



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA LIXIVIACIÓN DEL  
ORO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDROGENO**

**RAMÍREZ VELÁSQUEZ WELLINGTON FABRICIO  
INGENIERO QUIMICO**

**MORA VALLES NIURKA EDITH  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA  
LIXIVIACIÓN DEL ORO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
PERÓXIDO DE HIDROGENO**

**RAMÍREZ VELÁSQUEZ WELLINGTON FABRICIO  
INGENIERO QUIMICO**

**MORA VALLES NIURKA EDITH  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA  
LIXIVIACIÓN DEL ORO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
PERÓXIDO DE HIDROGENO**

**RAMÍREZ VELÁSQUEZ WELLINGTON FABRICIO  
INGENIERO QUIMICO**

**MORA VALLES NIURKA EDITH  
INGENIERA QUIMICA**

**ESPINOZA RAMON WASHINGTON OMAR**

**MACHALA  
2024**

# EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA LIXIVIACIÓN DEL ORO MEDIANTE APLICACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDROGENO

*por Niurka Mora Valles*

---

**Fecha de entrega:** 13-ago-2024 11:20a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2431359822

**Nombre del archivo:** TESIS\_MORA\_-\_RAMIREZ.pdf (1.28M)

**Total de palabras:** 10598

**Total de caracteres:** 52631

# EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA LIXIVIACIÓN DEL ORO MEDIANTE APLICACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDROGENO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorio.unsa.edu.pe">repositorio.unsa.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://bdigital.unal.edu.co">bdigital.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://ciencialatina.org">ciencialatina.org</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%

9	<a href="http://polodelconocimiento.com">polodelconocimiento.com</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://repositorio.cepal.org">repositorio.cepal.org</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://revistas.udca.edu.co">revistas.udca.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://digital.csic.es">digital.csic.es</a> Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	<1 %
14	<a href="http://quimicamedicinausac.files.wordpress.com">quimicamedicinausac.files.wordpress.com</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://revistas.sena.edu.co">revistas.sena.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
19	Submitted to University of Wales central institutions Trabajo del estudiante	<1 %

---

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, RAMÍREZ VELÁSQUEZ WELLINGTON FABRICIO y MORA VALLES NIURKA EDITH, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO EN LA LIXIVIACIÓN DEL ORO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDROGENO, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

RAMÍREZ VELÁSQUEZ WELLINGTON FABRICIO

0705005973

MORA VALLES NIURKA EDITH

0705957686



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Edith y Efren, quienes han sido una fuente inagotable de amor y sabiduría, cada logro que he alcanzado en este camino se debe a su constante apoyo y dedicación, ustedes han sido el pilar fundamental en mi carrera, enseñándome que los sueños se persiguen con el corazón y se logran con perseverancia. Agradezco también a mis hermanas Geovanna y Xiomara por sus valiosos consejos y a mis sobrinos, Jeremy e Isaac, por ser una luz en mi vida. No puedo olvidar a mis mascotas, Thor, Kitty y Figaro, quienes han sido mi apoyo emocional durante todo este viaje.

*Niurka Edith Mora Valles*

Trabajo de titulación dedicado primordialmente a Dios, a mis madres Matilde y Amalia Velásquez que han sido pilares fundamentales en mi formación académica durante todo mi trayecto universitario, a mis hermanos Edwin Ramírez y Yuri Velásquez que han sabido brindarme apoyo en todo momento, a mi novia Nathaly Plus por acompañarme en momentos muy importantes. A lo largo de este trayecto han hecho que este logro hoy por hoy sea posible.

*Wellington Fabricio Ramírez Velásquez*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios por permitirme culminar este desafío en mi vida. Estoy profundamente agradecida con mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y por motivarme a seguir adelante durante las adversidades que enfrenté a lo largo de mi carrera. Mi sincero agradecimiento al Ing. Washington Espinoza, cuya sabiduría, paciencia y dedicación han sido fundamentales en cada etapa de este proceso. A mi novio Luis, le agradezco por su apoyo constante en los momentos difíciles y por caminar a mi lado a lo largo de todo este viaje. Al Sr. Roque Ivan Andrade Espinoza, accionista de la Compañía Minera Exycominsur S.A. por su inmenso apoyo. También quiero expresar mi gratitud a mi amigo y compañero Fabricio Ramírez, por estar presente en los mejores momentos y por luchar junto a mí para alcanzar este objetivo.

*Niurka Edith Mora Valles*

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida, a mis madres Matilde y Amalia Velásquez por su inmenso apoyo, su paciencia y sobre todo por motivarme a continuar en los momentos más oscuros de mi carrera, agradezco también a mi tutor el Ing. Washington Omar Espinoza Ramon por darme las pautas necesarias para poder trabajar y culminar este trabajo de la mejor manera compartiendo sus conocimientos y experiencia en el campo practico, agradecimiento especial a mis amigos Niurka Mora, Brenda Toro, Abel Veliz, Darwin Bejarano, Erwin Salazar y Jean Aguilar por haber formado una amistad de aquellas que te motivan a ser mejor persona y cumplir cada meta y objetivo, por su ayuda eficaz en este trabajo. También al Sr. Roque Ivan Andrade Espinoza, accionista de la Compañía Minera Exycominsur S.A. por su apoyo.

*Wellington Fabricio Ramírez Velásquez*

## RESUMEN

El objetivo principal en esta investigación se centra en evaluar el impacto del uso de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en la lixiviación de oro, un proceso químico crucial para la extracción de este metal precioso. El objetivo principal es optimizar el consumo de cianuro ( $NaCN$ ), un reactivo costoso y potencialmente dañino para el medio ambiente, mediante la incorporación controlada de  $H_2O_2$ . Se realizaron varias pruebas experimentales, comparando el proceso de lixiviación en ausencia y presencia de  $H_2O_2$ . En las pruebas sin  $H_2O_2$ , la concentración de oro en la solución alcanzó un máximo de  $1.93\text{ g/m}^3$ , con un consumo total de  $256.5\text{ ml}$  de  $NaCN$ . El pH se mantuvo estable entre  $10.5$  y  $12$ , lo cual es crítico para la eficacia del proceso. Con la adición de  $H_2O_2$ , se observaron variaciones en la eficiencia de la extracción de oro. En la segunda prueba, donde se añadieron  $60\text{ ml}$  de  $H_2O_2$ , la concentración de oro alcanzó  $1.86\text{ g/m}^3$  utilizando  $198\text{ ml}$  de  $NaCN$ . En la tercera prueba, con una mayor adición de  $75\text{ ml}$  de  $H_2O_2$ , la recuperación de oro mejoró significativamente, llegando a  $2.05\text{ g/m}^3$ , con un consumo reducido de  $188\text{ ml}$  de  $NaCN$ . Finalmente, en la cuarta prueba, la adición escalonada de  $90\text{ ml}$  de  $H_2O_2$  resultó en la mayor eficiencia, alcanzando  $2.2\text{ g/m}^3$  con solo  $158\text{ ml}$  de  $NaCN$ . Los resultados demuestran que la incorporación de  $H_2O_2$  no solo reduce el consumo de cianuro, sino que también mejora la recuperación de oro. Estos hallazgos son fundamentales para el desarrollo de procesos más sostenibles y eficientes en la industria minera.

**Palabras claves:** Cianuración, Cianuro, Lixiviación, Peróxido de hidrogeno, Oro

## ABSTRACT

Our main objective in this research focuses on evaluating the impact of the use of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) in gold leaching, a crucial chemical process for the extraction of this precious metal. The main objective is to optimize the consumption of cyanide (NaCN), a costly and potentially environmentally harmful reagent, by controlled incorporation of  $H_2O_2$ . Several experimental tests were conducted, comparing the leaching process in the absence and presence of  $H_2O_2$ . In the tests without  $H_2O_2$ , the concentration of gold in solution reached a maximum of  $1.93\text{ g/m}^3$ , with a total consumption of 256.5 ml of NaCN. The pH remained stable between 10.5 and 12, which is critical for the efficiency of the process. With the addition of  $H_2O_2$ , variations in gold extraction efficiency were observed. In the second test, where 60 ml of  $H_2O_2$  were added, the gold concentration reached  $1.86\text{ g/m}^3$  using 198 ml of NaCN. In the third test, with further addition of 75 ml of  $H_2O_2$ , the gold recovery improved significantly, reaching  $2.05\text{ g/m}^3$ , with a reduced consumption of 188 ml of NaCN. Finally, in the fourth test, the stepwise addition of 90 ml of  $H_2O_2$  resulted in the highest efficiency, reaching  $2.2\text{ g/m}^3$  with only 158 ml of NaCN. The results demonstrate that the incorporation of  $H_2O_2$  not only reduces cyanide consumption, but also improves gold recovery. These findings are fundamental for the development of more sustainable and efficient processes in the mining industry.

**Key words:** Cyanidation, Cyanide, Cyanide, Leaching, Hydrogen Peroxide, Gold

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>7</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>INDICE DE ECUACIONES.....</b>	<b>11</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>12</b>
<b>INDICE DE GRAFICAS.....</b>	<b>13</b>
<b>INDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>14</b>
<b>LISTADO DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>18</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>18</b>
<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>1. MARCO TEORICO.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2 Oro.....</b>	<b>19</b>
1.2.1. Reacción química del oro.....	19
1.2.2 Usos.....	20
1.2.3 Valor económico.....	20
1.2.4 Aspectos medioambientales y sociales.....	21
1.2.5 Extracción y procesamiento.....	21
<b>1.3 Lixiviación.....</b>	<b>21</b>
1.3.1 Métodos de lixiviación.....	22
<b>1.4 Cianuración.....</b>	<b>24</b>
1.4.1 Consumo de cianuro.....	25

1.4.2 Toxicidad del cianuro .....	25
1.4.3 Economía del cianuro .....	25
<b>1.5 Minerales cianurables .....</b>	<b>26</b>
<b>1.6 Lixiviación de Oro con Cianuro:.....</b>	<b>27</b>
<b>1.7 Alternativas al cianuro en la lixiviación del oro .....</b>	<b>28</b>
1.7.1. Solventes sulfurados.....	29
1.7.2 Tiosulfato .....	29
1.7.3. Biolixiviación del oro. ....	30
1.7.4. Tiocianato .....	30
<b>1.8 Peróxido de Hidrogeno .....</b>	<b>30</b>
1.8.1 <i>Preparación del mineral</i> .....	31
<b>1.9 Beneficios al uso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> .....</b>	<b>32</b>
1.9.1 <i>Reducción del uso de cianuro</i> .....	32
1.9.2 <i>Prevención de pérdidas de cianuro por volatilización</i> .....	32
1.9.3 <i>Pasivación de minerales de sulfuro que consumen cianuro</i> .....	32
<b>1.9 Peligros para la salud del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.....</b>	<b>32</b>
<b>1.10 Caracterización del mineral .....</b>	<b>33</b>
<b>1.11 Procesos para determinar ley de oro.....</b>	<b>33</b>
1.11.1 <i>Espectrometría por absorción.</i> ....	33
1.11.2 <i>Ensayo a fuego.</i> .....	34
<b>2. METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1 Unidades de Análisis .....</b>	<b>35</b>
2.1.1 <i>Tipo de investigación</i> .....	35
2.1.2 <i>Ubicación</i> .....	35
2.1.2 <i>Variables de la investigación</i> .....	35
<b>2.2 Materiales y métodos .....</b>	<b>36</b>
2.2.1 <i>Materiales de laboratorio</i> .....	36
2.2.2 <i>Reactivos de laboratorio</i> .....	37
2.2.3 <i>Equipos de laboratorio</i> .....	37

2.2.4	<i>Diseño metodológico</i>	37
<b>2.3</b>	<b>Tratamiento preliminar de la muestra</b>	<b>38</b>
2.3.1	<i>Obtención de material para la lixiviación</i>	38
2.3.2	<i>Molienda del material</i>	38
2.3.3	<i>Preparación de soluciones</i>	38
2.3.4	<i>Volumen del tanque</i>	39
2.3.5	<i>Material a usarse</i>	40
2.3.6	<i>Calculo de NaCN</i>	41
<b>2.4</b>	<b>Proceso de lixiviación</b>	<b>41</b>
2.4.1	<i>Caracterización de la muestra</i>	41
2.4.2	<i>Neutralización</i>	41
2.4.3	<i>Agitación</i>	41
2.4.4	<i>Lixiviación en tanque</i>	41
2.4.5	<i>Porcentaje de extracción</i>	42
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Pruebas de lixiviación</b>	<b>43</b>
3.1.1	<i>Prueba 1 de lixiviación sin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i>	43
3.1.2	<i>Prueba 2 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%</i>	46
3.1.3	<i>Prueba 3 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%</i>	49
3.1.4	<i>Prueba 4 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%</i>	52
<b>3.2</b>	<b>Extracción de solidos en las pruebas preliminares</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>Consumo de CN<sup>-</sup></b>	<b>56</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>5.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>59</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>65</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Demanda mundial de consumo de oro, 2018.....	20
Figura 2 Diagrama Eh-pH limitado para el sistema oxígeno/peróxido/agua a 25°C.....	31
Figura 3 Ubicación geográfica del punto de recolección de la materia prima .....	35



## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Formula de dilución .....	38
Ecuación 2 Masa de $\text{AgNO}_3$ .....	38
Ecuación 3 Volumen del tanque .....	39
Ecuación 4 Volumen operativo .....	40
Ecuación 5 Concentración de cianuro.....	41
Ecuación 6 Porcentaje de extracción de oro .....	42

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Métodos de lixiviación .....	22
Tabla 2 Variables de la investigación .....	36
Tabla 3 Prueba 1 de lixiviación sin H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	44
Tabla 4 Prueba 2 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% .....	47
Tabla 5 Prueba 3 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% .....	50
Tabla 6 Prueba 4 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50%.....	53
Tabla 7 Extracción de sólidos en las 4 pruebas .....	56

## INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1 Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 1 de lixiviación sin H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ....	45
Grafica 2 Concentración de oro total en la prueba 1 de lixiviación sin H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	46
Grafica 3 Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 2 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% .....	48
Grafica 4 Concentración de oro total en la prueba 2 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50%.....	49
Grafica 5 Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 3 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% .....	51
Grafica 6 Concentración de oro total en la prueba 3 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50%.....	52
Grafica 7 Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 4 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% .....	54
Grafica 8 Concentración de oro total en la prueba 4 de lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50%.....	55
Grafica 9 Consumo de CN <sup>-</sup> en cada prueba.....	57

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> Tratamiento preliminar de la muestra.....	65
<b>ANEXO B.</b> Preparación de las soluciones .....	65
<b>ANEXO C</b> Proceso de lixiviación .....	66
<b>ANEXO D</b> Resultados.....	68

## LISTADO DE ABREVIATURAS

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**: Peróxido de hidrogeno

**Au**: Oro

**pH**: Potencial de hidrogeno

**HCN**: Acido cianhídrico

**ppm**: Partes por millón

**Eh**: Potencial de voltaje

**CN**: Cianuro

**AgNO<sub>3</sub>**: Nitrato de plata

**KI**: Yoduro de potasio

**NaOH**: Hidróxido de sodio

## INTRODUCCION

La extracción de oro es un proceso crucial en la industria minera, donde la lixiviación se destaca como uno de los métodos más comunes para recuperar este valioso metal de minerales de baja ley. Históricamente, el cianuro ha sido el reactivo predominante en la lixiviación de oro debido a su efectividad en disolver y extraer el metal precioso de los minerales. Sin embargo, su empleo genera graves problemas ambientales y salud pública por su toxicidad y el peligro de contaminar ríos, lagos y tierras.<sup>1</sup>

Frente a los riesgos asociados a los métodos tradicionales, se ha estudiado el potencial uso de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como una opción para ser un agente lixivante alternativo en la extracción de oro. A diferencia del cianuro, el peróxido de hidrógeno es un oxidante suave y no tóxico, lo que lo presenta como una opción prometedora para la industria minera. Esta tesis se centra en analizar el consumo de cianuro en comparación con la lixiviación de oro utilizando una combinación de cianuro y peróxido de hidrógeno.<sup>2</sup>

El propósito principal de este estudio es comparar la eficiencia de la lixiviación de oro con cianuro frente a la lixiviación que combina cianuro y peróxido de hidrógeno. Para alcanzar este objetivo, se realizarán una serie de experimentos tanto a escala de laboratorio como, en ciertos casos, a escala piloto. Estos experimentos evaluarán varios parámetros importantes como la extracción de oro, como el consumo de reactivos, la cinética de lixiviación, la recuperación del oro y la calidad del producto final.<sup>1</sup>

La investigación se llevará a cabo en varias fases. Primero, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre la lixiviación de oro utilizando cianuro y peróxido de hidrógeno, con el fin de establecer una base de conocimiento sólida en este campo. Este análisis nos permitirá conocer las carencias en las investigaciones que ya se encuentran existentes y establecer una base teórica sólida para las futuras investigaciones.

Posteriormente, se diseñarán y llevarán a cabo experimentos de laboratorio para comparar directamente la efectividad del proceso de lixiviación de oro con cianuro y la lixiviación con cianuro y peróxido de hidrógeno. Estos experimentos se centrarán en la determinación de la cinética de disolución del oro, la selectividad del reactivo y la influencia de diferentes condiciones operativas en el proceso de lixiviación.

Una vez completada la fase de laboratorio, se seleccionarán los casos más prometedores para ser evaluados a escala piloto. Esta etapa implicará la implementación de sistemas de lixiviación a mayor escala para validar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y

evaluar la viabilidad técnica y económica de la aplicación de la lixiviación con peróxido de hidrógeno a nivel industrial.

Los resultados de este estudio ofrecerán una comprensión más detallada de la eficiencia de la lixiviación de oro utilizando peróxido de hidrógeno en comparación con el método convencional con cianuro. Asimismo, se espera que esta investigación aporte al desarrollo de prácticas más sostenibles y seguras en la industria minera, promoviendo la implementación de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente. Se espera que los hallazgos de este estudio contribuyan significativamente a mejorar la eficiencia en los futuros procesos de extracción de oro.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **Objetivo General**

Evaluar a nivel laboratorio el consumo de cianuro en la lixiviación de oro mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno, para minimizar el consumo de cianuro sin afectar la recuperación de oro.

### **Objetivos Específicos**

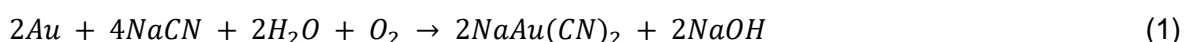
- Determinar características químicas de la materia prima.
- Evaluar el consumo de cianuro en la lixiviación de oro mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno.
- Comparar la eficiencia de la lixiviación del oro con peróxido de hidrogeno con la lixiviación con cianuro.



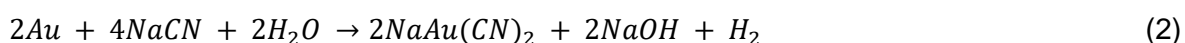
## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 Antecedentes

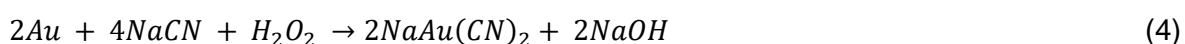
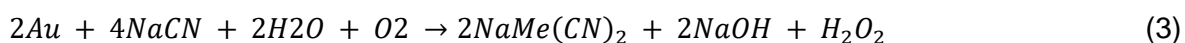
En 1783, Carl Wilhelm Scheele realizo el descubrimiento que el oro podía disolverse en cianuro. Posteriormente, en 1846, L. Elsner desarrolló la Teoría del Oxígeno, presentando una ecuación que demostraba la importancia del oxígeno en la disolución del oro en una solución de cianurada. La ecuación, que se muestra a continuación, describe este proceso:



La Teoría del Hidrógeno ofrece una perspectiva distinta. Aunque los hermanos Forrest y MacArthur son reconocidos como pioneros en la cianuración, no lograron identificar el papel crucial del oxígeno en el proceso de disolución. En su lugar, sugirieron una ecuación en la que el hidrógeno se genera como un subproducto de la reacción. No obstante, en esa misma época, MacLaurin y Christy descubrieron que, al incrementar la concentración de cianuro y oxígeno disuelto, la velocidad de reacción se incrementa.<sup>3</sup>



La Teoría del Peróxido de Hidrógeno, planteada por G. Bodlander en 1896, propone que el mecanismo de reacción dado por la ecuación (1) se puede entender como un proceso en dos fases (ecuaciones 3 y 4), en el cual el peróxido de hidrógeno actúa como un intermediario en el transcurso de la reacción.<sup>4</sup>



Aunque en ese período se especuló mucho y se llevaron a cabo numerosos estudios sobre la importancia del oxígeno en la disolución del oro, no fue hasta 1934 cuando Barsky, Swainson y Hedley calcularon las energías libres de las reacciones previamente sugeridas. Este análisis permitió demostrar, desde una perspectiva termodinámica, que las reacciones propuestas por Elsner y Bödlander eran las únicas viables.<sup>5</sup>

### 1.2 Oro

El oro es un elemento químico representado por el símbolo Au y tiene el número atómico 79. Es uno de los metales más valorados y codiciados desde la antigüedad debido a su belleza, rareza y durabilidad. Es un metal blando, maleable y dúctil, por lo que puede ser maleado en diferentes formas y su color amarillo brillante lo distingue de otros metales.<sup>6</sup> Se encuentra disperso en pequeñas cantidades, lo que lo hace difícil y costoso de extraer,

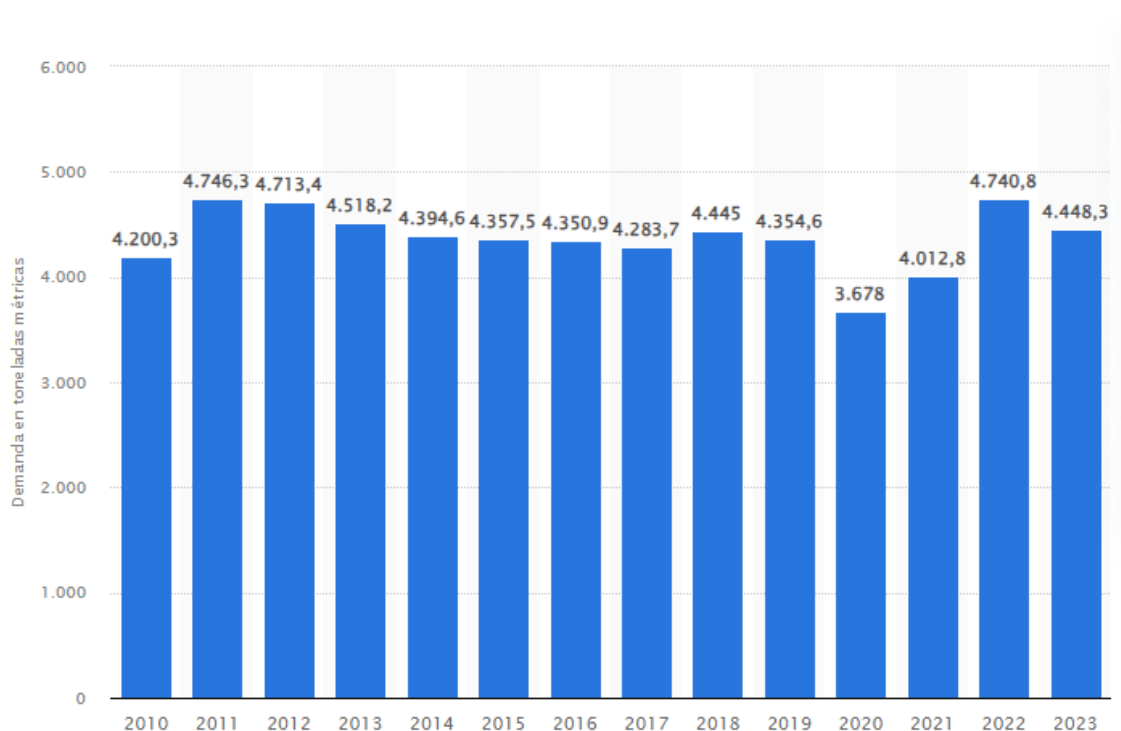
estos se encuentran en depósitos aluviales, filones de cuarzo y yacimientos, sus principales productores son China, Australia, Rusia, Estados Unidos, Sudáfrica y Canadá.

