamiento resulta especialmente

beneficioso para las operaciones auríferas que emplean sistemas de carbón en columnas (Sayiner & Acarkan, 2014).

La presente investigación se realiza con el fin de reducir la adsorción de complejos de cobre de menor grado sobre el carbón activado e incrementar la recuperación de oro en un proceso de carbón en columnas. Además, será en beneficio de las empresas auríferas incrementando su rentabilidad en el proceso CIC, reduciendo los costos en los procesos posteriores y penalizaciones en la comercialización del producto final.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar las causas que influyen en la recuperación de oro debido a la adsorción de cobre sobre el carbón activado en procesos CIC.

1.4.2 Objetivos Específicos

Realizar la caracterización de la solución cianurada que ingresa al proceso de adsorción en columnas.

Reducir la adsorción de complejos de cobre de menor grado sobre el carbón activado en los procesos CIC mejorando la recuperación de oro.

Analizar la influencia del pH y concentración de cianuro sobre la recuperación de oro en los procesos CIC a partir de soluciones lixiviantes con contenido de cobre.

1.5 Hipótesis de Investigación

1.5.1 Hipótesis General

La recuperación de oro aumenta al incrementar el pH y la concentración de cianuro libre en la solución.

1.5.2 Hipótesis Específicas

La caracterización de la solución cianurada permite determinar los elementos presentes en la solución, el pH y la concentración de cianuro libre.

El incremento del pH y la concentración de cianuro libre permite formar complejos de cobre de mayor tamaño para mejorar la recuperación de oro.

El tamaño de los complejos cianurados de cobre es inversamente proporcional a la cantidad de cobre adsorbido por el carbón activado, permitiendo mejorar la recuperación de oro.

1.5.3 Matriz de Consistencia

Cuadro 1. ***Desarrollo de la matriz de consistencia de la investigación***

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
PROBLEMA PRINCIPAL	**OBJETIVO GENERAL**	**HIPÓTESIS GENERAL**		**INDEPENDIENTE**	
¿Cuáles son las causas que afectan la baja recuperación de oro en procesos de carbón en columnas para soluciones de lixiviación con contenido de cobre?	Evaluar las causas que influyen en la recuperación de oro debido a la adsorción de cobre sobre el carbón activado en procesos CIC.	La recuperación oro aumenta al incrementar el pH y la concentración de cianuro libre en la solución.	Nivel de pH	Especies ácidas en solución	Escala de pH (1 -14)
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	**OBJETIVOS ESPECÍFICOS**	**HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**	Concentración de cianuro libre en la solución	Tiempo de cianuración/ lixiviación	Tiempo de residencia
¿En qué condiciones químicas ingresa la solución cianurada al proceso de adsorción en columnas?	Realizar la caracterización de la solución cianurada que ingresa al proceso de adsorción en columnas.	La caracterización de la solución cianurada permite determinar los elementos presentes en la solución, el pH y la concentración de cianuro libre.		**DEPENDIENTE**	
¿En qué medida la adsorción de complejos de cobre de menor grado influye en la deficiente recuperación de oro en los procesos de carbón en columnas?	Reducir la adsorción de complejos de cobre de menor grado sobre el carbón activado en los procesos CIC mejorando la recuperación de oro.	El incremento del pH y la concentración de cianuro libre permite formar complejos de cobre de mayor tamaño para mejorar la recuperación del oro.	La recuperación de oro por el proceso de adsorción de carbón en columnas	Concentración de oro en el carbón	Ley de oro en el carbón activado (gAu/ Kg*C)
¿De qué manera el pH y la concentración de cianuro limitan la recuperación de oro en los procesos de carbón en columnas?	Analizar la influencia del pH y concentración de cianuro sobre la recuperación de oro en los procesos CIC a partir de soluciones lixiviantes con contenido de cobre.	El tamaño de los complejos cianurados de cobre es inversamente proporcional a la cantidad de cobre adsorbido por el carbón activado, permitiendo mejorar la recuperación.	La recuperación de oro por el proceso de adsorción de carbón en columnas	Concentración en la solución	Grado de soluto por unidad de volumen (mg/l)

Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Epistemológico de la Investigación

La optimización de procesos refleja la búsqueda constante de mejora en el ser humano. En las actividades mineras, surgen preguntas como: ¿Cómo mejorar la eficiencia, la recuperación metalúrgica y reducir costos operativos? A través de algoritmos, metodologías y modelos matemáticos se han logrado avances, pero cada unidad minera tiene condiciones particulares que requieren enfoques específicos.

La pregunta clave es: ¿Cómo optimizar el procesamiento de minerales? Primero, la observación empírica permite identificar áreas de mejora en la planta. Segundo, el modelado matemático ayuda a entender y predecir los fenómenos fisicoquímicos en las plantas metalúrgicas. A pesar de los estudios previos en otras industrias, es esencial profundizar en cada caso, ya que las condiciones operativas varían según la empresa minera.

Durante estos años, el panorama metalúrgico cambiará drásticamente, debido a que la inversión minera se ha incrementado en 1.3% respecto al año 2021, según MINEM (2022). Asimismo, la industria metalúrgica del oro ha reducido su producción, así como su cotización en el mercado, por lo que se requiere investigar e identificar las variables que participan en la recuperación de oro. Solo si se logra mejorar el beneficio, se podrá generar impactos positivos directos para la empresa (mayores ingresos, mayor tonelaje, menor emisión de contaminantes, etc.) e indirectos para la población en general como las regalías, mejor calidad ambiental entre otros.

2.2 Antecedentes de la Investigación

Msumange et al. (2021) evaluaron la recuperación selectiva de oro a partir de soluciones cianuradas con presencia de cobre mediante diferentes adsorbentes (carbón activado y resinas). En soluciones con 62 mg/L de Cu a pH 10.5–11, se observó que el cobre compite con el oro durante la adsorción, reduciendo la capacidad de carga del

carbón activado. Las pruebas demostraron que el ajuste de pH y el control del cianuro libre son esenciales para mejorar la selectividad hacia el oro.

Vargas et al. (2022) investigaron la adsorción del complejo $Au(CN)_2^-$ sobre carbón activado granular impregnado con surfactante aniónico SDS. Se encontró que la impregnación mejora la afinidad del carbón por el oro en comparación con el carbón convencional, optimizando el proceso de adsorción en soluciones cianuradas a pH controlado. Este método demostró una mejora significativa en la eficiencia de captura del oro sin afectar la cinética de carga.

Fu et al. (2023) estudiaron la adsorción de oro desde soluciones que contenían complejos de cobre, tartrato y tiosulfato mediante resinas de intercambio iónico. Se determinó que el pH y la concentración de cobre influyen directamente en la capacidad de adsorción del oro, observándose que niveles altos de Cu generan competencia por los sitios activos. El trabajo resalta la importancia de controlar la relación Cu/Au para optimizar la recuperación.

Elshin & Golodkov (2022) analizaron cómo las propiedades eléctricas de la capa doble en la superficie del carbón activado afectan la adsorción de oro y plata en soluciones cianuradas. Determinaron que la densidad de carga superficial y la composición del electrolito influyen en la capacidad de adsorción, especialmente en presencia de iones metálicos competidores. Los resultados confirman que el ajuste del pH modifica la estructura de la doble capa y favorece la retención selectiva de $Au(CN)_2^-$.

Kim (2024) presentó una revisión sobre los avances recientes en recuperación hidrometalúrgica de oro mediante adsorción y resinas de intercambio iónico. El autor destacó que la presencia de cobre en soluciones de lixiviación reduce la eficiencia de adsorción del oro y que mantener el pH en el rango de 9.0–10.5, junto con una relación CN^-/Cu controlada, mejora la selectividad del proceso.

Cousins (2009) tuvo como objetivo de este estudio, reducir la adsorción de cobre sobre el carbón activado en circuitos CIC. Los resultados mostraron una disminución en la carga de oro en las columnas superiores a medida que el pH y el cianuro libre comenzaron a disminuir en concentración durante altas concentraciones de cobre y

níquel en la solución preñada. La combinación de altas concentraciones de cianuro y pH es el mejor método para suprimir la carga de metal de penalización.

Sayiner & Acarkan (2014) estudiaron cómo la presencia de Ag, Ni y Cu afecta la adsorción de oro en carbón activado, realizando ensayos con soluciones que contenían 5, 10 y 15 ppm de Au, obteniendo tras 48 horas recuperaciones de 99.04%, 98.13% y 97.16%, respectivamente. La incorporación de 200 ppm de plata generó la caída más pronunciada en la adsorción, reduciendo la recuperación de 98.13% a 83.77%, mientras que 250 ppm de níquel disminuyeron la retención de Au a 90.65% y 300 ppm de cobre la redujeron a 94.59%. Cuando se agregaron Ag, Ni (200 ppm cada uno) y Cu (300 ppm) simultáneamente, la adsorción de Au cayó aún más, alcanzando solo 74.92%, demostrando que la interferencia es mayor cuando los metales están presentes en conjunto. En el caso del cobre, su efecto individual fue limitado, pues 300 ppm ocasionaron apenas un descenso del 3% en la recuperación de oro, lo que indica que bajo las condiciones evaluadas (pH 10.7–11.0 y 200 ppm de NaCN) predominan las especies $Cu(CN)_3^{2-}$y $Cu(CN)_4^{3-}$, altamente hidratadas y con poca afinidad por el carbón activado, a diferencia de $Cu(CN)_2^-$, cuya mayor adsorción puede desplazar al complejo aurocianurado.

Dai & Breuer (2009) plantearon como propósito de su investigación el desarrollo de un modelo mecanicista, basado en datos experimentales, que permitiera describir la carga de equilibrio de las distintas especies de cianuro de cobre sobre el carbón activado. Sus ensayos mostraron que la adsorción tanto del cianuro libre CN^-como del complejo tetracianurado de cobre, $Cu(CN)_4^{3-}$, es mínima en comparación con la de los complejos $Cu(CN)_2^-$ y $Cu(CN)_3^{2-}$, los cuales presentan una retención significativamente mayor; por ello, las especies con adsorción poco relevante pueden ser descartadas en el modelo de cálculo.

Souza et al. (2014), evaluaron los efectos de los parámetros prácticos típicos sobre la adsorción selectiva de Au sobre Cu en muestras de carbón activado de diferentes fuentes; los parámetros investigados son: exceso de iones de cianuro libre (CN^-) y calcio (Ca^{2+}) en la solución, y condiciones de aireación. Los resultados mostraron que, con un exceso de cianuro libre en la solución, se observa una mayor selectividad

de Au/Cu, pero la carga de Au en las muestras de carbón activado disminuye. En presencia de iones Ca^{2+} en la solución de cianuro, se demostraron efectos positivos sobre la adsorción de Au y efectos negativos sobre la adsorción de Cu para una relación molar CN^-/Cu superior a 4 (es decir, $Cu(CN)_4^{3-}$ como la especie predominante), y estos comportamientos dieron como resultado una mayor selectividad de Au/Cu.

Majuste et al. (2014) evaluaron un mecanismo de adsorción de cianocomplejos de Cu cargados negativamente en sitios disponibles de diferentes carbones activados. Los resultados de los análisis termodinámicos y Raman indicaron que, en condiciones prácticas típicas de adsorción de oro a partir de soluciones de cianuro (pH> 9 y relación molar $CN^-/Cu > 4$), el principal competidor de los sitios de adsorción del carbón activado es el complejo $Cu(CN)_3^{2-}$y no el $Cu(CN)_2^-$.

2.3 Bases Teóricas

2.3.1 Geología y Mineralogía del Yacimientos de Oro

2.3.1.1 Aspectos Geológicos

Constituyen un patrimonio natural importante para nuestro país y la humanidad.

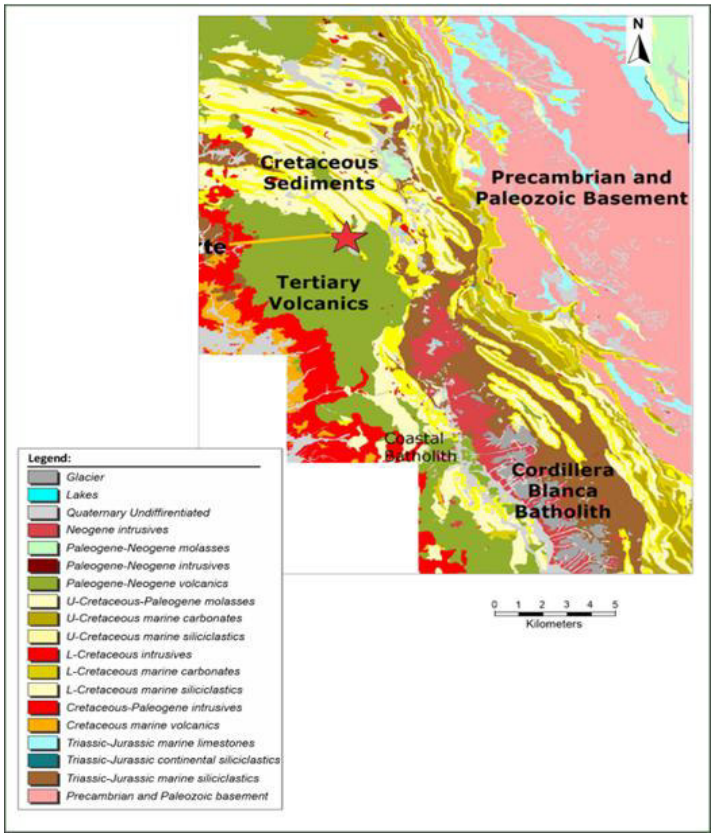


Figura 1. Mapa geológico local. Datos tomados de fuente propia, recopilado en el 2021.

La mina es un depósito del tipo epitermal de alta sulfuración de oro. La principal secuencia de roca huésped consiste en areniscas cuarzosas, subordinadas con secuencias intercaladas de lutitas, limolitas y limolitas carbonosas y con menor presencia se tiene tufos dacitico y andesíticos. Aproximadamente el 85% de la mineralización esta hospedada en las rocas sedimentarias y el remanente en rocas volcánicas. La mineralización consiste en una zona de óxido, una zona mixta pobremente desarrollada y finalmente una zona de sulfuros en la base del depósito. Se tiene la presencia de material carbonoso en las limolitas y presencia de mineral refractario, estos dos tipos de material contienen oro y se está evaluando la posibilidad de explotarlos por distintos proyectos (Cañola et al., 2015).

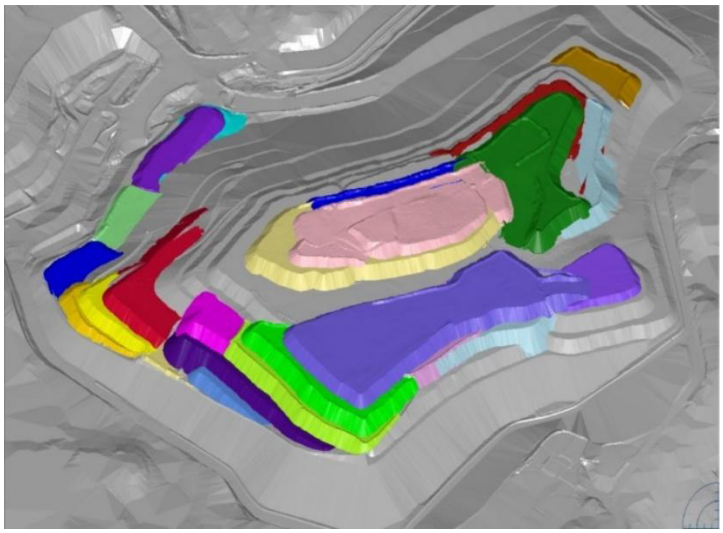


Figura 2. Modelo de Bloques de zonificación de mineral cuprífero. Datos tomados de fuente propia, recopilado en el 2021.

Cuadro 2. ***Leyes de Au, Ag y Cu del modelo de bloque de stocks en celdas del pad.***

Celda	Stock	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (g/t)
4130	Stock 07	2.142	9.598	1209
4170	Stock 07	2.281	9.893	1157
4140	Stock 07	1.920	7.782	983
4150	Stock 07- 27	1.898	8.099	1226
4175	Stock 27	2.202	13.231	2459
4090	Stock 07- 27	2.017	12.493	3542
4160	Stock 07- 27	2.122	10.415	1745
4180	Stock 07- 27	2.158	13.967	2560
4100	Stock 27	2.125	13.473	2759
4110	Stock 07- 27	1.808	9.680	1734
4120	Stock 07- 27	2.029	12.023	2044
4100-2	Stock 07- 27	1.862	9.168	1429
4160-2	Stock 27 - 15	2.008	12.325	2902
4170-2	Stock 27 - 15	2.029	10.324	1922
4170-3	Stock 27	3.390	11.228	1955
4180-RAMPA, 4180	Stock 27 - 15	2.918	12.973	3140
4130-C2	Stock 27	2.082	10.505	2756
4140-C3	Stock 27	3.089	12.622	3064
4160-C5	Stock 27	3.621	11.222	2714
4180-C7-C8	Stock 27	2.570	11.756	2990
4180_S1_S2_S3	Stock 27	2.276	10.521	2823
4170_JUL	Stock 27	1.949	9.545	1935
4180-JUL-AGO	Stock 27 -15	2.049	12.004	2393

Fuente: Datos tomados de fuente propia, recopilado en el 2021.

2.3.1.2 Geoquímica de los Depósitos Auríferos

Los minerales predominantes en el material son el cuarzo, los carbonatos y los óxidos, mientras que los sulfuros constituyen menos del 10% del conjunto. El pH y el estado de oxidación de los depósitos influyen directamente en el comportamiento geoquímico de los elementos presentes. En numerosos casos, las concentraciones de mercurio exceden los valores permitidos en la mayoría de las muestras evaluadas. Además, se ha observado que el oro tiende a acumularse principalmente en la fracción de partículas finas (Tupiza, 2019).

2.3.1.3 Tipos de Yacimientos Auríferos

Según indica que los depósitos de oro se clasifican en vetas, mantos y placeres, a continuación, se desarrolla cada uno (Cervera et al., 2008):

- Los mantos se concentran en el área de Rinconada
- Las vetas se encuentran dispersas en el área
- Los placeres se ubican cerca del alto del valle del Río Grande (Azángaro), así como en los valles de los ríos Huari e Inambari (Acosta, 2011).

2.3.1.4 Asociaciones Mineralógicas del Mineral Aurífero

El desarrollo de asociaciones mineralógicas obtiene información sobre el tipo de yacimiento y las propiedades del mineral. Un estudio mineralógico, también conocido como caracterización mineralógica, es una técnica de caracterización fisicoquímica, geoquímica y metalúrgica. La caracterización mineralógica es una técnica que optimiza el proceso de beneficio del mineral, particularmente para minerales problemáticos o refractarios (Arias et al., 2005).

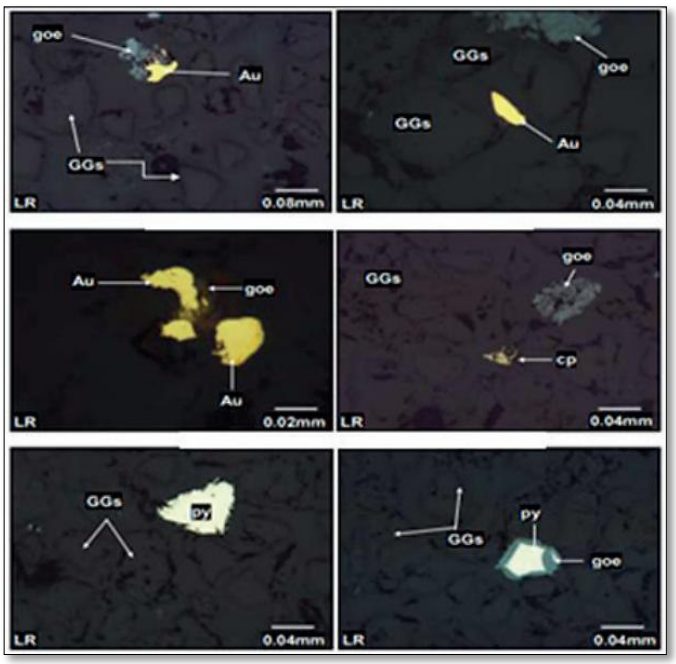


Figura 3. **Modelo de bloques de zonificación de mineral cuprífero.** Extraído de Soto et al. (2020).

2.3.2 Métodos de Extracción de Oro a partir de Mineral Aurífero

El tipo de depósito mineral es importante ya que determina qué tecnologías se utilizarán para extraer oro del mineral; del mismo modo, determina el enfoque, logrando reducir el uso de mercurio.

2.3.2.1 Lixiviación de Minerales Auríferos

Instalación y montaje de una planta de cianuración convencional para el tratamiento de sulfuros pírico-auríferos, incorporando un pretratamiento y la determinación de los parámetros más adecuados para este tipo de mineral. El proceso inicia con operaciones preliminares como la preparación mecánica del material y la verificación de la estabilidad operativa. Además, en cada punto de control se extrae una alícuota del lixiviado con el fin de evaluar la cinética de disolución del oro mediante análisis químicos, empleando técnicas como espectrofotometría de absorción atómica y/o microscopía electrónica de barrido.

La lixiviación es el proceso de extraer una especie de interés de un mineral utilizando productos químicos que lo disuelven o lo transforman en sales solubles en la metalurgia extractiva. En otras palabras, las especies valiosas se recuperan de una fase líquida durante la lixiviación, a continuación, se presentan los tipos de lixiviación:

a) **Lixiviación en pilas**

El proceso hidrometalúrgico más destacado en la extracción de cobre es la lixiviación en pilas. El mineral de cobre se amontona a alturas de más de 7 metros, con tamaños de superficie que oscilan entre 0,1 a 1 km^2.

b) **Proceso batch y dinámico**

Se puede realizar en reactores discontinuos o de flujo continuo. Por lo general, el primer escenario se favorece para los procedimientos que utilizan materias primas de alto valor que se manejan en tonelajes pequeños, mientras que el segundo escenario se recomienda para operaciones a gran escala que involucran grandes cantidades de materiales y donde la automatización es crucial.

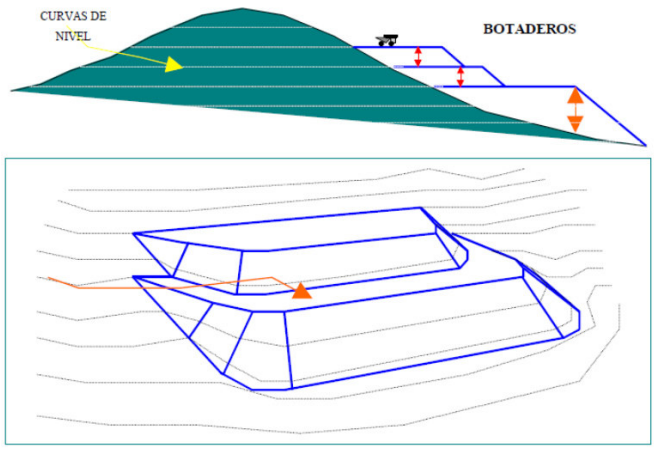


Figura 4. Lixiviación en Pilas. Extraída de Cifuentes (2019).

