

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MATALURGICA Y DE**  
**MATERIALES**



**TESIS:**

**“LIXIVIACIÓN DE ORO EMPLEANDO UNA SOLUCIÓN DE  
FERROCIANURO DE POTASIO DE UN CONCENTRADO  
SULFURADO AURÍFERO DE LA ZONA DE APURIMAC”**

**PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:**

**FRAGA VARILLAS, Jhaquelinne Lisset**

**TAIPE PEREZ, Marco Antonio**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERA(O) METALURGISTA Y DE MATERIALES**

**HUANCAYO – PERÚ**

**2024**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES**

Av. Mariscal Castilla N° 3909-4089 El Tambo Huancayo  
Ciudad Universitaria - Carretera Central Km. 5

**ACTA N° 031-2024-FIMM-UNCP**

**SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Siendo las 12:30 horas del 03 de diciembre del año dos mil veinticuatro, en la Sala de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad Nacional del Centro del Perú, con la presencia de los señores Miembros del Jurado, conformado por los docentes:

Presidente : Dr. Cesar Paul ORTIZ JAHN  
Secretario : Ms. Jean Pierre ESPEZA GAVILÁN  
Jurado : Dr. Felipe RUPAY GÜERE  
Jurado : Dr. Héctor Luis GILBONIO ZARATE  
Jurado : M.Sc. Raúl Wladimir CARRIÓN CORNEJO

El acto de sustentación de la tesis titulada: "LIXIVIACIÓN DE ORO EMPLEANDO UNA SOLUCIÓN DE FERROCIANURO DE POTASIO DE UN CONCENTRADO SULFURADO AURÍFERO DE LA ZONA DE APURIMAC", se inicia con la lectura de la Resolución N° 031-2024-DFIMM-UNCP, donde indica que el Bachiller: FRAGA VARILLAS Jhaqueline Lisset y TAÍPE PEREZ Marco Antonio, se encuentran aptos para Sustentar su informe de tesis, para optar el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALURGISTA Y DE MATERIALES.

Hechas las observaciones del caso, una vez realizadas estas, el señor presidente del jurado dispuso que los bachilleres expositores abandonen la sala para la deliberación del jurado pasándose a la votación secreta, con el siguiente resultado:

*APROBADO POR UNANIMIDAD*

El presidente, ordenó a los sustentantes que se sirvan pasar al estrado a fin de conocer el resultado, el mismo que fue anunciado por el presidente, quien sugirió continuar con los trámites respectivos para la obtención del título Profesional de Ingeniero Metalurgista y de Materiales.

Dado por concluido el acto de sustentación a las...../3.30 horas del mismo día.

Dr. Cesar Paul ORTIZ JAHN  
Presidente

Ms. Jean Pierre ESPEZA GAVILÁN  
Secretario

Dr. Felipe RUPAY GÜERE  
Jurado

Dr. Héctor Luis GILBONIO ZARATE  
Jurado

Raúl Wladimir CARRIÓN CORNEJO  
Jurado



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERU**  
**FACULTAD DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES**



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA  
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

Huancayo, 01 de octubre del 2024

**Oficio N° 040-2024-CPOJ-FIMM**

**Dr.**

**JAIME ALFONZO GONZALEZ VIVAS**

Director de la Escuela Académico Profesional de la FIMM

**Presente.-**

**ASUNTO : REMITO INFORME DE ORIGINALIDAD DEL SOFTWARE (TURNITIN) DE TESIS  
PARA TÍTULO PROFESIONAL**

**INTERESADO : FRAGA VARILLAS, JHAQUELINNE LISSET  
: TAIPE PEREZ, MARCO ANTONIO**

Me dirijo a usted, a fin de hacerle llegar un cordial saludo y al mismo tiempo informarle el procedimiento de TURNITIN de la Tesis Tituladas "**LIXIVIACIÓN DE ORO EMPLEANDO UNA SOLUCIÓN DE FERROCIANURO DE POTASIO DE UN CONCENTRADO SULFURADO AURIFERO DE LA ZONA DE APURIMAC**" presentado por los bachilleres:

**FRAGA VARILLAS, JHAQUELINNE LISSET  
TAIPE PEREZ, MARCO ANTONIO**

Con la finalidad de emitir el informe de originalidad y habiendo revisado la tesis en mención con el software (**TURNITIN**), se ha obtenido como resultado un **19%** de similitud, dando la conformidad respectiva y remitiendo los archivos digitales del software para la culminación del trámite respectivo.

Sin otro en particular, aprovecho la oportunidad para expresarle las muestras de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente,

**Dr. CESAR PAÚL ORTIZ JAHN**  
**DOCENTE ASESOR- FIMM**

c.c. Archivo

# TESIS FRAGA Y TAIPE

## INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

9%


TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 1 | Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru<br>Trabajo del estudiante | 6%  |
| 2 | repositorio.uncp.edu.pe<br>Fuente de Internet                                   | 4%  |
| 3 | miningpress.com<br>Fuente de Internet   | 2%  |
| 4 | www.clubensayos.com<br>Fuente de Internet                                       | 1%  |
| 5 | eiti.org<br>Fuente de Internet  | 1%  |
| 6 | hdl.handle.net<br>Fuente de Internet  | 1%  |
| 7 | www2.mdpi.com<br>Fuente de Internet   | 1%  |
| 8 | idoc.pub<br>Fuente de Internet  | <1% |



Dr. CESAR PAÚL ORTIZ JAHN  
DOCENTE ASESOR

|   |   |      |
|---|---|------|
| 9   | Submitted to Universidad Catolica Los Angeles de Chimbote<br>Trabajo del estudiante   | <1 % |
| 10  | <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 11  | <a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 12  | <a href="http://www.es.toptiontech.com">www.es.toptiontech.com</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 13  | <a href="http://kupdf.net">kupdf.net</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 14  | <a href="http://www.repositorio.ugto.mx">www.repositorio.ugto.mx</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 15  | <a href="http://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 16  | <a href="http://tangara.uis.edu.co">tangara.uis.edu.co</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| <br><b>Dr. CESAR PAÚL ORTIZ JAHN</b><br><b>DOCENTE ASESOR</b> |   |      |
| 17  | <a href="http://issuu.com">issuu.com</a><br>Fuente de Internet  | <1 % |
| 18  | Ziyuan Liu, Jue Kou, Yi Xing, Chunbao Sun.<br>"Recovery of Gold from Ore with Potassium Ferrocyanide Solution under UV Light",<br>Minerals, 2021<br>Publicación | <1 % |

19

Submitted to Universidad Nacional de  
Colombia

Trabajo del estudiante

<1 %

20

[www.911metallurgist.com](http://www.911metallurgist.com)

Fuente de Internet

<1 %

21

MÓNICA PASCUAL PAYÁ. "Investigación sobre la mejora de la humectabilidad de films poliméricos de polietileno de baja densidad (LDPE) mediante plasma por descarga corona. Optimización de laminados con espumas de polietileno mediante procesos de laminación con adhesivos Hot-Melt para aplicaciones técnicas en el sector de automoción", Universitat Politecnica de Valencia, 2011

Publicación

<1 %

22

[repositorio.unap.edu.pe](http://repositorio.unap.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

23

[stutzartists.org](http://stutzartists.org)

Fuente de Internet

<1 %



Dr. CESAR PAÚL ORTIZ JAHN  
DOCENTE ASESOR

24

[www.tridonic.es](http://www.tridonic.es)

Fuente de Internet

<1 %

25

M. S. Pauletti. "DESUERADO DE COAGULOS DE LECHE FORMADOS POR ENZIMA COAGULANTE Y GLUCONO- $\delta$ -LACTONA DRAINING RATE OF MILK GELS FORMED BY

<1 %

COMBINACION OF RENNET AND GLUCONO-  
 $\delta$ -LACTONE DESUERADO DE COAGULOS DE  
LEITE FORMADOS POR ENZIMA  
COAGULANTE E GLUCONO- $\delta$ -LACTONA",  
CyTA - Journal of Food, 12/01/2005

Publicación

---

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo



**Dr. CESAR PAÚL ORTIZ JAHN**  
**DOCENTE ASESOR**

**ASESOR**

**Dr. CESAR PAUL ORTIZ JAHN**



## **DEDICATORIA**

A nuestros padres, cuyo constante apoyo y amor han sido el motor que nos ha permitido llegar hasta aquí. Su dedicación y sacrificios han sido fundamentales para nuestra formación y crecimiento. Les dedicamos esta tesis como un sincero agradecimiento por todo lo que han hecho por nosotros.

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros profesores y compañeros de la carrera de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, quienes han sido nuestra guía y apoyo a lo largo de este viaje académico. Su sabiduría y experiencia han sido esenciales para nuestro desarrollo como ingenieros. En especial, queremos destacar al Dr. Cesar Paul Ortiz Jahn., cuya orientación y retroalimentación han sido cruciales para el éxito de esta investigación.

Finalmente, queremos agradecer a la universidad por brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestras habilidades y conocimientos en un entorno académico de alta calidad. La carrera de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales ha sido un desafío emocionante y gratificante, y esperamos que nuestros logros reflejen la excelencia de la educación que hemos recibido aquí.

## INDICE

|   |      |
|---|------|
| PORTADA .....   | i    |
| ASESOR .....  | ii   |
| DEDICATORIA .....   | iii  |
| AGRADECIMIENTO .....  | iv   |
| INDICE .....  | v    |
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | ix   |
| INTRODUCCIÓN .....  | x    |
| RESUMEN .....   | xiv  |
| CAPITULO I .....  | 15   |
| GENERALIDADES .....   | 15   |
| 1.1. Aspectos generales de la Minería en el Perú en la actualidad ..... | 15   |
| CAPITULO II .....   | 20   |
| FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....                                   | 20   |
| 2.1. Planteamiento del problema .....                                   | 20   |
| 2.2. Formulación del problema .....                                     | 22   |
| 2.2.1 Problema general .....  | 22   |
| 2.2.2 Problemas específicos .....                                       | 22   |
| 2.3. Objetivos .....  | 23   |
| 2.3.1 Objetivo general .....  | 23   |
| 2.3.2 Objetivos específicos .....                                       | 23   |
| 2.4. Justificación .....  | 23   |
| 2.5. Planteamiento de la hipótesis .....                                | 24   |
| 2.5.1 Hipótesis general .....   | 24   |
| 2.5.2 Hipotesis específicas .....                                       | 24   |

|   |    |
|---|----|
| 2.6. Variables .....  | 24 |
| 2.6.1 Variables independientes.....   | 24 |
| 2.6.2 Variable dependiente .....  | 24 |
| CAPITULO III.....   | 25 |
| MARCO TEÓRICO .....   | 25 |
| 3.1. Fundamentación teórica.....  | 25 |
| 3.1.1 Fuentes de oro.....   | 25 |
| 3.1.2 Minerales lixiviables .....   | 25 |
| 3.1.3 Minerales de sulfuros de hierro.....                                      | 27 |
| 3.1.4 Minerales sulfurados de metales básicos .....                             | 28 |
| 3.1.5 Acerca del uso del cianuro en el beneficio de los minerales de oro.....   | 28 |
| 3.1.6 Proceso de extracción de oro usando cianuro .....                         | 29 |
| 3.1.7 Presencia de cianuro en el medio ambiente .....                           | 31 |
| 3.1.8 Formas de cianuro en solución acuosa .....                                | 32 |
| 3.1.9 Toxicidad del cianuro.....  | 33 |
| 3.1.10 Una revisión de la extracción de oro usando lixiviantes sin cianuro..... | 33 |
| 3.1.11 Ferrocianuros de sodio y potasio .....                                   | 37 |
| 3.1.12 Deshidratación .....   | 38 |
| 3.1.13 Irradiación .....  | 39 |
| 3.1.14 Pirólisis .....  | 39 |
| 3.2. Análisis del proceso propuesto.....  | 40 |
| CAPITULO IV .....   | 44 |
| METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.....                               | 44 |
| 4.1. Métodos de investigación .....   | 45 |
| 4.1.1 Materiales .....  | 45 |
| 4.1.2 Equipos.....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1.3 Método.....   | 45 |
| 4.2. Procedimiento experimental .....   | 46 |
| 4.2.1 Materiales y reactivos .....  | 46 |
| 4.2.2 Diseño experimental de lixiviación de mineral de oro.....                     | 54 |
| 4.2.3 Microbalanza de cristal de cuarzo con disipación (QCM-D).....                 | 55 |
| 4.3. Presentación y discusión de resultados .....                                   | 58 |
| 4.3.1 Metodología de superficie de respuesta y diseño de Box-Behnken.....           | 62 |
| 4.3.2 Proceso cinético de lixiviación de oro en Au sensor con PF por QCM-D<br>..... | 67 |
| 4.3.3 Análisis de composición de productos superficiales por XPS .....              | 69 |
| RECOMENDACIONES.....  | 77 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 78 |
| ANEXOS .....  | 80 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Principales componentes químicos de la muestra de ensayo (%)</i> .....                           | 46 |
| <b>Tabla 2</b> <i>Distribución espectral e intensidad relativa de lámpara de mercurio de alta presión</i> .....    | 52 |
| <b>Tabla 3</b> <i>Rangos seleccionados para valores codificados y reales de las variables independientes</i> ..... | 54 |
| <b>Tabla 4</b> <i>Variables independientes y sus niveles para el diseño de Box-Behnken</i> .                       | 63 |
| <b>Tabla 5</b> <i>ANOVA de los modelos ajustados para la extracción de oro</i> .....                               | 64 |
| <b>Tabla 6</b> <i>Comparación del valor predicho de extracción de oro y el valor de prueba</i><br>.....            | 67 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> <i>Ranking de producción de metales del Perú</i> .....  | 19 |
| <b>Figura 2</b> <i>Patrones XRD de la muestra</i> .....   | 47 |
| <b>Figura 3</b> <i>Estructura química de PF (Ferrocianuro de potasio)</i> .....   | 48 |
| <b>Figura 4</b> <i>Solubilidad de PF con respecto a la temperatura</i> .....  | 49 |
| <b>Figura 5</b> <i>Diagrama del dispositivo de reacción fotoquímica</i> .....   | 51 |
| <b>Figura 6</b> <i>Irradiancia vs. valor actual del dispositivo</i> .....   | 53 |
| <b>Figura 7</b> <i>Configuración instrumental de QCM-D</i> .....  | 57 |
| <b>Figura 8</b> <i>Número de iones de cianuro libres liberados en varias concentraciones de PF en etapas de tiempo (0–60 min) bajo irradiación ultravioleta de una lámpara de mercurio de alta presión de <math>10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}</math> (tamponada a pH 12)</i> .....   | 59 |
| <b>Figura 9</b> <i>Se evaluaron cinco intensidades de irradiación diferentes, todas con el mismo tiempo de reacción de 30 min (tamponadas a pH 12)</i> .....  | 60 |
| <b>Figura 10</b> <i>Gráficas de superficie de respuesta, gráficas de contorno correspondientes e interacciones entre pH (<math>X_1</math>), dosis (<math>X_2</math>) y temperatura (<math>X_3</math>) para extracción de Au bajo radiación ultravioleta de lámpara de mercurio de alta presión de <math>10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}</math>. (a) pH frente a dosis (b) pH frente a temperatura (c) dosis frente a temperatura</i> ..... | 65 |
| <b>Figura 11</b> <i>Cambio de frecuencia (<math>\Delta f</math>) y cambio de disipación (<math>\Delta D</math>) frente al tiempo de lixiviación a <math>1 \text{ mmol/L}</math> PF, pH = 12. a, b, c, d y e representan las etapas iniciales de adsorción, lixiviación, desorción y lavado. 1 y 2 indican que la solución PF y el agua desionizada ingresan al sistema, respectivamente</i> .....   | 68 |
| <b>Figura 12</b> <i>Amplio espectro de energía XPS de superficies iniciales y de disolución</i> .....   | 71 |
| <b>Figura 13</b> <i>Espectro XPS de alta resolución de Au 4f (a), C 1s (b), N 1s (c) y O 1s (d)</i> .....   | 73 |

## INTRODUCCIÓN

El debate en torno al uso de cianuro en la industria minera ha impulsado una considerable investigación sobre el desarrollo de alternativas más benignas para el medio ambiente. Durante más de 100 años, el cianuro ha ocupado un lugar destacado como reactivo de lixiviación en las minas de oro debido a su alta eficiencia y su costo relativamente bajo. Aunque Hagen descubrió por primera vez que el oro era soluble en cianuro en 1806, no fue hasta el trabajo de John Stewart MacArthur en la década de 1880 que finalmente se comprendió el valor del cianuro como reactivo de lixiviación para el tratamiento del mineral de oro. MacArthur, metalúrgico químico, obtuvo la patente británica número 14174, Proceso de obtención de oro y plata a partir de minerales, en 1887. Esta tecnología, llamada “cianuración”, obtuvo un éxito industrial inmediato en Nueva Zelanda en 1889 y en Sudáfrica en 1890. Se recuperaron 14 millones de dólares gracias a la cianuración durante los primeros cinco años de funcionamiento del proceso, que finalmente reemplazó por completo el procesamiento de cloración. En 1907, la producción anual mundial de oro se había duplicado debido al mayor uso de cianuro; continúa siendo hasta el día de hoy el método de lixiviación principal en la industria minera del oro.

Hoy en día, la industria química utiliza anualmente más de un millón de toneladas métricas de cianuro (que representan el 80% de la producción total) para la producción de productos químicos orgánicos como nitrilo, nailon y plásticos acrílicos. El 20% restante se utiliza para fabricar cianuro de sodio, una forma sólida de cianuro, del cual el 90% (es decir, el 18% de la producción total) se utiliza en operaciones mineras en todo el mundo con fines de recuperación de oro. Normalmente, en los procesos de lixiviación en tanques y en pilas se utilizan



soluciones diluidas de cianuro de sodio (NaCN), normalmente en el rango de 0.01 a 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón). Los iones cianuro (CN<sup>-</sup>) son los ingredientes activos en el proceso de lixiviación del oro, que disuelven el oro contenido en el mineral por complejación, formando una “solución cargada” de la cual luego se extrae el oro.