*1.2.1. Reacción química del oro.* El oro se considera el metal más noble debido a su estabilidad y baja reactividad con el oxígeno y los ácidos fuertes presentes en el aire y el agua. Esta característica lo convierte en un metal precioso muy valorado en la industria, ya que puede ser utilizado en diversas aplicaciones. Sin embargo, para disolver el oro presente en una solución acuosa, es indispensable emplear un agente complejante y un agente oxidante para obtener tasas de lixiviación adecuadas. La estabilidad del oro se ve comprometida solo en presencia de ciertos ligandos, como el cianuro, cloruro, haluros, tiourea, tiocianato, tiosulfato y algunos ácidos orgánicos, que forman complejos estables con el oro.<sup>7</sup>

*1.2.2 Usos.* Tiene una amplia gama de aplicaciones, históricamente se ha utilizado para monedas, en la actualidad se utiliza principalmente en joyerías y artículos de lujo debido a su belleza y resistencia a la corrosión, también se usa en la electrónica especialmente en la fabricación de dispositivos electrónicos de alta tecnología debido a su conductividad eléctrica, además se utiliza en la industria médica en dispositivos como lo son marcapasos y tratamientos contra el cáncer.<sup>8</sup>

*1.2.3 Valor económico.* El valor del oro es muy variable y se encuentra sujeto a diferentes fluctuaciones en los mercados financieros globales. Se negocia en los mercados financieros como una mercancía y su precio se fija según la oferta y demanda.<sup>9</sup>

Figura 1 Demanda mundial de consumo de oro, 2010 a 2023



Fuente: <sup>9</sup>

*1.2.4 Aspectos medioambientales y sociales.* La minería de oro puede tener muchos impactos en el medio ambiente, puede resultar en la degradación del paisaje, contaminación del agua y hasta la deforestación. Además, en algunas áreas ha estado ligado a conflictos sociales, violaciones de derechos y prácticas laborales injustas, la preocupación de estos problemas ha llevado a tener un mayor escrutinio y regulación de la industria minera en múltiples países.<sup>8</sup>

*1.2.5 Extracción y procesamiento.* La extracción de oro se realiza mediante varios métodos que incluyen minera a cielo abierto, minera subterránea y minería de placer, una vez sea extraído el mineral se procesa para separar el metal de otros minerales que pueden venir dentro de la extracción, los procesos más comunes son trituración, lixiviación con cianuro y procesos de refinación para producir oro de forma pura.<sup>10</sup>

### 1.3 Lixiviación

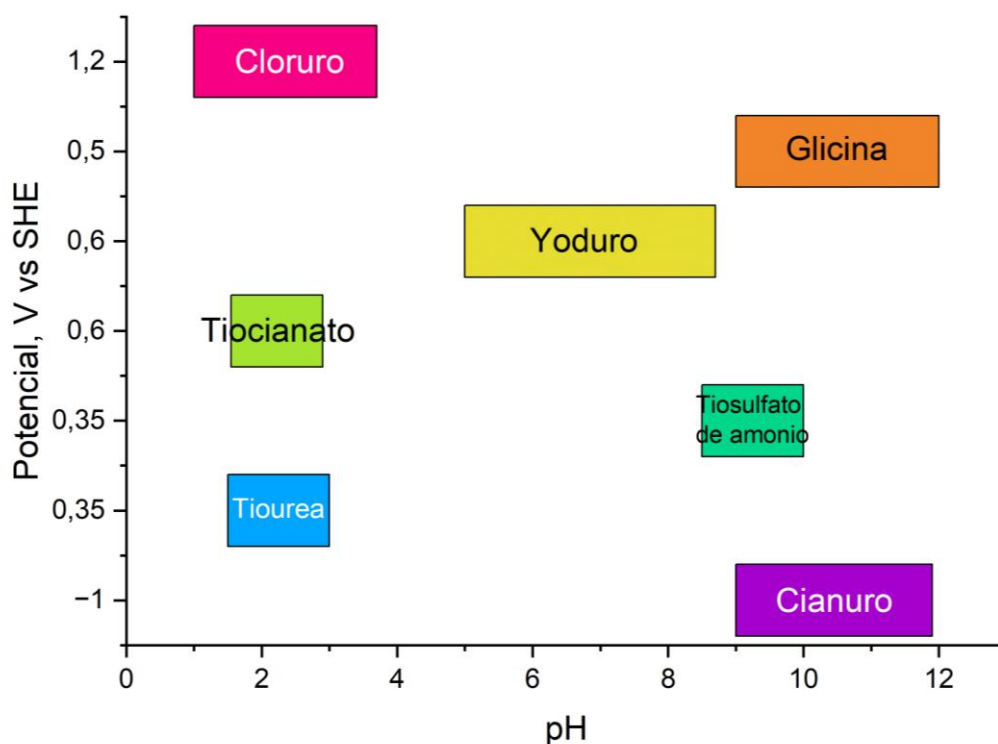
La lixiviación del oro es un proceso crucial en la minería para extraer este metal precioso de los minerales que lo contienen. Tradicionalmente, se ha utilizado cianuro para este propósito debido a su gran eficacia para disolver el oro en los minerales. No obstante, el

empleo de cianuro genera preocupaciones ambientales y de seguridad debido a su toxicidad y posibles efectos perjudiciales sobre la salud humana y el medio ambiente.<sup>11</sup>

El proceso de lixiviación de oro por cianuración ha sido el más común para extraer oro de minerales en pulpa alcalina de cianuro. La lixiviación de oro se ha estudiado con notoriedad en abundantes plantas de fundición de oro a lo largo de un siglo, debido a su organización simple y la disminución de importe operación.<sup>12</sup> Para apresurar la recuperación de oro, en las plantas industriales se acostumbra utilizar una cascada de reactores de tanque agitado continuo para la recuperación del oro en las plantas industriales, para incrementar la tasa y recuperar el tiempo de residencia.<sup>13</sup>

Dado que el producto aurífero es de gran valor, la tasa de restablecimiento es el indicador más considerable en las plantas de fundición de oro. Generalmente la lixiviación de oro se representa manualmente de modo heurística, y se suma el exceso de cianuro para respaldar la recuperación del producto aurífero.<sup>14</sup>

Figura 2 Diagrama de potencial en función de pH para soluciones potenciales para lixiviar el oro



Fuente: <sup>15</sup>

1.3.1 Métodos de lixiviación. La lixiviación es un método hidrometalúrgico empleado para extraer metales preciosos de sus minerales utilizando soluciones acuosas, y se utilizan diversos métodos según las propiedades del mineral y las condiciones de operación. La

lixiviación en pilas, adecuada para grandes volúmenes de mineral de baja ley, es económica pero lenta, mientras que la lixiviación en tanques y por agitación, aunque más costosas, ofrecen alta recuperación y control preciso. La lixiviación en autoclave, que utiliza alta presión y temperatura, es eficiente pero cara y riesgosa. La lixiviación in situ minimiza el impacto ambiental superficial, pero tiene un control limitado, y la lixiviación bacteriana es ecológica y efectiva para minerales refractarios, aunque más lenta. Factores como la naturaleza del mineral, tamaño de partícula, concentración de la solución, tiempo, temperatura y presión afectan la eficiencia de la lixiviación. La elección del método adecuado depende de estos factores y de los objetivos específicos de la operación minera.

Tabla 1 Métodos de lixiviación

Lixiviación in-situ	Abarcan métodos para disolver minerales en agua y técnicas de lixiviación que utilizan productos químicos disueltos en agua; estos enfoques permiten recuperar metales de depósitos minerales donde los métodos convencionales no son aplicables.
Lixiviación en botaderos	Involucra la lixiviación de rocas de baja calidad, desmontes o residuos de minas a cielo abierto con bajo contenido mineral, donde los métodos tradicionales no son viables. Aunque esta técnica tiene un rendimiento limitado, sus costos son bajos.
Lixiviación en batea	Este método implica colocar un lecho de mineral en contacto con una solución acuosa, de manera que el proceso de percolación empape el mineral en una batea o estanque. La aplicación de esta técnica indica que los minerales deben tener un contenido alto y pueden ser lixiviados en un rango de 3 a 14 días.
Lixiviación por agitación	Este método implica agitar los minerales de alta ley con la solución lixivante. Antes de la lixiviación, los minerales deben ser sometidos a procesos de conminución para obtener partículas finas, permitiendo así que los valores se liberen y queden expuestos a la solución.
Lixiviación en pilas	El mineral obtenido de la voladura se procesa de manera que su tamaño se reduce hasta lograr una granulometría adecuada para asegurar un alto coeficiente de permeabilidad. Posteriormente, el mineral se apila en montones con una

---

sección trapezoidal y altura determinada, y se instala un sistema de riego para aplicar la solución lixivante.

---

Fuente: Elaboración propia

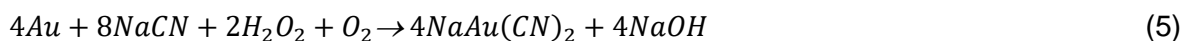
---

#### 1.4 Cianuración

El proceso de cianuración es uno de los métodos más utilizados para la recuperación de oro de los minerales. Su popularidad se basa en su alta eficiencia y bajo costo operativo, convirtiéndolo en una opción atractiva para la industria minera, sin embargo, este proceso también presenta riesgos ambientales y para la salud debido a la toxicidad del cianuro, lo que exige un análisis profundo de sus ventajas, desventajas y consideraciones éticas.<sup>16</sup>

La lixiviación con cianuro se fundamenta en las propiedades del oro: este mineral no se disuelve en ácidos sulfúricos, clorhídrico o nítrico, pero sí en agua regia (una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico). El oro es soluble en soluciones diluidas de cianuro, por lo que el cianuro se emplea como lixivante para su extracción a través de este proceso hidrometalúrgico. La cianuración se basa en la capacidad del cianuro de disolver metales preciosos formando complejos solubles en agua, lo que permite su posterior recuperación mediante procesos de separación.<sup>17</sup>

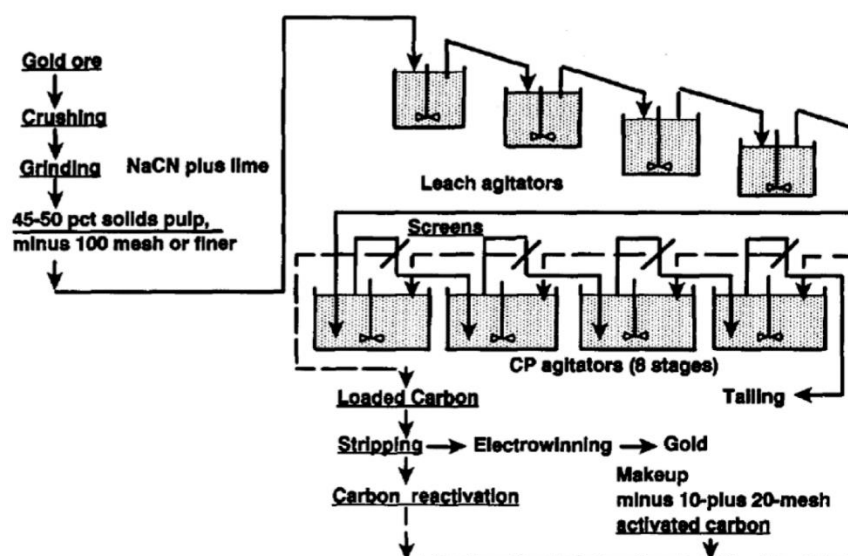
Reacción del cianuro de oro:



A continuación, en la siguiente figura

se muestra el proceso hidrometalurgia que comienza con los agitadores de lixiviación donde la pulpa entra en contacto con cianuro, oxígeno, agua y cal, iniciando el proceso de lixiviación.

Figura 3 Diagrama de lixiviación de oro con cianuración



Fuente: <sup>16</sup>

**1.4.1 Consumo de cianuro.** El cianuro se utiliza en la lixiviación del oro porque es uno de los métodos más comunes y efectivos para su extracción. Este proceso consiste en disolver el oro del mineral en una solución de cianuro, generalmente cianuro de sodio o cianuro de potasio. La elección del tipo de cianuro puede variar según diversos factores, como la composición del mineral, la granulometría, la concentración de cianuro en la solución, la temperatura y el tiempo de lixiviación.<sup>18</sup>

La dosificación excesiva de cianuro dentro de una planta de procesamiento puede aumentar los costos operativos, sin mejorar en ningún sentido la recuperación de oro, mientras que la dosificación insuficiente reducirá la eficiencia de la extracción. Es fundamental controlar y monitorear la concentración de cianuro en la solución durante todo el proceso para garantizar una operación eficiente y segura.

**1.4.2 Toxicidad del cianuro.** El cianuro es un elemento extremadamente tóxico para los seres humanos y otros organismos vivos si no se maneja correctamente. Es crucial tomar precauciones al trabajar con cianuro y estar preparado para actuar de manera rápida y eficaz en caso de emergencia.

Su toxicidad se debe a que impide la capacidad del cuerpo para utilizar oxígeno, bloqueando la actividad de una enzima llamada citocromo oxidasa, esencial para la respiración celular. Sin una respiración adecuada, las células no pueden producir energía y mueren rápidamente, afectando especialmente al corazón y al cerebro.<sup>19</sup>

La intoxicación por cianuro puede suceder por inhalación, ingestión o absorción a través de la piel. Los síntomas pueden incluir dificultad para respirar, confusión, mareos, dolor de cabeza, náuseas y vómitos. En los casos más severos, puede provocar convulsiones, pérdida del conocimiento, paro cardíaco o incluso la muerte.<sup>20</sup>

La toxicidad del cianuro no se limita solamente a los seres vivos, también puede tener efectos en el medio ambiente. Una de las preocupaciones más importantes es su capacidad para contaminar fuentes de agua, si las soluciones de cianuro no se manejan y eliminan adecuadamente puede filtrarse al suelo y alcanzar las aguas subterráneas y superficiales, contaminar ríos, lagos y acuíferos. La contaminación por cianuro tiene graves consecuencias dentro del mundo marino como la muerte de peces, y otros organismos acuáticos y también puede tener efectos negativos en las comunidades que depende de beber agua o usarla en otras necesidades.<sup>21</sup>

También puede afectar la vegetación, especialmente en áreas que se encuentren cercanas a operaciones mineras donde es utilizado el cianuro, las plantas los pueden absorber mediante el suelo o agua pueden morir como resultado a la exposición, puede afectar la biodiversidad y estabilidad de los ecosistemas. Puede tener efectos en el suelo reduciendo la capacidad para sostener la vida vegetal y microbiana, esto puede conducir a la erosión del suelo, pérdida de fertilidad y la degradación del paisaje.