2.3.2.2 Proceso de Cianuración

La cianuración es un método hidrometalúrgico de extracción sólido-líquido basado en la disolución del mineral. El proceso consiste en hacer circular una solución diluida de cianuro de sodio (NaCN) a través de una pila de mineral triturado, permitiendo que el

cianuro solubilice el oro y la plata presentes en las distintas fases mineralógicas. De este modo se obtiene una solución de lixiviación rica en metales (SEL), la cual es colectada y almacenada en una poza destinada específicamente para este fin.

a) Reacciones principales

A temperatura ambiente, el oro no se oxida y permanece insoluble en ácidos como el sulfúrico, clorhídrico o nítrico. Puede disolverse en agua regia, mezcla de ácido nítrico y clorhídrico, y también en ciertos compuestos basados en cloro o bromo. De hecho, el antiguo proceso bromo–cianuro, aplicado en Australia para tratar minerales refractarios en los inicios de la industria aurífera, se originó a partir de esta reacción. El oro también forma amalgamas al combinarse con mercurio. No obstante, la propiedad química más relevante desde el punto de vista industrial es su capacidad para disolverse en soluciones diluidas de cianuro.

$$4\ Au + 8\ NaCN + O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 4\ Na[Au(CN)_2] + 4\ NaOH$$

Oro + Cianuro de Sodio + Oxígeno (aire) + Agua → Complejo Cianuro de Oro + Hidróxido de Sodio

Solución Enriquecida (SEL)

b) Termodinámica de la cianuración

Es crucial comprender el comportamiento termodinámico, los diagramas de Pourbaix o Eh-pH se pueden utilizar para analizarlo. Aparte de los sistemas hidrometalúrgicos, los equilibrios en un sistema de corrosión metálica han sido descritos por los diagramas Eh-pH, o pH del potencial de electrodo. Dado que el sistema bajo investigación se encuentra en circunstancias estables, los diagramas Eh-pH se utilizan para describir equilibrios heterogéneos. En teoría, los procesos de hidrólisis, oxidación y reducción que tienen lugar en soluciones acuosas se representan en los diagramas. Para un mejor entendimiento y fundamentación termodinámica del rango de trabajo de pH se explicará algunos conceptos básicos aplicado a la cianuración de metales preciosos como el oro y la plata.

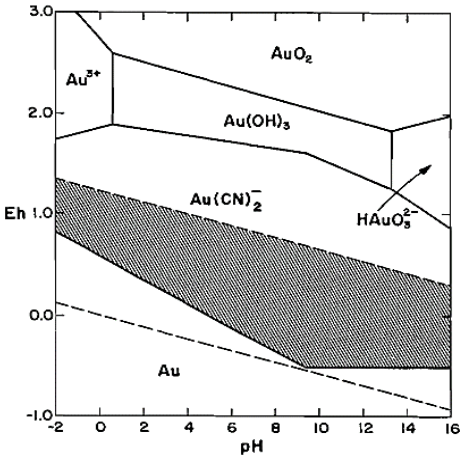


Figura 5. Diagrama de Pourbaix del Sistema $Au - CN - H_2O$. *Extraído de Brent & Atluri (2007).*

Según el diagrama de Pourbaix se prefiere trabajar con pH básico a partir de 9 ya que a valores inferiores de 9 se produce perdida de cianuro por hidrolisis lo cual produce el gas mortal denominado como ácido cianhídrico. Por otra parte, a pH mayores a 9 se lleva a cabo la acción oxidante del oxígeno en medio básico, lo cual permite la formación de iones aurocianurados. Desde un enfoque electroquímico, el proceso de lixiviación presenta dos zonas, una catódica donde el oxígeno se reduce y otra zona anódica donde la disolución cianurada de oro se oxida.

- **Zona catódica**

  En soluciones alcalinas, la reducción del oxígeno se representa en la siguiente semirreacción.

$$O_2 + 2H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^- + H_2O_2 \qquad E° = 0.44V$$

  Gracias a esta semirreacción se produce peróxido de hidrogeno que es un fuerte oxidante que favorece la disolución de los minerales auríferos.

- **Zona anódica**

  En esta zona se realiza la oxidación del oro, el cual se lleva a la solución como ion Au (+) para formar un complejo cianurado $(Au(CN)_2)^-$, esta semirreacción se representa de la siguiente forma:

$$Au^0 + 2CN^- \rightarrow (Au(CN)_2)^- + 1e^-, \qquad E° = 0.6V$$

Al operar la semirreacción en el ánodo y el cátodo se obtiene la ecuación global:

$$Au^0 + 4CN^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Au(CN)_2 + 2(OH)^- + H_2O_2, \Delta E° = 1.04V$$

Evaluando a condiciones estándar se puede ejecutar el siguiente calculo:

$\Delta G°$ = - nF$\mathcal{E}°$

$\Delta G°$ = - 2 moles e- x 96,500 Coul/mol e- x 1.04 Volt

= - 200,720 Coul- Volt

= - 200,720 Coul -volt 1 J/1 coul-volt = - 200,720 J

= - 200,720 J x 1Kj/103 J

= - 200.72 Kj

La interpretación de este valor es que la reacción es espontanea a condiciones normales, debido a que la energía libre de Gibbs es negativa.

Finalmente, a continuación, se muestra un esquema del mecanismo electroquímico.

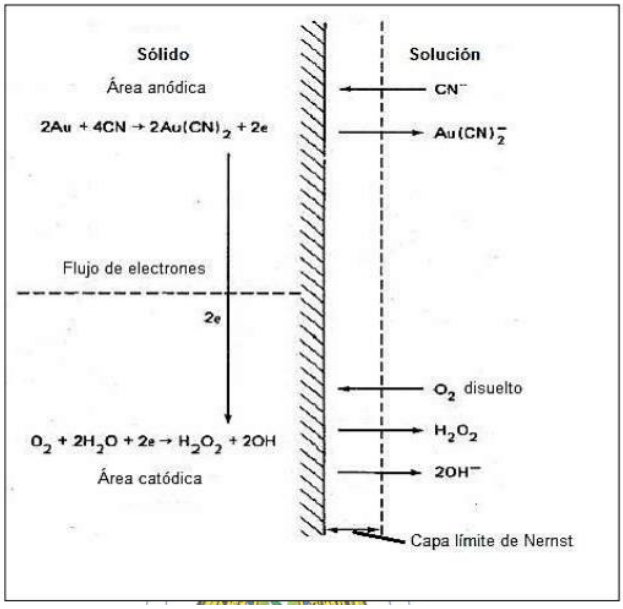


Figura 6. **Representación del mecanismo electroquímico**. Extraído de Ramirez & Sánchez (2016).

c) Cinética de la cianuración

Dependiendo de las variables, la etapa controlante de la reacción es diferente. El mecanismo de cianuración del oro es un proceso complicado en el que muchas variables interactúan entre sí. Esto hace que sea imposible describir el proceso utilizando una ecuación matemática directa. La orientación cristalina de los granos dentro de su estructura afecta la velocidad de disolución del oro. el control de la reacción es químico, considerando los resultados obtenidos en esta tesis bajo condiciones similares a las existentes en la práctica industrial.

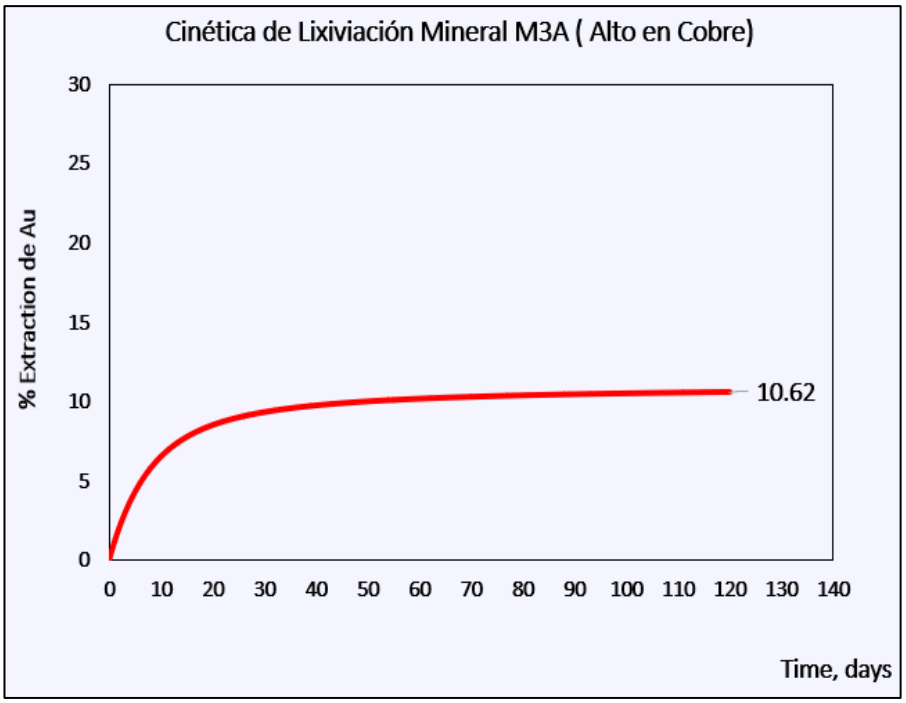


Figura 7. Cinética de lixiviación de oro de mineral con contenido de cobre. Datos tomados de fuente propia, recopilado en el 2023.

d) Factores cinéticos

La cinética dentro de un proceso de lixiviación constituye un aspecto clave a evaluar. El intervalo en el que tienen lugar las reacciones más lentas suele determinar la etapa que controla el proceso, pues es allí donde se desarrolla la mayor parte de la transformación. Reconocer dicha etapa resulta fundamental para optimizar la eficiencia global. Cuando en una reacción intervienen simultáneamente una fase sólida y una fase líquida, el avance del proceso suele comprender diversas etapas sucesivas.

I. Incorporación de oxígeno desde la solución.

II. Movimiento del cianuro y del oxígeno disuelto hacia la zona de contacto entre el sólido y el líquido.

III. Fijación de los reactivos (CN^- y O_2) sobre la superficie del sólido.

IV. Desarrollo de la reacción electroquímica.

V. Liberación desde el sólido de los complejos solubles oro–cianuro y de otros productos generados.

VI. Traslado de estos productos liberados hacia la solución.

En las etapas I, II, V y VI, el tiempo requerido depende principalmente de la velocidad de difusión. En cambio, las etapas III y IV están determinadas por la rapidez de las reacciones químicas. Cuando la difusión ocurre a una velocidad muy baja, es necesario incrementar la agitación para acelerar el proceso; mientras que, si el retraso proviene de las reacciones químicas, suele requerirse un aumento de la temperatura.

- **Efecto de la concentración de oxígeno**

  La cantidad de oxígeno que puede permanecer disuelto en las soluciones de cianuro está determinada únicamente por cuatro factores.

  - ✓ Altitud a la cual se realiza estas operaciones
  - ✓ Temperatura ambiente del lugar
  - ✓ Intensidad de agitación de la solución con los complejos cianuro áuricos
  - ✓ Concentración de cianuro disponible en solución

  Las consecuencias generadas por bajas concentraciones de oro no tienen grandes efectos sobre la velocidad de reacción del oro, sin embargo, a elevadas concentraciones la velocidad de reacción se incrementa. Por otra parte, cuando se incrementa la cantidad de oxígeno y la agitación por encima de valores permitidos, el oro comienza a pasivarse y disminuye su velocidad de reacción.

- **Concentración de cianuro en solución**

  La cantidad de cianuro libre en solución es otro factor de suma importancia, ya que cuando hay mayor cantidad de cianuro se incrementa la recuperación de oro. Además, se puede controlar este parámetro de manera sencilla porque basta con añadir solución de cianuro preparada o pastillas de cianuro. Por ejemplo, se puede adicionar un volumen de cianuro con una concentración de $8.2\frac{\text{mg}}{\text{L}}$, y 25°C sobre el nivel del mar. Por otra parte, se puede lograr una máxima

recuperación de oro cuando se obtiene una concentración de cianuro en solución de $0.1\% \frac{\text{g}}{\text{L NaCN sol}}$.

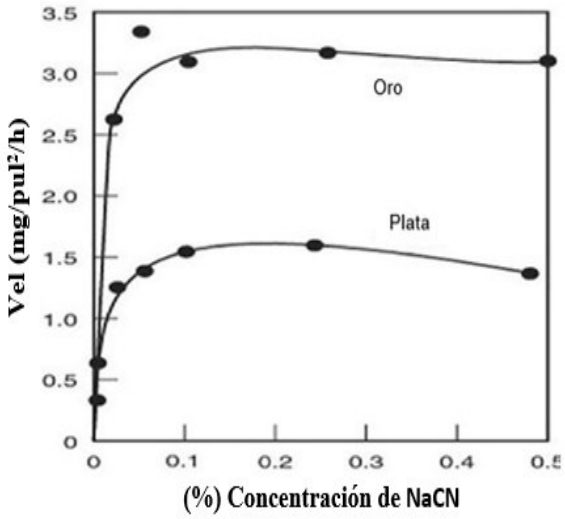


Figura 8. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata. *Extraído de Marsden & House (2009).*

- **Efecto de la temperatura**

  La recuperación de oro es directamente proporcional al incremento de temperatura. Esto se produce por el aumento de la velocidad de reacción. Por otro lado, las recuperaciones de oro con 0.25% de KCN es óptima cuando se llega a 85°C. Por lo tanto, el aumento de velocidad de reacción hasta en un 5% se logra cuando se eleva la temperatura de 25°C a 85°C.

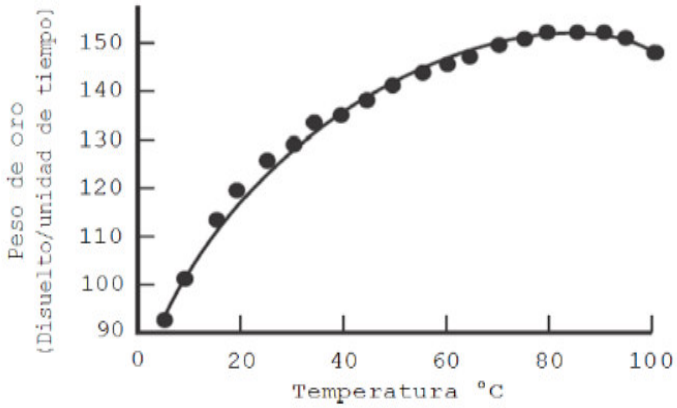


Figura 9. **Efecto de la temperatura en la velocidad de oro con 0.25% de KCN en solución.** Extraído de Marsden & House (2009).

- **Efecto del tamaño de partícula**

  La granulometría tiene una influencia considerable sobre la velocidad de reacción, ya que mientras más pequeño sea al tamaño de partícula tiene mayor área de contacto con la solución cianurante, por ende, la reacción se realiza de manera más rápida y eficaz. Por ejemplo, se estima que para una granulometría de 45 um se requieren de 13 horas para disolverse, mientras que para una granulometría de 150 um se requiere 31 horas adicionales.

- **Reguladores de pH**

  Para la regulación de pH se utilizan diferentes reguladores económicos como, por ejemplo, la cal, el hidróxido de calcio o el carbonato de sodio. Por otro lado, entre sus principales aportes se tiene:

  - ✓ Evitan las mermas excesivas de cianuro por hidrolisis o por la influencia del dióxido de carbono del aire.
  - ✓ Neutralizan otros compuestos con carácter acido como, por ejemplo, minerales ferrosos, férricos o sulfato de magnesio acuoso.

Asimismo, a pH inferiores a 9 la mitad del cianuro total se halla como acido cianhídrico. Mientras que lo demás se halla como cianuro libre para disolver los minerales auríferos; sin embargo, a pH mayores a 10 el 90% del cianuro se encuentra como cianuro libre, por lo que es recomendable trabajar a pH elevados para disminuir la emisión de gases nocivos y maximizar la presencia de iones cianuro. A continuación, se muestra una imagen que detallara esta explicación.

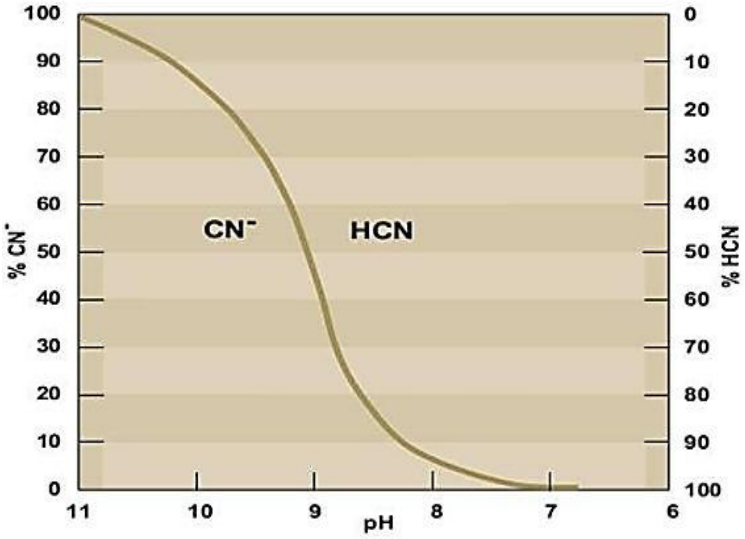


Figura 10. Equilibrio entre HCN y CN^- en función del pH. Extraído de García et al. (2021).

2.3.3 Asociaciones de los Minerales Auríferos

El oro comúnmente se encuentra en combinación con metales como el mercurio, teluro, selenio, bismuto, cobre, etc. A continuación, se muestra los principales minerales auríferos aleados.

Cuadro 3. ***Principales aleaciones naturales del oro.***

Aleaciones del oro en la naturaleza	
Aleación oro-plata (electrum)	(Au, Ag)
Aleación oro-cobre (cuproaururo)	(Au, Cu)
Aleación oro-paladio (porpesita)	(Au, Pd)
Aleación oro-rhodio (rodita)	(Au, Rh)
Aleación oro-iridio	(Au, Ir)
Aleación oro-platino	(Au, Pt)
Aleación oro-bismuto	(Au, Bi)
Aleación oro-mercurio	(Au_2Hg_3)
Aleación oro-bismuto	(Au_2Bi)
Aleación oro (+3)-cobre	($AuCu_3$)
Aleación oro-cobre-paladio	$(Cu, Pd)_3Au_2$

Fuente: Extraído de Rojas (2003).

2.3.4 Formación de Complejos de Cianuro de Cobre en la Lixiviación

La cianuración es reconocida como un método industrial muy efectivo para la recuperación de oro y plata; no obstante, en la mena estos metales suelen presentarse junto a minerales que contienen cobre. Esta asociación genera dificultades, pues el cobre se disuelve fácilmente en soluciones cianuradas y forma complejos con el cianuro, lo que incrementa su consumo y reduce la eficiencia en la extracción de oro y plata, o bien obliga a emplear mayores concentraciones de cianuro en el proceso (Marsden & House, 2009).

$$2Cu + 4NaCN + 2H_2O \leftrightarrow Na_2Cu_2(CN)_4 + 2NaOH + H_2$$

Respecto a la formación de complejos cianurados de cobre, se ha establecido que el CuCN puede disolverse cuando existe un exceso de cianuro, dando lugar a especies cianocuprosas como $CuCN_2^-$, $CuCN_3^{2-}$ y $CuCN_4^{3-}$ en medios acuosos (Lu et al., 2002).

Estas formas complejas se generan mediante una serie de etapas de equilibrio que ocurren conforme el cianuro libre reacciona sucesivamente con el cobre.

$$CuCN \leftrightarrow Cu^{+} + CN^{-}$$
$$CuCN + CN^{-} \leftrightarrow Cu(CN)_2^{-}$$
$$Cu^{+} + 2CN^{-} \leftrightarrow Cu(CN)_2^{-}$$
$$Cu(CN)^{2-} + CN^{-} \leftrightarrow Cu(CN)_2^{3-}$$
$$Cu(CN)_2^{3-} + CN^{-} \leftrightarrow Cu(CN)_2^{4-}$$

Los iones cúpricos reaccionan con el CN^- formando complejos que son poco estables y tienden a descomponerse rápidamente. Diversos estudios indican que, cuando la proporción molar CN^-:Cu es baja, los iones cúpricos generan dicianato cúprico en solución acuosa, pero este compuesto se transforma de forma rápida en cianuro cuproso y cianógeno. En cambio, si la relación de cianuro respecto al cobre es elevada, se produce tetracianuro cúprico, el cual igualmente se descompone con rapidez dando origen a cianógeno y a una especie cuprosa (Marsden & House, 2009).

A partir de estos comportamientos y aplicando los balances de masa correspondientes, es posible construir diagramas de distribución que relacionan la concentración molar total de cobre con la razón CN^-/Cu bajo las condiciones de precipitación consideradas, tomando en cuenta las concentraciones reales y los límites del rango de pH entre 10 y 12 (Marsden & House, 2009).