Sin embargo, una serie de accidentes ambientales recientes en varias minas de oro alrededor del mundo ha precipitado una preocupación generalizada sobre el uso de cianuro como reactivo de lixiviación. En la mayoría de estos casos, el cianuro proveniente de las operaciones de procesamiento ingresó al medio ambiente ya sea por fugas a través de desgarros y/o perforaciones en los revestimientos protectores de lixiviación en pilas, o por derrames de estanques de solución desbordados o áreas de almacenamiento de relaves. Por ejemplo, en Guyana, la noche del 19 de agosto de 1995 se liberaron unos 2.9 millones de m<sup>3</sup> de relaves y aguas residuales contaminados con cianuro debido al colapso de la presa de relaves en la mina Omai, contaminando el río Omai. Un desastre similar en escala ocurrió el 30 de enero de 2000 en Baia Mare, Rumania, donde se rompió la presa de relaves de Aurul S.A., lo que provocó la descarga de aguas residuales que contenían hasta 100 toneladas de cianuro que finalmente llegaron al río Danubio. Aunque el cianuro no se considera una toxina persistente, sí es un veneno mortal en altas concentraciones, lo que representa una grave amenaza para la salud de una amplia gama de entidades ecológicas. De hecho, la afirmación de que el cianuro no es persistente y no da lugar a problemas crónicos de salud o ambientales es algo engañosa. Como explica Moran, el ion CN<sup>-</sup>, que es ubicuo en la naturaleza, tiende a reaccionar fácilmente con innumerables agentes químicos y moléculas para formar cientos de compuestos diferentes, muchos de los cuales son letales

para los organismos. Para determinar la persistencia y toxicidad de la sustancia química, los químicos tradicionalmente han distinguido los complejos de cianuro “débiles” de los “fuertes”. Los complejos de cianuro débiles, a menudo denominados “disociables con ácido débil” o cianuro WAD, se descomponen y liberan iones de cianuro libres cuando se reduce el pH. El cianuro WAD incluye complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc, todos los cuales pueden disociarse en condiciones ácidas y producir cantidades ambientalmente significativas de iones de cianuro tóxicos. Los complejos de cianuro fuertes son más estables que el cianuro WAD y, por lo tanto, se degradan mucho más lentamente en condiciones naturales. Estos incluyen complejos de cianuro que contienen oro, cobalto y hierro, que son más estables en solución. La toxicidad del cianuro varía, siendo el cianuro libre el más tóxico y los complejos de cianuro menos tóxicos o no tóxicos.

En cantidades excesivas, el cianuro puede ser letal para los seres humanos y las especies animales porque se une a las enzimas transportadoras de hierro necesarias para que las células utilicen oxígeno, inhibiendo así que los tejidos corporales extraigan oxígeno de la sangre. El cuerpo rápidamente presenta síntomas de falta de oxígeno y asfixia. Los síntomas de la intoxicación por cianuro incluyen latidos cardíacos irregulares, convulsiones, dolores en el pecho y vómitos. Muchas especies de aves migratorias pueden sufrir daños en las instalaciones de lixiviación en pilas de las minas de oro, y algunas mueren inmediatamente después de consumir agua contaminada con cianuro. Los signos de envenenamiento agudo del ganado, incluidos temblores musculares iniciales, salivación, lagrimeo, defecación, micción y dificultad para respirar, generalmente ocurren dentro de los 10 minutos; la muerte puede seguir rápidamente. En el medio acuático, los peces

jóvenes de agua dulce, como los salmónidos, son especialmente susceptibles al envenenamiento por cianuro.

Es en el contexto de estos impactos ambientales que los grupos indígenas y los representantes de la comunidad de ONG en particular han presionado para que la industria minera desarrolle reactivos de lixiviación alternativos y menos tóxicos.

Considerando lo indicado anteriormente, se plantea como objetivo principal de esta tesis, Determinar el método alternativo a los reactivos convencionales tóxicos al medio ambiente que puede ser empleado para disolver el oro contenido en un concentrado sulfurado aurífero proveniente de la zona de Apurímac. y la hipótesis que se plantea es: El empleo del ferrocianuro de potasio, un precursor de cianuro no tóxico, como reactivo para la lixiviación de oro, es una alternativa al uso de los reactivos convencionales tóxicos en el beneficio de un concentrado sulfurado aurífero proveniente de la zona de Apurímac.

La estructuración de la tesis que se ha considerado incluyen un primer capítulo donde se indican las generalidades, el segundo la formulación de la investigación, el tercero considera el marco teórico y en el cuarto la parte fundamental que incluye la investigación experimental, al final se exponen las conclusiones y recomendaciones.

Por tanto, es nuestra finalidad la de cumplir con las expectativas técnicas y científicas de esta tesis y alcanzamos a nuestros jurados este trabajo de investigación para que nos permita obtener el título de Ingeniero Metalurgista y de Materiales.

*Los autores*

## RESUMEN

En este estudio, se aplicó ferrocianuro de potasio, un precursor de cianuro no tóxico en un ambiente oscuro y de reflexión difusa, como reactivo para la lixiviación de oro. Los iones de cianuro libres podrían liberarse gradualmente de la solución de ferrocianuro de potasio bajo la luz ultravioleta. Se realizaron experimentos de lixiviación, aplicando un diseño estadístico ortogonal en el mineral de oro para analizar el efecto del pH de la solución, la dosis de ferrocianuro de potasio y la temperatura en un sistema de solución de ferrocianuro de potasio bajo luz ultravioleta. Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (RSM) para explorar el papel del ferrocianuro de potasio en la lixiviación de oro; Los resultados optimizados mostraron que la recuperación de oro alcanzó el 67.74% en un ambiente altamente alcalino a un pH de 12.6, una dosis de ferrocianuro de potasio de 3.8 kg/t, 62 °C y una irradiación de 10 mW·cm<sup>-2</sup>.

La cinética de lixiviación de oro fue monitoreada por microbalanza de cristal de cuarzo con disipación (QCM-D) de solución de ferrocianuro de potasio. Los resultados indican que el proceso de extracción de oro se puede dividir en dos etapas: adsorción y lixiviación, y se forma una capa de adsorción rígida en la superficie de reacción. Además, el análisis de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) de la superficie del sensor de oro después de la reacción de lixiviación mostró que aparece  $-C\equiv N$  en la superficie del sensor de oro, y el oro se oxida para formar complejos de AuCN.

## **CAPITULO I**

### **GENERALIDADES**

El desarrollo de este trabajo de investigación fue desarrollado considerando la situación de la actividad minera metalúrgica en nuestro país, en tal sentido ponemos en consideración los siguientes aspectos.

#### **1.1. Aspectos generales de la Minería en el Perú en la actualidad**

De acuerdo a la información de Guía de inversión en minería y metales del Perú 2024/2025 publicado por el Gobierno Peruano, la minería es el sector dominante de la economía peruana. En los últimos 20 años ha habido importantes inversiones en el sector. Como resultado, ha habido un aumento en las actividades de exploración y desarrollo. Perú se encuentra entre los principales productores de productos minerales del mundo. Representan más del 60% de las exportaciones totales del país. El cobre y el oro son las exportaciones minerales más importantes por valor.

En los últimos años, el Perú ha logrado avances significativos en los indicadores sociales y de desarrollo, así como en el desempeño macroeconómico, con tasas de crecimiento del PIB muy dinámicas, reducción de la deuda externa, un tipo de cambio estable y baja inflación. La rápida expansión del Perú ha ayudado a reducir la tasa de pobreza nacional del 58,7% en 2004 al 27,5% de su población

total en 2022. La pobreza extrema disminuyó del 17,1% al 5,0% durante el mismo período. El Banco Mundial la clasifica como una economía de ingresos medios altos, aunque el PIB per cápita todavía está por debajo del promedio latinoamericano.

El país ha tenido una estabilidad económica continua desde principios de los años 1990. Si bien Perú sufrió en 2020 su peor contracción del PIB en tres décadas (-11,0%) debido al estallido de la pandemia de COVID-19, la actividad económica se ha recuperado a buen ritmo. La economía peruana se ha recuperado completamente a niveles previos a la pandemia.

En 2021, el PIB registró un crecimiento del 13,6%, convirtiendo al Perú en una de las economías con mayor crecimiento de la región. La recuperación de la actividad económica continuó en 2022, con una expansión del 2,7%, respaldada por mayores exportaciones y políticas económicas que se mantuvieron expansivas. Si bien la economía del Perú se contrajo un 0,5% en 2023, se está recuperando gradualmente y se espera que crezca a una tasa cercana al 3,0% en 2024.

El crecimiento positivo del país tiene mucho que ver con la competente política monetaria y fiscal aplicada desde principios de 2000. El endeudamiento público se redujo del 44,7% del PIB en 2004 a poco más del 30% en 2023, y el déficit fiscal anual continuó con una tendencia descendente hasta aproximadamente el 2,5% del PIB.

El compromiso del Perú con la disciplina fiscal y las políticas macroeconómicas prudentes han ido de la mano con la apertura del comercio y la inversión extranjera directa (IED), la independencia operativa del banco central y la maximización de los ingresos provenientes de los ricos recursos naturales y minerales del país, con un gasto que sigue el ritmo.

Entre los países que más invierten en Perú se encuentran España, Reino Unido, Estados Unidos y Chile. Casi una cuarta parte de la IED total es atraída por el sector minero y casi la mitad se divide entre los sectores financiero, de comunicaciones y energético.

Gracias a su sólido desempeño macroeconómico, las principales agencias de calificación (Standard & Poor's, Fitch y Moody's) elevaron la deuda soberana peruana al grado de inversión hace más de una década. Perú también se beneficia de fortalezas como el tamaño bastante grande de su mercado y su sector financiero sofisticado y bastante profundo.

Como país rico en recursos naturales, el Perú exporta bienes que están muy sujetos a la volatilidad de los precios, mientras que importa bienes industriales, cuyos precios son menos volátiles. El país se ha beneficiado de una mejora constante de sus términos de intercambio desde 2000, lo que ha tenido un impacto positivo en la balanza comercial. Además, el país ha participado en varios acuerdos comerciales bilaterales y multilaterales que han abierto nuevos mercados para sus exportaciones.

A pesar de las mejoras en la estabilidad macroeconómica del Perú, todavía enfrenta una serie de desafíos importantes que obstaculizan su potencial de competitividad.

Para que Perú siga creciendo de manera sostenida en el futuro, será necesario abordar una serie de debilidades. Esto incluirá mejorar la calidad del entorno institucional, mejorar la deficiente infraestructura del país (en particular su red de infraestructura de transporte insuficientemente desarrollada) y los estándares educativos. La excesiva dependencia del Perú de minerales y metales somete a la economía a las fluctuaciones de los precios mundiales.

Igualar o superar las tasas de crecimiento del PIB necesarias para emprender las inversiones y reformas necesarias dependerá principalmente de qué parte de los 53.130 millones de dólares en inversión minera para los próximos cinco a diez años realmente se lleve a cabo. Los niveles de pobreza y los ingresos y las desigualdades regionales siguen surgiendo como causa de malestar social en el país. No todos los peruanos han compartido los beneficios del crecimiento, a pesar de los esfuerzos del gobierno por aumentar el gasto social con el objetivo de reducir la pobreza en el Perú y mejorar la distribución de la riqueza en el país.

### **Importancia del sector minero del Perú**

El sector minero es y ha sido siempre muy importante para la economía nacional del Perú. Su reconocida tradición minera se remonta a la época preincaica, y se extiende por los períodos incaico, colonial y republicano. En cada una de esas etapas, la minería ha sido una de las principales actividades del desarrollo del país. Tradicionalmente ha aportado más de la mitad de los ingresos por exportaciones del país.

Perú es uno de los países más mineralizados del mundo. Actualmente alberga algunas de las principales empresas mineras del mundo, incluidas Glencore, Freeport Mc Mo Ran, Rio Tinto, Anglo American, MMG, Teck, Chinalco y Barrick Gold. Desde la liberalización de la industria en la década de 1990, se han desplegado inversiones locales y extranjeras para desarrollar importantes minas modernas.

Perú tiene una riqueza mineral bien reconocida. Se considera uno de los diez países más ricos en minerales del mundo. Es uno de los mayores productores de metales básicos y preciosos del mundo. Actualmente, es el segundo productor mundial de cobre, y también es un importante productor de oro, plata, zinc entre



otros minerales. Perú tiene el 12,0% de las reservas mundiales de cobre, el 3,9% de las de oro, el 15,3% de las de plata, el 9,5% de las de zinc, el 5,3% de las de plomo y el 2,8% de las de estaño, según los últimos datos publicados por el Servicio Geológico de Estados Unidos.

### Figura 1

#### *Ranking de producción de metales del Perú*

| <b>Mineral</b> | <b>América Latina</b> | <b>Mundo</b> | <b>Posición Top en el Mundo</b>                   |
|----------------|-----------------------|--------------|---|
| Copper         | 2                     | 2            | Chile (1st), Congo (3rd)                          |
| Zinc           | 1                     | 2            | China (1st), Australia (3rd)                      |
| Gold           | 2                     | 11           | China (1st), Australia (2nd), Russia (3rd)        |
| Silver         | 2                     | 3            | Mexico (1st), China (2nd)                         |
| Tin            | 1                     | 4            | China (1st), Burma (2nd), Indonesia (3rd)         |
| Lead           | 2                     | 5            | China (1st), Australia (2nd), U.S. (3rd)          |
| Molybdenum     | 2                     | 3            | China (1st), Chile (2nd)                          |
| Mercury        | 1                     | 3            | China (1st), Tajikistan (2nd)                     |
| Cadmium        | 2                     | 8            | China (1st), Republic of Korea (2nd), Japan (3rd) |
| Selenium       | 1                     | 9            | China (1st), Japan (2nd), Russia (3rd)            |

Source: US Geological Survey 2024

## **CAPITULO II**

### **FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La formulación de la investigación se plantea de acuerdo a la metodología científica.

#### **2.1. Planteamiento del problema**

A nivel mundial, las leyes de los yacimientos de cobre, plata y oro han ido cayendo y la mineralogía que los rodea se ha vuelto más diversificada y compleja. El proceso de cianuración para la producción de oro ha seguido siendo dominante durante más de 130 años debido a su selectividad y viabilidad en la industria minera. Por esta razón, la industria ha ido ajustando sus métodos para la extracción de oro, utilizando procesos y tecnologías más eficientes. A menudo, el oro se puede encontrar junto con el cobre y la plata en minerales y concentrados.

Por lo tanto, la aplicación de cianuro a este tipo de minerales puede presentar algunas dificultades, ya que la diversidad de minerales que se encuentran dentro de estos minerales puede hacer que la aplicación de cianuración se vuelva más complicada. En este trabajo de investigación pretendemos analizar algunos procesos y reactivos propuestos para el tratamiento efectivo de estos minerales.

La finalidad principal de este trabajo es la de verificar el uso del ferrocianuro de potasio como un agente lixiviantes para este tipo de minerales concentrados.

Además, este trabajo pretende presentar los retos más importantes a los que se enfrenta la industria actualmente, de modo que se puedan establecer procesos futuros que sean más eficientes y viables.

En los últimos años, se han utilizado y estudiado más procesos de lixiviación sin cianuro y contienen principalmente la técnica del tiosulfato, el método del polisulfuro, el proceso del halógeno, el método del tiocianato y el método de la tiocarbamida, etc. Se señalan las investigaciones de los antepasados: la termoestabilidad del tiosulfato es relativamente pobre y el consumo de reactivo es bastante grande cuando se empapa de oro, y es rebelde a la sensibilidad del efecto de temperatura, es difícil de aplicar en la práctica.

El polisulfuro no solo tiene mala estabilidad térmica, sino que también descompone gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno de generación de encuentro, el amoníaco y la contaminación ambiental es grave; Aunque es relativamente menos contaminante que el proceso de halógeno, es caro, es difícil de soportar; El método del tiocianato se lleva a cabo en medio ácido, debido a la naturaleza corrosiva del ácido, a la altura de los requisitos del equipo.

El método de tiocarbamida no solo es el costo más alto, y la tiocarbamida ha sido incluida en la lista de carcinógenos sospechosos en los últimos años, no se puede adoptar.

Que el método mencionado anteriormente, la toxicidad del hexacianuro de hierro tripotásico es pequeña y el precio bajo es más estable en ambientes alcalinos, bajo para equipos. Requisitos. Hay algunas investigaciones que muestran que en el extranjero el hexacianuro de hierro tripotásico como oxigenante, no solo no puede producir gases tóxicos en la cianuración extraída del oro, y puede aumentar el rendimiento de lixiviación del oro, sino que también puede recuperar el

hexacianuro de hierro tripotásico para desechar líquido a través de cierto procesamiento. También hizo que el erudito llevara tiourea alcalina y también usara el hexacianuro de hierro tripotásico como oxigenante en el oro, obteniendo un buen efecto. Pero el hexacianuro de hierro tripotásico extrae directamente la investigación dorada como agente de lixiviación y, sin embargo, no hay informes hasta el momento.

El método más común para lixiviar oro de minerales que contienen oro implica el uso de una solución a base de cianuro. Este proceso se conoce como lixiviación con cianuro o cianuración. Las soluciones de cianuro disuelven el oro del mineral formando complejos solubles. Si bien el ferrocianuro de potasio no participa directamente en la lixiviación del oro, está relacionado con los compuestos de cianuro que se utilizan en este proceso.

En la zona de Apurímac se ubican varios yacimientos de minerales auríferos, los cuales son acopiados, caracterizándose por estar mineralógicamente unido a los sulfuros, esta es la razón por lo que planteamos la siguiente problemática:

## **2.2. Formulación del problema**

### **2.2.1 Problema general**

¿Qué método alternativo a los reactivos convencionales tóxicos al medio ambiente puede ser empleado para disolver el oro contenido en un concentrado sulfurado aurífero proveniente de la zona de Apurímac?

### **2.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las condiciones específicas que requieren ser empleados para el uso de un nuevo reactivo en la lixiviación de minerales sulfurados auríferos?
- ¿Cómo se puede demostrar que el empleo de ferrocianuro de potasio puede ser efectivo para lixiviar los minerales auríferos?

## **2.3. Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general**

Determinar el método alternativo a los reactivos convencionales tóxicos al medio ambiente que puede ser empleado para disolver el oro contenido en un concentrado sulfurado aurífero proveniente de la zona de Apurímac.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar las condiciones específicas que requieren ser empleados para el uso de un nuevo reactivo en la lixiviación de minerales sulfurados auríferos.
- Demostrar que el empleo de ferrocianuro de potasio puede ser efectivo para lixiviar los minerales auríferos.

## **2.4. Justificación**

Este estudio de investigación se justifica tomando en consideración las siguientes razones:

El sur del Perú, especialmente en las regiones de Apurímac, Cusco, Ayacucho y Arequipa, presentan una geología que se caracteriza por poseer yacimientos de minerales sulfurados considerados polimetálicos con contenidos bastante apreciables de oro y plata, lo que hace que se procesen inclusive a escala pequeña, para obtener concentrados sulfurados por flotación, en plantas de beneficio convencionales, justificando así el desarrollo de este tipo de estudios de investigación.

El empleo de procesos combinados para la extracción metalúrgica, está siendo una alternativa bastante atractiva, si es que se consideran apropiadamente las rutas tecnológicas, de tal forma que se obtengan grados de concentrados o concentraciones adecuadas de las especies valiosas en los productos finales, y que se demuestre que dichos procesos sean económicamente viables.