Debido a su alta toxicidad el cianuro debe ser manejado y almacenado de manera adecuada cumpliendo las normativas establecidas de seguridad y ambientales, las empresas que se dediquen al uso de este elemento deben cumplir rigurosas normativas para garantizar la seguridad de sus trabajadores y prevenir la contaminación ambiental.<sup>22</sup>

*1.4.3 Economía del cianuro.* El uso del cianuro está asociado principalmente con la industria minera, especialmente en la extracción de metales preciosos como el oro. Este reactivo químico es muy económico en comparación con otros reactivos utilizados en la extracción de oro, lo que lo convierte en una opción altamente rentable para las operaciones mineras. El costo de producción del cianuro se ve afectado por factores como el precio de los insumos y la energía necesaria para su fabricación, así como por los estándares de seguridad y medioambientales que deben cumplirse durante su producción.<sup>9</sup>

## **1.5 Minerales cianurables**

Es fundamental evaluar la presencia o ausencia de agentes cianicidas antes de iniciar la extracción de minerales de plata y oro, ya que estos factores influyen significativamente en la recuperación de los metales preciosos. También es importante considerar que Las



partículas de carbono, que retienen los metales preciosos, y los materiales orgánicos, que consumen el oxígeno de la solución, pueden influir en el proceso. Para lograr una disolución efectiva, los metales preciosos deben estar en forma de partículas finas. De acuerdo con el método sugerido en esta investigación, la roca debe tener características de porosidad y permeabilidad, debe triturarse. Sin embargo, se debe evitar una cantidad excesiva de materiales arcillosos, ya que estos reducen la efectividad de la percolación, problema que se puede solucionar mediante la aglomeración de partículas finas.<sup>20</sup>

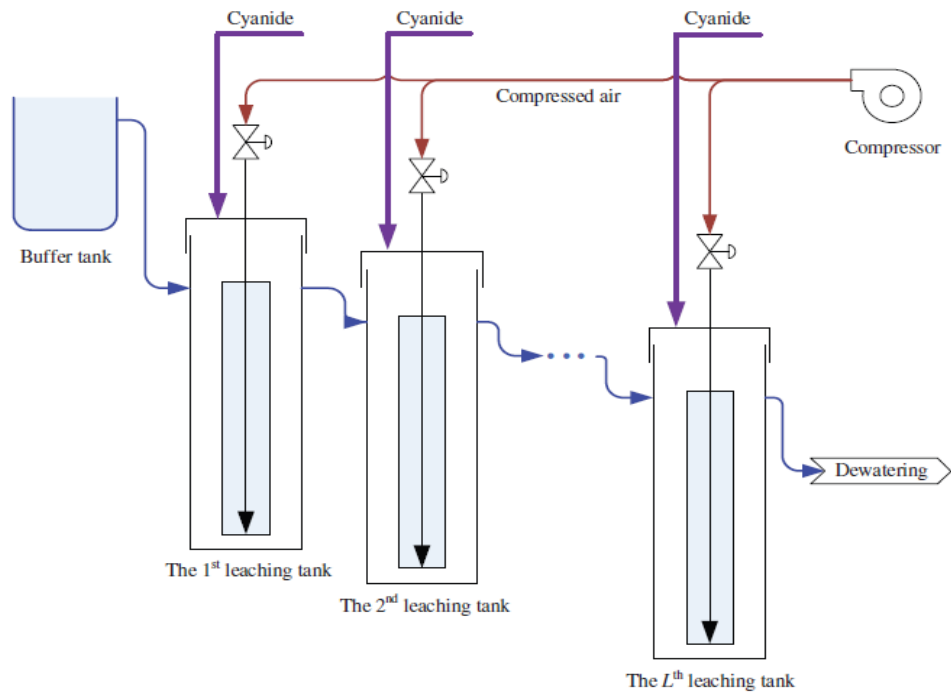
Cada material tiene características propias, por lo que es fundamental conocer su composición mineralógica para identificar minerales valiosos y entender cómo se comportará el mineral durante la cianuración. Antes de iniciar este proceso, el mineral debe ser preparado de manera adecuada, eliminando agentes cianicidas y sulfuros parcialmente oxidados de elementos oxidados de elementos como Cu, Fe, Sb y Zn, que pueden obstaculizar la solubilidad del oro. Las partículas del mineral deben ser medianamente finas para facilitar una disolución más rápida. La permeabilidad del material es esencial, ya que la solución debe tener contacto con la superficie del mineral de interés. Además, el mineral no debe contener ácidos; si los hay, es necesario realizar un pretratamiento adecuado.<sup>23</sup>

### **1.6 Lixiviación de Oro con Cianuro:**

Durante décadas, la lixiviación con cianuro ha sido el método principal para la extracción de oro debido a su alta eficiencia y selectividad para disolver el oro. El cianuro forma complejos solubles con el oro, facilitando su extracción en una solución acuosa. No obstante, el uso de cianuro conlleva riesgos significativos para el medio ambiente y la salud pública, como la contaminación de suelos y aguas subterráneas, así como el peligro de envenenamiento en caso de fugas o derrames.<sup>24</sup>

El proceso de cianuración se utiliza ampliamente para extraer oro de minerales y concentrados. Consiste en triturar el material que contiene metales preciosos y tratarlo con soluciones alcalinas diluidas de cianuro de sodio. Bajo la acción de estas soluciones, el oro y la plata se disuelven y se incorporan a la solución. La selectividad del cianuro de sodio como disolvente, junto con la combinación efectiva de disolución y precipitación de metales preciosos, la simplicidad del equipo y otras ventajas de la cianuración, hacen que este proceso sea muy eficiente y productivo. Además, esta tecnología es aplicable no solo a concentrados, sino también a minerales de oro, e incluso a materias primas en algunos casos.<sup>23</sup>

Figura 4 Diagrama de una planta de lixiviación de oro



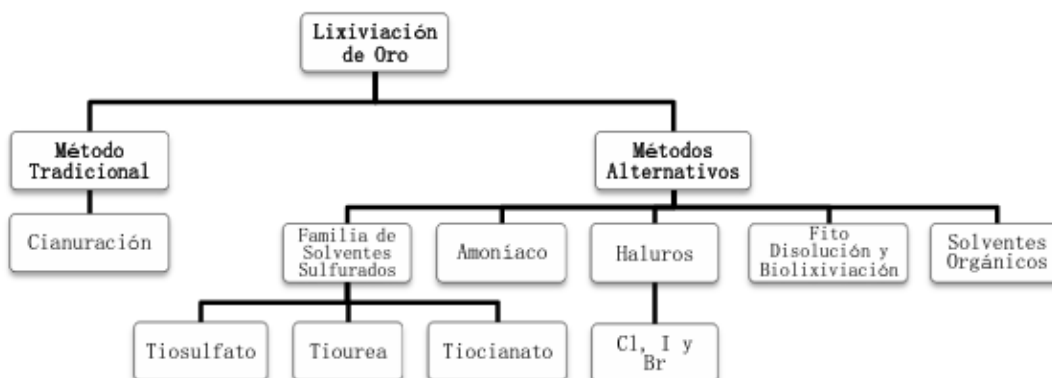
Fuente: <sup>14</sup>

### 1.7 Alternativas al cianuro en la lixiviación del oro

La lixiviación es un proceso en el que un metal, en este caso el oro, se disuelve en un líquido. Esta disolución ocurre principalmente en una solución acuosa, y para lograr tasas de lixiviación adecuadas se requieren tanto un agente complejante como un oxidante. La estabilidad del oro se ve afectada únicamente en presencia de ciertas sustancias llamadas ligandos, como el cianuro, el cloruro, la tiourea y los iones tiosulfato. Estos ligandos forman complejos estables con el oro.<sup>7</sup>

El cianuro es el método más común para la extracción de oro a nivel industrial, pero conlleva riesgos significativos para la salud y el medio ambiente.<sup>25</sup> Por ello, se buscan alternativas más seguras y sostenibles. Algunas de las alternativas más prometedoras son:

Figura 5 Métodos de disolución de oro



Fuente: <sup>7</sup>

1.7.1. *Solventes sulfurados*. La lixiviación del oro con solventes sulfurados es una opción alternativa a la cianuración para la extracción de oro de los minerales. Se basa en la capacidad de los solventes sulfurados, como el tiosulfato de sodio, tiourea o tiocianato. El cianuro y sus compuestos, descargados en depositar efluentes mineros, que son tóxicos para los organismos vivos, ya que el pH inferior a 9.5 ocasiona un deterioro a un ácido cianhídrico (HCN), un reactivo mortal a concentraciones de 250 ppm en el aire.

La producción de impactos al agua por inoculación de metales intensos, la aniquilación del suelo sin precedente tratamiento y la afectación del aire por gases derivados, han ocasionado un impacto negativo en la flora y fauna, debido a la actividad artesanal y la corta minería se forma algunas investigaciones acerca de los procedimientos convencionales de la reforma del cianuro y así mismo con los métodos opcionales con el uso de biomasa y materiales compuestos, adquiridos de carbones activados, con la finalidad de apreciar los mecanismos de remoción del ion de cianuro acuoso.<sup>17</sup>

1.7.2 *Tiosulfato*. La extracción de oro de minerales mediante lixiviación con tiosulfato es una alternativa a la cianuración. Este método aprovecha la capacidad del tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) para disolver el oro en forma de complejos oro-tiosulfato,  $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2$ .<sup>26</sup>

En la lixiviación de oro de minerales refractarios o de baja ley, el tiosulfato está emergiendo como una alternativa a la cianuración tradicional por dos razones principales: su menor toxicidad y su menor impacto medioambiental en comparación con la cianuración. El tiosulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$  es el ingenio químico clave que sirve en este proceso. El depósito de oro con tiosulfato se realiza normalmente junto con un agente de complejación, como amoníaco, y un agente oxidante, como peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), para mejorar la velocidad de disolución del oro.<sup>15</sup>

*1.7.3. Biolixiviación del oro.* La biolixiviación es un método empleado en la minería para extraer metales de minerales sulfurados utilizando microorganismos, principalmente bacterias y hongos. Estos microorganismos tienen la capacidad de oxidar los minerales y disolver los metales presentes en ellos. Este proceso se basa en la habilidad de ciertos microorganismos para oxidar compuestos sulfurados, liberando iones metálicos en la solución. La biolixiviación ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales de lixiviación química, tales como la reducción en el uso de productos químicos tóxicos, la capacidad de tratar minerales refractarios y la posibilidad de operar de manera más sostenible.<sup>27</sup>

Sin embargo, también tiene algunas limitaciones, como la necesidad de controlar cuidadosamente las condiciones del proceso y la velocidad relativamente lenta de lixiviación en comparación con algunos métodos químicos. A pesar de estas limitaciones, la biolixiviación sigue siendo una técnica prometedora en la industria minera, especialmente para la extracción de metales de baja ley o minerales refractarios.<sup>15</sup>

*1.7.4. Tiocianato.* La lixiviación de oro con tiocianato es una alternativa a la cianuración tradicional para extraer oro de minerales refractarios o de baja ley. En este método, se utiliza tiocianato de sodio (NaSCN) como agente lixivante en lugar de cianuro. El tiocianato forma complejos solubles con el oro, lo que facilita su disolución en la solución de lixiviación. Esta técnica se emplea para lixiviar oro de minerales de óxido y se utiliza la metodología de superficie de respuesta para determinar las condiciones óptimas que maximicen la recuperación de oro. Este enfoque es popular porque es rentable y altamente preciso. Primero, se llevan a cabo estudios piloto para evaluar cómo afecta el tiocianato inicial, las concentraciones de hierro y las densidades de la pulpa a la lixiviación del oro en un mineral de óxido.<sup>24</sup>

## **1.8 Peróxido de Hidrogeno**

El peróxido de hidrógeno, que también conocemos como peróxido, se considera uno de los agentes oxidantes más poderosos que podemos encontrar en teoría. Tiene un alto potencial de reducción estándar de 1.76 V para la reacción. Sin embargo, a pesar de que se han realizado investigaciones significativas en laboratorio sobre su potencial uso en la lixiviación oxidativa de minerales, su aplicación práctica ha sido bastante limitada. Esto se debe en parte al costo asociado con este reactivo, pero también a diversos aspectos de su química de uso que aún no se han apreciado ni comprendido completamente.<sup>21</sup>

Después de un breve repaso de la literatura previa, se ha observado que existen estudios de laboratorio sobre el uso del peróxido en la lixiviación oxidativa de minerales sulfurados

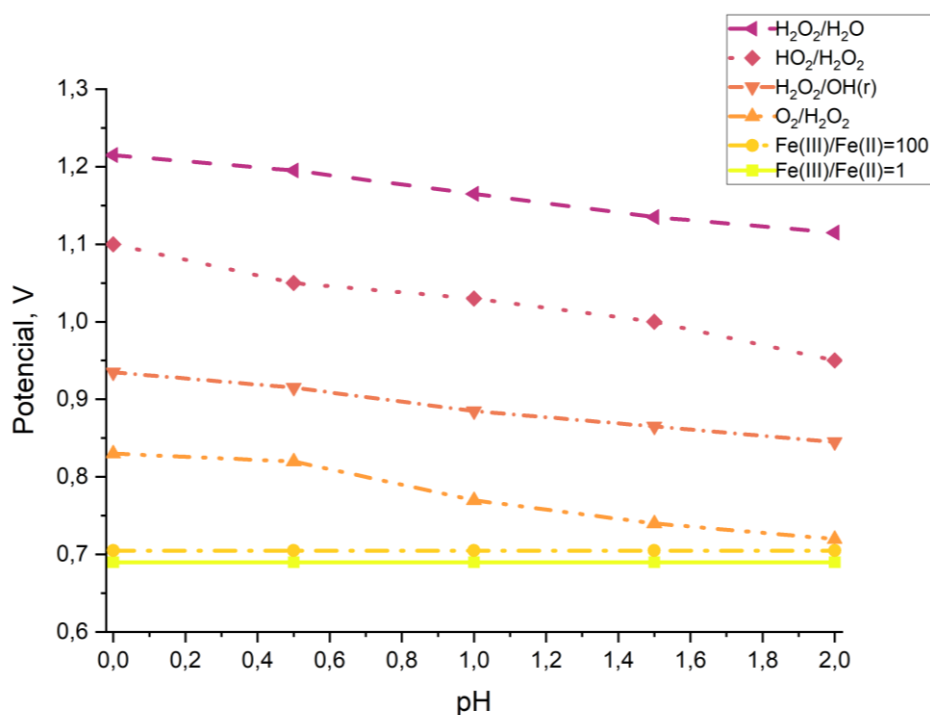
en soluciones ácidas. Sin embargo, aún quedan muchos detalles por entender y explorar para poder aplicar este conocimiento de manera más efectiva en la práctica.<sup>28</sup>

En la lixiviación del oro con peróxido de hidrógeno, se llevan a cabo los siguientes pasos:

**1.8.1 Preparación del mineral.** Los minerales auríferos se trituran y muelen para aumentar su área superficial y facilitar la exposición del oro al peróxido de hidrógeno.