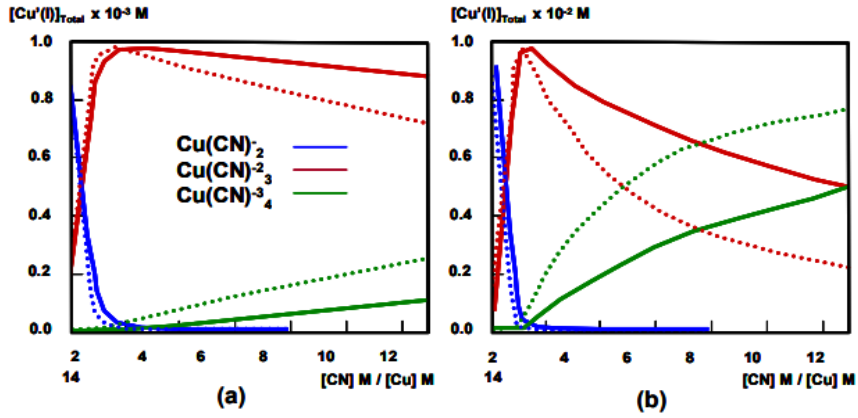


Figura 11. Diagramas de distribución de las especies cianuradas de cobre vs la relación molar. *Extraído de Ramírez & Sánchez (2016).*

En los diagramas de la figura 11 se aprecia que, cuando la relación molar CN^-/Cu es menor a 3, la distribución de los cianocupratos está determinada principalmente por dicha relación, mientras que la concentración total de cobre influye muy poco. En este intervalo, las especies predominantes son el tricianuro [$CuCN_3^{2-}$] y el dicianuro

[$CuCN_2^-$], siendo mínima la presencia del tetracianuro [$CuCN_4^{3-}$]. Al alcanzar una relación molar de 3, el tricianuro continúa siendo la especie mayoritaria y la forma en la que se encuentra la mayor parte del cobre en solución. No obstante, cuando la relación CN^-/Cu supera este valor, la distribución de complejos comienza a depender tanto de la proporción molar como de la concentración total de cobre. Para ambos valores de pH evaluados (10 y 12), el tricianuro [$CuCN_3^{2-}$] sigue siendo dominante, aunque disminuye gradualmente a medida que aumenta la proporción de cianuro; en paralelo, el dicianuro desaparece progresivamente y empieza a formarse el tetracianuro [$CuCN_4^{3-}$]. Este último se convierte en la especie principal cuando la relación CN^-/Cu supera aproximadamente 14 a pH 10 —equivalente a concentraciones de cianuro entre 0.1 y 0.2 M— mientras que, a pH 12, dicha dominancia se presenta desde relaciones superiores a 7. En consecuencia, en las condiciones típicas de precipitación y para concentraciones de cobre entre 10^{-3} y 10^{-2} M, la mayor parte del cobre disuelto se encontrará principalmente como tricianuro [$CuCN_3^{2-}$] y tetracianuro [$CuCN_4^{3-}$], como se evidencia posteriormente en los diagramas de potencial frente al pH.

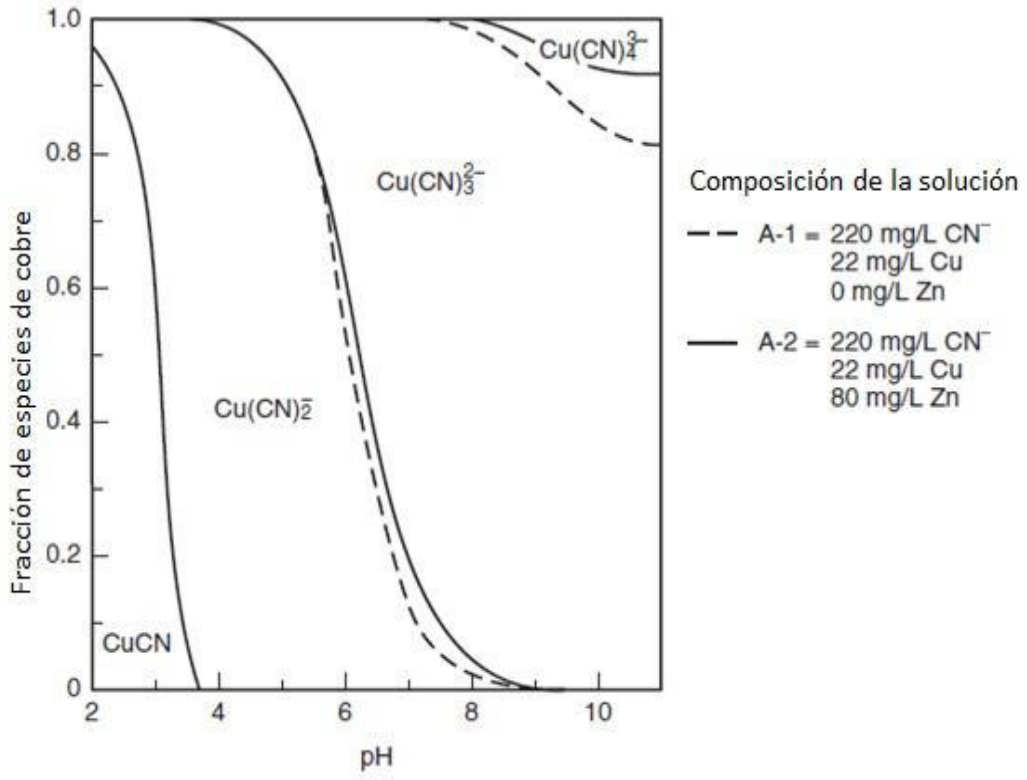


Figura 12. Diagrama de distribución para complejos de cianuro de cobre. Cuando [CN]total = 220 mg/L; [Cu]total = 22 mg/L, extraído de Marsden & House (2009).

La Figura 12 muestra que la cantidad de cobre que se adsorbe depende tanto del pH como del nivel de cianuro presente. A valores bajos de pH y con concentraciones reducidas de cianuro, el complejo $Cu(CN)_2^-$ tiende a fijarse en el carbón, lo que genera dificultades en la etapa de adsorción. En cambio, cuando el sistema opera a pH elevados y con abundante cianuro libre, la especie predominante es $Cu(CN)_4^{3-}$, cuya capacidad de adsorción es muy limitada. La adsorción de especies de cobre aumenta en el siguiente orden y son interferentes en el proceso de carbón en columnas (CIC):

$$Cu(CN)_4^{3-} < CuCN_3^{2-} < Cu(CN)_2^-$$

El efecto perjudicial del cobre sobre la adsorción de oro y concentraciones de cobre bajas como 100 mg/L interfieren gravemente en los procesos de adsorción. Asimismo, soluciones que contienen altas concentraciones de cobre mayor a 200 mg/L son inadecuados para el tratamiento por adsorción (Marsden & House, 2009).

2.3.5 Alternativas de Recuperación de Oro a partir de Soluciones Cianuradas

El carbón activado puede emplearse para purificar soluciones o pulpas, funcionando como una opción distinta a los métodos tradicionales de separación sólido-líquido y a la precipitación de oro con polvo de zinc en soluciones cianuradas.

2.3.5.1 Alternativas de Configuración para el Uso del Carbón Activado

Los desarrollos tecnológicos recientes proporcionan el uso de resinas como una técnica económica y de gran éxito para la extracción de oro a partir de lixiviados de cianuro.

a) **Proceso CIP (Carbón en Pulpa)**

   En un tanque agitador, el mineral se pulveriza, se tritura finamente y se combina con la solución de lixiviación con cianuro para crear una lechada. Tan pronto como el carbón activado está completamente cargado o "preñado" con oro, se agrega a la suspensión y se filtra.

b) Proceso CIL (Carbón en Lixiviación)

El procedimiento CIP y este son extremadamente similares. Los métodos utilizados para preparar la lechada y extraer el oro del lixiviado son los que presentan mayores variaciones. El carbón se combina con la solución de lixiviación, no con la pulpa, en un proceso CIL. El carbón dura mucho más en este sistema que en un proceso CIP porque es mucho menos abrasive.

c) Proceso CIC (Carbón en Columna)

La solución de lixiviación con cianuro se hace circular a través de columnas llenas de mineral durante este procedimiento. El método es bastante eficiente para extraer oro de minerales de baja ley.

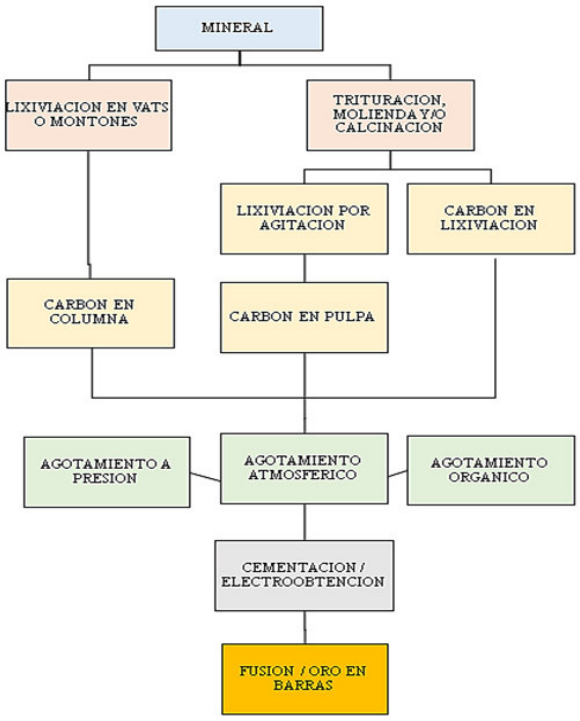


Figura 13. Diagrama de flujo para el procesamiento de oro. Extraído de Vargas et al. (2022).

2.3.6 Generalidades del Carbón Activado

El carbón activado es un material poroso que atrapa sustancias químicas, en su mayoría orgánicas, que están presentes en un gas o un líquido. Dado que es tan efectivo, es el purificador que las personas usan con más frecuencia.

La activación del carbón implica reorganizar los átomos de carbono en estructuras tipo anillo semejantes al benceno, generando una red cristalina parecida a la del grafito. En esencia, este proceso incrementa significativamente la cantidad de poros presentes en el material, formando una estructura altamente porosa con una vasta superficie interna que facilita la adsorción.

El carbón activado se puede obtener a partir de diversas fuentes carbonosas como lo son: madera, turba, antracita, semillas, carbón vegetal, cáscara de nuez y coco, frutos duros, azúcar y algunas resinas sintéticas (Hilari, 2018).

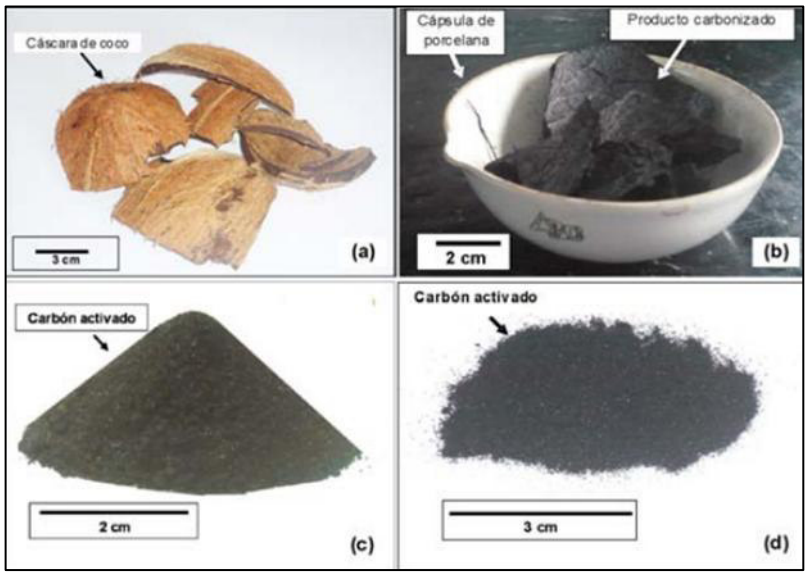


Figura 14. Procedimiento para obtención de carbón activado en laboratorio. Extraído de Hilari (2018).

2.3.6.1 Estructura del Carbón Activado

Los carbones activados son materiales carbonosos caracterizados por una red de poros muy desarrollada y una gran superficie interna, como se aprecia en la Figura 15, lo que les permite retener una amplia variedad de moléculas mediante adsorción. Por lo general, presentan volúmenes de poro superiores a 0.2 ml/g y superficies internas mayores a 400 m^2/g.

Además, este tipo de carbón presenta una estructura cristalina similar a la del grafito, donde los cristales están formados por capas de anillos hexagonales unidos entre sí por

fuerzas de Van der Waals, mientras que los enlaces carbono–carbono dentro de cada capa son predominantemente covalentes.

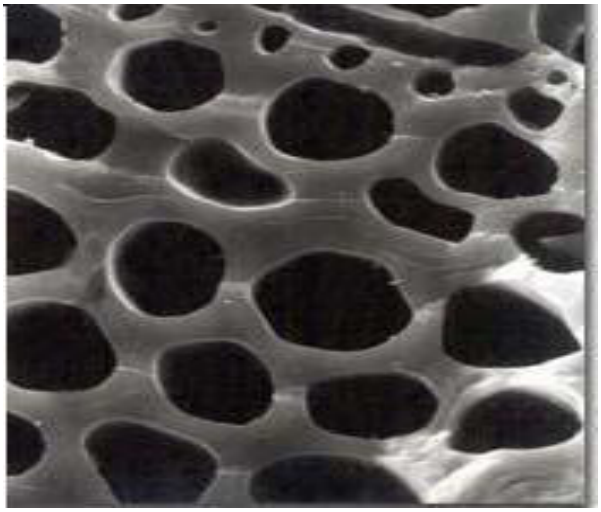


Figura 15. Estructura interna del carbón activado. Extraído de Hilari (2018).

2.3.6.2 Propiedades Físicas y Químicas del Carbón Activado

En estado seco, el material no presenta propiedades corrosivas; sin embargo, al humedecerse puede mostrar cierto grado de corrosividad.

Cuadro 4. Propiedades físicas y químicas del carbón activado

Propiedades	Descripción
Fórmula	C
Color	Negro
Olor	Ninguno
Punto de fusión	3550 °C
% de volátiles	N/A
Razón de evaporación	N/A
Solubilidad en agua	No Soluble
pH	N/A

Fuente: Extraído de Sulfo Química S.A. (2003).

Cuadro 5. ***Especificaciones técnicas del carbón activado.***

Parámetro	Carbón Activado
Actividad Butano	Min 19.5%
Contenido de Humedad	Max 5.0%
Contenido de Cenizas	Max 5.0%
Dureza de Partícula	min. 98-99%
Densidad (g/l)	520
Diámetro promedio de partícula (mm)	1.68 (mesh 6) - 3.35 (mesh 12)
Contenido de Plaquetas	máx. 3.0%
% de Atricción	Max.1.50%
Tamaño de partícula > M6	Max 8.0%
Tamaño de partícula < M12	Max 5.0%

Fuente: Extraído de Sulfo Química S.A. (2003).

2.3.6.3 Propiedades de Adsorción del Oro y Metales

Mediante el uso de carbón activado, el oro puede recuperarse durante el proceso de adsorción. El carbón activado adsorbe fuertemente los complejos de oro con cianuro o cloro. La adsorción de los complejos oro–cianuro en el carbón poroso ocurre mediante la difusión de estas especies al interior de los poros y su posterior interacción con los sitios activos de la superficie. Un paso muy crucial en la recuperación de este metal es esta técnica. Los diámetros de poro entre un nanómetro y cientos de nanómetros (Gasca, 2016) a menudo están vinculados al carbón activado. En línea con la IUPAC son los siguientes:

- Ultramicroporo: 0,7 nm o menos de diámetro
- Supermicroporo: 0,7 a 2 nm de diámetro
- Mesoporo: Diámetro de poro entre 2 y 50 nm;
- Microporos: Diámetro de poro inferior a 2 nm
- Macroporos: Ancho de poro superior a 50 nm.

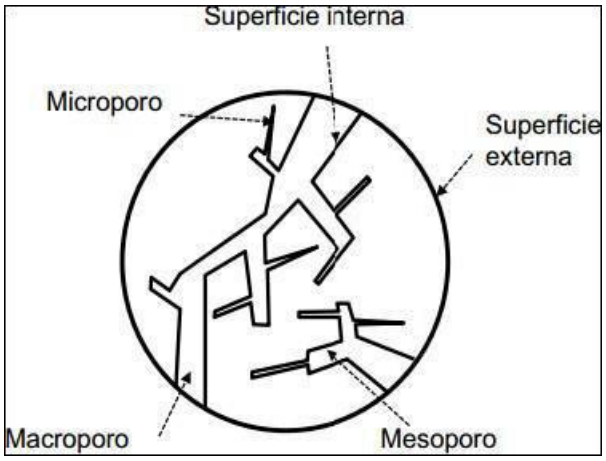


Figura 16. Distribución de poros del carbón activado. Extraído de Moscoso (2018).

2.3.7 Proceso de Adsorción

Mediante la instalación de filtros para retener el carbón dentro de los tanques de lixiviación, el método de carbón en lixiviación integra en una sola unidad las etapas de lixiviación y adsorción, evitando así el uso de tanques destinados al almacenamiento de carbón triturado (Moreno & Giraldo, 2008).

2.3.7.1 La Capacidad de Carga del carbón

El carbón activado se caracteriza por su estructura altamente porosa y su notable capacidad adsorbente. Su desempeño depende en gran medida del proceso de activación. En la activación física, la materia prima primero se transforma en carbono mediante carbonización y posteriormente se somete a una combustión controlada, generalmente entre 1100 y 1300 K, utilizando agentes oxidantes como aire, dióxido de carbono, vapor de agua o mezclas de estos.

2.3.7.2 Cinética de la Adsorción

La velocidad de adsorción depende de la interacción entre el adsorbato y el medio adsorbente, ya que a medida que pasa el tiempo las velocidades cambian hasta llegar al equilibrio.

a) Modelo de Langmuir

Es una isoterma que regula el equilibrio de la temperatura entre la solución cargada y la superficie del carbón. Pero, este modelo considera cuatro importantes restricciones:

- La adsorción ocurre únicamente en puntos específicos de la superficie del material.
- Cada sitio disponible puede alojar solo una molécula adsorbida.
- La energía requerida para adsorber es la misma en todos los puntos activos.
- No existen interacciones entre las moléculas ya adsorbidas.

$$q_e = \frac{b * q_{max} * C_e}{1 + b * C_e}$$

Donde:

- q_e reprecenta la capacidad de adsorcion del soluto en $\frac{\text{mg adsorbato}}{\text{g adsorbente}}$
- C_e es la concentracion en el equilibrio en $\frac{mg}{L}$
- q_{max} es la capacidad maxima de adsorcion en $\frac{\text{mg de adsorbato}}{\text{mg de adsorbente}}$
- b es la constante de Langmuir en $\frac{L}{mg}$

b) Modelos empíricos

El modelo matemático empírico más utilizado es el de pseudo primer orden o modelo de Laceraren, el cual inicialmente fue evaluado para describir como se adsorbía el ácido oxálico en el carbón. Asimismo, se describe de la siguiente manera:

$$\log(q_m - q_t) * \log(q_m) - \frac{kt}{2.303}$$

Donde:

- q_m y q_t son capacidades de adsorcion en $\frac{mg}{g}$
- k es la constante de velocidad de adsorcion de pseudo primer orden

c) Modelos difusionales

La principal limitación de los modelos matemáticos de adsorción es que solo predicen la tasa de adsorción y no consideran la difusión intra y extra-partícula. Siguiendo con lo anterior mencionado, los modelos de difusión intraparticular son usados para analizar el origen de la etapa controlante de la velocidad.

2.3.7.3 Características de la Cinética de Adsorción

Según acerca de la investigación sobre la cinética de adsorción de carbono, la difusión es el proceso que limita el ritmo al que se puede adsorber el carbono.

Según Rivas et al. (2014), para describir la cinética de adsorción se utiliza un modelo basado en la difusión acompañado por la isoterma de Freundlich, cuya formulación matemática se presenta de la siguiente forma:

$$\log q = \log K_f + \frac{1}{n}\log C$$

Según Rivas et al. (2014) otro modelo de difusión de adsorción es la isoterma de Langmuir expresada a través de la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{K_l C}{1 + K_l C}$$

2.3.7.4 Características de la Termodinámica de Adsorción

De acuerdo con Moreno y Giraldo (2008), la adsorción de iones presentes en soluciones acuosas sobre el carbón activado ocurre debido a las interacciones entre dichos iones y los grupos funcionales ubicados en su superficie. Este proceso está influenciado por varios factores, entre ellos:

- La cantidad de grupos funcionales disponibles, la cual varía en función del pH de la solución.

- Las fuerzas electrostáticas y las interacciones químicas que se generan entre los iones y la superficie del carbón activado.
- Las reacciones químicas específicas que se establecen entre los iones y los complejos superficiales, las cuales son las que finalmente determinan el grado de adsorción.

2.3.7.5 Mecanismos de Adsorción

La adsorción se refiere al proceso mediante el cual componentes disueltos se fijan a la superficie de un sólido con el que entran en contacto. Este fenómeno puede originarse por interacciones físicas entre las partículas, aunque también puede deberse a reacciones químicas que ocurren con las moléculas presentes en la superficie del material, generando lo que se conoce como adsorción química (Rojas, 2016).

La adsorción consiste en la fijación de átomos o moléculas sobre la superficie de un sólido o en la interfase entre dos fluidos. Este fenómeno ocurre debido a fuerzas intermoleculares que actúan en puntos particulares del sólido, conocidos como sitios o centros activos (Moscoso, 2018).

La interacción entre el oro y el carbón activado puede expresarse mediante la siguiente reacción química:

$$2[\mathrm{Au(CN)_2^-}] + \mathrm{Ca^{2+}} + \mathrm{C\ (Carbón)} \rightarrow \mathrm{Ca[C - Au(CN)_2]_2}$$

La Figura 17 ilustra cómo ocurre la adsorción del oro. En este proceso, el material sólido que captura las moléculas se conoce como adsorbente, mientras que la sustancia que es retenida sobre su superficie se denomina adsortivo.

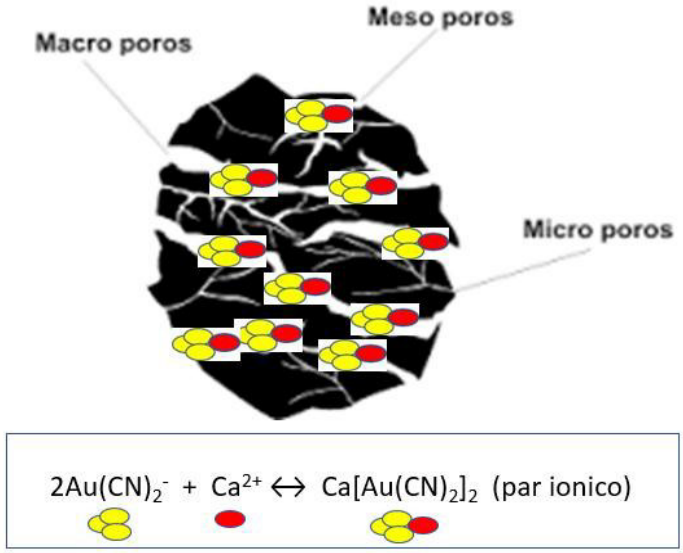


Figura 17. Mecanismo de adsorción del oro. Extraído de Vargas et al. (2022).