Es importante seguir buscando nuevas alternativas a los reactivos de lixiviación convencionales, que mayormente son altamente contaminantes, afectando a los sistemas ecológicos.

## **2.5. Planteamiento de la hipótesis**

### **2.5.1 Hipótesis general**

El empleo del ferrocianuro de potasio, un precursor de cianuro no tóxico, como reactivo para la lixiviación de oro, es una alternativa al uso de los reactivos convencionales tóxicos en el beneficio de un concentrado sulfurado aurífero proveniente de la zona de Apurímac.

### **2.5.2 Hipotesis específicas**

- Las condiciones específicas que se requieren para el uso del ferrocianuro de potasio es bajo la radiación ultravioleta, la solución PF podría disociarse y liberar iones de cianuro libres poco a poco.
- La cinética de lixiviación con el empleo de ferrocianuro de potasio muestra que la liberación de iones de cianuro es un proceso de liberación gradual.

## **2.6. Variables**

### **2.6.1 Variables independientes**

- pH
- Dosis de ferrocianuro de potasio.
- Temperatura

### **2.6.2 Variable dependiente**

- Porcentaje de extracción de oro
- Presencia de ion cianuro

## **CAPITULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

Este marco teórico nos permitirá demostrar las hipótesis planteadas en la formulación de la investigación.

#### **3.1. Fundamentación teórica**

##### **3.1.1 Fuentes de oro**

Hay diferentes fuentes de oro en la tierra. Están influenciados por aspectos geológicos y su tratamiento económico es muchas veces complejo. Una clasificación común considera placeres, minerales de veta, minerales oxidados, sulfuros polimetálicos y fuentes especiales. Cada uno de estos tipos de fuentes de oro tiene una mineralogía especial que juega un papel importante en su tratamiento metalúrgico.

##### **3.1.2 Minerales lixiviables**

Este grupo de minerales también se denomina minerales de molienda libre y está formado por depósitos con contenidos de oro superiores a 5 g/t y la recuperación de extracción del proceso llega al 90%. Normalmente, el proceso de tratamiento del mineral sigue a la trituración, trituration, gravimetría y cianuración. Este tipo de minerales se encuentran en placeres, minerales de oro en vetas de

cuarzo, minerales oxidados, minerales ricos en plata, minerales de sulfuro de cobre y algunos minerales de sulfuro de hierro y sulfuro de arsénico.

Un aspecto muy importante es realizar estudios mineralógicos del comportamiento del oro en diversos minerales y productos metalúrgicos con el fin de clasificar el mineral y abordar cuestiones y problemas relacionados con el procesamiento del mineral de oro. Se utiliza ampliamente como herramienta de predicción y resolución de problemas en el procesamiento de mineral de oro y proporciona información útil sobre la selección de procesos, el desarrollo de diagramas de flujo, la mejora de la recuperación y la optimización del consumo de reactivos.

El comportamiento del oro de los distintos tipos de mineral se puede resumir de la siguiente manera: el oro en placeres, los minerales de oro en vetas de cuarzo y los minerales oxidados se liberan fácilmente y pueden recuperarse por gravedad, flotación y cianuración; el oro en los minerales de sulfuro de cobre suele ser de grano grueso y está asociado con minerales de cobre, y puede recuperarse para obtener un concentrado de cobre mediante flotación; El oro en los minerales ricos en plata suele estar presente como electrum o asociado con minerales de plata, que pueden recuperarse por gravedad, flotación y/o lixiviación directa con cianuro. El problema en la recuperación de oro de minerales ricos en plata es que la mayor reactividad de la plata puede influir en el desempeño metalúrgico del oro en procesos de flotación, lixiviación y recuperación mediante la formación de recubrimientos de sulfuro de plata o sulfato de plata.

Un buen ejemplo de mineral lixiviable es el depósito de Witwatersrand en Sudáfrica. Este depósito es la concentración aurífera más grande del mundo. Desde que fue descubierto en 1886, la producción estimada de oro es cercana a



las 45.000 toneladas, lo que representa aproximadamente el 40% de la producción total de oro en el mundo. En 1983, algunas zonas minadas tenían un contenido de oro de 10 g/t. Hoy en día el contenido de oro es menor. Este tipo de depósitos consisten en conglomerados litificados que contienen guijarros redondeados de cuarzo en una matriz de pirita, cuarzo fino, uraninita y oro. Ha habido algunas hipótesis que intentaron establecer una asociación entre el oro y el uranio orientadas a determinar si la uraninita es una sustancia química precipitada o no.

### **3.1.3 Minerales de sulfuros de hierro**

Es bien sabido que los minerales de sulfuro de hierro, la arsenopirita, la pirita y la pirrotita son minerales hospedantes del oro. La mayoría de las veces, el oro se puede extraer mediante cianuración y se puede clasificar como no refractario. Es posible elaborar un concentrado de sulfuro de hierro y oro y realizar una separación selectiva entre el mineral de hierro que contiene oro y los minerales de sulfuro de hierro que no tienen valor. Esta separación se practica por flotación en diferentes condiciones que se basan en condiciones de reducción-oxidación.

La presencia de arsenopirita puede ser un problema si el proceso seleccionado es flotación y cianuración debido al alto consumo de oxígeno. En este caso se pueden incluir pretratamientos especiales antes de la cianuración para minimizar este problema. Existe otro problema potencial cuando el producto final se obtiene por flotación y debe comercializarse. El problema es el alto contenido de arsénico. Si el mineral es refractario a la cianuración, el problema es más grave.

Si el yacimiento tiene pirrotita, el proceso de cianuración puede ser problemático debido a que este mineral de sulfuro de hierro absorbe muy fácilmente el oxígeno del medio ambiente. El proceso de lixiviación no es eficiente ni siquiera con consumos de cianuro.

### **3.1.4 Minerales sulfurados de metales básicos**

Los depósitos de cobre y sulfuros polimetálicos contienen oro en varias formas, libre o como partículas finas alojadas en sulfuros de hierro. En general, el oro asociado a un determinado metal base se recupera mediante flotación con el mineral, pero en ocasiones cuando el oro está alojado en pirita aparecen algunos problemas en el proceso. Básicamente, el oro libre grueso se puede recuperar mediante dispositivos gravimétricos antes del circuito de flotación. El oro fino debe recuperarse en un concentrado de cobre o cobre-plomo, pero nunca en el circuito de flotación de zinc porque el proceso extractivo del concentrado de cobre y plomo incluye la recuperación de metales preciosos. El tratamiento de concentrados de zinc no es una buena opción para los metales preciosos. Los concentrados de metales comunes reciben un pago extra por el oro y la plata. Entonces resulta atractivo intentar concentrar metales preciosos en concentrados de cobre y plomo.

En ocasiones, el oro puede ser alojado por pirita y su recuperación se logrará luego de recuperar cobre, plomo y zinc. En este caso se obtendrá un concentrado de pirita con contenido de oro y resulta atractiva la posibilidad de incluir un proceso de cianuración.

### **3.1.5 Acerca del uso del cianuro en el beneficio de los minerales de oro**

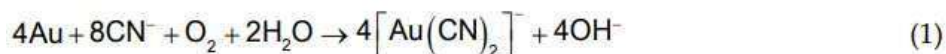
El cianuro se ha utilizado ampliamente en varias aplicaciones industriales, como la fotografía de galvanoplastia, el procesamiento de metales, la agricultura, los alimentos y la producción de productos químicos orgánicos, plásticos, pinturas e insecticidas. La fuerte afinidad del cianuro por metales como el oro y la plata lo hace adecuado para la lixiviación selectiva de estos metales a partir de minerales. El cianuro es muy tóxico; por lo tanto, existe la necesidad de regular y limitar la cantidad de cianuro que se puede descargar al medio ambiente. Se han

desarrollado tecnologías centradas en el uso de métodos físicos, químicos y biológicos para reducir la concentración de cianuro y compuestos de cianuro en las aguas residuales a los límites permisibles.

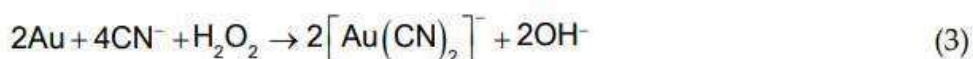
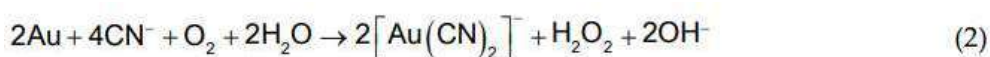
El cianuro es una sustancia extremadamente tóxica que se produce de forma natural y artificial. El cianuro se ha utilizado ampliamente en varias aplicaciones industriales, como la textil, los plásticos, las pinturas, la fotografía, la galvanoplastia, la agricultura, el tratamiento de metales y la minería. La alta afinidad de unión del cianuro por metales como el oro, el zinc, el cobre y la plata le ha permitido lixiviar selectivamente estos metales de los minerales.

### 3.1.6 Proceso de extracción de oro usando cianuro

La cianuración es la técnica de extracción de oro predominante desde finales del siglo XIX. La disolución de oro en cianuro acuoso se describe comúnmente utilizando la ecuación de Elsner [1]:



La disolución de oro es un proceso electroquímico en el que el oxígeno se reduce en la zona catódica, mientras que el oro se oxida en las regiones anódicas. La disolución total precisa de oro en soluciones alcalinas de cianuro aireado que tiene lugar en las regiones catódica y anódica se representa en las Ecs. (2) y (3)



Los principales méritos de la cianuración son la alta selectividad del cianuro libre para la disolución del oro en comparación con otros metales y una constante de estabilidad extremadamente alta ( $2 \times 10^{38}$ ) del complejo de cianuro de oro.

Las soluciones diluidas de cianuro de sodio dentro de los rangos de concentración de 0.01 a 0.05% se utilizan en las minas para la lixiviación de oro. El mineral de oro se somete a procesos físicos tales como molienda, molienda y separación por gravedad antes de la adición de cianuro de sodio acuoso para formar una lechada. El pH de la solución de extracción resultante se incrementa agregando cal apagada o hidróxido de sodio para evitar la generación de cianuro de hidrógeno tóxico. El pH de la suspensión se mantiene a no menos de 10.5 durante la cianuración para evitar una pérdida excesiva de cianuro por hidrólisis a través de la volatilización del cianuro de hidrógeno. El oxígeno, un componente importante durante la cianuración, se bombea continuamente a la suspensión, lo que resulta en la formación del complejo de dicianoaurato (I).

Se emplean varios métodos para la lixiviación con cianuro del mineral de oro. Sin embargo, la lixiviación por agitación se usa comúnmente para la mayoría de los minerales debido a su viabilidad comercial. La lixiviación generalmente se realiza en recipientes de acero y los sólidos se mantienen en suspensión mediante aire o agitación mecánica.

Luego, el complejo de oro  $\text{NaAu}(\text{CN})_2$  se extrae de las soluciones de lixiviación mediante adsorción en adsorbentes sólidos como el carbón activado o una resina de intercambio iónico sintética. El carbón activado es el adsorbente más utilizado para la extracción de oro debido a varias propiedades favorables, como alta capacidad de adsorción, buenas capacidades de reactivación, bajo costo, fácil disponibilidad, alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste.

os complejos de oro adsorbidos en carbón activado se eluyen para producir soluciones concentradas de oro de alta ley adecuadas para la recuperación final de oro. Eluyentes como hidróxido de sodio y solventes orgánicos en soluciones acuosas se han utilizado para la desorción o extracción de oro del carbón activado.

El oro se extrae de la solución a una forma sólida concentrada mediante un proceso denominado recuperación. La precipitación de zinc y la electroobtención se han utilizado para tratar soluciones concentradas de oro producidas a partir del decapado con carbón activado. ecuación (4) representa el proceso de reducción electroquímica del oro.



El oro recuperado del crudo se refina para producir lingotes crudos que contienen entre 90 y 99.5% de oro puro. La refinación implica tostar el oro crudo para convertir metales básicos como hierro, plomo, cobre y zinc en sus respectivos óxidos. A este proceso le sigue la fundición, que elimina las impurezas del óxido base en forma de escoria.

El lingote producido se puede mejorar aún más a metales del grupo del platino de mayor pureza mediante procesos como pirorrefinación, hidrorrefinación y electrorrefinación. Estos procesos de extracción dejan residuos tóxicos de cianuro.

### 3.1.7 Presencia de cianuro en el medio ambiente

El cianuro y compuestos relacionados se producen en niveles bajos a partir de plantas como el sorgo, la yuca, la patata, el brócoli, los anacardos y los albaricoques. El cianuro se encuentra en determinadas bacterias, hongos y algas. Las fuentes antropogénicas de liberación de cianuro también incluyen el humo de

los cigarrillos, los gases de escape de los automóviles y la producción de acrilonitrilo. La presencia masiva de cianuro en el medio ambiente se atribuye a las operaciones humanas en industrias y actividades metalúrgicas y mineras.

El cianuro se produce principalmente industrialmente en forma de cianuro de hidrógeno gaseoso o cianuro de sodio sólido o cianuro de potasio.

### **3.1.8 Formas de cianuro en solución acuosa**

Los compuestos de cianuros presentes en el agua generalmente se pueden clasificar en cianuro total, cianuro complejo y cianuro libre. Estos compuestos acuosos de cianuro existen como cianuros, cianatos y nitrilos simples y complejos. La forma más tóxica de cianuro es el cianuro libre, que existe como anión cianuro o como cianuro de hidrógeno (HCN), dependiendo del pH de la solución

El HCN predomina en sistemas acuosos con un pH inferior a 8.5 y puede volatilizarse fácilmente. A valores de pH más altos, el cianuro libre se encuentra principalmente en forma de anión cianuro. Los cianuros acuosos forman complejos con iones metálicos presentes en las aguas residuales industriales.

Estos complejos de metalocianuro exhiben diferentes estabilidades químicas y biológicas. Los complejos se clasifican como disociables en ácido débil (WAD) y disociables en ácido fuerte de acuerdo con la fuerza del enlace cianuro-metal. El cadmio, el cobre, el níquel y el zinc forman complejos disociables con ácidos débiles que se disocian fácilmente en condiciones ácidas.

Los complejos de cianuro con cobalto, hierro, plata y oro son disociables en ácido fuerte (SAD). Ambas formas de complejos se disocian y liberan cianuro libre. La estabilidad de estos complejos depende de varios factores como el pH, la intensidad de la luz, la temperatura del agua y los sólidos disueltos totales.

### **3.1.9 Toxicidad del cianuro**

El cianuro es extremadamente tóxico para los seres humanos y la vida acuática. A diferencia de los iones metálicos tóxicos, el anión cianuro no se acumula en el cuerpo, sino que instantáneamente provoca la muerte de la vida acuática y de los seres humanos en poco tiempo en dosis bajas al deprimir el sistema nervioso central. El cianuro se une fuertemente a los citocromos inhibiendo la cadena de transporte de electrones en las mitocondrias y la liberación de energía en las células. El cianuro de hidrógeno líquido o gaseoso ingresa al cuerpo por inhalación, ingestión o absorción cutánea. La exposición de animales al cianuro de hidrógeno tiene varios efectos, como dolores de cabeza, mareos, entumecimiento, temblores y pérdida de agudeza visual. Otros efectos tóxicos del cianuro incluyen agrandamiento de la glándula tiroides, problemas cardiovasculares y respiratorios.

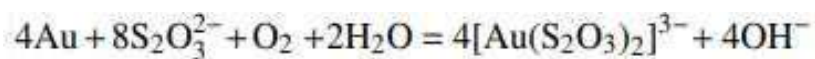
### **3.1.10 Una revisión de la extracción de oro usando lixiviantes sin cianuro**

Durante más de un siglo, la cianuración ha dominado la industria de extracción de oro debido a su efectividad, estabilidad química, bajo costo y tecnología de proceso madura. Sin embargo, la cianuración a menudo ofrece una eficiencia de extracción deficiente para minerales de oro refractarios que contienen cobre, arsénico, estibina y materia carbonosa. Además, el uso de cianuro implica un riesgo sustancial para el medio ambiente y la salud humana debido a su alta toxicidad.

En este contexto, se ha dedicado una extensa investigación a la exploración de técnicas ambientalmente amigables y económicamente viables para la extracción de oro. Como resultado, se han propuesto numerosos tipos diferentes de lixiviantes no cianuros como alternativas al cianuro, incluidos tiourea, bromo, cloruro, yodo-yoduro, aminoácidos alcalinos, polisulfuros y tiosulfato. En estudios

recientes, se ha descubierto que el tiosulfato y los polisulfuros, que son agentes que contienen azufre, son útiles para la lixiviación de oro en condiciones alcalinas.

El tiosulfato fue identificado en el siglo XX como un lixiviante para la extracción de metales preciosos en presencia de aditivos apropiados. El proceso de lixiviación con tiosulfato amoniacal se ha utilizado para la extracción de oro y plata a partir de residuos lixiviados de concentrados de sulfuro de cobre. En soluciones alcalinas oxigenadas, el tiosulfato puede formar complejos estables con iones de oro (I), como se presenta en la ecuación. (1):



En comparación con el proceso de cianuración, la lixiviación con tiosulfato no sólo reduce los riesgos ambientales y los costos de los reactivos, sino que también ofrece una alta selectividad y características de lixiviación aceptables. Además, esta técnica de lixiviación sin cianuro ofrece un potencial sustancial para el procesamiento de minerales de oro refractarios que contienen cobre o minerales carbonosos. Varias empresas mineras han realizado grandes esfuerzos para extraer oro de minerales de oro carbonosos utilizando tiosulfato a escala comercial o semicomercial. Barrick Gold Corporation ha desarrollado un proceso que combina un pretratamiento de oxidación a presión alcalina con lixiviación con tiosulfato libre de amoníaco; este proceso se está llevando a cabo con éxito en Goldstrike, Nevada, EE. UU. Dados los peligros ambientales que plantea el amoníaco y el alto consumo de tiosulfato, los investigadores están dedicando cada vez más esfuerzos a explorar la lixiviación de tiosulfato sin amoníaco.

Aunque los investigadores han investigado extensamente los fundamentos de la lixiviación con tiosulfato, el progreso hacia su aplicación comercial sigue



siendo lento debido a varios obstáculos principales, que incluyen el alto consumo de tiosulfato, la pasivación del oro y el procesamiento posterior inmaduro del oro recuperado de las soluciones lixiviadas.

Además, el polisulfuro se ha introducido como otra alternativa en la clase de lixiviantes que contienen azufre. Los aniones polisulfuro se pueden obtener mediante la reacción de azufre elemental e iones sulfuro en soluciones alcalinas en las que se ha disuelto oro para formar complejos oro-azufre. La reacción general para la disolución de oro en soluciones de polisulfuro se describe como:



Las soluciones amoniacales de polisulfuro pueden disolver el oro a temperaturas y presiones elevadas, y la velocidad de disolución depende de la temperatura y la composición de las especies de azufre en la solución de lixiviación. La recuperación de oro alcanzó el 90% a 50°C en una solución de polisulfuro/tiosulfato con amonio cúprico como catalizador, a pesar de que el concentrado de oro contenía 5% en peso de arsénico. Yang y otros también informaron que el 93% del oro se lixiviaba en una solución de polisulfuro caliente que contenía antimonio.