- **Lixiviación:** El mineral triturado se introduce en un reactor o tanque de lixiviación, donde se mezcla con una solución que incluye peróxido de hidrógeno y, frecuentemente, ácido clorhídrico u otros ácidos para crear un entorno ácido. El peróxido de hidrógeno actúa como agente oxidante, disolviendo el oro presente en el mineral y formando complejos solubles.
- **Adsorción y recuperación del oro:** Una vez que el oro se ha disuelto en la solución lixivante, se puede recuperar mediante técnicas de adsorción, como la adsorción en carbón activado o en resinas de intercambio iónico. El oro adsorbido en estos materiales se lava y luego se diluye para obtener una solución rica en oro que posteriormente se procesa para recuperar el metal.
- **Tratamiento de efluentes:** Después de la extracción del oro, es importante tratar adecuadamente los efluentes para eliminar los residuos y evitar la contaminación ambiental.<sup>28</sup>

Figura 2 Diagrama Eh-pH limitado para el sistema oxígeno/peróxido/agua a 25°C



Fuente: <sup>28</sup>

## **1.9 Beneficios al uso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

*1.9.1 Reducción del uso de cianuro.* La incorporación de peróxido de hidrógeno lleva a una reducción significativa en el consumo de cianuro. Esto se debe a varias razones: el uso eficiente de esta alternativa suele acortar considerablemente el tiempo necesario para extraer todo el oro disponible para el cianuro. Al reducir el tiempo de lixiviación, se minimiza el uso de cianuro en reacciones secundarias que no están relacionadas con la disolución del oro.

*1.9.2 Prevención de pérdidas de cianuro por volatilización.* Siempre hay una cierta pérdida de cianuro durante los procesos de cianuración debido a la volatilización de HCN, que es un gas disuelto, en equilibrio con los iones CN<sup>-</sup>. La cantidad de cianuro que se pierde está influenciada por el pH y el grado de aireación. A pH bajos, un alto porcentaje de cianuro se encuentra como HCN disuelto (50% a pH=9.4 y 20% a pH=10.0), el cual puede ser eliminado mediante aireación. A pH más alto, el equilibrio se desplaza hacia los iones CN<sup>-</sup>, reduciendo así la pérdida de cianuro. Además del pH, la intensidad de la aireación es crucial para controlar las pérdidas de cianuro. En contraste, el proceso PAL utiliza H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> líquido como oxidante, lo que elimina la necesidad de aireación intensa y previene la pérdida de cianuro por volatilización.

*1.9.3 Pasivación de minerales de sulfuro que consumen cianuro.* El peróxido de hidrógeno tiene un efecto notable en los minerales de azufre, especialmente cuando hay pirrotina y arsenopirita presentes, ya que estas sustancias consumen grandes cantidades de cianuro para producir tiocianato (SCN<sup>-</sup>). Gracias a su potente capacidad oxidante, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> reduce la superficie de los minerales sulfurados, lo que se refleja en una disminución tanto en el consumo de cianuro como en la formación de SCN<sup>-</sup>. Esta reducción en el consumo de cianuro no afecta la cinética del proceso extractivo, pero permite un ahorro del 30% en la cantidad de cianuro utilizada.

## **1.9 Peligros para la salud del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

El peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) presenta varios peligros para la salud, especialmente en concentraciones elevadas. El contacto directo con soluciones concentradas puede causar irritación significativa y daños en la piel, que van desde enrojecimiento y quemaduras hasta necrosis en casos graves.<sup>29</sup>

La exposición ocular puede resultar en irritación, dolor, enrojecimiento y daño corneal severo si no se trata de inmediato. La exposición a vapores o aerosoles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede causar irritación en las vías respiratorias, resultando en tos, dificultad para respirar y dolor en el pecho. En caso de exposiciones prolongadas las concentraciones elevadas, puede

producir daño pulmonar. Si se ingiere, el peróxido de hidrógeno puede provocar náuseas, vómitos y dolor abdominal; en dosis altas, puede causar daños graves en el tracto gastrointestinal y otros órganos.

Además, dado que el  $H_2O_2$  es un potente agente oxidante, puede reaccionar violentamente con ciertos materiales y productos químicos, aumentando el riesgo de incendios o explosiones. Por estos motivos, es esencial utilizar equipo de protección adecuado, como guantes, gafas y mascarillas, y seguir estrictamente las recomendaciones de seguridad para su manejo.<sup>6</sup>

### **1.10 Caracterización del mineral**

El análisis mineralógico en el procesamiento de minerales de oro es una herramienta clave para determinar y evaluar los métodos y técnicas de beneficio, complementando los análisis químicos tradicionales. Estos análisis químicos, por sí solos, no siempre revelan todas las causas de los problemas en los procesos de extracción del mineral, lo que puede llevar a operaciones innecesarias y costos adicionales. El análisis mineralógico es crucial para la recuperación de minerales, ya que proporciona información detallada sobre las especies minerales y sus características.<sup>30</sup> Esto ayuda a interpretar los resultados de las pruebas metalúrgicas e identificar posibles causas de problemas en los procesos. Para determinar la composición mineralógica del depósito, se utilizan técnicas instrumentales de identificación mineralógica, tales como: microcopia óptica y electrónica, y difractor de rayos X.

### **1.11 Procesos para determinar ley de oro**

Para establecer la cantidad de oro en un mineral, se inicia con la preparación de una muestra representativa que se tritura y muele hasta obtener un polvo fino. Esta muestra puede ser disuelta en un ácido específico y luego analizada mediante métodos como la fusión (fire assay), que separa el oro mediante fusión y lo mide gravimétricamente, o usando métodos como la espectrometría de absorción atómica (AAS) o la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES), que evalúan la concentración de oro en una solución. También se puede utilizar el método de cianuración para disolver y medir el oro. Los resultados se expresan en porcentaje o gramos por tonelada de mineral, y se realiza un control de calidad para asegurar la precisión de los resultados.

1.11.1 *Espectrometría por absorción.* La espectroscopía de absorción atómica es una técnica utilizada empleada en laboratorios metalúrgicos para analizar diversos metales y matrices. Este método es preferido por su alta especificidad, sensibilidad y facilidad de uso. En el proceso, la muestra en solución se aspira directamente hacia una llama de flujo laminar, que tiene como objetivo convertir los elementos presentes en la muestra en átomos en su estado fundamental. La llama, con temperaturas que oscilan entre 1.500 y 3.000°C, es lo suficientemente caliente para atomizar la mayoría de los elementos, los cuales absorben parte de la radiación emitida por la fuente de luz.<sup>31</sup>

1.11.2 *Ensayo a fuego.* El método de análisis implica colocar la muestra en un horno a temperaturas superiores a 1000°C, lo que provoca la fusión del material. Durante este proceso, se emplean fondos y reactivos específicos para formar dos fases líquidas distintas. Una de estas fases es metálica, compuesta principalmente de plomo, que se utiliza para recoger los metales de interés. La otra fase es una escoria, mayormente formada por silicatos complejos. Una vez que la fusión se enfría a temperatura ambiente, ambas fases se solidifican: la fase metálica y la escoria. Posteriormente, se realiza un análisis químico o gravimétrico según las características obtenidas de la muestra. Estas técnicas se emplean conjuntamente, ya que ninguna de ellas por sí sola proporciona toda la información necesaria para una evaluación completa.<sup>32</sup>



## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Unidades de Análisis

*2.1.1 Tipo de investigación.* El presente trabajo de investigación se llevará a cabo mediante estudios experimentales, analíticos y comparativos que permitan establecer resultados eficaces al proceso a realizar.

*2.1.2 Ubicación.* Las pruebas de ensayo experimentales serán desarrolladas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias ubicado en la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala y el material a tratar fue recolectado de la mina Exycominsur del área minera Ríos Uno.

*Figura 3 Ubicación geográfica del punto de recolección de la materia prima*



Fuente: Google maps

*2.1.2 Variables de la investigación.* En este apartado se colocaron las variables que intervinieron en el proceso de investigación para posteriormente llevar a cabo los estudios experimentales.

En la tabla 1, se detallan las variables dependientes e independientes que se llevaron a cabo en los estudios lixiviación.

Tabla 2 Variables de la investigación

Variables	Lixiviación sin H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Lixiviación con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Dependientes	Consumo de CN <sup>-</sup> (%)	Consumo de CN <sup>-</sup> (%)
Independientes	Concentración de oro en la materia prima (g/m <sup>3</sup> ) Tiempo (h)=12 horas Cantidad de peróxido (ppm o mg/L) pH=10.5-12	Concentración de oro en la materia prima (g/m <sup>3</sup> ) Tiempo (h)=12 horas Concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ppm o mg/L) Cantidad de peróxido (ppm o mg/L) pH=10.5-12

Fuente: Elaboración propia

En esta sección se enumeran los diversos materiales, equipos y reactivos de laboratorio que fueron esenciales para realizar la experimentación adecuada relacionada con la lixiviación.

## 2.2 Materiales y métodos

2.2.1 *Materiales de laboratorio.* Materiales necesarios para llevar a cabo un procedimiento adecuado, son fundamentales para obtener resultados positivos. Estos materiales garantizan la seguridad y eficiencia en los experimentos que se realicen.

- Batas de laboratorio
- Mascarillas desechables
- Guantes
- Vasos de precipitación (500 ml; 1000 ml)
- Balones volumétricos (1000 ml)
- Matraz Erlenmeyer (500 ml)
- Pipetas graduadas
- Pipetas volumétricas

- Embudos de vidrio
- Varillas de agitación
- Gradillas
- Tubos de ensayo (15 ml)
- Papel filtro corrugado
- Pera de succión
- Pissetas
- Fundas zipper

2.2.2 *Reactivos de laboratorio.* Se especifican los distintos reactivos necesarios para la correcta aplicación de la metodología, incluyendo la marca y la pureza de cada uno de ellos.

- Agua destilada
- Hidróxido de sodio (NaOH, 99%)
- Cianuro (CN<sup>-</sup>) (Puro)
- Peróxido de Hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (50%)
- Nitrato de Plata (AgNO<sub>3</sub>) (Puro)
- Yoduro de Potasio (KI) (Puro)

2.2.3 *Equipos de laboratorio.* Se proporciona un listado detallado de los equipos utilizados en el laboratorio para validar la metodología. En este listado se incluyen los nombres de los equipos junto con sus respectivas marcas o modelos.

- Balanza analítica
- Molino de bolas
- Equipo de lixiviación por agitación
- Agitador magnético
- Tiras de pH

2.2.4 *Diseño metodológico.* Se lleva a cabo el plan guía para realizar una investigación efectiva que producirá resultados tras su implementación. Se definen los tratamientos correspondientes y se obtienen nuevas muestras aplicables a los estudios de lixiviación.

## 2.3 Tratamiento preliminar de la muestra

2.3.1 *Obtención de material para la lixiviación.* En esta sección se detallaron los procedimientos realizados para obtener los materiales necesarios para el proceso de lixiviación del oro.

2.3.2 *Molienda del material.* Se molió el material en un molino de bolas, mediante un intervalo de 2 horas, hasta llegar a pulverizar el material. Una vez pulverizado el material se retira de las chanchas y se procede a un lavado para posteriormente dejar sedimentar el material.

2.3.3 *Preparación de soluciones.* Se preparó soluciones que se utilizó en el proceso de lixiviación del oro.