2.3.7.6 Variables que Afectan la Carga de Oro en el Carbón Activado

a) Efecto del carbón

Las variables influyentes en la adsorción del oro relacionadas a la naturaleza propia del carbón son:

- Contenido de cenizas
- Área superficial
- pH

b) Concentración del oro

La concentración de oro es directamente proporcional a la capacidad de equilibrio del carbón, ya que a bajas concentraciones de oro el sistema carbón – solución de oro tarda más en llegar al equilibrio.

c) Efecto del pH

Es importante señalar que el oro puede recuperarse mejor a bajos pH, sin embargo, a pH con tendencia acida la solución cianurada se hidroliza produciendo contaminantes ambientales, por esta razón no se debe realizar la adsorción a un pH de 10. En la siguiente ecuación se muestra la descomposición del cianuro de sodio cuando los valores de pH son muy bajos.

$$NaCN + H_2O \rightarrow HCN + NaOH$$

d) Efecto de la Concentración de Cianuro

La rapidez de adsorción y la cantidad de oro que puede retener el carbón activado se reducen cuando aumenta la concentración de cianuro libre, debido a que este ion compite por los mismos sitios activos en la superficie del carbón. No obstante, al elevarse la concentración de cianuro, el carbón muestra una mayor preferencia por adsorber oro frente a otros complejos metálicos.

2.3.7.7 Factores que Afectan la Adsorción del Oro

Se tienen en cuenta factores físicos y químicos.

Cuadro 6. ***Factores físicos.***

Variable	Efecto
Tipo de carbón activado	Varios
Tamaño de las partículas de carbón	Un tamaño mayor provoca una adsorción lenta, considerando la etapa inicial.
Agitación	Debido a que la mayoría de los sistemas industriales solo operan en pseudo-equilibrio, una agitación de considerable intensidad acelera la tasa de adsorción.
Densidad de pulpa	Disminuye la cinética

Fuente: Extraído de Souza et al. (2014).

Cuadro 7. Factores químicos

Variable	Efecto
Temperatura	La adsorción del oro sobre el carbón activado es un proceso exotérmico, por lo que su capacidad de retención disminuye cuando la temperatura se incrementa, fenómeno que también explica que a temperaturas elevadas ocurra la desorción. No obstante, el aumento de temperatura favorece la velocidad del proceso.
Concentración de oro	Aumenta la cinética y la capacidad de carga.
Concentración de cianuro	Disminuye la cinética y la capacidad de carga.
pH solución	En el rango 9 – 11, tiene poco efecto.
Fuerza iónica	Aumenta la cinética y la capacidad de carga.
Concentración de otros metales	Cuando otros metales compiten por los sitios activos del carbón, tanto la velocidad de adsorción como la cantidad de oro que puede fijarse se ven reducidas.
Deterioro del carbón	La eficacia de la adsorción puede verse gravemente afectada por la degradación o el envenenamiento del carbono causado por la adsorción, la precipitación o la obstrucción física de otras especies en solución.

Nota: Extraído de Souza et al. (2014).

2.3.8 Proceso de Desorción

Esencialmente, este procedimiento incluye la recirculación de una solución que contenía NaOH al 1 % (p/v) y NaCN al 0,2 % (p/v) a 95–100 °C durante unas 72 horas. Luego se alteró el procedimiento presurizándolo a 140°C, recortando el período a alrededor de 12 horas.

2.3.8.1 Mecanismos de Desorción

El sodio cumple una función importante en la desorción de oro, ya que se asocia con el complejo cianuro oro formando un par iónico.

Por medio de calor el complejo se rompe y se libera las especies de $Au(CN)_2^-$.

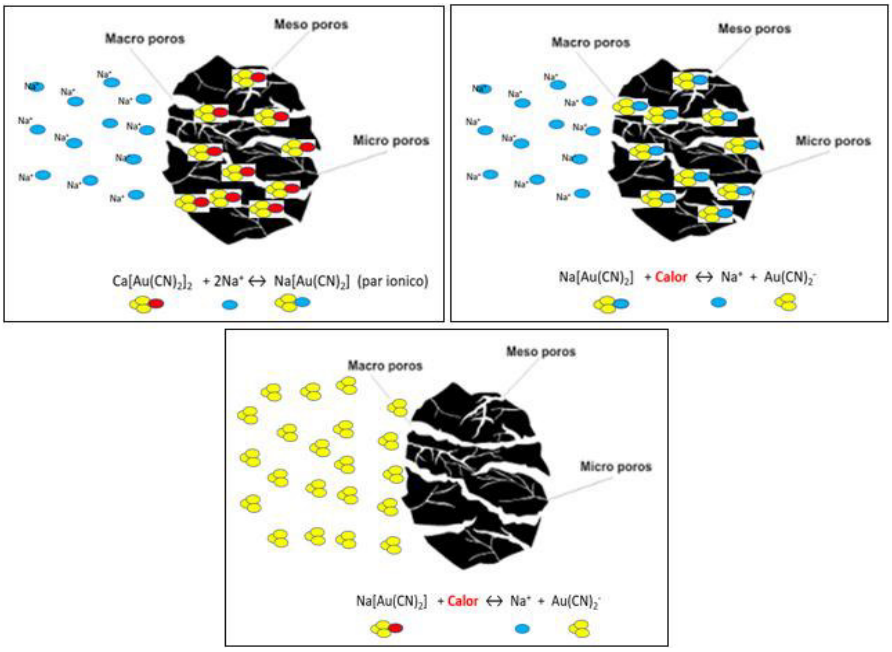


Figura 18. Mecanismo de desorción del oro. Extraído de Vargas et al. (2022).

2.3.8.2 Efectos Físicos y Químicos

De acuerdo con Zegarra (2018), ciertos parámetros pueden favorecer un proceso inverso a la adsorción, es decir, la desorción del carbón activado que contiene el complejo de aurocianuro, lo cual contrasta con las condiciones consideradas óptimas para la etapa de carga. En este sentido, pueden identificarse diversos efectos físicos y químicos asociados.

- Temperatura y presión
- Concentración de cianuro
- Efecto del pH
- Velocidad de flujo del eluyente

2.3.8.3 El Proceso Zadra

La recuperación de oro mediante carbón activado se realiza empleando una solución compuesta por 0,1% de NaCN y 1% de NaOH, calentada entre 85 y 95 °C. Según las condiciones operativas y la composición de la solución, el tiempo requerido para

reducir la carga de oro en el carbón hasta niveles bajos puede variar aproximadamente entre 24 y 60 horas. Este proceso se desarrolla a presión atmosférica (Zegarra, 2018).

2.3.9 Proceso de Regeneración del Carbón Activado

En particular, se utilizan métodos térmicos para regenerar el carbón, una operación costosa. Estos métodos incluyen hornos rotativos, de múltiples pistones y de palanca fluidizada (como el tipo Herreshoff). En el tipo rotatorio, el carbón es impulsado contra la corriente por una mezcla de humos de combustión y vapor sobrecalentado (Zegarra, 2018).

2.3.9.1 Regeneración Química

El objetivo de la regeneración química es eliminar los carbonatos existentes en el carbón rico. La etapa de regeneración química está compuesta de 04 fases de operación: preparación de ácido nítrico, enjuague del carbón, lavado acido y neutralización con hidróxido de sodio.

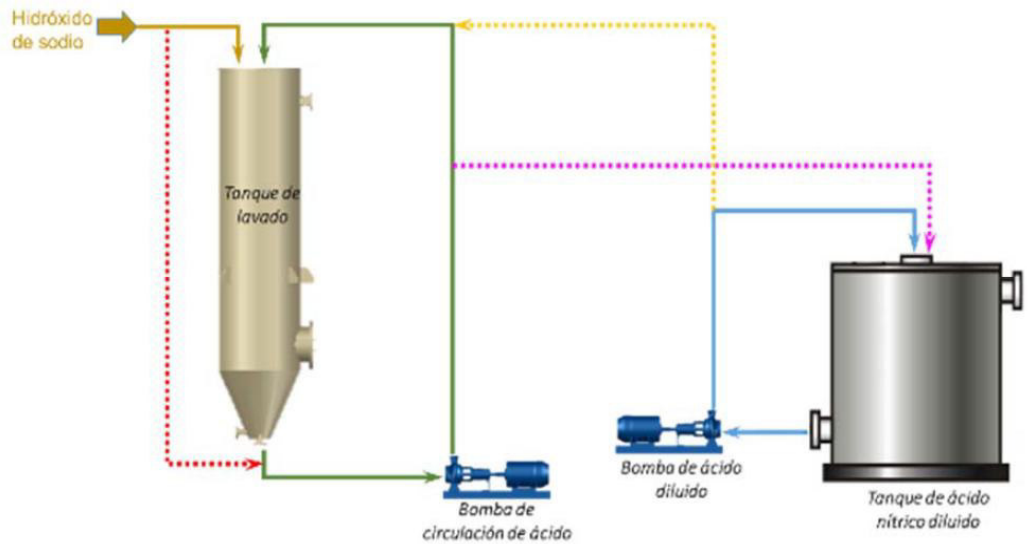


Figura 19. Regeneración química del carbón activado. Extraído de Vargas et al. (2022).

2.3.9.2 Regeneración Térmica

La remoción más efectiva de compuestos orgánicos y partículas inorgánicas que permanecen adheridas al carbón durante el proceso de adsorción, y que no pueden ser eliminadas mediante la elución o el lavado ácido, necesita de una etapa de regeneración térmica del carbón después de la desorción (Zegarra, 2018).

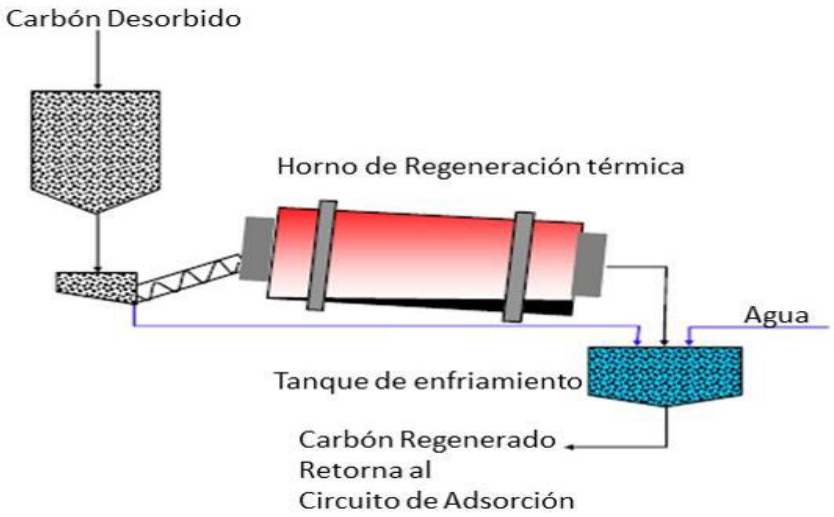


Figura 20. Regeneración térmica de carbón activado. Extraído de Vargas et al. (2022)

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Tipo y Diseño de Investigación

Este tema de investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se requiere medir y estimar las magnitudes de las variables de estudio y se busca hallar la correlación estadística existente entre la recuperación de oro, el pH y la concentración de cianuro libre en solución (Hernández et al., 2014).

Las etapas de la presente investigación y las actividades desarrolladas se muestran en el siguiente diagrama (Ver Figura 21).

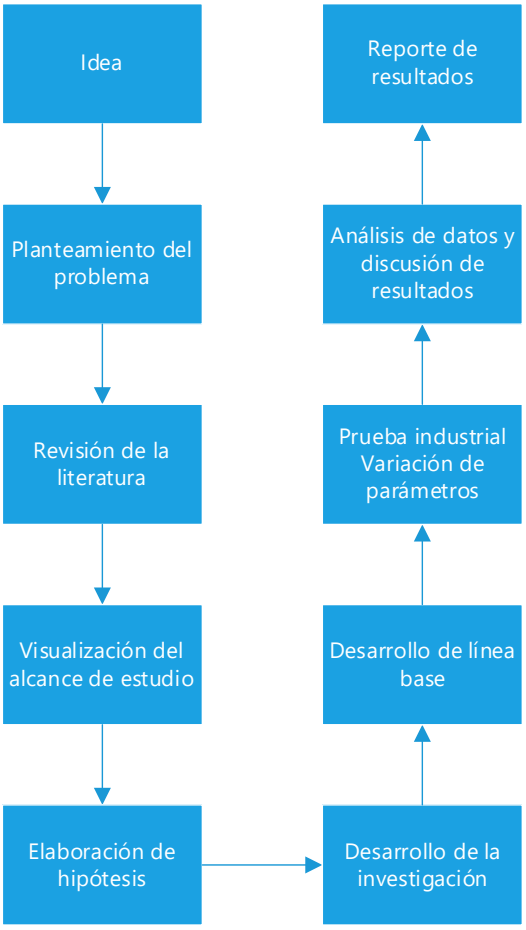


Figura 21. Etapas planteadas para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia.

El alcance de esta investigación es descriptivo – correlacional, ya que en primera instancia se busca describir los fenómenos, propiedades y las características de la adsorción de oro en el carbón activado durante la cianuración, la adsorción y su posterior desorción, luego, esta información se recoge para su posterior análisis. En segundo lugar, se tiene un enfoque correlacional, debido a que se busca conocer la relación entre el cianuro libre en solución y el pH con la recuperación de oro. Finalmente, se cuantifican y se analizan mediante herramientas estadísticas (Hernández et al., 2014).

La investigación es de carácter experimental, ya que se realiza la manipulación de las variables independientes [pH y CN libre (ppm)] en un rango determinado y se observa su impacto en el porcentaje de recuperación de oro.

3.2 Identificación de Variables

3.2.1 Variable Independiente

Las variables independientes son:

- El valor de pH de la solución pregnant.
- La concentración de cianuro libre en solución.

3.2.2 Variable Dependiente

La variable dependiente es la recuperación de oro por el proceso de carbón activado.

3.2.3 Matriz de Operacionalización de Variables

***Cuadro 8**. **Desarrollo de la matriz de operacionalización de variables**.*

Variable	Definición Conceptual	Indicadores	Instrumento (test, equipo, etc)
pH	El pH representa un indicador del grado de acidez o basicidad de una solución. Este parámetro refleja la concentración de iones hidrógeno presentes en un medio determinado.	pH: 7 - 10	pHmetro
Concentración de cianuro libre	Corresponde al ion cianuro en su forma no complejada (CN^-). Este término se emplea para referirse al cianuro libre que permanece disuelto en el agua utilizada durante el proceso.	Cianuro Libre (ppm)	Titulación con Nitrato de Plata
Recuperación de oro	El oro se recupera de la solución cianurada a través del carbón activado por el proceso de adsorción.	% Recuperación	Ley de Oro por adsorción atómica

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Unidad de Análisis

Esta investigación se fundamenta en las tendencias operacionales que se tienen como resultados de la operación continua de una Planta Hidrometalúrgica de oro, específicamente del circuito de Lixiviación de oro con Carbón en Columna (CIC). En estos datos se muestra la evolución de la recuperación de oro en el carbón activado, cuando se varían parámetros críticos como lo son la concentración de cianuro libre en solución (ppm) y el pH.

Se ha tomado una muestra representativa de un rango de fechas en los que no se ha llevado a cabo la operación de manera regular, de modo que se puedan descartar desviaciones por cuestiones operacionales, ya que este factor es intrínseco en el

proceso en cuanto a un reporte refiere, por lo tanto la evaluación de cuestiones técnicas como lo son las variables operativas del pH y concentración de cianuro libre (ppm) en la solución utilizada en el proceso de Adsorción nos resultaría como una dificultad que no puede ser asumida arbitrariamente cuando se quieren evaluar incluso la correlación de las variables en cuestión o la significancia de terceras.

Cuadro 9. Promedio diario de la base de datos utilizada para el análisis de variables críticas.

Año	Mes	Día	Promedio de pH	Promedio de CN libre (ppm)	Promedio de % Recuperación
2019	abril	8	7.01	26.78	57.51
2019	abril	9	7.42	23.98	51.60
2019	abril	10	8.21	20.15	64.33
2019	abril	11	8.51	19.68	69.98
2019	abril	12	8.95	20.25	82.61
2019	abril	13	9.40	25.58	82.60
2019	abril	14	8.92	21.38	83.40
2019	abril	15	9.13	25.33	82.68
2019	abril	16	9.26	34.65	81.65
2019	abril	17	9.65	38.25	78.56
2019	abril	18	9.33	39.23	82.76
2019	abril	19	9.39	35.30	78.92
2019	abril	20	9.21	36.53	78.70
2019	abril	21	9.17	25.58	81.31
2019	abril	22	9.02	21.03	77.91
2019	abril	23	9.34	32.30	76.67
2019	abril	24	9.27	34.80	82.21
2019	abril	25	9.37	37.45	70.81
2019	abril	26	9.27	33.95	74.66
2019	abril	27	9.48	36.13	74.73
2019	abril	28	9.34	33.40	74.98
2019	abril	29	9.48	31.35	79.16
2019	abril	30	9.38	35.08	66.52
2019	mayo	1	9.36	38.05	75.60
2019	mayo	2	9.31	41.10	75.51
2019	mayo	3	9.52	41.15	78.73
2019	mayo	4	9.52	41.58	79.60
2019	mayo	5	9.46	41.35	83.04
2019	mayo	6	9.49	39.59	74.79
2019	mayo	7	9.52	41.85	79.07

Fuente: Elaboración propia.

Se ha tomado como base de análisis el promedio diario ya que una Planta de operación continua generalmente tiene dos reportes diarios, para llevar a cabo una evaluación de tendencias operacionales y definir el comportamiento normal y típico del proceso nos es suficiente y necesario para evitar el ruido de las curvas, más sin embargo; para realizar el análisis matemático si nos es conveniente tener la mayor información de datos posibles ya que este tipo de operaciones constantemente genera información que

nos puede proporcionar detalles relevante de manera natural en base al comportamiento y agrupamiento de datos como lo veremos más adelante.

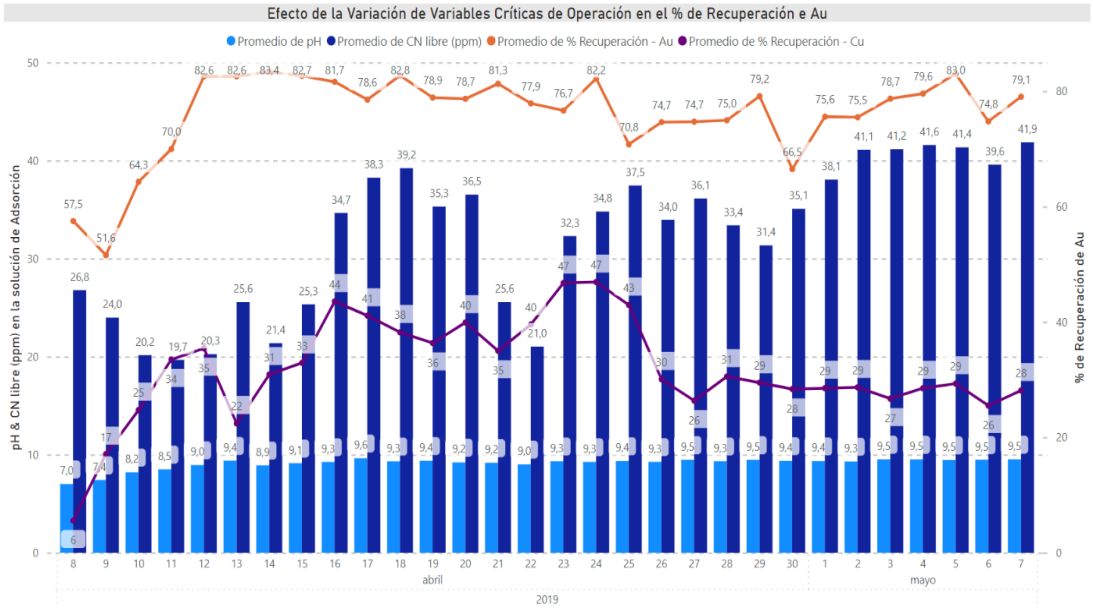


Figura 22. Tendencia operativa del efecto de la variación de variables críticas en el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción. Elaboración propia.

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población de estudio es la concentración de oro en complejo cianurado adsorbido en los poros del carbón activado en el proceso de cianuración – recuperación a partir de una solución rica o Pregnant. Solo se considera el oro adsorbido en el carbón, ya que hay oro en solución que no llega a adsorberse y es recirculado al sistema de lixiviación en una solución denominada Barren. La zona de muestreo es en planta de operaciones, durante la cosecha del carbón. Por otro lado, es necesario evaluar el efecto de variables secundarias como: concentración de Cu, Ag en la solución Pregnant y Au en la solución Barren, para así poder evaluar el % de Recuperación de Au en la etapa de Adsorción de una manera más completa y realista en relación con el proceso instalado en planta.