Recientemente, se ha descubierto que el tetrasulfuro y el pentasulfuro desempeñan funciones importantes en la lixiviación de oro utilizando soluciones alcalinas de polisulfuro que ofrecen un buen rendimiento de lixiviación para minerales de antimonio que contienen oro. De acuerdo con estos estudios previos, la lixiviación de polisulfuro es aplicable a ciertos minerales de oro que contienen arsénico y antimonio.

La lixiviación de sulfuro alcalino también se utiliza como técnica sin cianuro para la extracción de oro. La disolución de azufre elemental en soluciones alcalinas crea una variedad de aniones metaestables que contienen azufre que pueden usarse para disolver el oro. Este sistema hidrometalúrgico opera esencialmente sobre la función combinada de sulfuro ( $S^{2-}$ ), polisulfuros ( $S_n^{2-}$ ) y tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ). Ofrece un enfoque alternativo a la lixiviación selectiva de oro, plata, antimonio, estaño, arsénico y telurio. Algunos autores han informado que el oro y el cobre se recuperaron efectivamente de concentrados de enargita auríferas en paralelo con la eliminación de arsénico y antimonio utilizando esta técnica de lixiviación. Este sistema hidrometalúrgico se ha utilizado industrialmente para la producción de antimonio en algunos países.

Actualmente, la lixiviación amoniacal y la lixiviación no amoniacal con tiosulfato de oro se están estudiando ampliamente y también se han publicado varios estudios sobre la lixiviación de oro utilizando soluciones de polisulfuro. Sin embargo, no se ha informado de ninguna revisión especializada sobre agentes lixiviantes que contienen azufre en la que se consideren dichos agentes en su conjunto. En el presente artículo, resumimos sistemáticamente el progreso de la investigación y los desafíos que enfrenta el uso de lixiviantes que contienen azufre para la lixiviación de oro en condiciones alcalinas.

Primero, se introduce brevemente la preparación de soluciones alcalinas que contienen azufre, después de lo cual se describe el proceso de transformación de varias especies de azufre. Luego se revisa la investigación fundamental sobre los mecanismos de lixiviación de oro utilizando lixiviantes que contienen azufre, incluido el análisis termodinámico, la disolución electroquímica y la cinética de lixiviación. Además, se analiza la generación in situ de reactivos que contienen

azufre a partir de minerales de sulfuro que contienen oro durante la lixiviación de oro.

### **3.1.11 Ferrocianuros de sodio y potasio**

Las reacciones de los ferrocianuros de sodio y potasio que se analizan en esta sección son las de las sales secas, ya sea como sólidos o en medios esencialmente anhidros. Las reacciones que involucran el ion ferrocianuro o el ácido hidroferrocianuro libre se encontrarán en las secciones siguientes.

El ferrocianuro de sodio se puede preparar como un polvo blanco, anhidro, no higroscópico o, más comúnmente, como un decahidrato cristalino de color amarillo pálido. A pesar de informes anteriores que afirmaban lo contrario, los trabajos de finales del siglo XIX establecieron que la única forma hidratada era la que contenía diez moles de agua.

El ferrocianuro de potasio anhidro es un polvo blanco y extremadamente higroscópico. Cuando se expone a la luz ultravioleta, gradualmente se vuelve azul, probablemente debido a la formación de azul de Prusia en los cristales.

El ferrocianuro de potasio generalmente se prepara como su trihidrato cristalino de color amarillo. Nuevamente, sólo se conoce una forma hidratada. Este producto es estable en el aire y la luz del laboratorio durante al menos un año, pero bajo la luz solar directa, el color puede cambiar muy lentamente a un azul verdoso. Si los cristales están húmedos, la exposición a la luz parece provocar una lenta liberación de cianuro de hidrógeno con la formación de una fina capa de hidróxido férrico en sus superficies.

Debido a la mayor disponibilidad de potasa para muchos de los primeros trabajadores en Europa, la mayoría de las reacciones que se describen a continuación se llevaron a cabo utilizando ferrocianuro de potasio. Se puede

esperar, sin embargo, que la sal de sodio se comporte esencialmente de la misma manera en la mayoría de los casos.

### **3.1.12 Deshidratación**

A presión atmosférica, temperatura ambiente y cuando la humedad relativa es baja, el ferrocianuro de sodio decahidratado eflorece ligeramente. Sin embargo, la deshidratación constante no comienza hasta que la temperatura supera los 50 °C. Si los cristales se irradian con luz ultravioleta, la eflorescencia se produce más fácilmente, especialmente en los bordes del cristal. Por ejemplo, a 47°C, los cristales de ferrocianuro de sodio irradiados pierden 3,5 veces más agua en dos horas y media que los que no han sido irradiados. Como podría esperarse, la deshidratación también se produce fácilmente a temperatura ambiente bajo una presión sustancialmente reducida.

La deshidratación del trihidrato de ferrocianuro de potasio se ha estudiado con algo más de detalle que la de la sal de sodio. Toda el agua se pierde a temperatura ambiente cuando la presión es inferior a 3 mm, y en estas condiciones son útiles agentes secantes como el ácido sulfúrico o el cloruro de calcio. Se informa que en una corriente de aire libre de dióxido de carbono, el trihidrato pierde un mol de agua a 30°C. y dos a 40°C. en seis a siete horas. Un autor informa, sin embargo, que el último medio mol de agua es difícil de eliminar a esta temperatura. La deshidratación cuantitativa a presión atmosférica se produce mucho más rápidamente a 80-95 °C. esencialmente sin descomposición.

La siguiente ecuación ha sido desarrollada para la presión de vapor del agua en milímetros sobre la sal a 19-100°C. y presión atmosférica:

$$\log P_{H_2O} = - 2610.1539/T + 9.8782$$

Recientemente se ha informado de la eliminación de al menos parte del agua mediante la reacción del trihidrato con carburo de calcio, tricloruro de fósforo o cloruro de acetilo. También se dice que el oxitricloruro de vanadio elimina el agua del ferrocianuro de potasio hidratado.

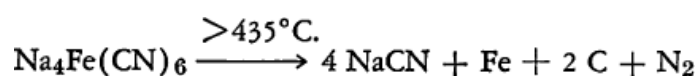
### 3.1.13 Irradiación

Como se señaló anteriormente, la irradiación con luz ultravioleta provoca cierta descomposición en los bordes de los cristales de ferrocianuro de sodio, haciéndolos generalmente más reactivos.

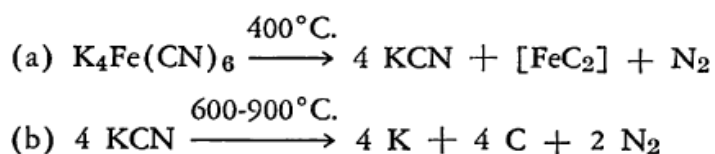
Cuando los cristales de ferrocianuro de potasio se someten a la acción prolongada de los rayos X, se observa descomposición y cambio de color.

### 3.1.14 Pirólisis

El ferrocianuro de sodio anhidro comienza a descomponerse al vacío a 435 °C. dando como productos una mezcla de cianuro de sodio, hierro, carbono y nitrógeno.



A temperaturas superiores a 400 °C. El ferrocianuro de potasio puede pirolizarse mediante descomposición según la siguiente ecuación general:



El carburo de hierro indicado entre paréntesis en realidad no se forma, pero se produce un residuo reactivo que consiste en grafito, hierro alfa y carburo de hierro, Fe<sub>3</sub>C, que se presentan en las proporciones estequiométricas de la fórmula registrada.

Dependiendo de la temperatura, la presión y de si está presente una atmósfera oxidante o reductora, el pirólisis conduce a diferentes productos finales. Mientras que la reacción (b) comienza a una velocidad satisfactoria sólo a presiones cercanas a 1 mm. Hg, que disminuye rápidamente a medida que la presión se eleva a 100 mm. Se dice que la reacción (a) de Hg no se ve influenciada por una presión de hasta una atmósfera.

A temperatura moderada al vacío, se ha observado ferrocianuro ferroso dipotásico.



Sin embargo, al rojo vivo, este producto sufre una mayor descomposición.



Si se introduce aire en el pirolizado caliente, se pueden producir diversos óxidos de hierro, así como cianato de potasio.

Pirólisis a 350°C. y bajo 200 atmósferas de hidrógeno y nitrógeno también se produce una forma de hierro altamente reactiva. Este último es catalítico para la conversión de hidrógeno y nitrógeno en amoníaco a alta presión y 430°C.

Cuando una mezcla de ferrocianuros de sodio y potasio se calienta a temperaturas superiores a 600 °C, se dice que se forma una aleación de sodio y potasio, líquida a temperatura ambiente, en gotas plateadas. Esto aparentemente resulta de una mayor descomposición de los cianuros de sodio y potasio producidos a partir de los ferrocianuros.

### **3.2. Análisis del proceso propuesto**

La hidrometalurgia es un método principal de extracción de oro. El proceso de lixiviación como parte importante de la hidrometalurgia se puede clasificar en

tres especies dependiendo de las diferentes condiciones de lixiviación: en fase ácida ( $\text{pH} < 3$ ) con cloro, tiourea, cloruro férrico y tiocianato; en fase neutra ( $\text{pH}$  entre 5 y 9) con halógenos y tiosulfato; y en fase alcalina ( $\text{pH} > 10$ ) con cianuro, sulfuro de sodio, amoníaco, cianuro de amonio, nitrilos y azufre.

Entre ellos, la lixiviación con tiosulfato es el método más potencial de lixiviación de oro debido a su baja toxicidad y alta eficiencia. La Oficina de Minas de EE. UU. utiliza métodos experimentales estadísticos para determinar la viabilidad de la lixiviación con tiosulfato. Se puede obtener una tasa de extracción de oro de hasta el 62% a partir de la lixiviación con tiosulfato de mineral carbonoso de baja ley, y se ha aplicado con éxito en la mina Goldstrike, Nevada, de Barrick Gold Corp. Además, la lixiviación con glicina tiene las ventajas de un proceso simple, estabilidad en un amplio rango Eh-pH, fácil recuperación y no toxicidad, lo que atrajo el interés de los investigadores. Un nuevo estudio muestra que la recuperación de oro del mineral oxidado en una solución alcalina de glicina es del 85.1 % en condiciones de fuerte oxidación del permanganato de potasio.

Sin embargo, el cianuro de fase básica sigue siendo el más utilizado en aplicaciones industriales debido a su tecnología madura, alta selectividad, operación práctica y complejación estable a oro. Mientras tanto, las desventajas de la lixiviación con cianuro incluyen un largo tiempo de lixiviación y poca adaptabilidad hacia  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{S}^{2-}$ .

El cianuro puede ser mortal en altas concentraciones, lo que representa una grave amenaza para la salud de una amplia gama de entidades ecológicas. Con esta limitación en mente, se ha investigado un ferrocianuro de potasio (PF) precursor del cianuro no tóxico. Podría liberar iones de cianuro libres bajo la luz ultravioleta, pero tener la alta estabilidad del complejo de cianuro ferroso en luz

difusa o en la oscuridad (prueba de toxicidad aguda,  $LD_{50} = 1600\text{--}3200\text{ mg/kg}$ ). El PF sólido es un producto de la industria química del carbón y se considera un complejo de metal-cianuro fuerte no tóxico, ampliamente utilizado en las industrias farmacéutica, química y alimentaria.

Los iones de cianógeno ferroso tienen actividad iónica en soluciones. Ya en 1952, se probó la estabilidad de la solución de PF y los resultados mostraron que podía descomponer los iones de cianuro libres bajo luz ultravioleta, pero ocurría una reacción inversa después de interrumpir la iluminación.

La foto disociación de PF incluye la fotooxidación y la foto acuación del hexacianuro ferroso en solución acuosa. En la actualidad, el tratamiento foto catalítico de complejos de cianuro ferroso en aguas residuales es una de las motivaciones para la utilización de PF. LA Betancourt-Buitrago describió un método de recuperación de cianuro complejado a partir de aguas residuales sintéticas de minería mediante tratamiento anóxico foto catalítico utilizando  $TiO_2$  y secuestrantes. Demostró que la descomposición foto catalítica del ferricianuro se llevó a cabo mediante la foto reducción del complejo metálico. Sergio Hanela introdujo un sistema de tratamiento por ozono ultravioleta y zeolita modificada para eliminar el complejo de ferricianuro de las aguas residuales, que logró una tasa efectiva de eliminación de hierro (55%) y cianuro (68%).

Las anteriores son las aplicaciones de foto catalíticos en solución PF para eliminar el cianuro, pero ha habido pocos informes de aplicación de disociación de iones de cianuro para la recuperación de oro a partir de mineral de oro. Recientemente, Weida D. Chen demostró que un sensor de luz acumulativo hecho de oro, que era un dispositivo fotoquímico para convertir señales de luz en señales eléctricas y convertir fotones en iones de cianuro libres en presencia de una



solución de PF. Nos inspiró a aplicar iones de cianuro libres liberados por la solución PF para extraer oro del mineral de oro. Podría hacer la reutilización del complejo de cianuro ferroso en las aguas residuales y evitar los peligros altamente tóxicos del cianuro en el transporte y la conservación.

Aunque el precio del PF (1800 \$/tonelada) es ligeramente superior al del cianuro (1600 \$/tonelada), el PF sólido tiene mayores ventajas en términos de costo de transporte y costo de seguridad debido a la fuerte toxicidad del cianuro. Este documento proporciona un método hidrometalúrgico novedoso para la extracción de oro con una solución de PF irradiada con luz ultravioleta.

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN**

Muchos minerales de oro son problemáticos porque contienen sulfuros metálicos, como pirita, arsenopirita y calcopirita. El cianuro se considera un compuesto peligroso debido a su toxicidad; Actualmente existe presión ambiental por parte de diferentes grupos alrededor del mundo para prohibir el uso industrial del cianuro.

La investigación sobre la sustitución del cianuro como lixiviante ha estado en curso a lo largo de los años y ha encontrado que existen otros compuestos potencialmente viables, como tiosulfato, tiourea, haluros, varios sistemas de sulfuro, amoníaco, bacterias, ácidos naturales, tiocianato, nitrilos y combinaciones de cianuro con otros compuestos.

Muchos de estos procesos alternativos de oro aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo. Un factor clave para el éxito comercial de estos lixiviantes alternativos se relaciona con la estabilidad general del lixiviante y el complejo de oro en solución.

En el presente trabajo de investigación, estudiamos la aplicación del ferrocianuro de potasio como agente lixiviante de los minerales sulfurados auríferos.

## **4.1. Métodos de investigación**

### **4.1.1 Materiales**

Se empleará un concentrado sulfurado aurífero obtenido del beneficio de un mineral aurífero concentrado en forma convencional proveniente de la zona de la Región Apurímac.

Los reactivos a emplear en este estudio experimental a ser considerados son los siguientes:

- \* Ferrocianuro de potasio
- \* NaOH
- \* Agua desionizada

### **4.1.2 Equipos**

Para la caracterización del mineral se empleará un difractómetro de rayos X de ánodo rotatorio de alta potencia Rigaku-RA con radiación Cu-K $\alpha$  (40 kV, 100 mA), sistema de control de pH medido utilizando un HQ30d-phc10103 (Hach Company, Loveland, CO, EE. UU.) portátil, sistema fotoquímico BL-GHX, La fuente de iluminación será proporcionada por una lámpara de mercurio de alta presión UVA con una emisión máxima a 365 nm, sistema de agitación magnética. Las pruebas de lixiviación se realizarán en una probeta de cuarzo de 100 mL. Microbalanza de cristal de cuarzo con disipación (QCM-D)

### **4.1.3 Método**

El procedimiento consistirá en el procesamiento del concentrado sulfurado aurífero, para lo cual previamente se preparará el reactivo lixivante preparado con una solución de ferrocianuro de potasio en un medio alcalino acondicionado con NaOH, las muestras serán lixiviadas en una probeta de cuarzo. La performance del

proceso será medida empleando la microbalanza de cristal de cuarzo con disipación (QCM-D), los resultados obtenidos serán analizados y discutidos.

## 4.2. Procedimiento experimental

### 4.2.1 Materiales y reactivos

Los concentrados de oro del proceso de flotación en la industria minera de la zona de Apurímac se utilizaron como muestras de prueba para los experimentos. Los principales componentes químicos de la muestra de prueba se muestran en la Tabla 1. Los principales metales valiosos son el oro y la plata, con una ley de 56.78 g/t y 38.8 g/t, respectivamente.

El análisis de difracción de rayos X en polvo (XRD) se realizó en un difractómetro de rayos X de ánodo rotatorio de alta potencia Rigaku-RA con radiación Cu-K $\alpha$  (40 kV, 100 mA) a una velocidad de exploración de 10° min, de 10° a 90°. Los principales componentes minerales son pirita (FeS<sub>2</sub>), cuarzo (SiO<sub>2</sub>), moscovita (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>) y gismondina (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8-4</sub>(H<sub>2</sub>O)), como se muestra en la Figura 1.