- **Preparación de solución de NaOH.** Se preparó una solución de NaOH para la neutralización del pH. Se prepara una solución de NaOH al 10% en un 1L de H<sub>2</sub>O

*Ecuación 1* Formula de dilución

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (Ec. 1)$$

Donde:

C<sub>1</sub>= Concentración inicial (%)

V<sub>1</sub>= Volumen inicial (ml)

C<sub>2</sub>= Concentración final (%)

V<sub>2</sub>= Volumen final (ml)

Por lo tanto:

$$10\% * 1000 \text{ ml} = 100\% * V_2$$

$$V_2 = 100 \approx 100 \text{ g NaOH}$$

Primero pesamos 100 g de NaOH en una balanza analítica, después añadimos lo pesado en un balón volumétrico de 1000 ml y aforamos.

- **Preparación de solución de AgNO<sub>3</sub>.** Se preparó para 1 litro (1000 ml) de una solución 0.1 M.

*Ecuación 2* Masa de AgNO<sub>3</sub>

$$m = M * V * m \quad (Ec. 2)$$

Donde:

M= Molaridad (M)

V= Volumen (L)

m= masa molar (g/mol)

Por lo tanto, se obtiene:

$$\dot{m} = 0.1 M * 1L * 169.87 \frac{g}{mol}$$

$$\dot{m} = 16.987 g$$

Pesamos los 16.987 g de AgNO<sub>3</sub> en una balanza analítica, para después añadirlo a un balón volumétrico y por último aforamos. Por último, colocamos en un frasco de ámbar ya que estar en contacto con la luz podría descomponer la solución

- **Preparación de solución de IK.** Se preparó para 1 litro (1000 ml) de una solución 0.1 M.

$$\dot{m} = M * V * m \quad (Ec. 2)$$

$$\dot{m} = 0.1 M * 1L * 166 \frac{g}{mol}$$

$$\dot{m} = 16.60 g$$

Pesamos los 16.60 g de KI en una balanza analítica, para después añadirlo a un balón volumétrico y por último aforamos. Al final lo colocamos en un frasco.

- **Preparación de solución de NaCN.** Se preparó para 1 litro (1000 mL) de una solución al 10%.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (Ec. 1)$$

$$10\% * 1000 ml = 100\% * V_2$$

$$V_2 = 100 \approx 100 g NaCN$$

2.3.4 *Volumen del tanque.* Procedemos a calcular el volumen de tanque.

Para calcular el volumen del tanque ocupamos la siguiente ecuación:

*Ecuación 3* Volumen del tanque

$$V_{Tanque} = \frac{\pi * (D)^2 * h}{4} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

D= Diámetro (cm)

h= Altura (cm)

Por consiguiente, obtenemos:

$$V_{Tanque} = \frac{\pi * (36.5)^2 * 51}{4}$$

$$V_{Tanque} = 49.70 L$$

2.3.5 *Material a usarse.* En esta investigación se usara una proporción del 35% del sólido y el cálculo para el mismo se realiza a continuación:

*Ecuación 4* Volumen operativo

$$\frac{M_s}{G_e} + \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = V_{operativo} \quad (Ec. 4)$$

Donde=

M<sub>s</sub>= Masa del solido (kg)

M<sub>H<sub>2</sub>O</sub>= Masa del agua (kg)

ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>= Densidad del agua (kg/L)

V<sub>operativo</sub>= Volumen operativo (L)

De este modo, obtenemos:

$$\frac{M_s}{2.6} + \frac{M_{H_2O}}{1} = V_{operativo}$$

$$\frac{M_s + 2.7 * M_{H_2O}}{2.7} = 49.70$$

$$M_s = 20 \text{ Kg de Mineral}$$

Con el mismo calculo obtendremos la masa de agua a usarse:

$$M_{H_2O} = \frac{134192.6 - M_s}{2.7}$$

$$M_{H_2O} = 43 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

2.3.6 *Calculo de NaCN.* Se calculo la cantidad de cianuro que se añadió para el principio del proceso de lixiviación.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (Ec. 1)$$

$$10\% * V_1 = 20\% * 49$$

$$V_1 = 98 \text{ ml de NaCN}^-$$

Primero pesamos 100 g de NaCN<sup>-</sup> en una balanza analítica, después añadimos lo pesado en un vaso de precipitación de 1000 ml y aforamos.

## 2.4 Proceso de lixiviación

2.4.1 *Caracterización de la muestra.* Se determinó la concentración de oro y propiedades de la muestra.

2.4.2 *Neutralización.* Se ajustó el pH de la muestra a un valor adecuado para la lixiviación. El pH ideal es de 10.5 a 11.

2.4.3 *Agitación.* Se agitó la muestra para asegurar que el contacto entre el mineral y la solución de lixiviación sea uniforme.

2.4.4 *Lixiviación en tanque.* Procedemos a llenar el tanque con las respectivas cantidades planteadas arriba, y conectamos la energía al tanque de lixiviación para el proceso de lixiviación.

Después de un trayecto de una hora, procedimos a tomar la primera alícuota de 10 ml de la solución en análisis para realizar la titulación y calcular el cianuro libre en la lixiviación, utilizando AgNO<sub>3</sub> como reactivo y KI como indicador. Inicialmente filtramos la alícuota para eliminar impurezas, y la vertimos en un matraz limpio, añadiendo luego 3 gotas de KI. Posteriormente, añadimos la solución de AgNO<sub>3</sub> gota a gota, mezclando bien tras cada adición, hasta observar un cambio de color de transparente a amarillo tenue, indicando el punto final de la titulación. En ese momento, registramos el volumen de AgNO<sub>3</sub> utilizado, dato esencial para calcular la concentración de cianuro libre en la muestra.<sup>33</sup>

*Ecuación 5* Concentración de cianuro

$$CN^- = \frac{A * 0.002 * 100}{B} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

A= Volumen de AgNO<sub>3</sub> utilizado (ml)

B= Alícuota (ml)

De este modo, obtenemos:

$$CN^{-} = \frac{8ml * 0.002 * 100}{10ml}$$

$$CN^{-} = 0.16 \%$$

De esta manera, continuamos con el proceso de lixiviación, asegurándonos de mantener un control riguroso y constante durante las 12 horas completas. Este periodo extendido permite una interacción adecuada entre los reactivos y la muestra, garantizando que la lixiviación sea efectiva y que los resultados obtenidos sean precisos y representativos. Cada hora, repetimos el mismo procedimiento de titulación para obtener los resultados correspondientes, asegurándonos de monitorear y registrar cuidadosamente cada medición para un análisis detallado y preciso.

*2.4.5 Porcentaje de extracción.* Una vez completado el proceso de lixiviación, se realizarán los análisis correspondientes. A través de estos análisis, determinaremos la ley de oro, lo que nos permitirá calcular el porcentaje de extracción de cada prueba realizada. Este enfoque nos ayudará a evaluar la eficiencia del proceso y a identificar áreas para posibles mejoras en la extracción de oro.

*Ecuación 6* Porcentaje de extracción de oro

$$\% \text{ extracción} = \frac{A}{B} * 100$$

Donde:

**A=** Cantidad de oro recuperado

**B=** Cantidad inicial de oro

Por lo tanto, realizando los cálculos correspondientes con cada prueba realizada, obtenemos:

$$\% \text{ extracción} = \frac{6.77 \text{ g/TM}}{19.9 \text{ g/TM}} * 100$$

$$\% \text{ extracción} = 34\%$$



## 3. RESULTADOS

### 3.1 Pruebas de lixiviación

#### 3.1.1 Prueba 1 de lixiviación sin $H_2O_2$

A continuación, en la Tabla 2, se presentan los datos experimentales obtenidos de un proceso de lixiviación sin  $H_2O_2$ . Estos resultados son esenciales para entender el comportamiento del material en dichas condiciones y compararlos con experimentos que utilizan  $H_2O_2$ . La ausencia de  $H_2O_2$  permite evaluar la eficiencia del proceso en un entorno más simple.

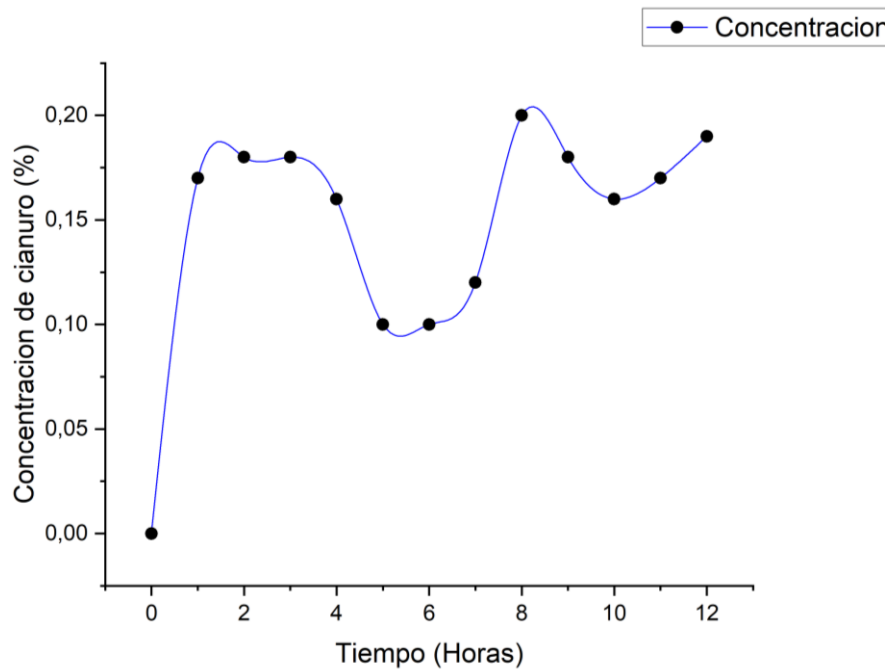
Tabla 3 Prueba 1 de lixiviación sin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Hora		Tiempo de Agitación (Horas)	pH	NaCN al 10% (ml)	Reactivos agregados		Alícuota (ml)	Concentración NaCN (%)	Oro total (g/m <sup>3</sup> )
Inicio	Fin				NaOH al 10% (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% (ml)			
		0	10	98	10	-	10	0	0
9:30	10:30	1	11	-	-	-	10	0.17	0.43
10:30	11:30	2	11	-	-	-	10	0.18	1.36
11:30	12:30	3	11	-	-	-	10	0.18	1.66
12:30	13:30	4	11	20	-	-	10	0.16	1.77
13:30	14:30	5	11	30	-	-	10	0.1	1.66
14:30	15:30	6	11	30	-	-	10	0.1	1.93
15:30	16:30	7	10	20	5	-	10	0.12	1.76
16:30	17:30	8	11	30	-	-	10	0.2	1.51
17:30	18:30	9	10	-	5	-	10	0.18	1.78
18:30	19:30	10	11	8,5	-	-	10	0.16	1.74
19:30	20:30	11	11	20	-	-	10	0.17	1.80
20:30	21:30	12	11	-	-	-	10	0.19	1.82
Total				256.5	20	-			

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 1, se puede observar la concentración de cianuro a lo largo de las 12 horas durante las cuales se llevó a cabo el proceso de lixiviación sin la adición de  $H_2O_2$ . Este gráfico nos permite visualizar cómo varía la concentración de cianuro en función del tiempo, proporcionando una comprensión detallada de la dinámica del proceso en ausencia del peróxido de hidrógeno.

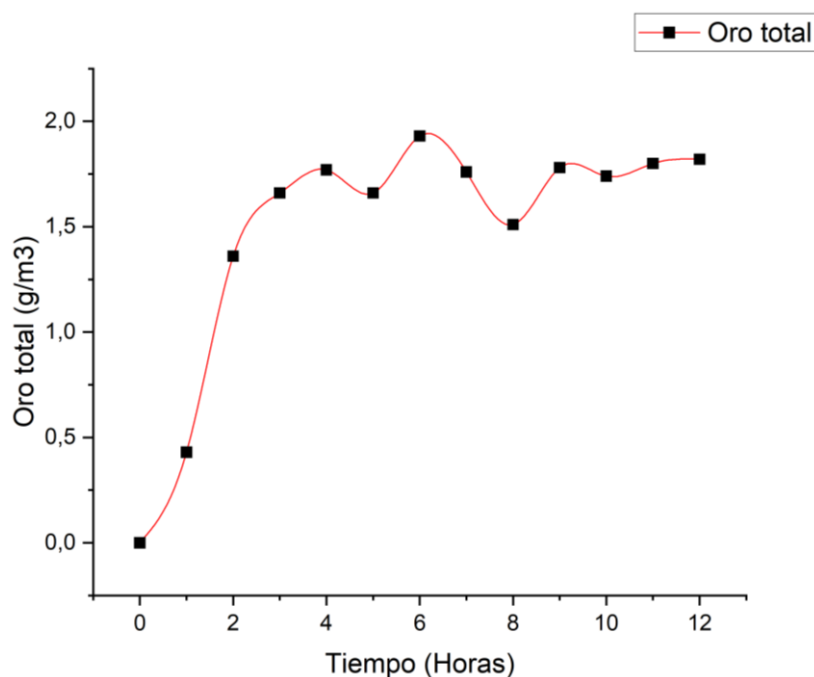
Grafica 1 Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 1 de lixiviación sin  $H_2O_2$



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2, se presenta la recuperación total de oro medida cada hora durante el mismo periodo de lixiviación. Este gráfico ilustra la eficiencia del proceso de recuperación de oro a lo largo del tiempo, permitiendo una comparación directa con los resultados obtenidos en las siguientes pruebas realizadas a lo largo de la investigación.