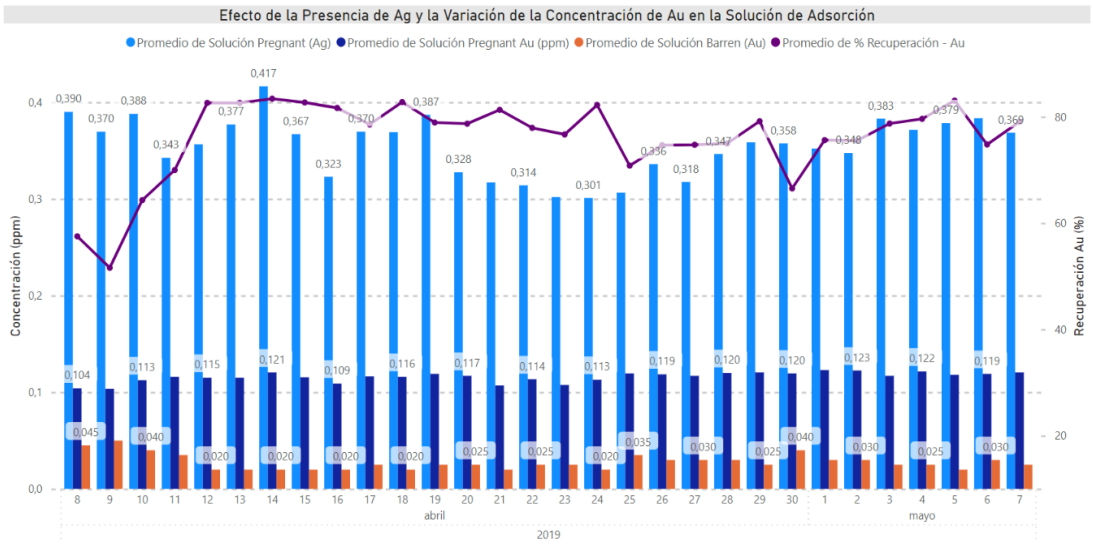


Figura 23. Tendencia del efecto de la presencia de Ag en la solución pregnant y la variación de la concentración de Au sobre el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción. *Elaboración propia.*

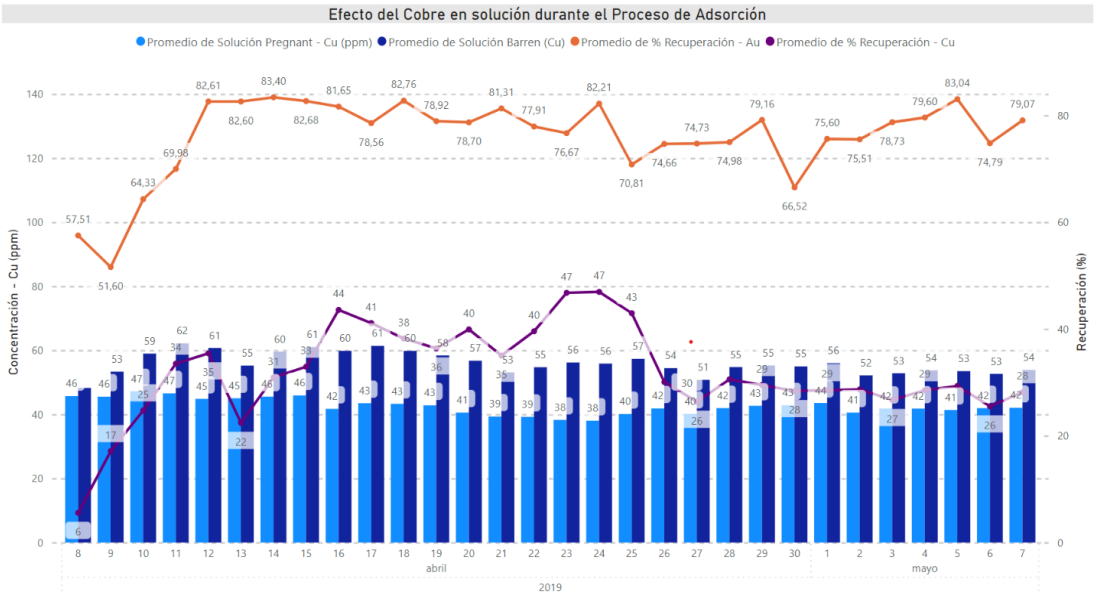


Figura 24. Tendencia operativa del efecto de la presencia de Cu en la solución pregnant sobre el % de recuperación de Au en la etapa de adsorción*. Elaboración propia.*

3.4.2 Muestra

Se realizan tomas de muestra en los dos turnos de operación, en la columna Nº5 del Circuito de Carbón en Columna. El volumen total de la muestra es de 60 observaciones en las que se recopilan la variación de las variables críticas: pH y concentración de cianuro libre (ppm).

3.4.3 Selección de Muestra

Como se mencionó anteriormente, el criterio que se ha tenido para llevar a cabo la selección de la muestra es que esta sea lo más representativa posible en cuanto al proceso en una continuidad típica refiere. Al tratarse de una recopilación de información operativa, registrada luego de un análisis químico sistemático diario, nos permite incluir por defecto el factor de eficiencia operativa de modo que la aplicación de variaciones sea aplicable y de igual manera el factor de los mecanismos de medición; siempre y cuando el volumen de datos utilizado sea alto se podrá mantener este homogeneidad y distribución.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.5.1 Técnicas de Investigación

Este trabajo de investigación requiere de la recopilación de una base de datos para generar el rango de trabajo de las variables metalúrgicas que ya hayan sido estudiadas a fin de evitar consideraciones excesivas en los rangos que no tengan un grado de significancia alto. Para diseñar esta base de datos se usaron los siguientes buscadores:

- Scopus
- Science Direct
- Google academics
- Scielo
- Entre otros

Por otra parte, la revisión bibliográfica de los principios fenomenológicos, empíricos y semi-empíricos son necesarias para formular una interpretación adecuada de los datos en estudio, así como de los resultados que se han obtenido. Esto se ve reflejado en la información del marco teórico y la metodología de investigación.

- Los artículos de información son descargados de la red de fuentes de revistas científicas y proyectos de investigación relacionados.
- Se comprobará su origen a través del DOI y en caso no se pueda determinar su procedencia o haya duda se descartará la información.
- Se requiere clasificar y analizar la información según la tabla de operacionalización de variables. Asimismo, se mostrará un resumen de la procedencia de la información procesada.

Se ha considerado solo la información relacionada directamente con la recuperación de oro por el proceso de carbón activado y que aporten información relevante para garantizar una mejor calidad de información.

3.5.2 Instrumentos de Investigación

El uso de diseños experimentales es uno de los instrumentos más cruciales para la optimización experimental de procesos metalúrgicos. Particularmente en procesos donde el fenómeno físico o químico que gobierna es tan complicado que es más conveniente evaluar modelos matemáticos utilizando métodos empíricos.

3.5.3 Etapas del Diseño Experimental

Un enfoque estadístico conocido como diseño experimental permite la modificación de las variables de entrada de un proceso para determinar el impacto que esos factores tienen en los resultados finales del proceso. Esto nos proporciona el conocimiento que necesitamos para poder mejorar y optimizar el proceso.

3.5.4 Diseños Factoriales

Un diseño experimental de primer orden conocido como diseño factorial combina todos los niveles factibles de los componentes que se estudian para que podamos determinar la influencia que tienen en la variable respuesta.

3.5.5 Aplicación de Minitab 19

Es un software estadístico diseñado para todo tipo de empresas que permite el análisis de datos complicados y la resolución de problemas del proceso de fabricación. Muchas organizaciones pueden regular y mejorar los resultados de sus procesos de producción gracias a este programa, que incluye una amplia variedad de alternativas precisas y extremadamente fáciles de usar. Los usuarios pueden evaluar los resultados mediante histogramas, diagramas, gráficas, tablas y pruebas de hipótesis.

3.6 Análisis e Interpretación de la Información

El análisis de los resultados se ha clasificado en la tabla de operacionalización de variables y en la Matriz de Consistencia.

Para asegurar la validez interna y externa de los resultados, se han considerado los siguientes criterios:

- Validez interna: se garantiza mediante el control de las variables independientes (pH y concentración de cianuro libre) dentro de los rangos operacionales típicos de una planta aurífera (pH entre 9.5–10.5 y CN^- libre entre 10 – 60 ppm). Además, se establecieron condiciones constantes de temperatura y tiempo de contacto, minimizando la influencia de factores externos.
- Validez externa: los datos provienen de registros reales de una planta de adsorción con carbón en columna (CIC), lo cual permite extrapolar los resultados a condiciones operativas industriales similares.

- Validez de constructo: las variables fueron definidas conceptual y operacionalmente de acuerdo con la teoría metalúrgica de la adsorción de oro (Dai & Breuer, 2009; Souza et al., 2014), asegurando su correcta medición e interpretación.
- Validez estadística: se aplicaron métodos de análisis de correlación y regresión mediante el software Minitab 19, asegurando que los modelos ajusten con niveles de significancia estadística ($p < 0.05$).

En cuanto a la confiabilidad, se garantizó mediante los siguientes procedimientos:

- Se utilizaron instrumentos calibrados: pHmetro digital para la medición de pH y titulación argentométrica con nitrato de plata para la determinación del cianuro libre.
- Se tomaron muestras duplicadas en cada turno para verificar la repetibilidad de los resultados.
- La precisión analítica se comprobó aplicando pruebas de control estadístico de calidad (gráficos de control de medias y desviación estándar).
- Se verificó la consistencia de los datos mediante el análisis de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (R^2), determinando la estabilidad de las tendencias en la base de datos.

Estos criterios aseguran que los resultados obtenidos sean reproducibles, coherentes y estadísticamente confiables, otorgando solidez a las conclusiones derivadas del análisis experimental.

El análisis de los datos permitió determinar las condiciones experimentales más adecuadas para optimizar la recuperación de oro en el circuito CIC:

- pH óptimo: entre 9.5 y 10.0, rango en el cual se minimiza la formación de complejos cúpricos como $Cu(CN)_3^{2-}$ y $Cu(CN)_4^{3-}$, que compiten con el complejo $Au(CN)_2^-$ por los sitios activos del carbón activado.

- Concentración de cianuro libre (CN^-): entre 30 y 40 ppm, cantidad suficiente para mantener la estabilidad del complejo aurocianuro sin generar exceso de complejos cuprocianurados.
- Temperatura: se mantuvo constante a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), evitando la volatilización de cianuro y cambios en la cinética de adsorción.
- Tiempo de contacto: entre 8 y 12 horas de adsorción efectiva, de acuerdo con la práctica operativa estándar en plantas de carbón en columnas.
- Tamaño de partícula del carbón activado: malla 6x12, seleccionada por su mayor superficie específica y adecuada resistencia mecánica.

Estas condiciones fueron determinadas en función de la estabilidad de los datos, los modelos de correlación obtenidos y la evidencia bibliográfica (Majuste et al., 2014; Vargas et al., 2022; Fu et al., 2023), y son las que se consideran óptimas para lograr una mayor selectividad hacia el oro en presencia de cobre.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados

4.1.1 Análisis

4.1.1.1 Evaluación de las Tendencias Operacionales del Circuito de Adsorción Incremento de la Relación Molar CN^-/Cu

Al circuito de Adsorción ingresa una solución Pregnant rica en oro (complejo cianurado) con presencia de cobre y plata, a esta solución se le realizó un análisis en Laboratorio Químico para determinar la concentración de cianuro libre y la concentración de cobre. Se logró determinar que la concentración de cobre se encuentra en un promedio de 42.52 ppm.

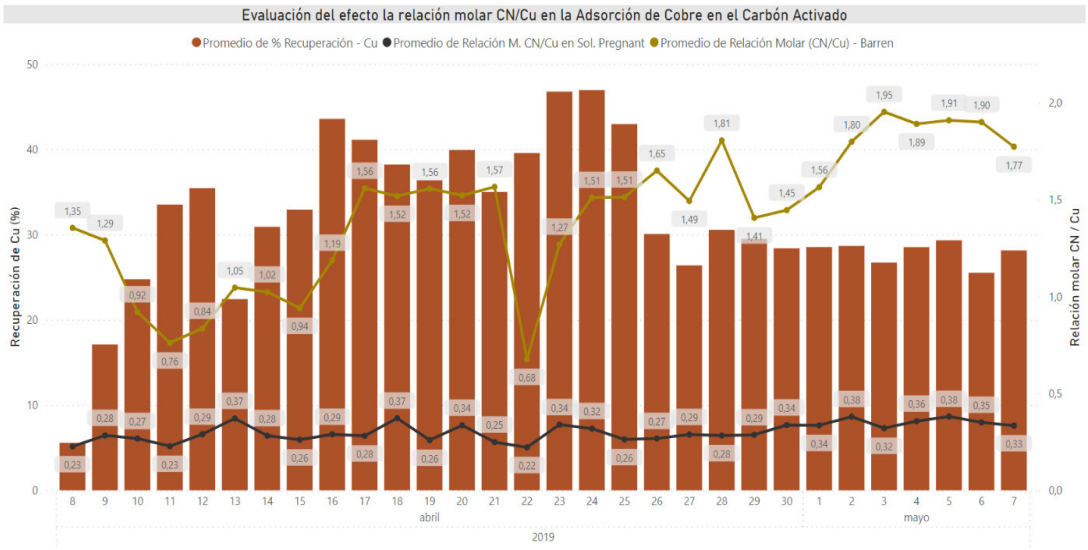


Figura 25. Tendencia de relación molar CN^-/Cu en las soluciones Pregnant y Barren del circuito de adsorción. Elaboración propia.

El cobre presente en la solución se encuentra en complejos cianurados que pueden afectar la adsorción del oro, dependiendo del pH y la concentración de cianuro libre. Como se observa en la Figura 25, en el circuito de Adsorción la solución Pregnant ingresa con una relación molar CN^-/Cu promedio de 0.302, esta baja concentración de

cianuro libre favorece la formación de complejos de cobre de menor tamaño que son adsorbidos en el carbón activado. Luego de dosificar cianuro al circuito de Adsorción, la relación molar CN^-/Cu alcanza un valor promedio de 1.98 en la solución Barren, la formación de complejos de cobre de mayor tamaño se ven favorecidas al incrementar esta relación molar, los mismos que por su tamaño son menos favorecidos para la adsorción en el carbón activado disminuyéndose así la Recuperación de cobre (%).

4.1.1.2 Efecto de la Concentración de Cianuro Libre en la Selectividad Au/Cu

La forma de evaluar la cambiante variación de la Recuperación de Oro (%) en la etapa de Adsorción está principalmente definida por la selectividad que está teniendo el carbón por el complejo cianurado de oro con relación a los de cobre (Au/Cu).

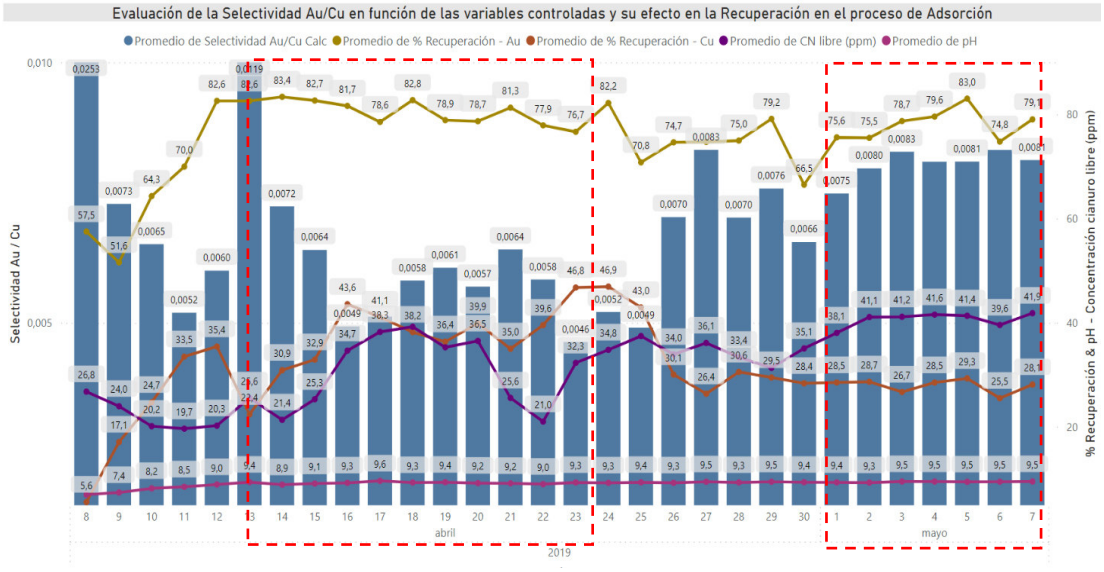


Figura 26. Efecto de la concentración de cianuro libre en la selectividad Au/Cu. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 26, sosteniendo el valor de pH en un rango de 9.0 – 9.5, la Recuperación (%) de oro y cobre fluctúa en el mismo ritmo y de manera proporcional, de modo que podríamos fijar un equilibro hasta este instante. Sin embargo, la optimización de la adsorción de estos metales se realiza a partir del incremento de la concentración de cianuro libre para que se dé a lugar la formación del complejo tricianuro de cobre, disminuyendo así el rango en el que fluctúa la

Recuperación de cobre (%) en el carbón a un valor promedio de 28.5% en comparación al de la primera parte donde oscila alrededor de 39.5%, esto incrementando la concentración de cianuro libre de 32 a 42 ppm aproximadamente.

4.1.1.3 La Recuperación en Función de la Variación del pH y Concentración de CN Libre

Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos, resulta necesario el manejo masivo de información almacenada de una operación continua, por ende, luego de la selección de un período representativo de operación para el mes de abril del 2019, se ve por conveniente representar de manera gráfica la forma en la que se distribuyen los resultados de Recuperación de oro (%) en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm). Al tratarse de un sistema con dos variables independientes, una representación gráfica en 3 dimensiones (Ver Figura 27) nos ayuda a identificar que los datos no tienen un comportamiento lineal por la interacción de ambas variables, una visualización de la influencia de cada variable como en las Figuras 28 y 29 nos podrían llevar a la conclusión errónea de que los datos si obedecen a una agrupación del tipo lineal.

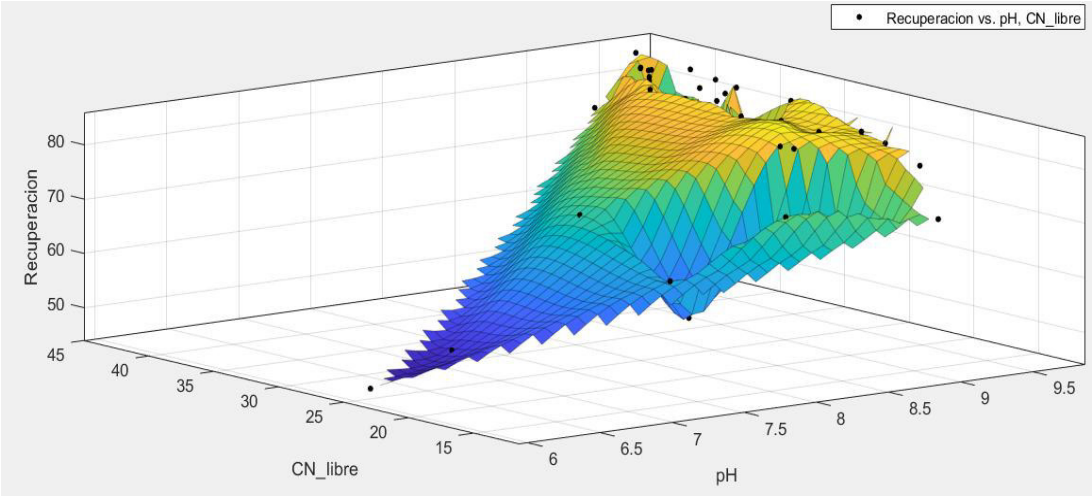


Figura 27. Efecto de la recuperación de oro (%) en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm). Elaboración propia.

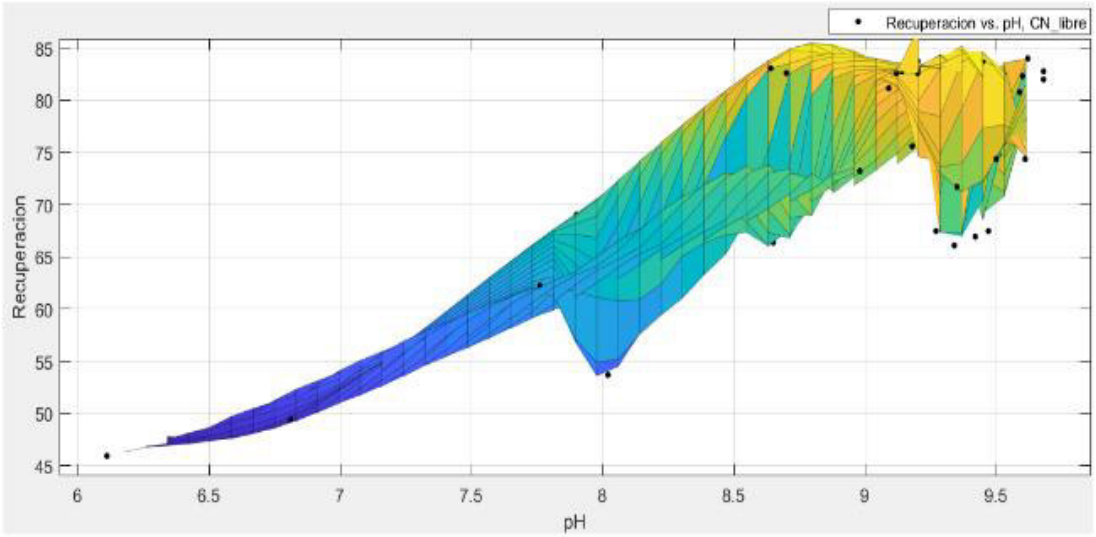


Figura 28. Efecto del pH en la solución del circuito de adsorción para la recuperación de oro (%). Elaboración propia.

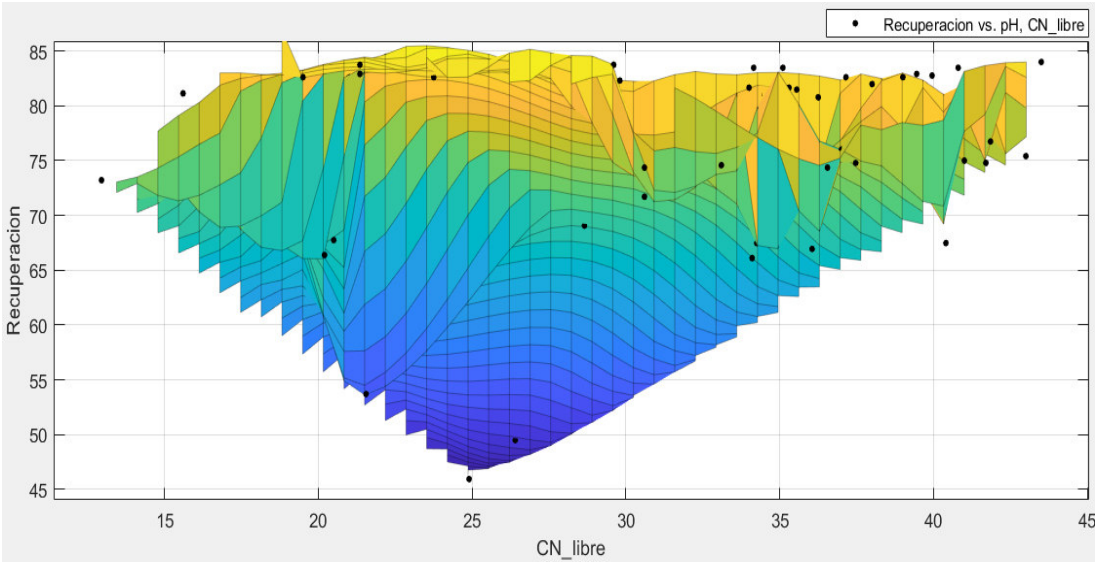


Figura 29. Efecto de la concentración de cianuro libre (ppm) en la solución del circuito de adsorción para la recuperación de oro (%). *Elaboración propia.*

Para llevar a cabo pruebas de cinética de Adsorción que nos permitan evaluar la Recuperación de oro (%) y el grado de adsorción de cobre en el carbón activado, es importante delimitar un rango de evaluación efectivo, esto debido a que se pueden realizar pruebas para una amplia brecha a nivel laboratorio, más sin embargo, durante la operación a escala industrial esta brecha se reduce considerablemente, es así que, partiendo de los datos recolectados de la operación fijaremos estos rangos de análisis propia del sistema.