**Tabla 1**

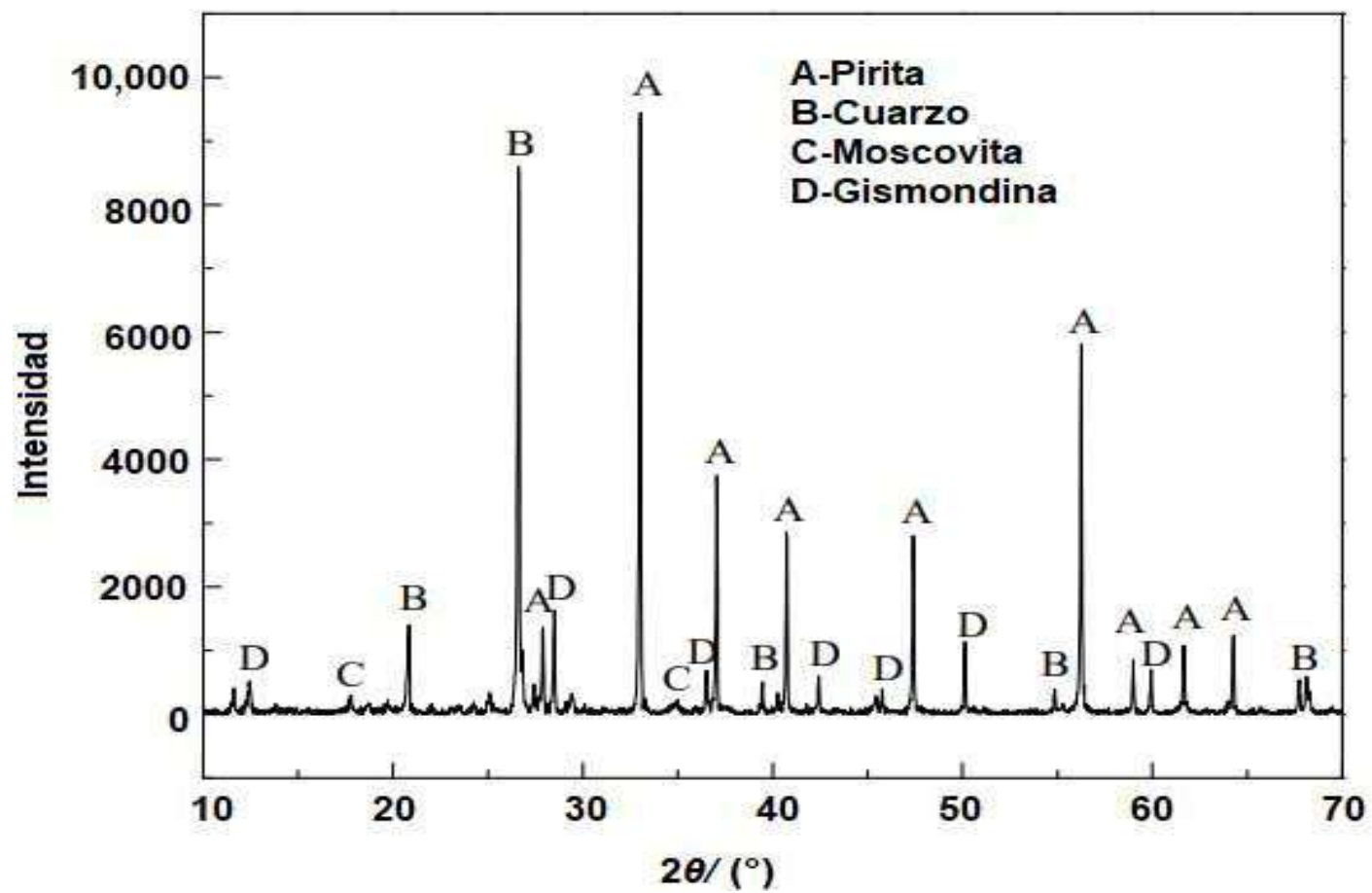
*Principales componentes químicos de la muestra de ensayo (%).*

| <b>Au*</b> | <b>Ag*</b> | <b>Fe</b>  | <b>Cu</b>  | <b>As</b>                          | <b>Zn</b>              |
|------------|------------|------------|------------|------------------------------------|------------------------|
| 56.78      | 38.8       | 26.03      | 0.11       | 0.082                              | 0.044                  |
| <b>Pb</b>  | <b>S</b>   | <b>CaO</b> | <b>MgO</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>SiO<sub>2</sub></b> |
| 0.10       | 26.64      | 1.27       | 0.95       | 6.69                               | 33.51                  |

\* La unidad es g/t.

**Figura 2**

*Patrones XRD de la muestra*



Todos los experimentos se realizaron con reactivos de grado analítico y agua desionizada. El trihidrato de PF sólido ( $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ ,  $\geq 99,5\%$ ) y el hidróxido de sodio ( $NaOH$ ,  $\geq 99,5\%$ ) se adquirieron de los almacenes de reactivos de la planta concentradora.

La estructura química de PF se muestra en la Figura 2. La solución de PF se preparó disolviendo un número conocido de partículas en agua desionizada, y su curva de solubilidad se muestra en la Figura 3.

El pH del sistema de lixiviación se ajustó usando  $0,1\text{ mol/L}$  solución de  $NaOH$  y medido utilizando un HQ30d-phc10103 (Hach Company, Loveland, CO, EE. UU.) pH metro portátil

### Figura 3

*Estructura química de PF (Ferrocianuro de potasio)*

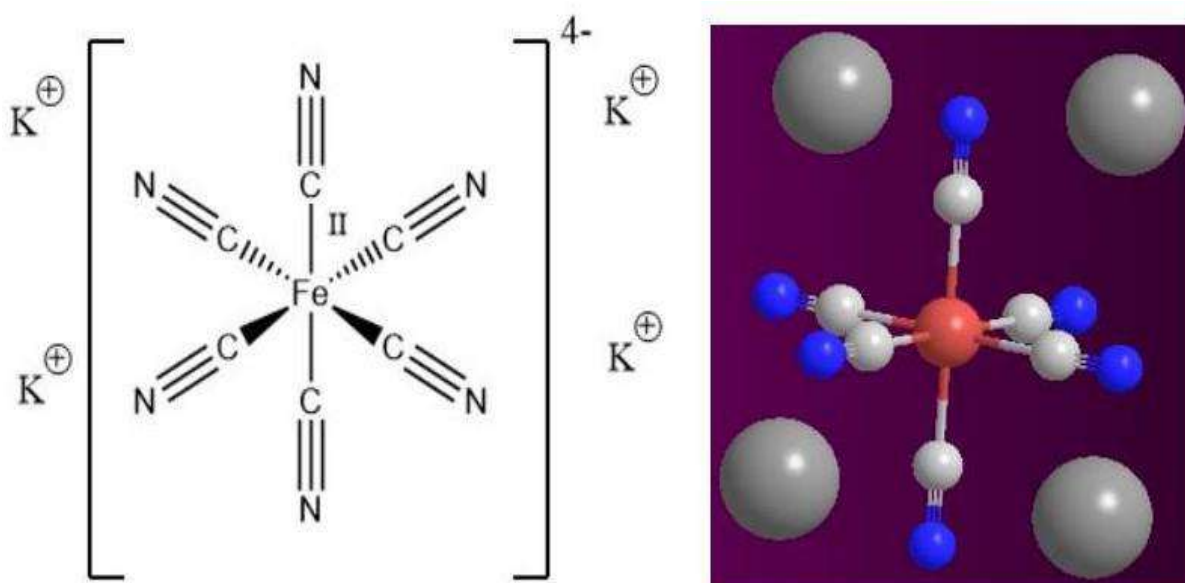
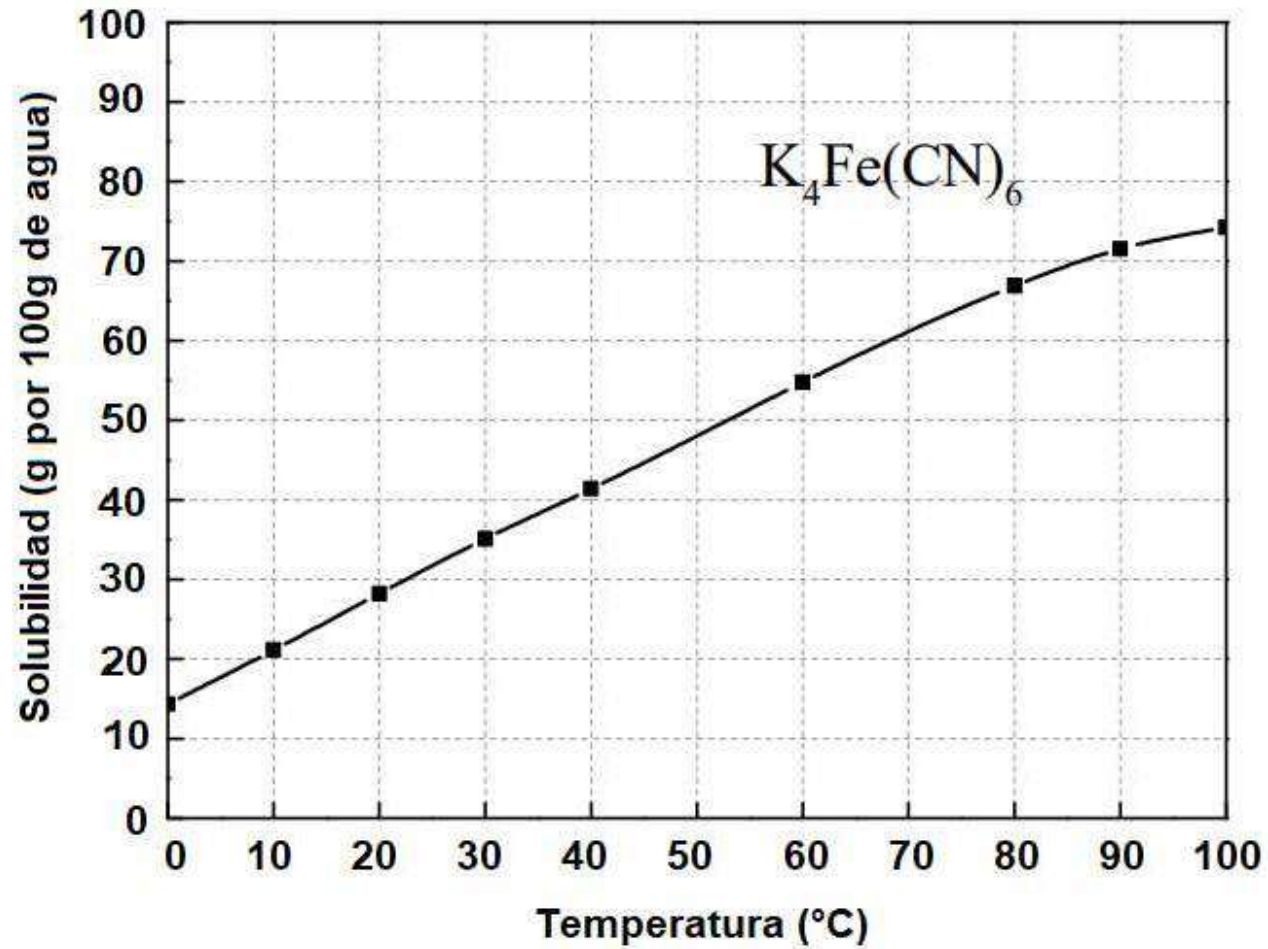


Figura 4

Solubilidad de PF con respecto a la temperatura



## **Fuente de luz**

El sistema fotoquímico BL-GHX producido por BILON Co., Ltd (Shanghai, China) se muestra en la Figura 4. La fuente de iluminación fue proporcionada por una lámpara de mercurio de alta presión UVA con una emisión máxima a 365 nm. La distribución espectral y la intensidad relativa de la lámpara de mercurio de alta presión se muestran en la Tabla 2.

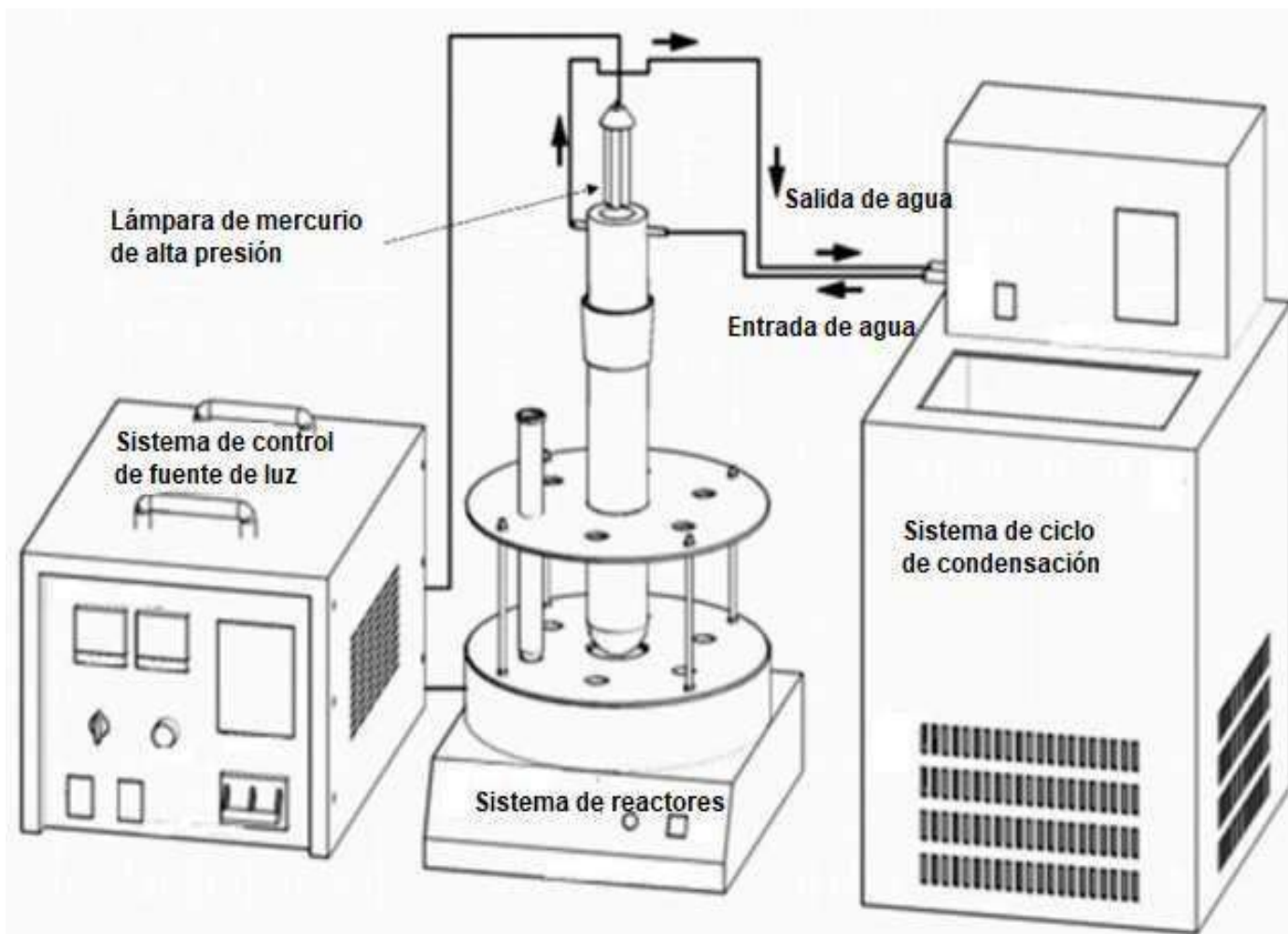
Para los experimentos de reacción fotoquímica, se utilizó como foto reactor un tubo de ensayo de cuarzo de 100 mL (diámetro de 30 mm, altura de 190 mm), que fue colocado 5 cm debajo de la lámpara. Además, el sistema está equipado con un ciclo de condensación para enfriar la fuente de luz ultravioleta y ajustar la temperatura de reacción.

La intensidad de irradiación de la luz incidente que ingresa a la solución PF se ajusta cambiando la corriente de la lámpara de mercurio de alta presión en el reactor. Antes de los experimentos, la irradiancia correspondiente al valor actual del sistema se corrigió cuantitativamente utilizando un radiómetro UVA-365; los resultados de la calibración se muestran en la Figura 5.



**Figura 5**

*Diagrama del dispositivo de reacción fotoquímica*



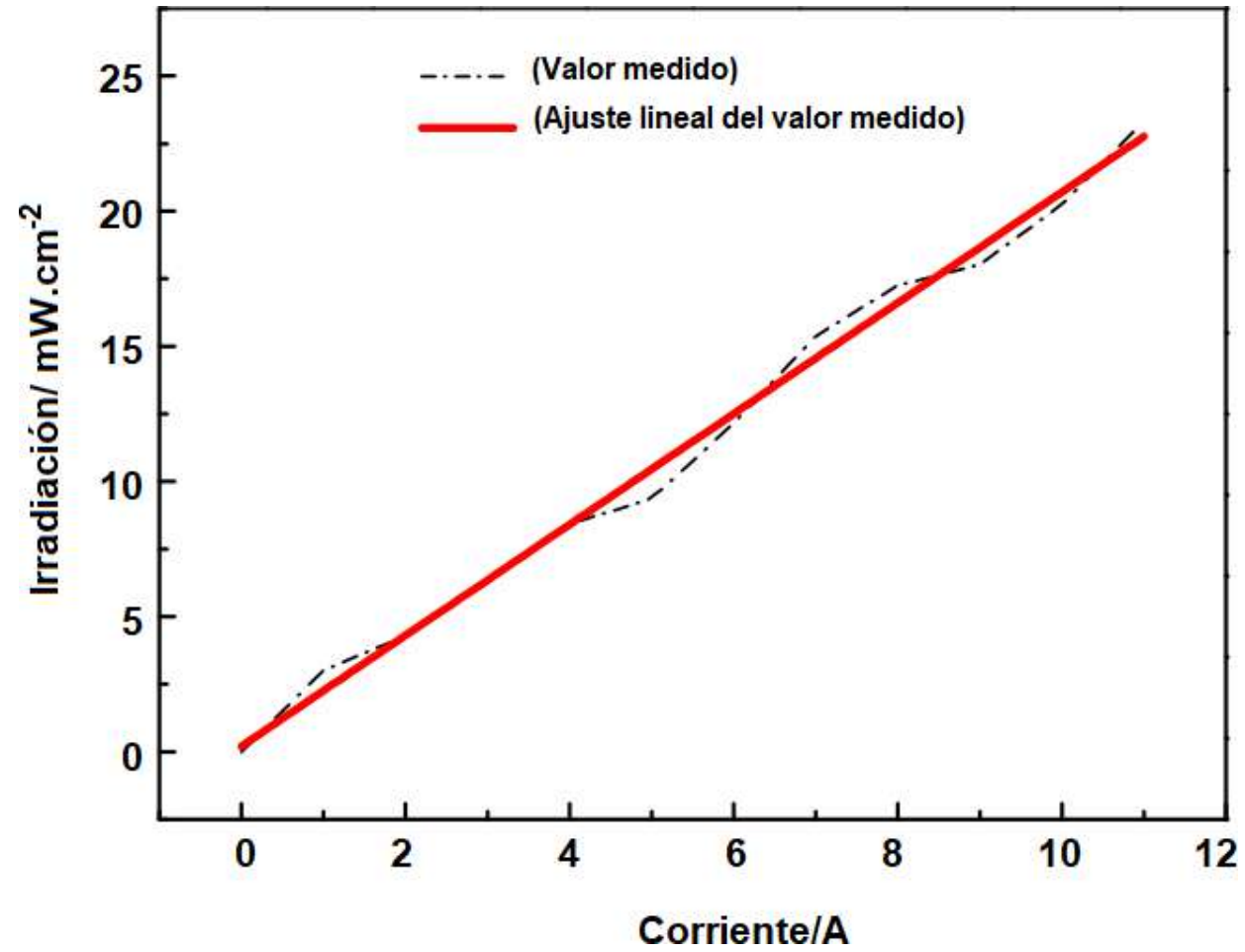
**Tabla 2**

*Distribución espectral e intensidad relativa de lámpara de mercurio de alta presión*

|                                    |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Longitud<br/>de<br/>onda/nm</b> | 250 | 313 | 365 | 400 | 510 | 620 | 720 |
| <b>Intensidad<br/>relativa/%</b>   | 20  | 85  | 100 | 30  | 20  | 40  | 80  |

**Figura 6**

*Irradiancia vs. valor actual del dispositivo*



#### 4.2.2 Diseño experimental de lixiviación de mineral de oro

El efecto de lixiviación de oro de la solución de PF se investigó mediante un sistema de agitación magnética. Las pruebas de lixiviación se realizaron en una probeta de cuarzo de 100 mL y la frecuencia de agitación se fijó en 400 rpm. Para cada prueba de lixiviación individual, se lixiviaron 30 g de muestra durante 24 h a una relación sólido/líquido constante de 1:3. Con el fin de determinar los parámetros óptimos del proceso de lixiviación de oro en solución PF bajo luz ultravioleta, se diseñaron experimentos de análisis con tres factores y tres niveles utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). Todas las pruebas se llevaron a cabo bajo la irradiación ultravioleta de una lámpara de mercurio de alta presión de  $10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Los resultados se analizaron utilizando el software Design Expert. Los factores experimentales incluyeron el pH inicial ( $X_1$ ), la dosis de PF ( $X_2$ ) y la temperatura de lixiviación ( $X_3$ ). Como se muestra en la Tabla 3, los rangos de  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  fueron 11–13, 1–5 kg/t y 45–75 °C, respectivamente, con valores centrales de 12, 3 kg/t y 60 °C, respectivamente. Para evitar errores sistemáticos, la secuencia de experimentos se estableció aleatoriamente. Los resultados obtenidos se calcularon mediante una ecuación cuadrática para evaluar el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y se analizaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA).