Grafica 2 Concentración de oro total en la prueba 1 de lixiviación sin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

En la tabla presentada se observa que se utilizó un total de 256.5 ml de NaCN durante el experimento. La concentración de NaCN varió entre 0.12% y 0.18%, mientras que el valor óptimo deseado es una concentración de 0.20%.<sup>34</sup>

Durante el proceso, la concentración de oro mostró un incremento continuo en cada intervalo horario, alcanzando un máximo de 1.93 g/m<sup>3</sup> a las 6 horas antes de estabilizarse y mostrar ligeras fluctuaciones. Este aumento en la concentración de oro sugiere que el proceso de extracción está progresando de manera efectiva. El pH del sistema se mantuvo en un rango estable entre 10.5 y 12 a lo largo de todo el experimento. Este control del pH es crucial para mantener la eficacia del proceso de extracción y asegurar que el entorno se mantenga dentro del rango óptimo para la reacción química.

### 3.1.2 Prueba 2 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

En la Tabla 3 se muestran los datos experimentales de un proceso de lixiviación de 12 horas que comenzó con la adición de 10 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Estos resultados son cruciales para comprender cómo se comporta el material bajo estas condiciones y para compararlos con los experimentos que emplean la adición progresiva de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

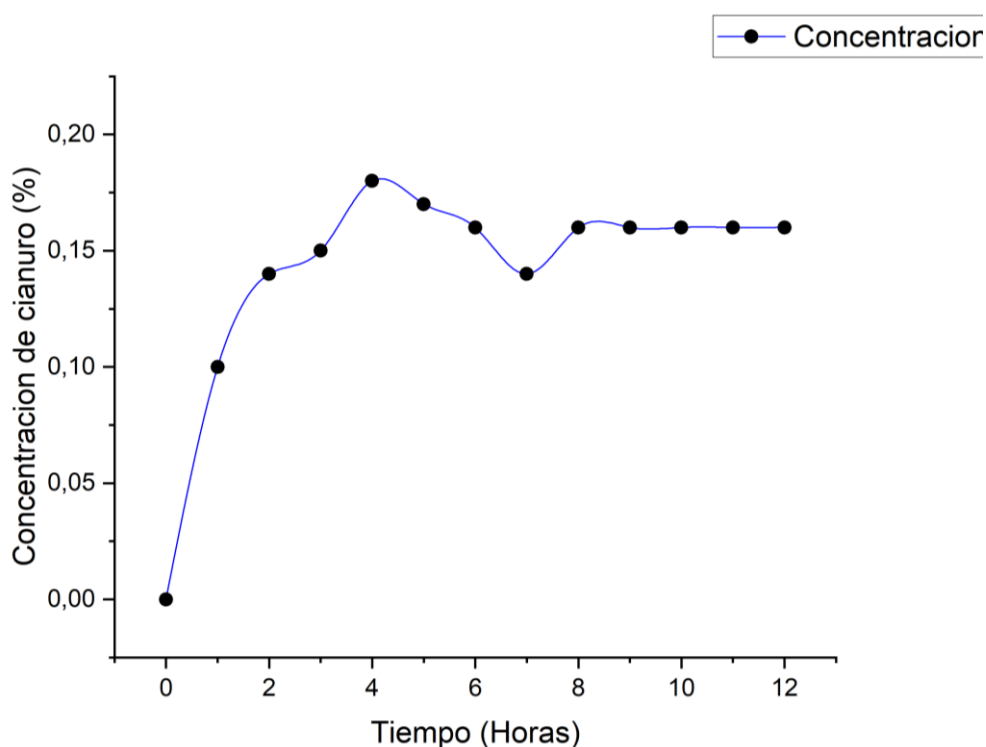
Tabla 4 Prueba 2 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

Hora		Tiempo de Agitación (Horas)	pH	NaCN al 10% (ml)	Reactivos agregados		Alícuota (ml)	Concentración NaCN (%)	Oro total (g/m <sup>3</sup> )
Inicio	Fin				NaOH al 10% (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% (ml)			
		0	9	98	20	10	10	0	0
9:00	10:00	1	11	20	-	-	10	0.1	0.7
10:00	11:00	2	11	30	-	-	10	0.14	1.02
11:00	12:00	3	10	30	5	-	10	0.15	1.22
12:00	13:00	4	11	-	-	20	10	0.18	1.3
13:00	14:00	5	11	-	-	-	10	0.17	1.35
14:00	15:00	6	11	-	-	-	10	0.16	1.22
15:00	16:00	7	10	20	10	10	10	0.14	1.27
16:00	17:00	8	11	-	-	-	10	0.16	1.3
17:00	18:00	9	11	-	-	-	10	0.16	1.46
18:00	19:00	10	11	-	-	20	10	0.16	1.55
19:00	20:00	11	11	-	-	-	10	0.16	1.7
20:00	21:00	12	11	-	-	-	10	0.16	1.86
Total				198	35	60			

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 3, se muestra la evolución de la concentración de cianuro a lo largo de las 12 horas del proceso de lixiviación, durante el cual se añadieron un total de 60 ml de  $H_2O_2$ . Este gráfico es fundamental para analizar cómo fluctúa la concentración de cianuro en función del tiempo, ofreciendo una visión detallada de la dinámica del proceso. A través de esta visualización, podemos evaluar el impacto del  $H_2O_2$  en la lixiviación y comprender mejor cómo su presencia afecta la concentración de cianuro durante el transcurso del experimento. La información proporcionada por este gráfico es esencial para realizar comparaciones con otros procesos en los que la adición de  $H_2O_2$  se maneja de manera diferente, permitiendo una evaluación más completa de las variaciones en la eficiencia del proceso de lixiviación.

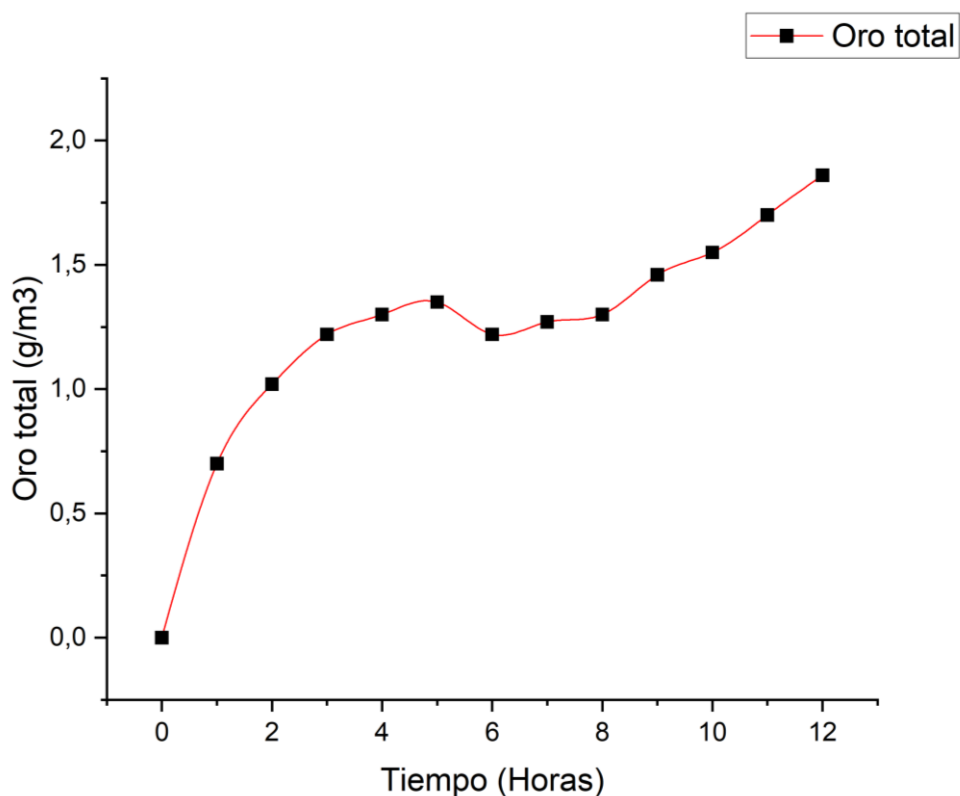
*Grafica 3* Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 2 de lixiviación con  $H_2O_2$  al 50%



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 4, se presenta la recuperación total de oro medida en intervalos horarios a lo largo del mismo periodo de lixiviación. Este gráfico proporciona una visión clara de la eficiencia del proceso de recuperación de oro a lo largo del tiempo, revelando cómo varía la cantidad de oro recuperado en cada hora del proceso. Al analizar este gráfico, se puede observar la progresión y efectividad del método de recuperación de oro cuando se emplea una adición total de 60 ml de  $H_2O_2$ .

Grafica 4 Concentración de oro total en la prueba 2 de lixiviación con  $H_2O_2$  al 50%



Fuente: Elaboración propia

En la tabla presentada, se detalla que se emplearon un total de 198 ml de NaCN a lo largo del experimento. La concentración de NaCN fluctuó entre 0.14% y 0.18%. Durante el proceso, la concentración de oro mostró un aumento constante en cada intervalo horario, alcanzando un pico de 1.86 g/m<sup>3</sup> a las 12 horas. Este incremento continuo en la concentración de oro indica que el proceso de extracción está funcionando de manera efectiva. Además, se mantuvo el pH dentro del rango óptimo de 10.5 a 12 durante todo el experimento, lo que contribuyó a la estabilidad y eficacia del proceso de lixiviación.

### 3.1.3 Prueba 3 de lixiviación con $H_2O_2$ al 50%

En la Tabla 4 se presentan los datos experimentales correspondientes a la tercera prueba realizada en esta investigación, en la cual se añadió en un principio de 30 ml de  $H_2O_2$  durante un proceso de lixiviación que se extendió por 12 horas. Estos resultados son fundamentales para entender el comportamiento del material bajo estas condiciones específicas de adición de  $H_2O_2$ .

Tabla 5 Prueba 3 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

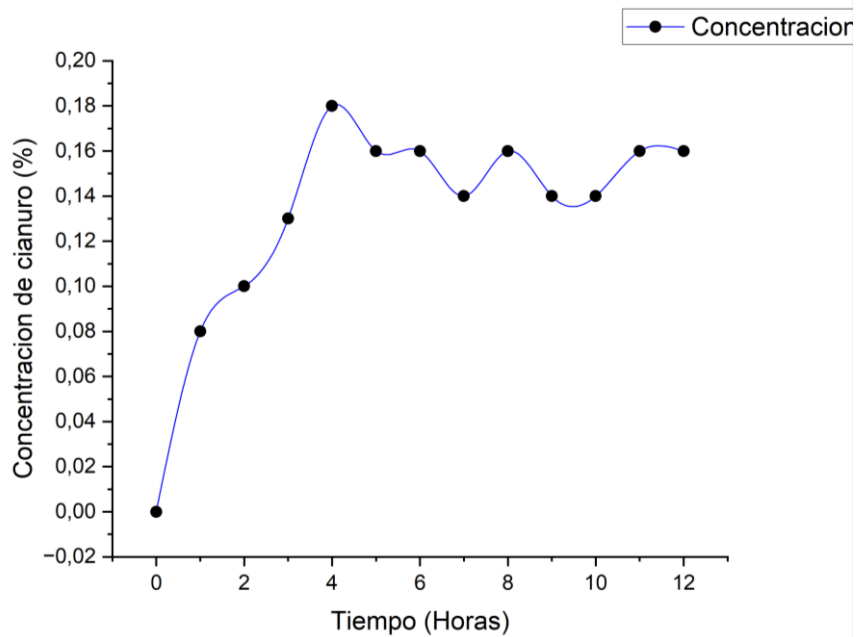
Hora		Tiempo de Agitación (Horas)	pH	NaCN al 10% (ml)	Reactivos agregados		Alícuota (ml)	Concentración NaCN (%)	Oro total (g/m <sup>3</sup> )
Inicio	Fin				NaOH al 10% (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% (ml)			
		0	8	98	70	30	10	0	0
9:00	10:00	1	11	-	-	-	10	0.08	1.19
10:00	11:00	2	11	30	-	-	10	0.1	0.94
11:00	12:00	3	11	30	-	-	10	0.13	1.02
12:00	13:00	4	10	-	-	20	10	0.18	1.36
13:00	14:00	5	11	-	-	-	10	0.16	1.31
14:00	15:00	6	11	-	-	-	10	0.16	1.26
15:00	16:00	7	10	20	5	15	10	0.14	1.31
16:00	17:00	8	11	-	-	-	10	0.16	1.35
17:00	18:00	9	11	-	5	-	10	0.14	1.51
18:00	19:00	10	11	10	-	10	10	0.14	1.75
19:00	20:00	11	11	-	-	-	10	0.16	2.05
20:00	21:00	12	11	-	-	-	10	0.16	1.92
Total				188	60	75			

Fuente: Elaboración propia



En el Gráfico 5 se ilustra la evolución de la concentración de cianuro a lo largo de las 12 horas del proceso de lixiviación, durante el cual se añadieron un total de 75 ml de  $H_2O_2$  y 188 ml de NaCN. Este gráfico sirve para analizar las fluctuaciones en la concentración de cianuro a lo largo de las 12 horas de lixiviación, proporcionando una visión detallada de la dinámica del proceso de lixiviación.