Para obtener un modelo de regresión que nos permita predecir un resultado en la mayoría de los escenarios posibles de un sistema activo real como lo es una operación continua, se opta por utilizar el Método de Bosques de Regresión como herramienta avanzada para el manejo de datos masivos e irregulares, esto debido a que la continua variación de las variables independientes en nuestro sistema producen resultados relativamente distantes que con un método matemático clásico difícilmente se podrían agrupar la mayoría de posibles resultados.

El Método de Bosque de Regresión está compuesto por cientos de Árboles de Regresión, esto genera un mecanismo más robusto de predicción, en la Figura 30 se muestra la segmentación de un árbol de regresión de 5 ramas; como se puede ver, la agrupación de los resultados por zonas de menor entropía nos ayuda a tener una mejor efectividad de predicción, si bien es cierto la regresión realizada por un solo árbol de decisión pareciera lo necesariamente completa, estas zonas delimitadas en su regresión reúnen datos que tienen un grado de dispersión aún reducible, para ello el uso de cientos de árboles convergen en la reducción de este efecto y la optimización del modelo de predicción.

Cuadro 10. Características y precisión del modelo de regresión por bosque de decisión.

Características de Regresión	
Training de Modelo	80%
Testing de Modelo	20%
Nº Árboles de Regresión	300
Segmentación máxima (ramas)	8
Precisión de Modelo	
% Recuperación Au	0.89
% Recuperación Cu	0.85

Fuente: Elaboración propia.

Se ha diseñado el modelo de regresión de modo que se alcance un ajuste de acuerdo al tipo de datos que se tienen, que son del tipo operacional más no experimental, por ende un elevado % de precisión nos puede conducir a un sobre ajuste y trabajar con valores entre 85 – 90% de eficiencia nos resulta más conveniente ya que de este modo la segmentación de cada árbol de decisión no será tan fraccionada y la agrupación de

resultados tiene coherencia; lo que no quiere decir que se van a tener agrupaciones con grados de dispersión altos, sino que, con la determinación de un número de árboles adecuado, el entrenamiento del modelo va a ir delimitando zonas en las que los datos se agrupan mejor y descartando otras en las que la escases de datos o una muy alta dispersión no resulten significantes para predecir adecuadamente un resultado.

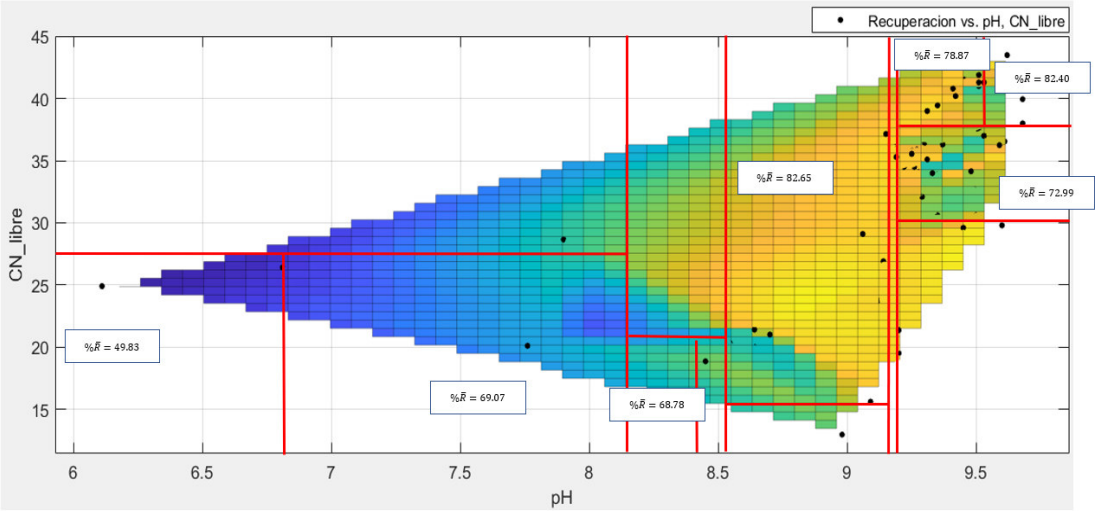


Figura 30. Segmentación del método de árbol de decisión para la regresión del conjunto de datos en análisis. Elaboración propia.

Las agrupaciones de datos nos brindan un valor promedio de la Recuperación (%) esperada en cada zona segmentada, este valor, evaluándose desde la regresión que puede realizar un solo árbol, nos puede parecer que en algunas zonas puede tomarse como cierta, producto de la cantidad y proximidad de los resultados que se usado por el modelo para dar su predicción, pero en zonas en las que hay pocos datos o dispersión de varios, la aceptación de esta predicción resultaría en un amplio margen de error, es por ello que el modelo de Bosque de Decisión se ha entrenado y testeado con 300 árboles de 8 ramas cada una, de este modo se alcanza un equilibrio de precisión sin llegar al sobre ajuste.

4.1.1.4 Modelo de Regresión para la Evaluación del Sistema y Generación de Rango de Análisis Experimental

Se plantea un diseño experimental completo para evidenciar el comportamiento de las variables independientes y la interacción de ambas en la Recuperación de oro (%) y la Recuperación de cobre (%) en el circuito de Adsorción en un escenario real de planta, de modo que se pueda fijar el rango de análisis en laboratorio en valores en los que sean realmente incidentes en la operación. La gran cantidad de pruebas que supondrían un diseño de este tipo se ven muy favorecidas con la utilización del Bosque de Decisión para regresión. Los resultados obtenidos como predicción del modelo se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11. ***Diseño experimental para la evaluación de la recuperación de oro y cobre en el circuito de adsorción y determinación del rango de análisis a nivel laboratorio.***

pH	CN libre (ppm)	Recuperación Au - Modelo Bosque de Regresión	Recuperación Cu - Modelo Bosque de Regresión
5,50	10	54,73	9,38
5,50	20	54,39	9,37
5,50	30	56,94	9,23
5,50	40	57,00	8,77
5,50	50	56,98	8,60
5,50	60	56,98	8,60
6,50	10	54,73	9,38
6,50	20	54,39	9,37
6,50	30	56,94	9,23
6,50	40	57,00	8,77
6,50	50	56,98	8,60
6,50	60	56,98	8,60
7,50	10	63,63	15,56
7,50	20	62,74	15,57
7,50	30	65,61	15,82
7,50	40	65,70	15,29
7,50	50	65,56	14,82
7,50	60	65,56	14,82
8,50	10	71,66	32,59
8,50	20	69,84	32,64
8,50	30	71,78	38,50
8,50	40	71,90	33,36
8,50	50	71,68	30,87
8,50	60	71,68	30,87
9,50	10	78,19	31,45
9,50	20	77,56	31,50
9,50	30	79,06	31,04
9,50	40	79,94	30,78
9,50	50	80,04	29,61
9,50	60	80,04	29,61
10,50	10	78,32	33,55
10,50	20	77,74	33,61
10,50	30	79,27	33,36
10,50	40	81,85	36,21
10,50	50	80,44	33,40
10,50	60	80,44	33,40

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este análisis se tienen los siguientes comportamientos de los datos que resumen el grado de influencia de cada variable para la Recuperación de oro y cobre en el carbón, así como también la interacción de ambas variables.

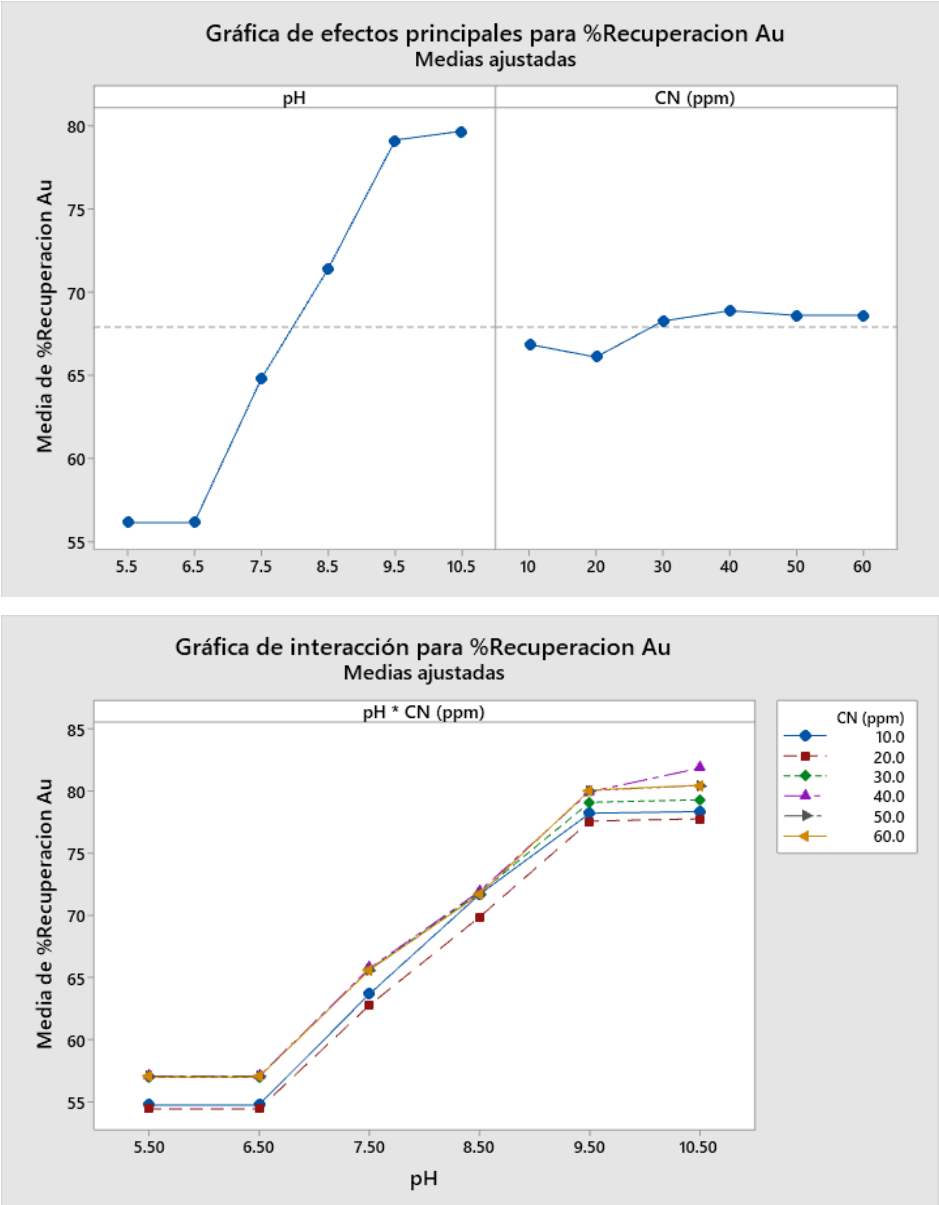


Figura 31. Efectos principales e interacción del pH y la concentración del cianuro libre (ppm) para la recuperación de oro (%) en el circuito de adsorción. Elaboración propia.

En primera instancia, se evidencia la significancia de cada variable en la Recuperación de oro (%), siendo el pH el de mayor efecto durante su variación; más, sin embargo, la optimización de la recuperación está controlada por la concentración de cianuro libre en la solución.

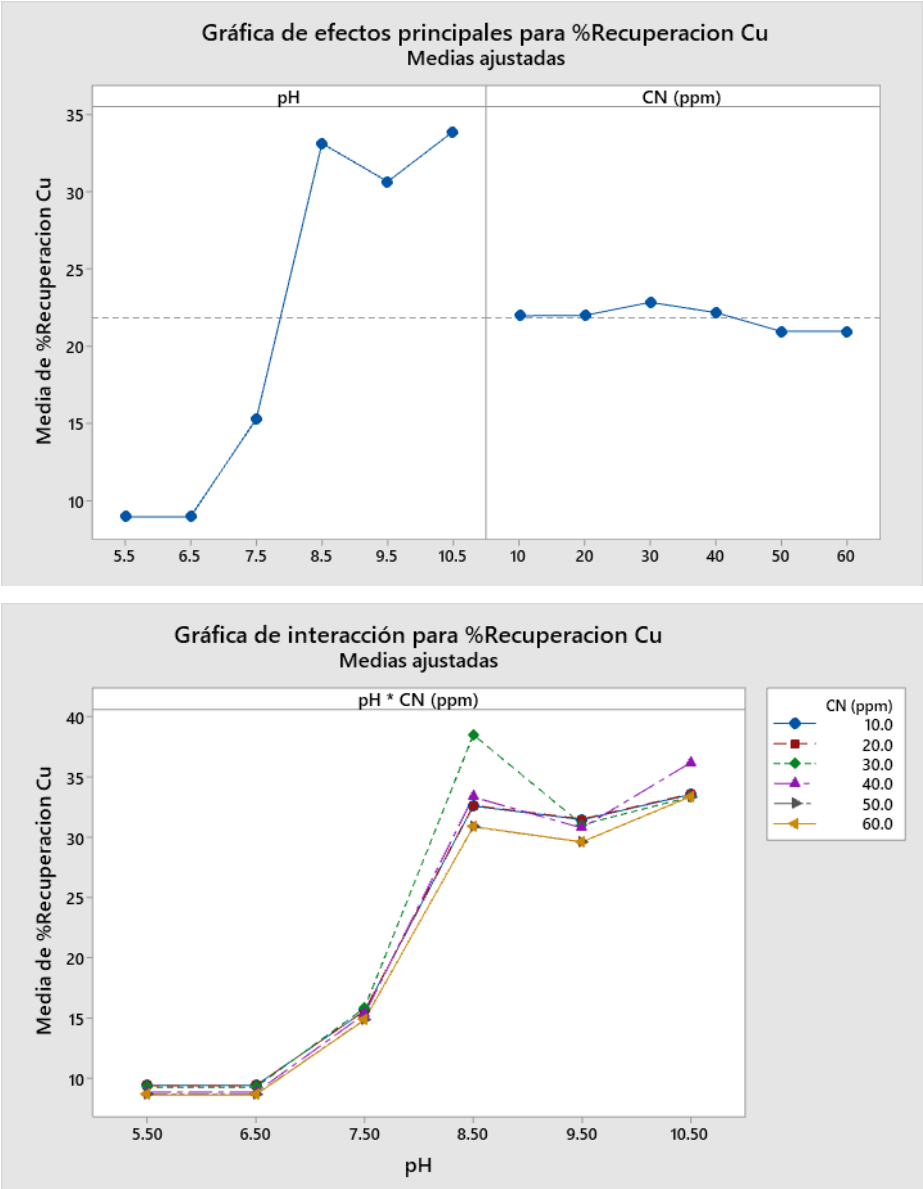


Figura 32. Efectos principales e interacción del pH y la concentración del cianuro libre (ppm) para la recuperación de cobre (%) en el circuito de adsorción. Elaboración propia.

El cobre como principal contaminante en el carbón activado tiene un comportamiento similar al del oro desde el punto de vista del efecto generado por el pH en la solución; más, sin embargo, la concentración del cianuro libre si resulta en un efecto inverso.

4.1.1.5 Diseño Experimental de la Cinética de Adsorción de los complejos cianurados

Producto del análisis generado a partir del diseño experimental, planteado en base a datos del sistema real de operación, y validada su correlación con los conceptos y antecedentes correspondientes al tipo de operación, resulta factible generar un rango de análisis como el que sigue a continuación:

Cuadro 12. ***Planteamiento de diseño de experimentos para evaluar la cinética de adsorción de oro y cobre en el carbón activado.***

Concentración de Au (ppm)	pH	Conc. De Cianuro Libre (ppm)	Objetivo de Validación
0.117	6.50	20	Menor grado de Adsorción de Au & Menor grado de Adsorción de Cu
0.117	7.50	30	Bajo grado Adsorción de Au & Bajo grado de Adsorción de Cu
0.117	9.50	40	Incremento de Adsorción de Au & Disminución de la Adsorción de Cu
0.117	10.50	11	Valor promedio de Adsorción de Au & Aumento de la Adsorción de Cu
0.075	6.50	20	Efecto de la disminución de Au en la Solución Pregnant
0.075	7.50	30	Efecto de la disminución de Au en la Solución Pregnant
0.075	9.50	40	Efecto de la disminución de Au en la Solución Pregnant
0.075	10.50	11	Efecto de la disminución de Au en la Solución Pregnant

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de Cinética de Adsorción, por su naturaleza sistemática, requieren de un período de evaluación y control, se plantea llevar a cabo controles de 1, 3, 6, 9 y 12 minutos de modo que se pueda definir la velocidad de Adsorción de los complejos cianurados de oro y cobre en la superficie del carbón activado. De acuerdo con la información recogida de la operación continua de la Planta se tiene que: la concentración de oro promedio en la solución Pregnant es de 0.116 ppm, por ende, las pruebas en laboratorio se realizan bajo las mismas condiciones promedio de operación como se puede ver en el Cuadro 13. Por otro lado, se decide evaluar la repercusión que tendría una disminución de la concentración de oro en la solución Pregnant.

Tabla 13. Concentraciones promedio en las soluciones utilizadas en las pruebas de cinética de adsorción.

Sol. Matriz	Prueba 1	Prueba 2
Au (ppm)	0.117	0.077
Ag (ppm)	0.253	0.248
Cu (ppm)	30.100	29.725

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el análisis químico de la adsorción llevada a cabo para cada tiempo de contacto entre el carbón activado y la solución cianurada bajo las diferentes configuraciones de las variables evaluadas, se presenta la disminución de la concentración de oro y cobre en la solución que actúa como medio de la operación unitaria para cada prueba. Estos resultados se resumen en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Resultados de las pruebas 1 y 2 de cinética de adsorción configuradas para la evaluación del efecto del pH, concentración de cianuro libre y concentración de oro.

N°	Cod. Pruebas	Au (ppm)	Cu (ppm)	Ag (ppm)	N°	Cod. Pruebas	Au (ppm)	Cu (ppm)	Ag (ppm)
1	Matriz 1	0,117	30,100	0,250	1	Matriz 1	0,075	27,200	0,270
1.1	CN 11 - 1'	0,097	29,400	0,240	1.1	CN 11 - 1'	0,067	25,700	0,250
1.2	CN 11- 3'	0,081	28,800	0,200	1.2	CN 11- 3'	0,053	23,300	0,220
1.3	CN 11 - 6'	0,064	28,200	0,150	1.3	CN 11 - 6'	0,042	20,500	0,170
1.4	CN 11 - 9'	0,050	28,100	0,120	1.4	CN 11 - 9'	0,032	18,300	0,140
1.5	CN 11 - 12'	0,040	27,300	0,100	1.5	CN 11 - 12'	0,026	16,800	0,120
2	Matriz 2	0,119	30,200	0,260	2	Matriz 2	0,075	31,500	0,250
2.1	CN 20 - 1'	0,105	28,600	0,230	2.1	CN 20 - 1'	0,067	29,300	0,230
2.2	CN 20- 3'	0,089	26,400	0,200	2.2	CN 20- 3'	0,060	26,200	0,190
2.3	CN 20 - 6'	0,066	23,900	0,160	2.3	CN 20 - 6'	0,042	23,100	0,150
2.4	CN 20 - 9'	0,053	23,000	0,120	2.4	CN 20 - 9'	0,032	20,600	0,110
2.5	CN 20 - 12'	0,043	21,900	0,100	2.5	CN 20 - 12'	0,026	18,600	0,090
3	Matriz 3	0,115	31,500	0,260	3	Matriz 3	0,077	30,300	0,240
3.1	CN 30 - 1'	0,100	30,400	0,250	3.1	CN 30 - 1'	0,069	29,500	0,220
3.2	CN 30 - 3'	0,083	28,000	0,200	3.2	CN 30 - 3'	0,057	27,700	0,180
3.3	CN 30 - 6'	0,066	25,800	0,160	3.3	CN 30 - 6'	0,047	26,200	0,140
3.4	CN 30 - 9'	0,049	24,600	0,130	3.4	CN 30 - 9'	0,034	24,500	0,120
3.5	CN 30 - 12'	0,038	23,000	0,100	3.5	CN 30 - 12'	0,030	23,700	0,090
4	Matriz 4	0,116	28,600	0,240	4	Matriz 4	0,079	29,900	0,230
4.1	CN 40 - 1'	0,097	28,200	0,230	4.1	CN 40 - 1'	0,058	29,100	0,210
4.2	CN 40 - 3'	0,081	27,600	0,180	4.2	CN 40 - 3'	0,052	28,700	0,180
4.3	CN 40 - 6'	0,066	27,600	0,140	4.3	CN 40 - 6'	0,040	27,400	0,140
4.4	CN 40 - 9'	0,050	27,000	0,120	4.4	CN 40 - 9'	0,030	27,300	0,120
4.5	CN 40 - 12'	0,039	26,000	0,100	4.5	CN 40 - 12'	0,025	26,100	0,090

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el uso de la Isoterma de Lagnmuir para la evaluación de la Cinética de Adsorción de cada complejo cianurado, luego del análisis matemático correspondiente, se obtienen la velocidad de Adsorción del oro y el cobre con relación a la masa de carbón utilizado y el tiempo de residencia del carbón en la solución cianurada utilizada como medio: [(mgMetal/gC)/hr].

La Prueba 01 corresponde a la simulación de las condiciones promedio, en cuanto a concentración de metales (oro, plata y cobre), con las que se realiza la operación en planta, como se observa en la Figura 33 los resultados presentan correlación con los observado anteriormente en el diseño experimental completo, simulado a partir de la información almacenada de la operación continua del circuito de Adsorción.