**Tabla 3**

*Rangos seleccionados para valores codificados y reales de las variables independientes*

| Niveles | $X_1$ : pH | $X_2$ : Dosis (kg/t) | $X_3$ : Temperatura (°C) |
|---------|------------|----------------------|--------------------------|
| -1      | 11         | 1                    | 45                       |
| 0       | 12         | 3                    | 60                       |
| 1       | 13         | 5                    | 75                       |

### 4.2.3 Microbalanza de cristal de cuarzo con disipación (QCM-D)

QCM-D es un instrumento de medición en tiempo real para el análisis de reacciones superficiales. El elemento principal del QCM-D es un cristal de cuarzo piezoeléctrico de corte AT entre los electrodos de película metálica. El cristal de cuarzo produce una deformación mecánica si se aplica un campo eléctrico en la dirección de la polarización del cristal. Por lo tanto, las corrientes alternas pueden causar vibraciones mecánicas en el cristal de cuarzo y la resonancia del cristal se produce cuando la frecuencia de la corriente es la misma que la frecuencia natural del cristal. La frecuencia de resonancia ( $\Delta f$ ) del cristal de cuarzo varía con la masa ( $\Delta m$ ) del electrodo de película metálica. A través de la medición de los cambios en la disipación de energía ( $\Delta D$ ), se conocen los cambios en las propiedades de la superficie del cristal de cuarzo. La ecuación de Sauerbrey (Ecuación (1)) puede describir la relación entre  $\Delta m$  y  $\Delta f$ .

$$\Delta m = -\frac{\rho_q t_q}{f_0 n} \Delta f = -\frac{C \Delta f}{n}$$

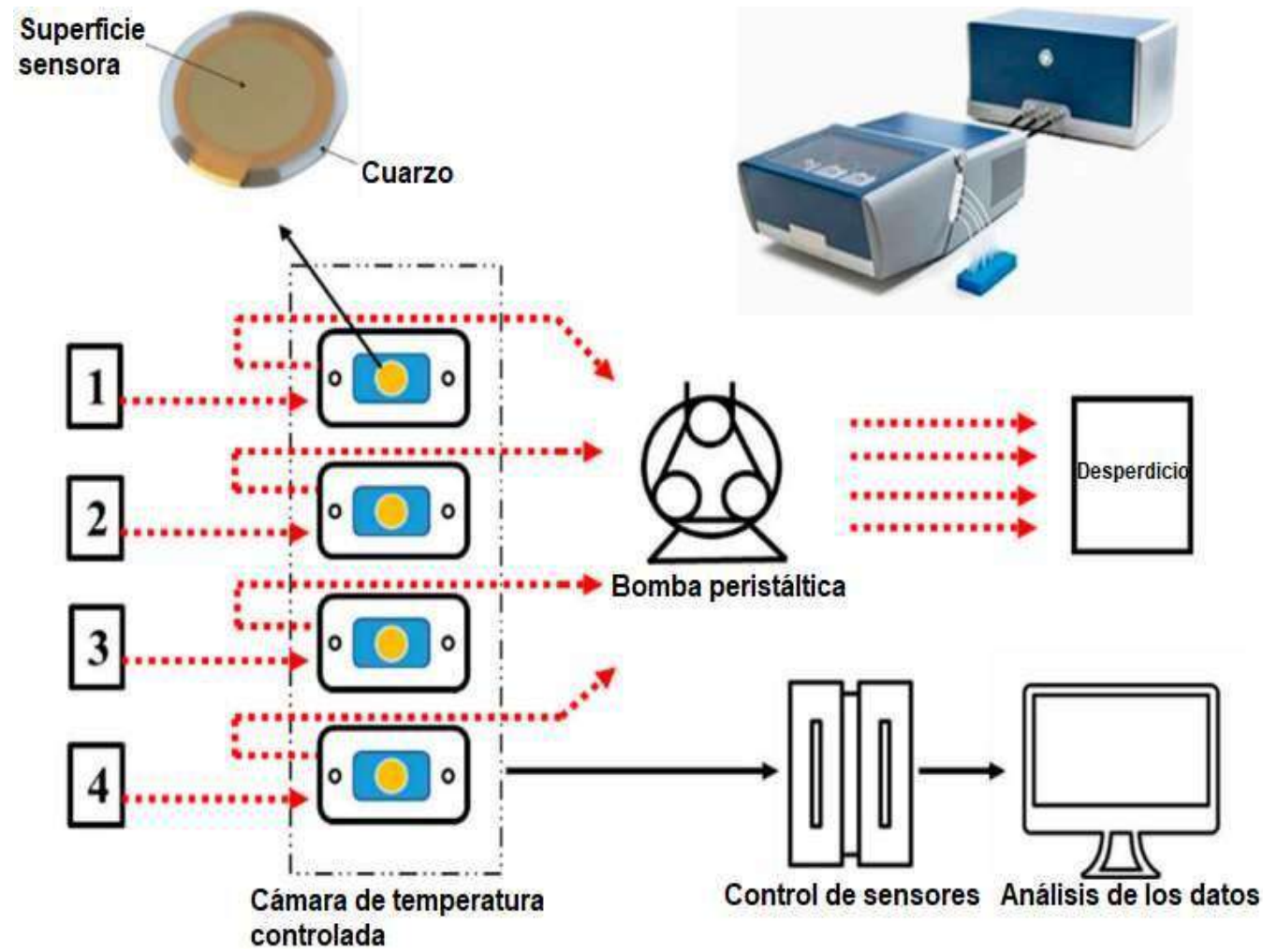
donde  $\rho_q$  es la densidad del cristal de cuarzo utilizado como sensor;  $t_q$  es el espesor del cristal de cuarzo; y  $n$  es el número armónico, que es igual a 1, 3, 5, 7, ... (cuando  $n = 1$ ,  $f_0 = 5$  MHz). Los datos del séptimo sobretono se utilizaron en las gráficas de este estudio porque presentaban la relación señal-ruido más baja. La frecuencia resonante del resonador de cristal de cuarzo cambia linealmente con la masa superficial del cristal de cuarzo y disminuye durante el proceso de lixiviación. La relación es aplicable al proceso de corrosión en la superficie de resonadores de cuarzo revestidos. Su sensibilidad de masa es de  $0.9 \text{ ng/cm}^2$  en agua. El equipo de medición QCM-D fue el sistema Q-Sense E4 (Biolin Scientific, Gotemburgo, Suecia), que se muestra en la Figura 6. Este sistema consta de tres partes

principales: la plataforma de la cámara, que contiene los módulos de cristal del sensor; la unidad electrónica, que controla el sensor; y el software para el análisis de datos.

El sensor de cristal de cuarzo AT-Cut se preparó con electrodos de oro de 100 nm de espesor como capa para los cristales de cuarzo y una capa de cromo de 5 nm colocada en el intermedio para mejorar la adhesividad. La frecuencia fundamental del sensor de cristal de cuarzo fue de 5 MHz, como el valor  $f_0$  mencionado anteriormente. Antes de la prueba, los sensores se limpiaron con agua desionizada y se secaron con nitrógeno. Limitado por las condiciones del equipo, la temperatura se fijó en 30 °C, que es el valor más alto de la cámara de temperatura controlada, y el caudal del reactivo de lixiviación se fijó en 50  $\mu\text{L}/\text{min}$  en todos los experimentos, a menos que se especifique lo contrario.

**Figura 7**

*Configuración instrumental de QCM-D*



### **4.3. Presentación y discusión de resultados**

#### **Descomposición de la solución PF bajo luz ultravioleta**

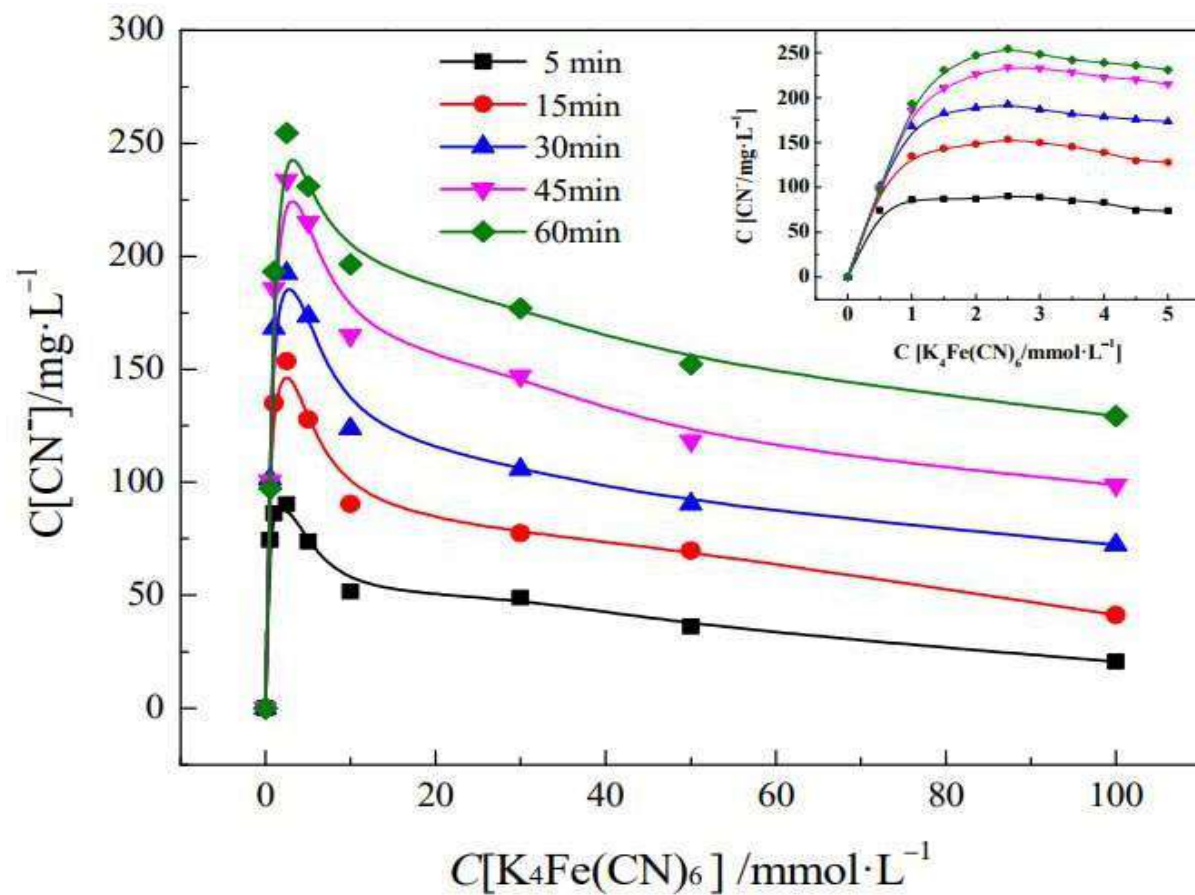
Para investigar la dependencia de la descomposición del ion cianuro libre de la concentración de PF y el tiempo de irradiación, se llevó a cabo el primer experimento comparando las diferentes concentraciones de solución de PF a 0-100 mmol/L en 1 hora. Los resultados se muestran en la figura 7.

Además, los efectos de la intensidad de la irradiación de la disociación del PF se observaron cambiando la corriente como se muestra en la figura 8. En la parte del ensayo, se seleccionó la titulación con nitrato de plata para determinar las concentraciones de cianuro libre en soluciones acuosas.



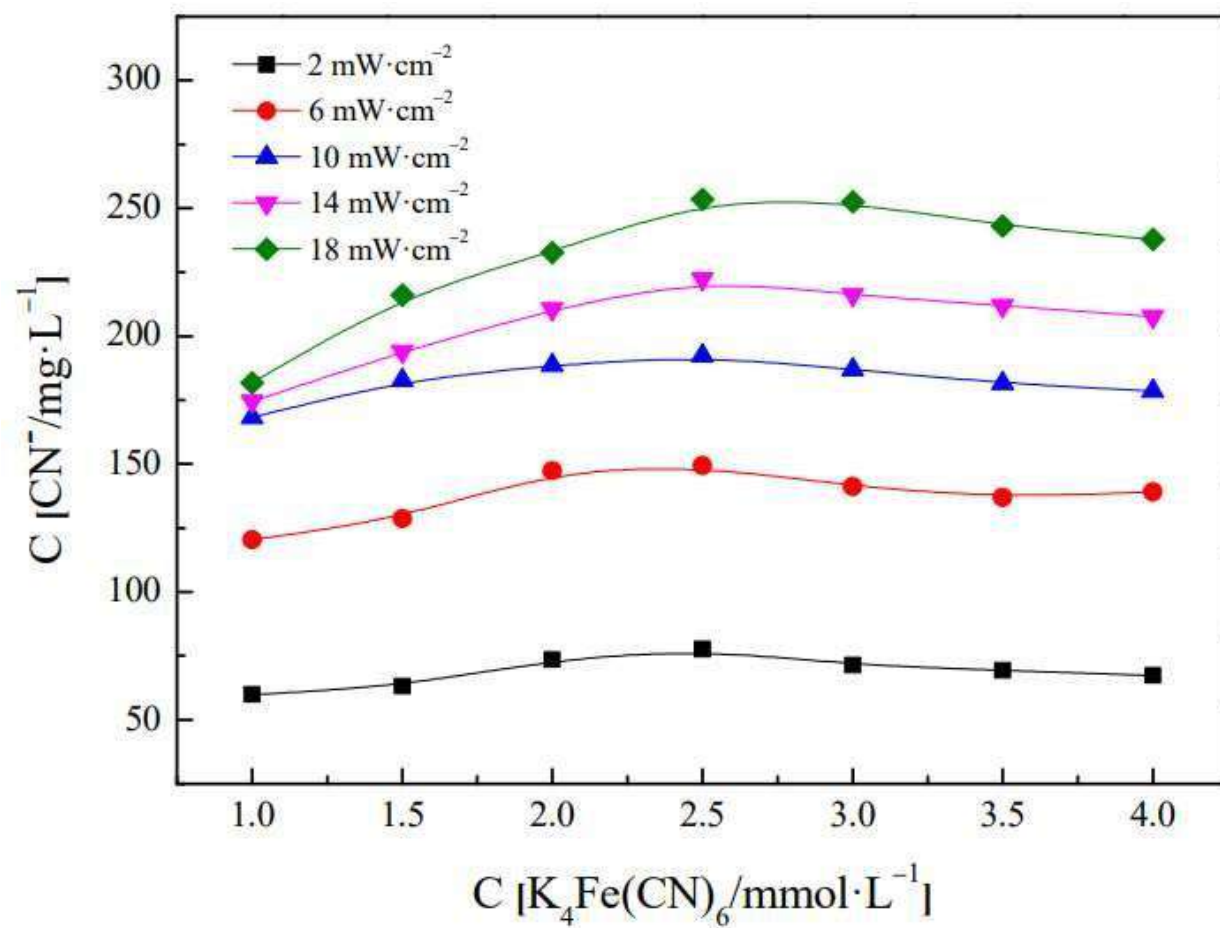
**Figura 8**

Número de iones de cianuro libres liberados en varias concentraciones de PF en etapas de tiempo (0–60 min) bajo irradiación ultravioleta de una lámpara de mercurio de alta presión de  $10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  (tamponada a pH 12)



**Figura 9**

Se evaluaron cinco intensidades de irradiación diferentes, todas con el mismo tiempo de reacción de 30 min (tamponadas a pH 12)



Para una mejor comparación de los efectos de diferentes concentraciones de reactivos en la liberación de iones de cianuro de manera integral, se extrajeron 10 ml de solución cada 15 minutos para detectar su concentración de iones de cianuro libre. La concentración del ion de cianuro libre en solución es cero sin irradiación ultravioleta, lo que es consistente con informes anteriores de que la solución de PF es estable en condiciones de oscuridad o reflectancia difusa.

En diferentes intervalos de tiempo, el PF sufre una reacción de fotólisis secuencial bajo radiación ultravioleta durante mucho tiempo, liberando gradualmente iones de cianógeno libres. Un fenómeno novedoso es que el ion cianuro libre tiene un valor de saturación en el rango de 1–5 mmol/L y disminuye cuando se excede el rango de concentración.

Para determinar la concentración máxima de iones de cianuro libres liberados de la solución, se redujo el intervalo entre los rangos de concentración, como se muestra en la Figura 7.

Encontramos que la concentración de liberación de iones de cianuro libre en la solución es máxima cuando la concentración de El PF es de 2,5 mmol/L en diferentes intervalos de tiempo, lo que muestra que hay una concentración saturada de PF de descomposición de iones de cianuro libre bajo la luz ultravioleta. En este punto, la tasa de conversión de iones de cianuro es 65.28%.

Se investigó el efecto de la intensidad de la iluminación sobre la liberación de iones de cianuro libres de la solución de PF.

La solución inicial de diferente concentración reaccionó durante 30 min bajo luz ultravioleta en el rango de irradiancia de 2–18  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . La determinación de iones de cianuro libres en la solución se muestra en la Figura 8.

La liberación de iones de cianuro aumenta en todas las condiciones de concentración con el aumento de la potencia de iluminación, lo que se debe al aumento de la liberación de fotones en condiciones de alta potencia que promueven una mayor descomposición de PF moléculas.

Además, con el aumento de la irradiancia, el gradiente de aumento de iones de cianuro libres en solución se ralentizó gradualmente, pero la concentración de liberación máxima de iones de cianuro libres no cambió con el cambio de irradiancia.

#### **4.3.1 Metodología de superficie de respuesta y diseño de Box-Behnken**

La influencia del pH inicial, la dosis de PF, la temperatura de lixiviación y cualquier interacción bidireccional entre ellos sobre la tasa de extracción de oro bajo luz ultravioleta se investigó utilizando un modelo de regresión lineal múltiple. El esquema experimental se ejecutó para 17 combinaciones, y los resultados se muestran en la Tabla 4.

Todos los experimentos se realizaron por triplicado. El ajuste de los datos experimentales por análisis de regresión condujo a un modelo de ecuación polinomial de segundo orden (Ecuación (2)), como sigue:

$$Y = 64.21 + 5.17X_1 + 6.58X_2 + 8.54X_3 + 1.72X_1X_2 + 0.088X_1X_3 + 1.23X_2X_3 - 4.36X_1^2 - 13.26X_2^2 - 7.14X_3^2$$

donde Y era la tasa de extracción de oro prevista; y  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  fueron los valores de código de pH, dosis de PF y temperatura de lixiviación, respectivamente.

**Tabla 4***Variables independientes y sus niveles para el diseño de Box-Behnken*

| Ejecutar | Factores            |                               |                                   | Respuesta            |
|----------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
|          | X <sub>1</sub> : pH | X <sub>2</sub> : Dosis (kg/t) | X <sub>3</sub> : Temperatura (°C) | Y: Au Extracción (%) |
| 1        | 11                  | 5                             | 60                                | 44.17                |
| 2        | 12                  | 1                             | 45                                | 29.38                |
| 3        | 12                  | 3                             | 60                                | 63.19                |
| 4        | 13                  | 3                             | 45                                | 47.69                |
| 5        | 12                  | 3                             | 60                                | 62.49                |
| 6        | 13                  | 3                             | 75                                | 64.42                |
| 7        | 12                  | 5                             | 75                                | 60.73                |
| 8        | 11                  | 3                             | 75                                | 57.56                |
| 9        | 12                  | 5                             | 45                                | 40.65                |
| 10       | 12                  | 3                             | 60                                | 65.13                |
| 11       | 12                  | 3                             | 60                                | 64.95                |
| 12       | 13                  | 1                             | 60                                | 45.58                |
| 13       | 11                  | 3                             | 45                                | 41.18                |
| 14       | 12                  | 1                             | 75                                | 44.52                |
| 15       | 11                  | 1                             | 60                                | 35.01                |
| 16       | 13                  | 5                             | 60                                | 61.61                |
| 17       | 12                  | 3                             | 60                                | 65.30                |

La tabla 5 muestra la importancia del ajuste de la ecuación, que se probó mediante ANOVA. El modelo arrojó un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,9851 y el coeficiente de determinación ajustado fue de 0,9660, lo que indica que el modelo presentó alta significancia.

El valor F obtenido de la prueba F fue de 51,48, lo que implica que el modelo fue adecuado.

El valor P se utilizó para verificar la significación de las variables y reflejó la fuerza de interacción entre cada variable independiente. Cuanto menor sea el valor P, más significativa será la variable correspondiente [28]. El valor F de falta de ajuste de 5,67 implica que la falta de ajuste fue insignificante y que la correlación entre la variable y la respuesta del proceso fue suficiente.

**Tabla 5***ANOVA de los modelos ajustados para la extracción de oro*

| Fuente                        | Suma de cuadrados | Grado de libertad | Cuadrado medio ajustado | Valor F | Valor P Probabilidad > F |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------|--------------------------|
| Modelo                        | 2289.29           | 9                 | 254.37                  | 51.48   | <0.0001                  |
| X <sub>1</sub>                | 214.04            | 1                 | 214.04                  | 43.32   | 0.0003                   |
| X <sub>2</sub>                | 346.77            | 1                 | 346.77                  | 70.19   | <0.0001                  |
| X <sub>3</sub>                | 583.62            | 1                 | 583.62                  | 118.13  | <0.0001                  |
| X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> | 11.8              | 1                 | 11.80                   | 2.39    | 0.1662                   |
| X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> | 0.031             | 1                 | 0.031                   | 0.0062  | 0.9394                   |
| X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> | 6.1               | 1                 | 6.10                    | 1.23    | 0.3032                   |
| X <sub>1</sub> <sup>2</sup>   | 80.17             | 1                 | 80.17                   | 16.23   | 0.005                    |
| X <sub>2</sub> <sup>2</sup>   | 739.88            | 1                 | 739.88                  | 149.76  | <0.0001                  |
| X <sub>3</sub> <sup>2</sup>   | 214.41            | 1                 | 214.41                  | 43.40   | 0.0003                   |
| Falta de ajuste               | 28                | 3                 | 9.33                    | 5.67    | 0.0634                   |

R<sup>2</sup> = 98,51 %, R<sup>2</sup> (ajustado) = 96,60 %; significativo al 95% de grado de confianza (p < 0,05).

El valor F se utilizó para examinar la significación estadística y el modelo se evaluó para un valor P con un nivel de confianza del 95 %. En el modelo, los valores de P > F (<0.0001) indicaron que los términos del modelo eran significativos y que la probabilidad de ruido del valor F del modelo era del 0.01 % (<5 %). Como se muestra en la Tabla 5, los valores P para X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> fueron significativamente inferiores al 5 %, lo que indica que la dosis y la temperatura de PF fueron más significativas para la tasa de extracción de oro que las otras variables. Además, el valor P para X<sub>1</sub> fue 0.0003, lo que sugiere que la fuerza de interacción con la extracción de oro fue fuerte. Estos tres componentes (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub>) desempeñaron un papel importante en la extracción de oro.

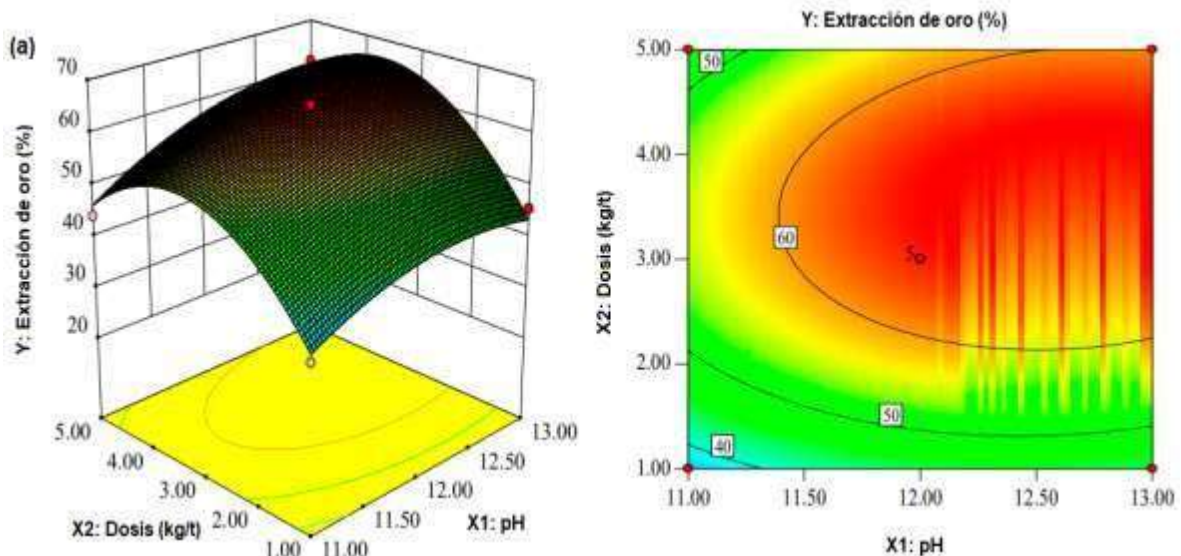
RSM analizó más a fondo las interacciones entre estos tres componentes y su nivel óptimo para la extracción de oro. La superficie de respuesta tridimensional presentada por Design-Expert 8.0 describe la interacción entre los factores experimentales duales y la tasa de extracción, mientras que el otro factor se

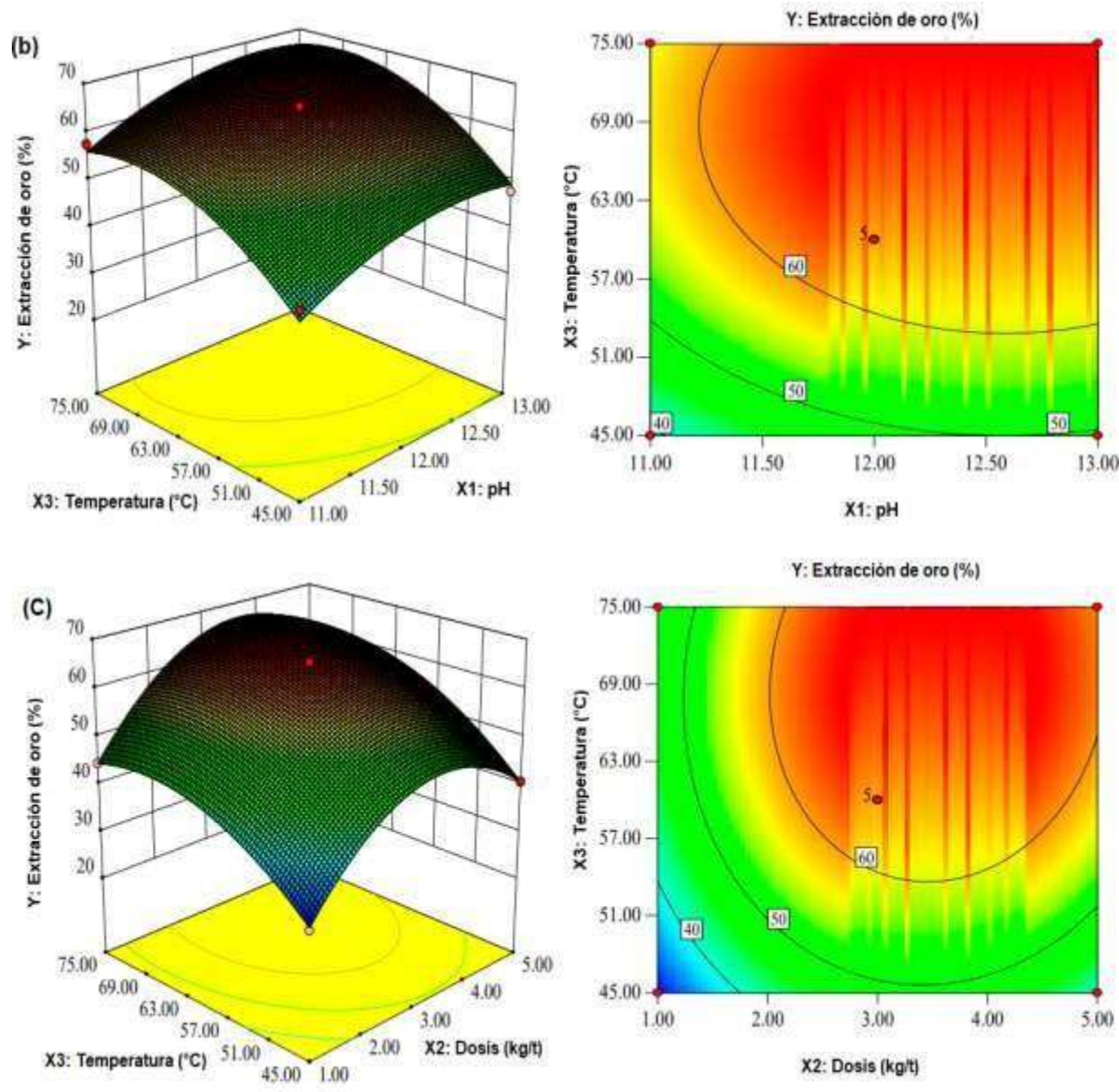
mantuvo en el nivel central, como se muestra en la Figura 9. Todos los gráficos muestran picos relativos dentro del rango de variables. La tasa de extracción óptima se determinó en función de las consideraciones económicas y la dificultad operativa. Los resultados optimizados de RSM mostraron que, a un pH de 12.6, una dosis de 3.8 kg/t de PF y 62 °C, se logró la extracción óptima de 67.74 %. No hubo una mejora clara en la tasa de extracción cuando el pH y la temperatura de lixiviación aumentaron continuamente.

Sin embargo, la dosificación del reactivo tuvo un rango óptimo y el efecto de lixiviación se deteriora cuando la dosificación es excesiva. En este punto, la cantidad de PF se puede convertir a una concentración molar de 2.64 mmol/L, lo que es coherente con la ley de liberación del ion cianuro bajo la luz ultravioleta.

### Figura 10

Gráficas de superficie de respuesta, gráficas de contorno correspondientes e interacciones entre pH ( $X_1$ ), dosis ( $X_2$ ) y temperatura ( $X_3$ ) para extracción de Au bajo radiación ultravioleta de lámpara de mercurio de alta presión de  $10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . (a) pH frente a dosis (b) pH frente a temperatura (c) dosis frente a temperatura





Para verificar la confiabilidad de la optimización de RSM, se realizaron tres conjuntos de pruebas de lixiviación en paralelo en las condiciones óptimas anteriores. Los resultados de la comparación de la prueba y los valores previstos se muestran en la Tabla 6. La extracción por lixiviación de oro fue del 67.01 %, 67.47 % y 67.33 %, respectivamente.

La extracción de lixiviación de oro promedio es 67.27%, lo que muestra que el valor experimental es básicamente consistente con el valor predicho y el error es solo 0.69%. Además, se determinó la cantidad residual de ion cianuro en la solución



cargada. Como se muestra en la Tabla 6, el valor medio del ion de cianuro libre en la solución cargada de PF fue de 18.5 mg/L, que fue menor que el ion de cianuro libre en la solución cargada de cianuro cuando la extracción de oro fue similar. El umbral reglamentario general para las emisiones de cianuro de la operación de procesamiento de minerales es de 0.2 mg/L y, por lo tanto, la solución de lixiviación de PF aún requiere tratamiento antes de la descarga.

**Tabla 6**

*Comparación del valor predicho de extracción de oro y el valor de prueba*

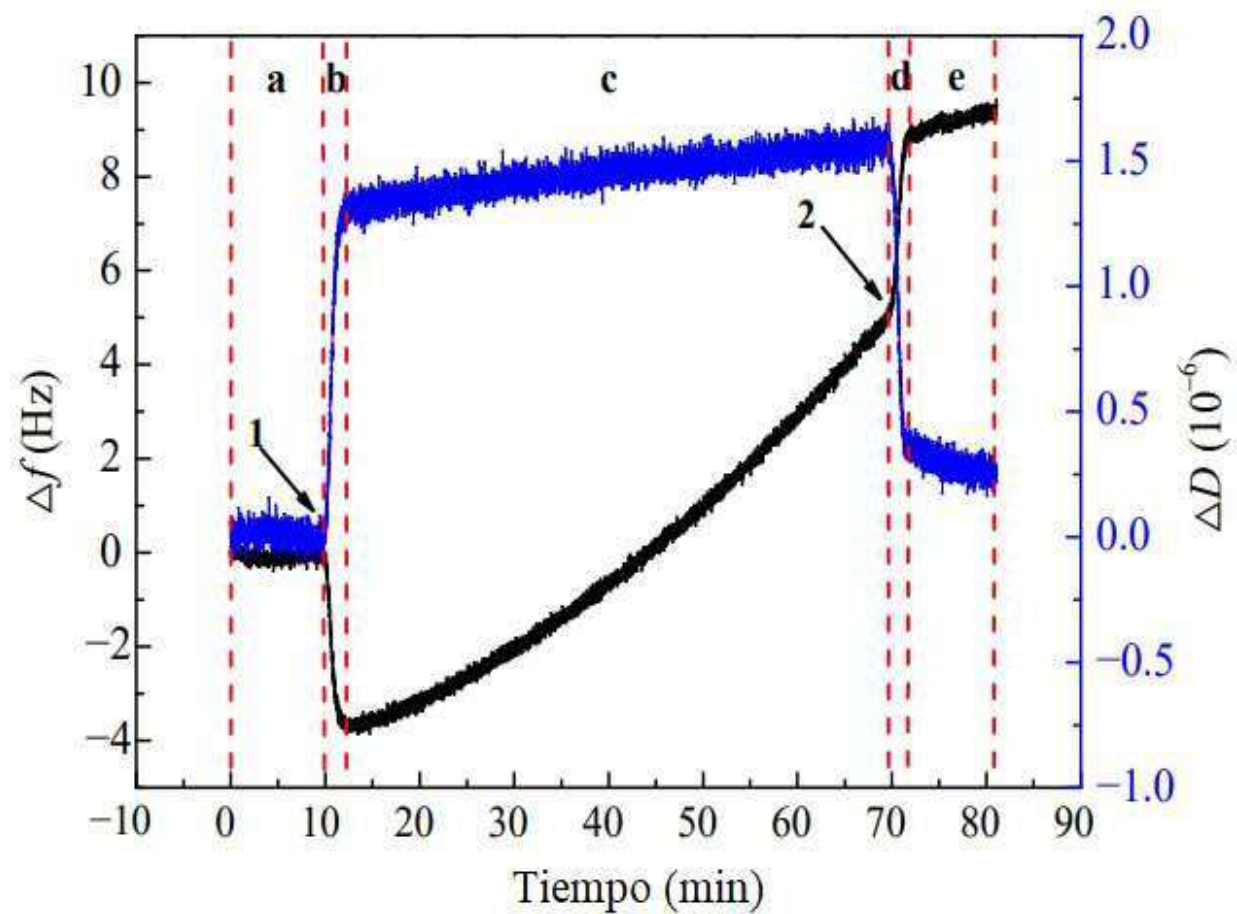
| Reactivo | pH   | Dosis<br>(kg/t) | Temperatura<br>(°C) | Ion cianuro<br>(mg/L) | Extracción de<br>oro (Valor de<br>prueba %) |
|----------|------|-----------------|---------------------|-----------------------|---|
| PF       | 12.6 | 3.8             | 62                  | 19.1                  | 67.01                                       |
| PF       | 12.6 | 3.8             | 62                  | 17.9                  | 67.47                                       |
| PF       | 12.6 | 3.8             | 62                  | 18.4                  | 67.33                                       |
| Cianuro  | 12.6 | 2               | 62                  | 84.9                  | 68.02                                       |

#### **4.3.2 Proceso cinético de lixiviación de oro en Au sensor con PF por QCM-D**

La cinética de lixiviación de oro para diferentes concentraciones de solución de PF bajo irradiación UV de 10 mW·cm<sup>-2</sup> en el sensor de Au se determinó mediante QCM-D. Los datos experimentales en tiempo real del cambio de frecuencia a lo largo del tiempo se obtuvieron del séptimo sobretono (frecuencia de resonancia = 35 MHz). Todas las operaciones aseguran que la línea de base antes de la prueba fuera inferior a 1 Hz en 5 min. El cambio de frecuencia ( $\Delta f$ ) y el cambio de disipación ( $\Delta D$ ) del proceso de lixiviación en la solución de PF se muestran en la Figura 10. La flecha 1 representa la inyección de la solución de PF en el sistema y la flecha 2 indica la entrada de la solución de fondo (agua desinizada) en el sistema después de que se estabilizó la tasa de lixiviación.