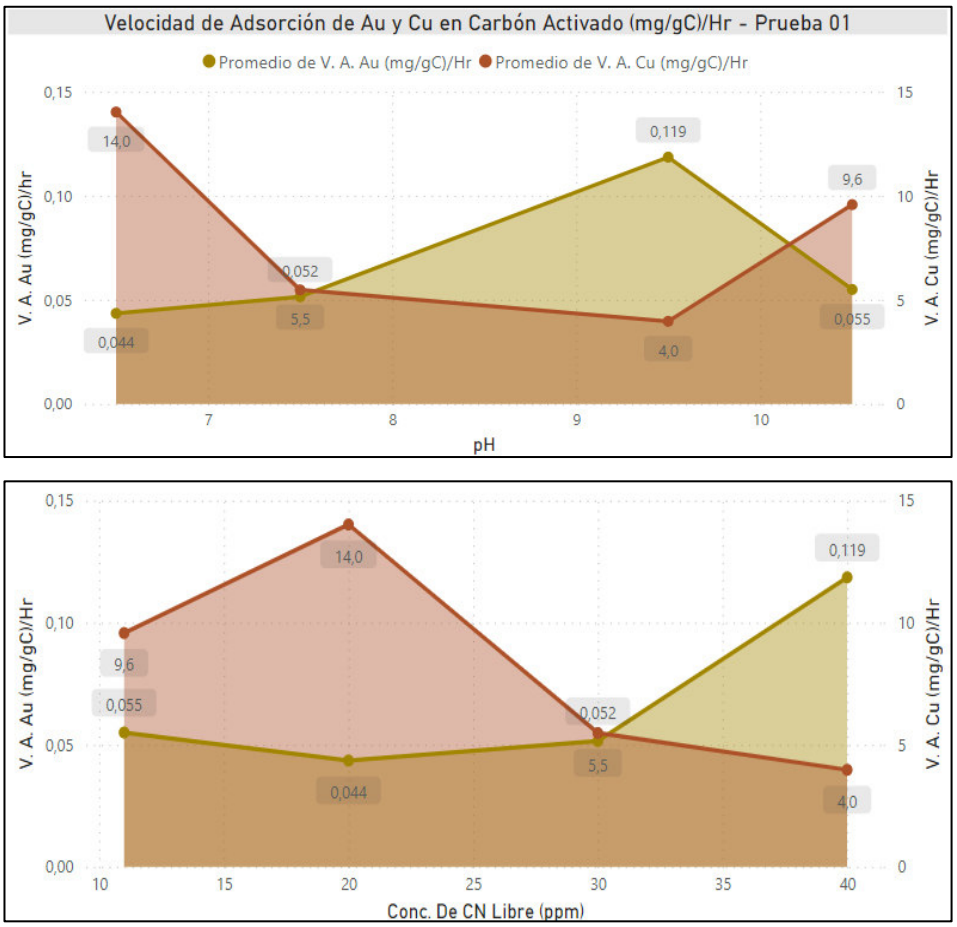


Figura 33. Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de oro y cobre en el carbón activado en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm) para la prueba 01. Elaboración propia.

Por otro lado, en la prueba adicional (Prueba 02), realizada para evaluar el efecto de la disminución de la concentración de oro en la solución Pregnant, se observa en la figura 34 un comportamiento ligeramente diferente en la cinética de adsorción de este metal, más sin embargo se sostiene una baja adsorción de cobre, lo que podría significar una alternativa una vez validadas repeticiones y configuraciones adicionales con rangos de operación típicos del sistema.

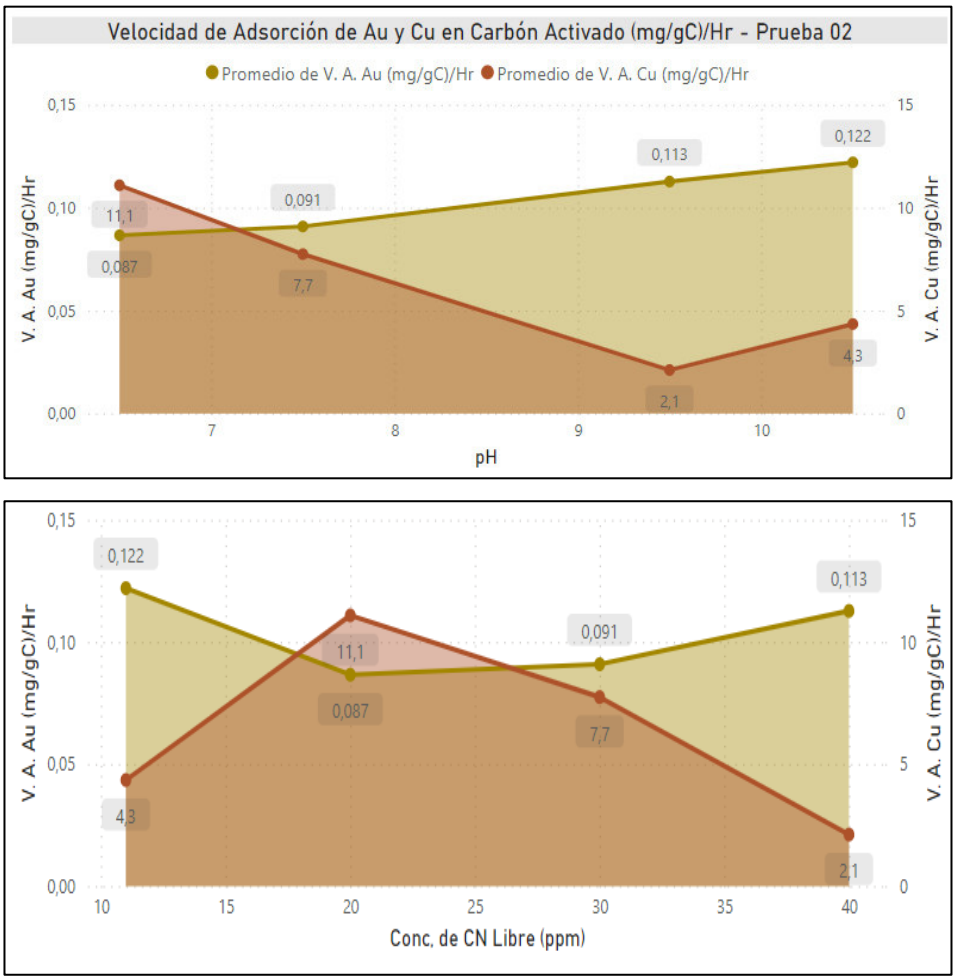


Figura 34. Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de oro y cobre en el carbón activado en función del pH y la concentración de cianuro libre (ppm) para la prueba 02. Elaboración propia.

Cuadro 15. Cinética de adsorción configuradas para la evaluación de la concentración de cianuro libre y concentración de cobre.

Concentración CN^-, ppm	CARBÓN ACTIVADO
	Cu (mgMe/gC)/min
33	0.014587435
50	0.012301307
60	0.009667475
70	0.007480510

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de cinética de adsorción de cobre para diferente concentración de cianuro libre registran una disminución en la velocidad de adsorción de cobre sobre el carbón activado a medida que se incrementa la concentración de cianuro, esto debido a que se forman complejos de cobre de mayor tamaño cuando se incrementa la concentración de cianuro, lo cual esto genera que la eficiencia de adsorción de cobre sea baja.

En la figura 35 se logró obtener un R^2=0.9988 para una regresión lineal negativa, lo cual la velocidad de adsorción de complejos de cobre depende de la concentración de cianuro libre, conforme se incrementa la concentración de cianuro libre se forman complejos de cobre de mayor tamaño y se reduce la velocidad de adsorción de cobre. Asimismo, en la figura 36 también se puede observar una menor velocidad de adsorción (k) para los complejos de cobre a medida que se incrementa la concentración de cianuro libre.

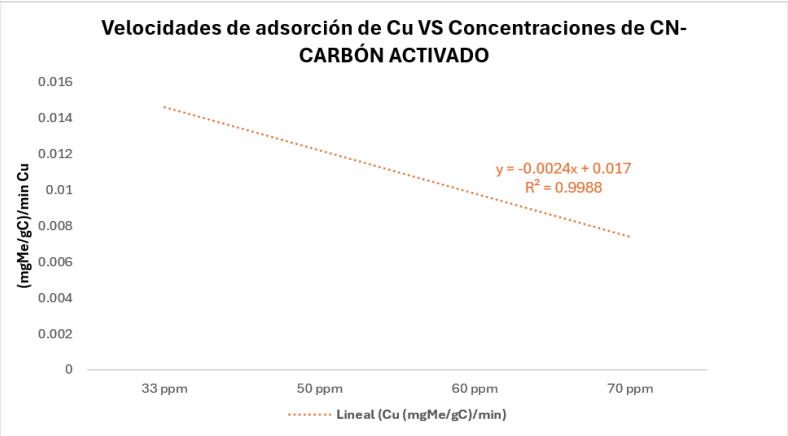


Figura 35. ***Velocidad de adsorción de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado y la concentración de cianuro libre (ppm).*** Elaboración propia.

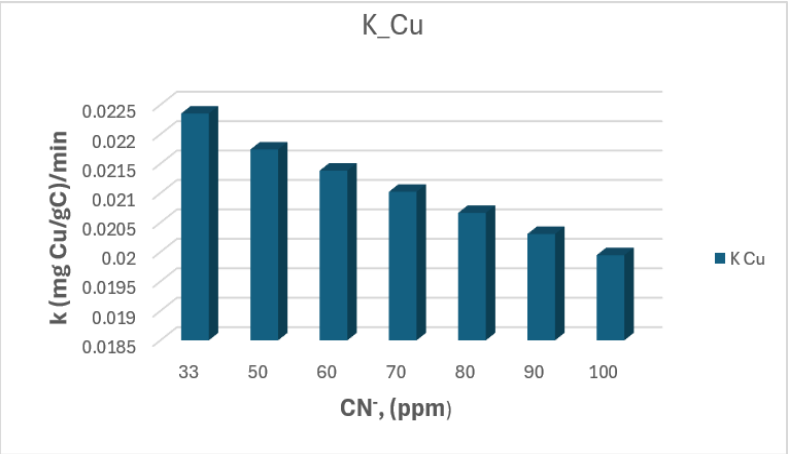


Figura 36. Velocidad de adsorción (k) de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado y la concentración de cianuro libre (ppm). Elaboración propia.

4.1.1.6 Sostenibilidad Ambiental del Proceso

Como parte de la sostenibilidad ambiental, es importante precisar que el cianuro de sodio se trabaja en un circuito cerrado y solo cuando hay un exceso de agua en el sistema se realiza su detoxificación a través del proceso INCO, Tratamiento Secundario y Osmosis Inversa para luego realizar la descarga del agua tratada cumpliendo los límites máximos permisibles como se muestra en la figura 35.

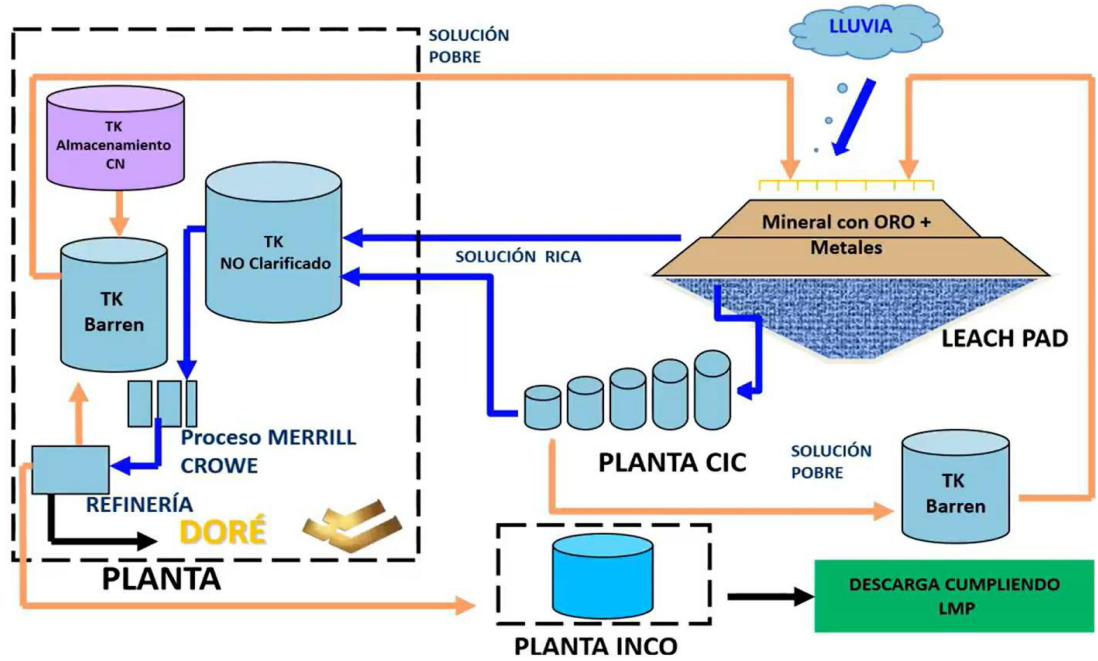


Figura 37. Circuito cerrado del uso de cianuro y su detoxificación cuando hay un exceso de agua en el sistema. Elaboración Propia.

Como parte del compromiso con la sostenibilidad ambiental, se realiza un seguimiento riguroso del impacto generado en el entorno, procurando mejorar de manera continua aspectos como el consumo energético, la eficiencia operativa, las emisiones, el uso del agua, la protección de la biodiversidad y la gestión de residuos, contribuyendo así a enfrentar el cambio climático. Para asegurar una gestión ambiental responsable, la organización dispone de certificaciones internacionales voluntarias como la ISO 14001:2015 y el Código Internacional para el Manejo del Cianuro.

4.1.1.7 Sistema de Seguridad y Salud

Todo el personal involucrado deberá estar capacitado y autorizado en la operación con soluciones cianuradas debiendo aprobar con un mínimo de Nota 16 en los cursos cianuro I, cianuro II y cianuro III, asimismo deberán verificar obligatoriamente el MSDS del Cianuro de Sodio, realizar el IPERC, check list pre-operacional, realizar cartilla de controles que salvan vidas antes de empezar la tarea.

Durante la operación se puede presentar valores puntuales de HCN > 4.7 ppm, esto debido a un PH< 9.8 en la solución de alimento al circuito de adsorción, para ello se deben de tomar lo siguientes controles:

- Se deberá monitorear continuamente el HCN, este se revisará en línea tanto en los paneles de campo como en el DELTA V, así mismo el operador deberá contrastar el valor de HCN con el medidor portátil durante la actividad, el valor de HCN debe ser menor a 4.7 ppm, de lo contrario el personal deberá evacuar el área, hasta obtener valores por debajo del límite permisible, si el valor está por debajo se retornará al área y así mismo se podrá continuar con la actividad, monitoreando constantemente.

  Los equipos fijos de monitoreo de HCN Drager cuentan con dos lámparas indicadoras:

  Lámpara amarilla: Señala una alarma de advertencia cuando la concentración de HCN supera los 3.7 ppm.

  Lámpara roja: Indica una alarma crítica cuando la concentración de HCN sobrepasa los 4.7 ppm, situación en la que se debe proceder a la evacuación, el personal se retira del área y se comunica al área de respuesta de emergencias del evento.

Ambas lámparas se apagan automáticamente cuando los valores de HCN descienden por debajo de los límites configurados.





Equipo Fijo: Drager **Equipo Portatil: GasBadge**

- En caso de que el pH sea < a 9.8 el operador comunicara al Control Room que se adicionara lechada de cal hasta alcanzar el pH > a 9.8 y estabilizar.
- El personal debe de contar con los EPP´s obligatorios: casco, lentes, zapatos de seguridad, guantes, traje tipo C (Tyveck), orejeras y respiradores Fullface.

4.1.2 Interpretación

El comportamiento de la interacción de ambas variables no agrupa todos los resultados en una tendencia lineal, por otro lado, una evaluación de regresión tradicional no nos proporcionaría un modelo que pueda predecir correctamente el tipo de datos que se manejan, esto debido a la naturaleza de estos ya que son operacionales. Es por ello que se ve por conveniente la utilización de un Método de Regresión avanzado denominado Bosques de Decisión; con una configuración de 300 árboles de 8 ramas en profundidad de análisis.

De acuerdo con la información recaudada de la Planta en cuestión, los rangos en los que se opera el circuito de Adsorción son relativamente amplios, tanto para el pH (5.5 – 10.5) como para la concentración de cianuro libre (10 – 60 ppm). La realización de pruebas de Cinética de Adsorción en amplios rangos como los mencionados supondría una planificación de varias pruebas que a la vez conlleva en cada una de ellas varios análisis por distintos metales; por ello se ha visto por conveniente la utilización de herramientas de manejo de datos para reducir el rango de análisis y realizarlo en puntos que resulten específicos. Se plantea una simulación de Diseño Factorial completo de 02 factores con 06 niveles para cada uno, haciendo un total de 36 pruebas, esto con el

objetivo de evaluar los rangos mencionados anteriormente para las 02 variables. La configuración generada por el software Minitab son utilizados para introducirlos en el Modelo generado para la predicción por el Método de Bosques de Decisión desarrollado en lenguaje de programación Python – Spyder, los resultados de la simulación son llevados al esquema del Diseño Factorial, como resultado se observa en la Figura 29 la variación del pH controla la adsorción del complejo cianurado de oro en primera instancia, a medida que aumenta el pH desde 6.5 hasta 8.0 aproximadamente la Recuperación es más rápida, es decir, la velocidad de adsorción es mayor, conforme se acerca a valores de 9.5 – 10.0 la velocidad decrece y se sostiene en sus valores altos, de ahí en adelante la Recuperación crece lentamente a partir de 10.5, valor a partir del cual se tendría que evaluar la rentabilidad de sostener estos altos de pH. Por otro lado, la concentración de cianuro libre es una variable que optimiza esta adsorción ya que a medida que aumenta el perfil de la Recuperación de oro se ve favorecida sobre todo en el rango de 30 – 40 ppm, concentraciones superiores podrían presuponer una mejora del perfil de recuperación, pero al igual que el pH, esto va de la mano con la cantidad de insumos requeridos y la rentabilidad.

La interacción de la concentración del cianuro libre con la mejor recuperación del complejo cianurado de oro es indirecta, ya que como podemos observar en la Figura 33, a medida que el valor de esta variable se incrementa la adsorción del complejo cianurado de cobre decrece sobre todo en el rango de 40 – 50 ppm, esto podemos atribuirlo a la formación de complejos de mayor tamaño, lo que genera que no pueda adsorberse en la superficie del carbón activado. El efecto del pH sobre la adsorción del complejo de cobre también resulta en un favorecimiento con el incremento de esta variable, es decir, ambos perfiles de adsorción son establecidos mediante el control de esta variable, sin embargo en el rango de 9.0 – 10.0 la adsorción decrece, mientras que por debajo y encima de estos valores se produce una mayor recuperación de este metal, presumiblemente es esta la razón por la que se prefiere realizar este proceso en este rango de pH, para favorecer a la adsorción del complejo cianurado de oro y controlar la adsorción del complejo cianurado de cobre.

Estos rangos y comportamientos de los perfiles de la adsorción de estos metales son estimados, ya que como se menciona anteriormente, estos han sido construidos en función a una regresión estadística robusta que tiene como base datos operacionales.

Sin embargo, nos da un fuerte soporte en la estimación de configuraciones de estas dos variables para ser validadas las hipótesis planteadas y poder generar una concepción más concreta de lo que ocurre desde un punto de vista termodinámico y de la cinética que se desarrolla durante este proceso.

Las pruebas en laboratorio se realizan bajo las condiciones promedio de Planta en lo que refiere a la concentración de oro, plata y cobre que llegan en la solución Pregnant al ingreso del circuito de Adsorción en columnas; como se observa en el Cuadro 12, se han realizado 02 pruebas variando la concentración de oro (ppm), esto con el objetivo de analizar la velocidad de adsorción que tienen los complejos cianurados de oro y cobre presentes en la solución en condiciones típicas de operación (Prueba 01) y cuando este valor decrece por la eficiencia de extracción o tratamiento de minerales con baja ley en la etapa de lixiviación (Prueba 02).

La adsorción sobre el carbón tiene una cinética mayor en una etapa inicial, esto se debe a que la carga se esté realizando en zonas en las que el carbón tiene una mayor distribución de macroporos y mesoporos, esta interacción nos permite establecer un primer régimen termodinámico en el cual se puede estimar el equilibrio de la velocidad de adsorción en una primera instancia; conforme pasa el tiempo la velocidad de adsorción disminuye y este proceso tiene ocurrencia en zonas con microporos, que requieren de un mayor tiempo, por lo tanto en esta interacción es difícil determinar un punto de equilibrio para la interacción de la solución cianurada y el carbón. Este perfil se puede observar para ambas pruebas y en la adsorción de ambos complejos cianurados, sin embargo, la configuración de distintos valores de pH y concentración de cianuro libre nos ha permitido validar y delimitar límites que en primera instancia nos permiten sostener una recuperación óptima:

- En la Prueba 01 la velocidad de Adsorción del complejo cianurado de oro aumenta de manera directamente proporcional con el pH (Ver Figura 33), esta velocidad es mayor a partir de 7.5 [0.05 (mgAu/gC)/hr] hasta 9.5 [0.119 (mgAu/gC)/hr], de acuerdo al análisis estadístico realizado la Recuperación de oro (Figura 24) presenta un aumento desde 66 – 77.5 % en este rango, de ahí en adelante para valores de 10.5 la Recuperación aumenta lentamente hasta 80% y máximo hasta 82.5% con un incremento de 30 a 40 ppm en

concentración de cianuro libre, más por el contrario si sostenemos este alto pH y bajamos la concentración de cianuro libre a valores mínimos de 11 ppm la velocidad de Adsorción para el oro disminuye [0.055 (mgAu/gC)/hr] y aumenta la velocidad de Adsorción del cobre [9.57 (mgCu/gC)/hr] lo que conlleva a una alta Recuperación de 33% de este metal; el mejor control de la velocidad de Adsorción de este complejo se logra en valores de pH desde 7.5 [5.48 (mgCu/gC)/hr] hasta 9.5 [3.97 (mgCu/gC)/hr] con una concentración de 30 a 40 ppm de cianuro libre la Recuperación máxima esperada es de 30%.

- En la Prueba 02 la velocidad de Adsorción del complejo cianurado de oro aumenta de manera directamente proporcional con el pH(ver Figura 35), en el rango de 7.5 a 9.5 es donde ocurre una mayor gradiente, desde 0.091 a 0.113 [(mgAu/gC)/hr] con el incremento de la concentración de cianuro libre de 30 a 40 ppm; si bien es cierto la gradiente disminuye si se aumenta el pH hasta 10.5, la velocidad sigue en crecimiento [0.122 (mgAu/gC)/hr] aún con la disminución de la concentración de cianuro libre a 11 ppm, más sin embargo, la velocidad de adsorción del complejo cianurado de cobre se incrementa [4.34 (mgCu/gC)/hr] en esta última condición ya que en el rango de pH de 7.5 a 9.5 se observa un claro decrecimiento de la velocidad de Adsorción de 7.74 a 2.11 [(mgCu/gC)/hr] mediante un incremento de la concentración de cianuro libre de 30 a 40 ppm.

4.1.3 Discusión

A partir de la evaluación estadística de la Recuperación (%) de oro y cobre, y la evaluación experimental de la Cinética de Adsorción de los complejos cianurados de estos metales se ha podido validar el aumento de la Recuperación (%) de oro en el circuito de Adsorción con el incremento del pH y la concentración de cianuro libre en la solución cianurada, que interactúa con el carbón distribuido en las columnas de Adsorción. En rangos de pH de 5.5 a 8.5 se promueve la adsorción del complejo cianurado de cobre hasta su valor más alto estimado (33%) principalmente por la presencia del dicianuro de cobre que por su tamaño tiene una fácil difusión en la superficie del carbón, en adelante la inhibición de esta acción está dada principalmente por el control del pH, el mismo que se puede optimizar y controlar de una mejor

manera mediante el incremento de la concentración de cianuro libre entre 30 y 40 ppm, esto da lugar a la formación del tricianuro de cobre como principal complejo en la solución, el mismo que por su mayor tamaño tiene una menor difusión en el carbón y la adsorción se ve reducida alrededor del 30% de recuperación. Por otro lado, la adsorción del complejo cianurado de oro se promueve con una mayor velocidad de adsorción en el rango de pH entre 7.5 y 9.5, concentración de cianuro libre entre 30 y 40 ppm, alcanzando una recuperación estimada del 80%.

La recuperación de oro y cobre (%) en la superficie de carbón se resumen en el comportamiento de la selectividad Au/Cu del proceso de Adsorción; independientemente de la Recuperación de oro, si la selectividad Au/Cu es baja (pH > 9, CN^-< 30ppm), la contaminación de cobre en el carbón se dará, lo que será perjudicial para etapas posteriores llegando a generar penalidades en el producto final. De manera que sostener una buena Recuperación de oro con una alta selectividad Au/Cu resulta conveniente para la operación, este incremento está principalmente controlado por la concentración de cianuro libre por encima de 40 ppm, como se menciona anteriormente, esto se debe a la formación de complejos cianurado de cobre de mayor tamaño, de esta manera aunque la velocidad de adsorción del complejo cianurado de oro se vea disminuida, la adsorción de los complejos cianurados de cobre se ven inhibidos.

Durante la evaluación, surge un evento que resulta de interés para profundizar en su análisis, está en relación con el incremento de la concentración de cianuro libre, cuando se encuentra en la transición de 20 ppm el perfil de Recuperación de oro (%) está considerablemente por debajo del perfil de 10 ppm y la velocidad de Adsorción de cobre se incrementa desde 9.57 a 14.02 [(mgCu/gC)/hr]. En la Prueba 02 también ocurre un evento similar, la velocidad de Adsorción de cobre alcanza su valor máximo [11.09 (mgCu/gC)/hr], no se tiene un perfil de la Recuperación de oro (%) para estas condiciones de operación, más de acuerdo con la similitud de ambos resultados de Cinética de Adsorción, presumiblemente también este por debajo del perfil de menor concentración de cianuro libre.

CONCLUSIONES

1. Mediante la utilización de herramientas de estadística avanzada para el análisis de datos de una operación continua de adsorción con carbón en columna (CIC), se ha determinado la influencia del pH y la concentración de cianuro libre en la solución de proceso como variables significativas y directamente proporcionales para alcanzar una óptima recuperación de oro en el carbón, dado que, en valores de pH mayores a 9.5 y concentraciones de cianuro mayores a 30 ppm la recuperación de oro alcanza un 82.5%.

2. El incremento de pH y la concentración de cianuro libre a valores superiores a 9.5 y 30 ppm respectivamente, promueve la generación de complejos cianurados de cobre de mayor tamaño (tricianuro de cobre), por lo que, la velocidad de adsorción de estos se ve disminuida a 3.97 (mgCu/gC)/hr y una recuperación máxima del 30%; por el contrario, operar a valores de pH menores a 7.5 y 20 ppm de concentración de cianuro libre promueven la generación de complejos cianurados de cobre de menor tamaño (dicianuro de cobre) que tienen una cinética de adsorción de 9.57 (mgCu/gC)/hr lo que aumenta la recuperación hasta un 33% de cobre en el carbón.

3. Independientemente de alcanzar valores altos de recuperación de oro, es importante el control de la selectividad Au/Cu por encima de 0.080, esto debido a la importancia de mantener el insumo principal del proceso (carbón activado) con la menor cantidad posible de contaminantes, para ello se ve conveniente sostener una operación con un pH mayor a 9.0 y concentraciones de cianuro libre mayores a 40 ppm; ya que como se mencionó, la generación de complejos cianurados de cobre de menor tamaño se ve desfavorecido en estos rangos.

4. La relación molar CN^-/Cu es el parámetro que nos permite controlar el grado de adsorción de los complejos cianurados de cobre sobre la superficie del carbón, esta inhibición se ve favorecida en valores superiores a 1.75, sosteniendo así una recuperación de cobre por debajo del 30%; esto es directamente influenciado por la concentración de cianuro libre presente en la

solución que actúa como medio para el proceso, el mismo que debe de ser igual o mayor a 40 ppm.

5. Resulta conveniente para el control de la adsorción, mantener la operación en valores de pH y concentración de cianuro libre en los cuales la velocidad de adsorción de los complejos cianurados de oro sea mayor y por el contrario los de cobre sea menor, de acuerdo con las pruebas de cinética realizadas, esta condición se da a un pH de 9.5 y concentración de cianuro libre de 40 ppm (CN^-/Cu = 1.75) obteniéndose una velocidad de adsorción de 0.119 (mgAu/gC)/hr y 4.0 (mgCu/gC)/hr respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. La relación molar CN^-/Cu utilizado aún está por debajo de las recomendaciones de la literatura revisada que ascienden a 4.0, en las condiciones revisadas se alcanza un máximo de 1.98 con el cuál la recuperación de oro está alrededor de 80% y la de cobre se controla hasta un 30%. Resultaría conveniente evaluar si elevar la relación CN^-/Cu conllevaría a una mayor recuperación de oro y a una menor de cobre, así mismo si esta sugerencia llegara a ser económicamente rentable en contraste con pérdidas de oro y la contaminación de cobre.

2. Si el control de la alta concentración de cobre en la solución Pregnant que llega al proceso de Adsorción no puede ser sostenible en el mismo, podría evaluarse si la separación de estos complejos es conveniente realizarla a la salida del circuito de Adsorción en la solución barren mediante técnicas de precipitación o electrólisis de modo que al recircularla a los PAD´s de lixiviación no se siga concentrando el cobre conjunto con el proveniente del mineral fresco.

3. Durante la evaluación surge un evento que resulta de interés para profundizar en su análisis, está en relación al incremento de la concentración de cianuro libre, cuando se encuentra en la transición de 20 ppm el perfil de recuperación de oro está considerablemente por debajo del perfil de 10 ppm y la velocidad de Adsorción de cobre se incrementa desde 9.57 a 14.02 (mgCu/gC)/hr, esto independientemente del pH, por lo que presumiblemente el complejo dicianuro de cobre es predominante en este rango y la operación se vería afectada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, J. (2011). *Épocas metalogenéticas de los yacimientos de oro, plata y cobre en el Perú: Producción, reservas y recursos y su implicancia en la exploración.* Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. https://hdl.handle.net/20.500.12544/3323

Arias, V., Coronado, R., Puente, L., & Lovera, D. (2005). Refractariedad de concentrados auríferos. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 8(16), 5–14. https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/493

Brent, J., & Atluri, V. (2007). Dissolution chemistry of gold and silver in different lixiviants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 4(1–2), 95–134. https://doi.org/10.1080/08827508808952634

Cañola, C., Gallego, A., & Bolívar, W. (2015). Caracterización mineralógica y mineralogía de procesos aplicada a la mina de veta "La Esperanza", ubicada en la vereda Cedeño parte alta del municipio de Támesis, Antioquia. *Revista Colombiana de Materiales*, (6), 54–68. https://doi.org/10.17533/udea.rcm.22874

Cervera, J., Neira, G., Molano, J., & Prieto, G. (2008). Caracterización mineralógica y química de los depósitos de relaves (colas de proceso) en los sectores auríferos de Cueva Loca (Buga) y El Retiro (Ginebra–Guacarí), departamento del Valle del Cauca. *Geología Colombiana*, 33, 47–56. https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/32046

Cousins, B. (2009). Operational practices to reduce copper and other metals loading onto activated carbon in heap leach CIC circuits. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*, 9–109. https://onemine.org

Dai, X., & Breuer, P. (2009). Cyanide and copper cyanide recovery by activated carbon. *Minerals Engineering*, 22(5), 469–476. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.007

Dai, X., Simons, A., & Breuer, P. (2012). A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. *Minerals Engineering*, 25(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.002

Elshin, V., & Golodkov, Y. (2022). The properties of electric double layer at activated carbon surface and their effect on gold and silver adsorption from cyanide solutions. *Tsvetnye Metally*, (11). https://doi.org/10.17580/tsm.2022.11.02

Fleming, C., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M., & Ashbury, M. (2011). Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. *Minerals Engineering*, 24(6), 484–494. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.021

Fu, Y., Chen, J., Xie, F., Cao, Z., & Wang, W. (2023). Adsorption of gold from copper–tartrate–thiosulfate solutions with ion-exchange resins. *Metals*, 13(8), 1443. https://doi.org/10.3390/met13081443

García, E., Camporredondo, J., Castruita, L., & Equihua, F. (2021). Principios termodinámicos y cinéticos de la cianuración de oro y sus efectos en el proceso. *CienciAcierta*, (19), 73–87. http://www.cienciacierta.uadec.mx/2021/04/02/principios-termodinamicos-y-cineticos-de-la-cianuracion-de-oro-y-sus-efectos-en-el-proceso-una-revision

Gasca, J. (2016). *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados.* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. http://hdl.handle.net/11627/4911

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Hilari, A. (2018). *Estudio de la adsorción con carbón activado para mejorar la recuperación del oro en la planta San Juan de Century Mining Perú S.A.C.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6720

Ilyas, S., & Lee, J.-C. (2018). *Gold metallurgy and the environment* (1.ª ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315150475

Kim, J., Kim, R., & Han, K. (2024). Advances in hydrometallurgical gold recovery through cementation, adsorption, ion exchange and solvent extraction. *Minerals*, 14(6), 607. https://doi.org/10.3390/min14060607

Lu, J., Dreisinger, D., & Cooper, W. (2002). Thermodynamics of the aqueous copper–cyanide system. *Hydrometallurgy*, 66(1–3), 23–36. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00081-6

Mahmood, N., Baqi, R., & Obaid, I. (2021). Physical and chemical adsorption and its applications. *International Journal of Thermodynamics and Chemical Kinetics*, 7(2), 1–8. https://doi.org/10.37628/IJTCK

Majuste, D., Ciminelli, V., & Souza, C. (2014). Effects of surface properties of activated carbon on the adsorption mechanism of copper cyanocomplexes. *Hydrometallurgy*, 142, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.003

Marsden, J., & House, L. (2009). *The chemistry of gold extraction* (2.ª ed.). Society for Mining, Metallurgy & Exploration. https://doi.org/10.1007/BF03215543

Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Boletín estadístico minero.* https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4097457/BEM%2012-2022.pdf?v=1675805688

Moreno, J., & Giraldo, L. (2008). Propiedades termodinámicas del proceso de adsorción de Pb^{2+} sobre carbón activado a diferentes pH. *Información Tecnológica*, 19(5), 61–72. https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3923it.07

Moscoso, H. (2018). *Estudio del proceso de desorción para mejorar la recuperación del oro en la planta de Macdesa.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7206

Msumange, D., Yazici, E., Celep, O., & Deveci, H. (2021). The effectiveness of adsorbents for selective recovery of gold from copper-bearing cyanide leach solutions. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 60(1), 21–30. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1297261

Ramírez, C., & Sánchez, Y. (2016). *Influencia del tiempo de lixiviación y concentración de NaCN sobre el porcentaje de recuperación de Au mediante agitación en pulpa de un mineral aurífero procedente de Minera Danzing - Áncash.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. https://hdl.handle.net/20.500.14414/8791

Rivas, C., Núñez, O., Longoria, F., & González, L. (2014). Isoterma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO_3. *Saber*, 26(1), 43–49. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622014000100008

Rojas, N. (2003). *Recuperación de oro y plata desde residuos ferríticos mediante cianuración.* [Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción]. https://repositorio.udec.cl/handle/11594/1778

Rojas, R. (2016). *Estudio de investigación para la cianuración de un mineral complejo con alto contenido de hierro.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3209

Sayiner, B., & Acarkan, N. (2014). Effect of silver, nickel and copper cyanides on gold adsorption on activated carbon in cyanide leach solutions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(1), 277–287. https://doi.org/10.5277/ppmp140123

Soto, A., Leguía, J., & Bustamante, J. (2020). Influencia mineragráfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la Minera Qero's Gold de Paucartambo-Cusco. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 23(46), 139–146. https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.19190

Souza, C., Majuste, D., Dantas, M., & Ciminelli, V. (2014). Selective adsorption of gold over copper cyanocomplexes on activated carbon. *Hydrometallurgy*, 147–148, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.017

Sulfo Química S. A. (2003). *Carbón activado: Norma técnica colombiana.* https://www.itm.edu.co/wp-content/uploads/Laboratorios/materiales-polimericos/Polvo-de-carbon-activado-Sulfo-quimicas.pdf

Tauetsile, P., Oraby, E., & Eksteen, J. (2019). Activated carbon adsorption of gold from cyanide-starved glycine solutions containing copper. Part 1: Isotherms. *Separation and Purification Technology*, 211, 594–601. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.024

Tupiza, J. (2019). *Tecnologías limpias para el aprovechamiento de depósitos detríticos (oro aluvial) ubicados en la provincia del Napo.* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19816

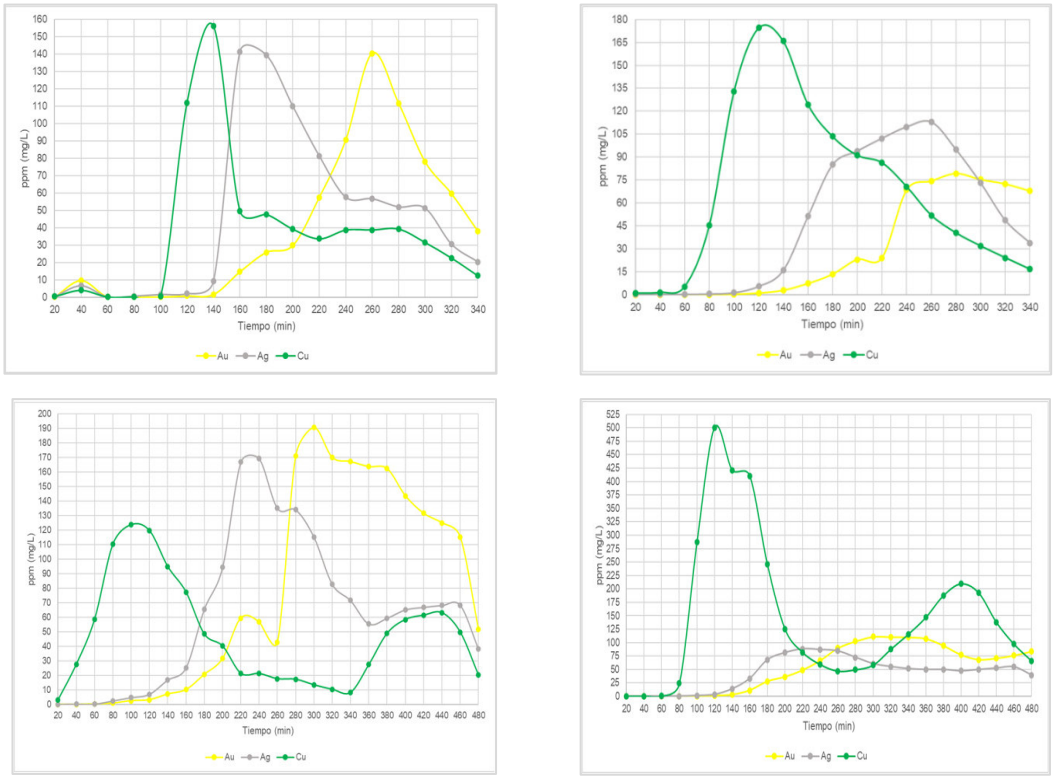
Vargas, C., Navarro, P., Mejía, E., & Hernández, P. (2022). Aurocyanide adsorption onto granular activated carbon impregnated with SDS anionic surfactant. *Gold Bulletin*, 55, 134–143. https://doi.org/10.1007/s13404-022-00314-y

Xie, F., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2013). A review on recovery of copper and cyanide from waste cyanide solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 34(6), 387–411. https://doi.org/10.1080/08827508.2012.695303

Zegarra, G. (2018). *Optimización del proceso de desorción, electrodeposición de la planta La Joya Mining S.A.C.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6480

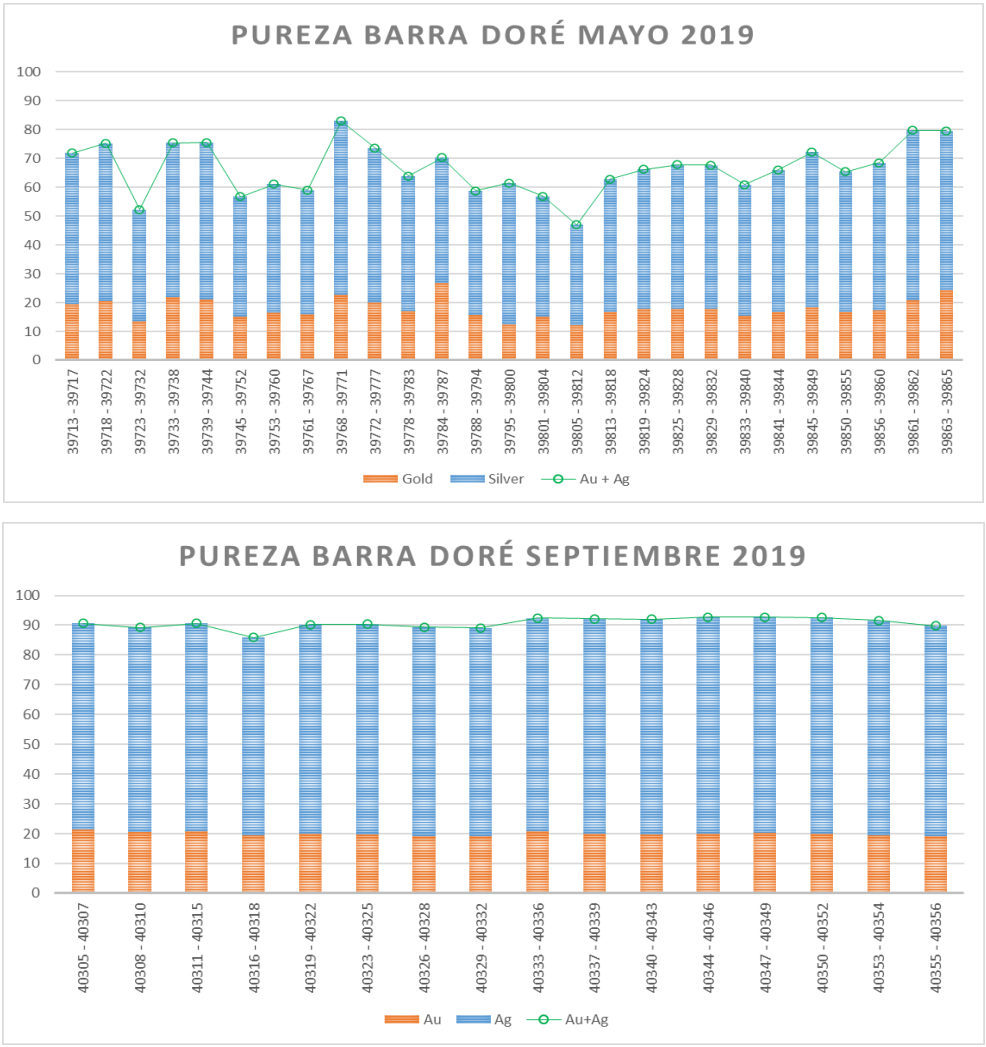
ANEXOS

Anexo 1: Pruebas de desorción



Nota: Curvas de desorción para carbón cargado en un promedio de 450 ppm Au y 746 ppm Cu, se verifica en todas las gráficas que el Cu es el primer metal en desorberse. En el proceso de desorción se genera una solución rica con un promedio de 25 ppm Au y 576 ppm Cu, esta solución es transferida hacia el proceso Merrill Crowe para el proceso de precipitación.

Anexo 2: Pureza de barras doré



Nota: En los dos gráficos se presenta el % de pureza de las barras doré como producto final del proceso. Debido al alto contenido de cobre en la solución rica que se obtiene del proceso de desorción y luego se precipita en Merrill Crowe, durante el proceso de fundición no se logra eliminar el cobre y la pureza de las barras doré (Au+Ag) bajan hasta 47% para el mes de mayo del 2019. Luego de identificar la causa y realizar el control de pH y cianuro en el circuito de adsorción el cobre se adsorbe en menor cantidad y se obtiene menos cobre en la solución rica, y menos precipitación en Merrill Crowe, por consecuencia las barras doré logran tener una pureza (Au+Ag) hasta 93% para el mes de septiembre 2019.

Anexo 3: Gestión de Responsabilidad Social

Las actividades de operación en la unidad minera generan aguas residuales industriales que son tratadas antes de su descarga al cuerpo receptor, para soluciones cianuradas el tratamiento se realiza en la Planta de Destrucción de cianuro (conformado por el sistema détox, la planta de tratamiento secundario y la planta de osmosis inversa) la solución tratada es enviada a la poza de limpieza o poza de sedimentación desde donde son descargados al ambiente a través del punto autorizado. El sistema también permite descargar mediante tubería y bombeo la solución tratada desde la poza de limpieza.

El monitoreo de aguas en los puntos de control establecido dentro del Programa de Monitoreo Ambiental aprobado en el EIA, es realizado por personal de laboratorio externo cumpliendo los procedimientos de muestreo establecidos por el Protocolo de Monitoreo de Agua y el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de Agua en Cuerpos Naturales de Agua Superficial de la Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos de ANA.

De igual manera, se realizan monitoreos diarios internos por personal del área y en diferentes ocasiones en coordinación con el área de Relaciones Comunitarias se realizar monitoreos participativos con los representantes de las comunidades.

El monitoreo incluye la medición de parámetros fisicoquímicos de campo como pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos; utilizando equipos multiparámetros. Adicionalmente se realizan mediciones de caudal en los puntos de monitoreo utilizando correntómetros o métodos de medición manual.



Monitoreo Participativo

Asimismo como parte de los mecanismos de participación ciudadana aprobados en el Plan de Participación Ciudadana del EIA, la unidad minera recibe visitas guiadas de los diferentes grupos de interés del área de influencia directa, con el objetivo de informar las medidas de manejo ambiental implementadas en el marco de los instrumentos de gestión ambiental, informar sobre el manejo y tratamiento de aguas, informar sobre el manejo responsable del cianuro, hacer de conocimiento nuestras actividades de gestión social.



Visita Guiada