**Figura 11**

*Cambio de frecuencia ( $\Delta f$ ) y cambio de disipación ( $\Delta D$ ) frente al tiempo de lixiviación a 1 mmol/L PF, pH = 12. a, b, c, d y e representan las etapas iniciales de adsorción, lixiviación, desorción y lavado. 1 y 2 indican que la solución PF y el agua desionizada ingresan al sistema, respectivamente*



De acuerdo con la figura 10, la inyección de la solución PF provocó una disminución de  $\Delta f$  y un fuerte aumento de  $\Delta D$ , lo que indica que hay sustancias adsorbidas en la superficie del sensor en la etapa b. Esto se debe a que las especies de AuCN e hidróxido de Au se forman y precipitan en las superficies cuando hay una deficiencia de cianuro libre. Tras la inyección continua de solución de PF,  $\Delta f$  alcanzó su punto más bajo y luego comenzó a aumentar.

El aumento de  $\Delta f$  una tasa que aumenta gradualmente sugiere que los iones de cianuro en la solución aumentaron con la extensión del tiempo de irradiación en el estado de fuga c. Mientras tanto,  $\Delta D$  aumentó a un estado de equilibrio, lo que indica que la reacción entre la solución de lixiviación y el Au tuvo poco efecto sobre la viscoelasticidad de la superficie, y ese comportamiento puede interpretarse como una adsorción rígida. Cuando se bombeó la solución de fondo al sistema,  $\Delta f$  exhibió una tendencia ascendente ligeramente más rápida y finalmente alcanzó un equilibrio en un valor distinto de cero, lo que indica que se habían producido reacciones irreversibles entre el PF y el oro. Por el contrario,  $\Delta D$  disminuyó casi a su estado inicial, lo que indica que las propiedades de la superficie del sensor no cambiaron significativamente después de este experimento.

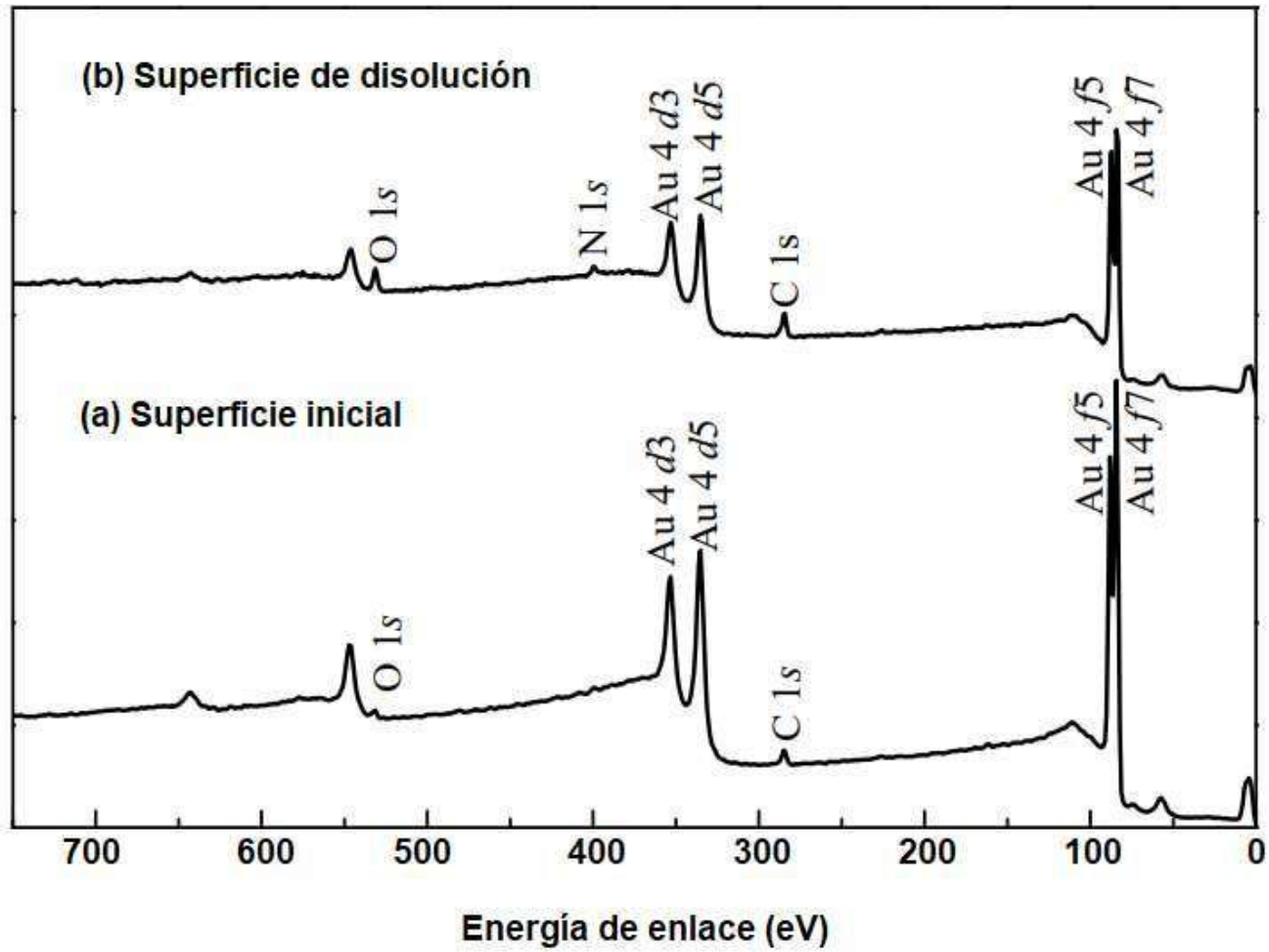
#### **4.3.3 Análisis de composición de productos superficiales por XPS**

Para estudiar la composición elemental y la morfología estructural de los productos de la superficie, se obtuvo el amplio espectro de energía XPS de los sensores limpios y tratados con agente. Los resultados se utilizaron para ilustrar la composición química de la superficie del sensor de Au. Como se muestra en la Figura 11, la superficie del sensor limpio contiene principalmente Au 4f y una pequeña cantidad de C 1s y O 1s, lo que confirma que el oro recubrió con éxito la superficie del sensor sin ningún otro elemento impuro. Después de la lixiviación, el

contenido relativo de C 1s y O 1s aumentó sustancialmente y apareció un nuevo elemento, N 1s. Este nuevo elemento indicó que C 1s, O 1s y N 1s se depositaron en la superficie del sensor después del proceso de lixiviación, lo que resultó en la formación de algunos complejos. Para determinar aún más la morfología química de los elementos, se investigaron las propiedades de enlace de cada elemento. Por lo tanto, el Au, C, N y O en los productos de la superficie se escanearon a energías estrechas y se usó el programa de ajuste de curvas del software Thermo Advantage para ajustar las líneas espectrales obtenidas.

**Figura 12**

*Amplio espectro de energía XPS de superficies iniciales y de disolución*

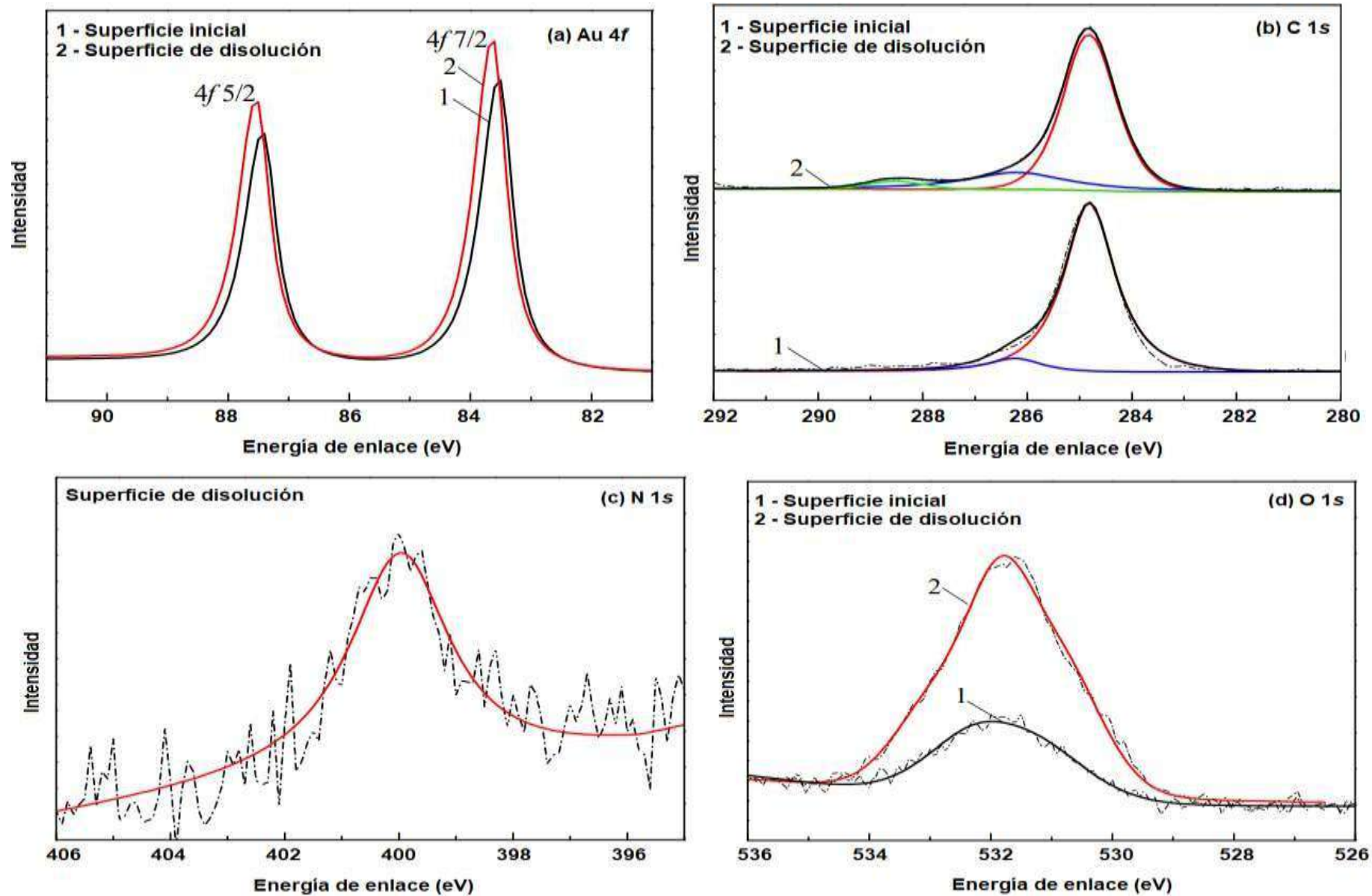


La estrecha curva de barrido de Au en las superficies de reacción inicial y de disolución se muestra en la Figura 12a. Las energías de enlace de los dos picos principales son de aproximadamente 83.90 eV, lo que es consistente con las energías de enlace del pico 4f 7 del Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy. Los resultados obtenidos confirmaron que había una gran cantidad de Au en la superficie del sensor. Además, el pico característico de la superficie de disolución se desplazó hacia la dirección de alta energía en comparación con la superficie inicial.

Este resultado indica que la densidad de carga alrededor de los átomos de Au disminuyó después de la reacción, y el Au con carga positiva emergió a la superficie del sensor.

**Figura 13**

*Espectro XPS de alta resolución de Au 4f (a), C 1s (b), N 1s (c) y O 1s (d)*



Los espectros XPS de alta resolución de C 1s en la superficie de los sensores originales y tratados con reactivo se muestran en la Figura 12b. De acuerdo con el gráfico, el pico principal de C 1s estaba en 284.80 eV, lo que demuestra que el C en la superficie se aproxima al pico característico del estado no unido C debido a la contaminación por trazas de hidrocarburos en la superficie del sensor. Los espectros exhibieron características asimétricas significativas, y el pico de C 1s en la superficie de disolución se desplazó 0.12 eV hacia la dirección de alta energía de enlace, lo que indica la existencia de otras especies de C 1s que contienen carbono. Luego se realizó un ajuste de picos para analizar las formas existentes de C 1s. En la superficie original se registraron picos a 284.84 y 286.70 eV en el espectro XPS, y corresponden a las trazas de contaminantes orgánicos preadsorbidos en la superficie del sensor. En comparación con el pico C 1s de la superficie original, la descomposición del pico C 1s en la superficie de disolución consta de tres picos. Además del pico C a 284.96 y 286.78 eV, apareció otro pico con energía de enlace mayor que el enlace C-C a 288.21 eV, correspondiente a  $-\text{C}\equiv\text{N}$  de los complejos formados durante el proceso de lixiviación.

Como se muestra en la Figura 12c, la ausencia de un pico característico de N 1s en la superficie inicial indica que la detección de N no se vio afectada por el entorno. En la superficie de disolución, el pico característico de N 1s fue de 399.96 eV, lo que coincide con la energía de enlace del enlace  $-\text{C}\equiv\text{N}$  [34]. Considerando el análisis XPS de C y Au, se puede inferir que N existe en forma de  $-\text{C}\equiv\text{N}$  y en complejos con Au en la superficie de disolución.

Como se muestra en los espectros de O 1s en la Figura 12d, la energía de enlace de O 1s fue de 531,94 eV, lo que coincide con el pico estándar de oxígeno adsorbido (Oads). Generalmente se cree que el Oads es O<sub>2</sub> o -OH cuando la



energía de enlace es de aproximadamente 532 eV. Según el gráfico, el contenido relativo de O 1s en la superficie de disolución aumentó claramente, lo que indica la presencia de -OH y su existencia probablemente en forma de  $\text{Au}(\text{OH})_n$ .

## CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- 1) Bajo la radiación ultravioleta, la solución PF podría disociarse y liberar iones de cianuro libres poco a poco. Además, la cantidad de iones de cianuro libres aumentó gradualmente con el aumento del tiempo y la intensidad de la irradiación. Sin embargo, ha habido un valor de saturación de la liberación de iones de cianuro libres a la concentración. La cantidad máxima liberada corresponde a una concentración de PF de 2.5 mmol/L, y la tasa de conversión de iones de cianuro es del 65.28 % después de la irradiación durante 60 min a una irradiación de  $10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ .
- 2) Los experimentos de lixiviación analizados por la metodología de superficie de respuesta mostraron una extracción de oro del 67.74% a  $62 \text{ }^\circ\text{C}$ , pH de 12.6 y dosificación de reactivo de 3.8 kg/t bajo luz ultravioleta de  $10 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . La cinética de lixiviación de la solución de PF monitoreada por QCM-D mostró que la liberación de iones de cianuro es un proceso de liberación gradual. La reacción de lixiviación en la solución consta de dos procesos: adsorción y lixiviación.
- 3) El análisis XPS mostró que había  $-\text{C}\equiv\text{N}$  en la superficie de reacción de disolución y que el oro se oxidó para formar complejos de AuCN. Se puede suponer que el ion cianuro libre se liberó de la solución de PF durante la reacción de lixiviación y formó AuCN y  $\text{Au}(\text{OH})_n$ .

## **RECOMENDACIONES**

1. Las pruebas desarrolladas en este trabajo de investigación tienen que ser continuadas en la profundización de los conocimientos de los parámetros operativos para la lixiviación con el reactivo propuesto, de tal manera que permita optimizar costos operativos y tener las dimensiones de los equipos en forma correcta.
2. El manejo de reactivos tiene que ser desarrollado de acuerdo a un adecuado manual de procedimientos, de tal forma que permita trabajar al operador con seguridad y sin ningún riesgo.
3. Siempre es importante la realización de un instrumento de gestión ambiental no obstante que se puede considerar a este reactivo como una alternativa que puede ofrecer ventajas ecológicas frente a la cianuración.
4. El Estado debe propiciar a través de las universidades trabajos de investigación que permitan resolver los problemas de la industria.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acton, C.F. (1982). "The technology of gold and silver extraction", AIChE. *Symposium Series*, 78 (216), pp.127-137.
- CEPECT (1990). "El Oro". Cepect-Concytec, Lima.
- Chapman T.G. (1939). A cyanide process based on the simultaneous dissolution and adsorption of gold. *Trans. AIME.*; 13, (1939) pp 207 -223
- Dana, H. (1965). "Manual de mineralogía", Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España
- Fuerstenau M.C. (1987). Rate of adsorption of gold cyanide on activated charcoal. *Min. Metall. Process.*; 4 , pp 177-181.
- Gilchirst, J. D. (1978). "Extraction Metallurgy", Pergamon Press, Oxford.
- Marsden, J., House, I. (1993). "The chemistry of gold extraction", Ellis Horwood Ed., Great Britain.
- Misari CH., F. (1993). "Metalurgia Del Oro", CEPECT, Lima - Perú, Tomo I y II.
- MUNDO MINERO, (1995). "Oro, Tratamiento De Los Minerales De Oro" Separata del Periódico Mundo Minero, Lima, Perú.
- Navarro, P., Vargas, C., Villarroel, A., and Alguacil, F.J., (2004), On the use of ammoniacal/ammonium thiosulfate for gold extraction from a concentrate. *Hydrometallurgy*, Vol 65, Issue 1, July 2002, pp. 37-42.
- Nagy, I y Otros. (1993). "Tratamiento químico de menas refractarias de oro", NIM, Randburg, South Africa

- Rosenqvist, T. (1987). "Fundamentos de metalurgia extractiva", Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), México.
- Sohn, H. Y. y Wadsworth, M. E. (1986) "Cinética de los procesos de la metalurgia extractiva". Ed. Trillas, México
- Van Arsdale, G. (1965). "Hidrometalurgia de los metales comunes", Ed. Uteha, México, 1965.
- Cyanamid.(1988). Manual De Productos Químicos Para La Minería. Edición Comercial, México.
- Currie, JM. (1984). Operaciones Unitarias En Procesamiento De Minerales. Trad. por Chia Aquije, J. y Chia Aquije, L., Lima - Perú.
- Kelly E., Spottiswood D. (1990). Introducción Al Procesamiento De Minerales. Editorial Limosa S.A., México D.F.
- Wills, B. A. (1992). Mineral Processing Technology. 5th. Edition, Pergamon Press, Oxford.

## **ANEXOS**