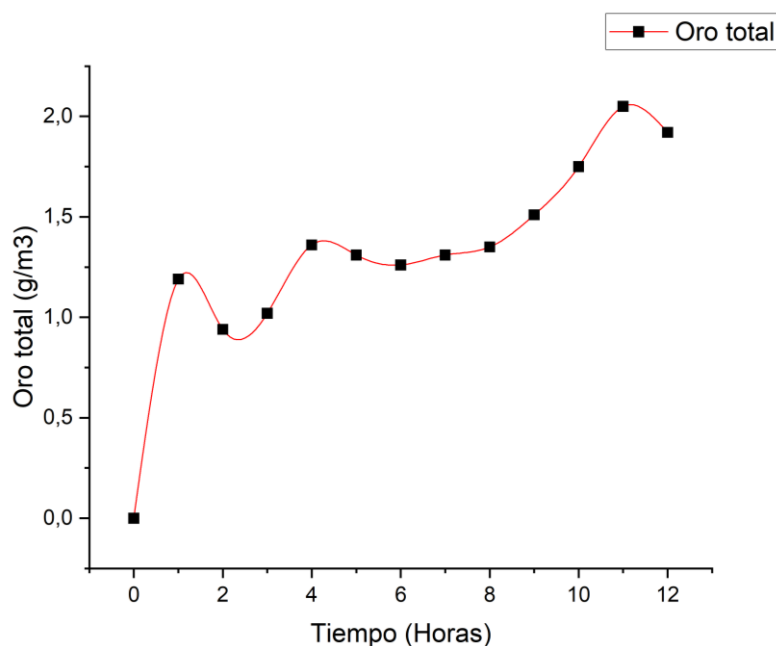
*Grafica 5* Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 3 de lixiviación con  $H_2O_2$  al 50%



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 6 se muestra la recuperación total de oro medida en intervalos horarios a lo largo del mismo periodo de lixiviación. A través de esta visualización, es posible observar claramente la progresión y efectividad del método de recuperación de oro bajo las condiciones específicas del experimento, en el que se empleó una adición total de 75 ml de  $H_2O_2$ .

Grafica 6 Concentración de oro total en la prueba 3 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%



Fuente: Elaboración propia

En la tabla presentada se detalla que se utilizaron un total de 188 ml de NaCN a lo largo del experimento. La concentración de NaCN varió entre 0.16% y 0.18%. Durante el proceso, la concentración de oro mostró un aumento constante en cada intervalo horario, alcanzando un máximo de 2.05 g/m<sup>3</sup> a las 11 horas. Este incremento sostenido en la concentración de oro sugiere que el proceso de extracción está funcionando de manera efectiva y eficiente.

Además, el pH se mantuvo dentro del rango óptimo de 10.5 a 12 durante todo el experimento. Comparado con la prueba anterior, se observa una mejora notable en la recuperación de oro, indicando que las condiciones actuales han optimizado el proceso de extracción de manera más efectiva.<sup>35</sup>

#### 3.1.4 Prueba 4 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los datos experimentales correspondientes a la cuarta prueba realizada. En esta prueba, se comenzó con una adición inicial de 50 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, incrementando gradualmente hasta un total de 90 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a lo largo de un proceso de lixiviación de 12 horas.

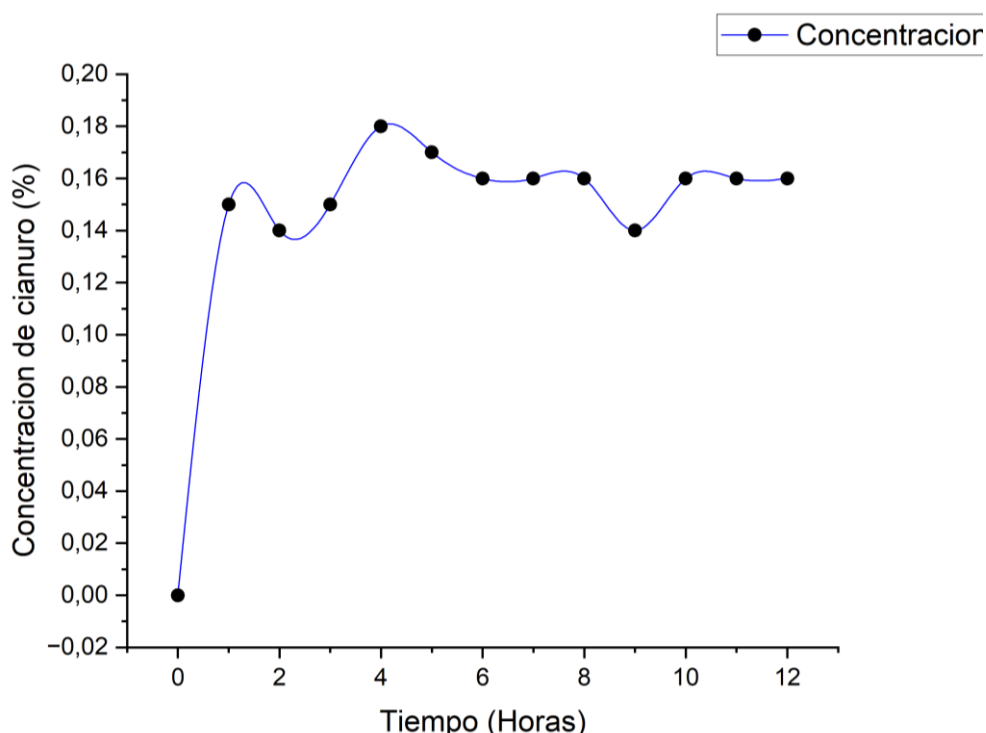
Tabla 6 Prueba 4 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

Hora		Tiempo de Agitación (Horas)	pH	NaCN al 10% (ml)	Reactivos agregados		Alícuota (ml)	Concentración NaCN (%)	Oro total (g/m <sup>3</sup> )
Inicio	Fin				NaOH al 10% (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% (ml)			
		0	10	98	10	50	10	0	0
9:00	10:00	1	11		-	-	10	0.15	1.2
10:00	11:00	2	11	30	-	-	10	0.14	1.15
11:00	12:00	3	11	20	-	-	10	0.15	1.1
12:00	13:00	4	10	-	10	-	10	0.18	1.45
13:00	14:00	5	11	-	-	20	10	0.17	1.44
14:00	15:00	6	11	-	-	-	10	0.16	1.36
15:00	16:00	7	10	-	10	10	10	0.16	1.33
16:00	17:00	8	11	-	-	-	10	0.16	1.31
17:00	18:00	9	11	10	-	-	10	0.14	1.68
18:00	19:00	10	10	-	10	10	10	0.16	1.89
19:00	20:00	11	11	-	-	-	10	0.16	2.2
20:00	21:00	12	11	-	-	-	10	0.16	2.15
Total				158	40	90			

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 7 se muestra la evolución de la concentración de cianuro a lo largo de las 12 horas del proceso de lixiviación, durante el cual se añadieron un total de 90 ml de  $H_2O_2$  y 158 ml de NaCN. Este gráfico proporciona una visión integral de cómo varía la concentración de cianuro durante el proceso, permitiendo un análisis detallado de su dinámica a lo largo del tiempo. La información contenida en este gráfico es crucial para comprender las fluctuaciones en la concentración de cianuro y evaluar el impacto de la adición de  $H_2O_2$  en la eficiencia del proceso de lixiviación.

*Grafica 7* Concentración de cianuro por tiempo en la prueba 4 de lixiviación con  $H_2O_2$  al 50%

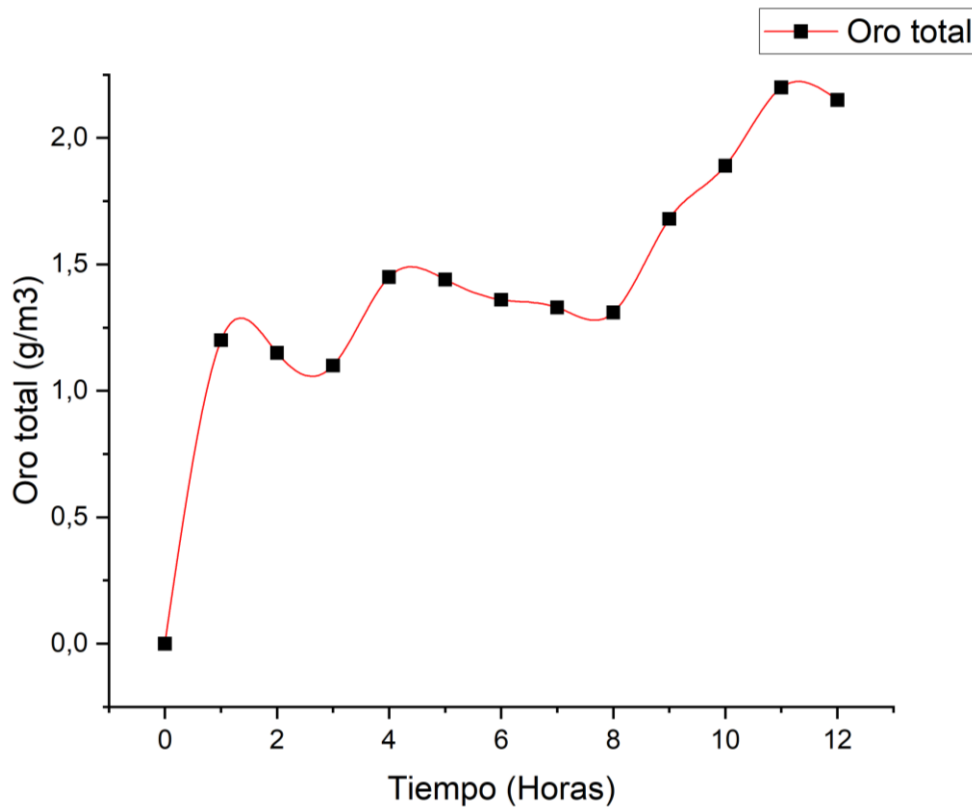


Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 8 se presenta la recuperación total de oro medida en intervalos horarios durante el mismo periodo de lixiviación. Este gráfico proporciona una representación detallada de cómo varía la cantidad de oro recuperado en cada hora del proceso.

A través de esta visualización, es posible observar de manera destacada la evolución y efectividad del proceso bajo las condiciones específicas del experimento, en el cual se utilizó una adición total de 90 ml de  $H_2O_2$ . El gráfico facilita la comprensión de cómo la cantidad de  $H_2O_2$  añadido influye en la eficiencia de recuperación de oro. Además, permite realizar comparaciones con otras pruebas y ajustar el proceso para optimizar la recuperación de oro en futuras investigaciones.

Grafica 8 Concentración de oro total en la prueba 4 de lixiviación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%



Fuente: Elaboración propia

En la tabla presentada se detalla que se emplearon un total de 158 ml de NaCN a lo largo del experimento. Esta cantidad representa una reducción significativa en comparación con los 256.5 ml utilizados anteriormente, lo que equivale a una disminución del 35% en el consumo de cianuro durante el proceso de lixiviación. A pesar de esta reducción en el uso de NaCN, la recuperación de oro experimentó un aumento notable, pasando de 1.82 g/m<sup>3</sup> a 2.15 g/m<sup>3</sup>.<sup>36</sup>

Además, el pH se mantuvo consistentemente dentro del rango óptimo de 10.5 a 12 a lo largo de todo el experimento, lo que contribuyó a la estabilidad y eficacia del proceso de lixiviación. Estos resultados indican que, a pesar de la reducción en la cantidad de NaCN utilizada, el proceso de lixiviación se mantuvo eficiente, logrando una recuperación de oro mejorada.

### 3.2 Extracción de sólidos en las pruebas preliminares

En la siguiente tabla se presenta de manera más detallada el consumo de los reactivos utilizados durante el proceso de lixiviación, así como la ley inicial de nuestro mineral puro y el porcentaje de extracción de oro en cada una de las pruebas. Los datos muestran una tendencia de mejora continua en el porcentaje de extracción a medida que avanzan las pruebas, indicando una optimización progresiva del proceso.

Tabla 7 Extracción de sólidos en las 4 pruebas

Prueba	Material (kg)	Consumo de reactivos		Ley de Au (g/TM)	Extracción (%)
		NaCN al 10% (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 50% (ml)		
Mineral puro	-	-	-	19.1	-
1	20	256.5	-	6.77	34
2	20	198	60	6.92	35
3	20	188	75	7.75	39
4	20	158	90	8.2	41

Fuente: Elaboración propia

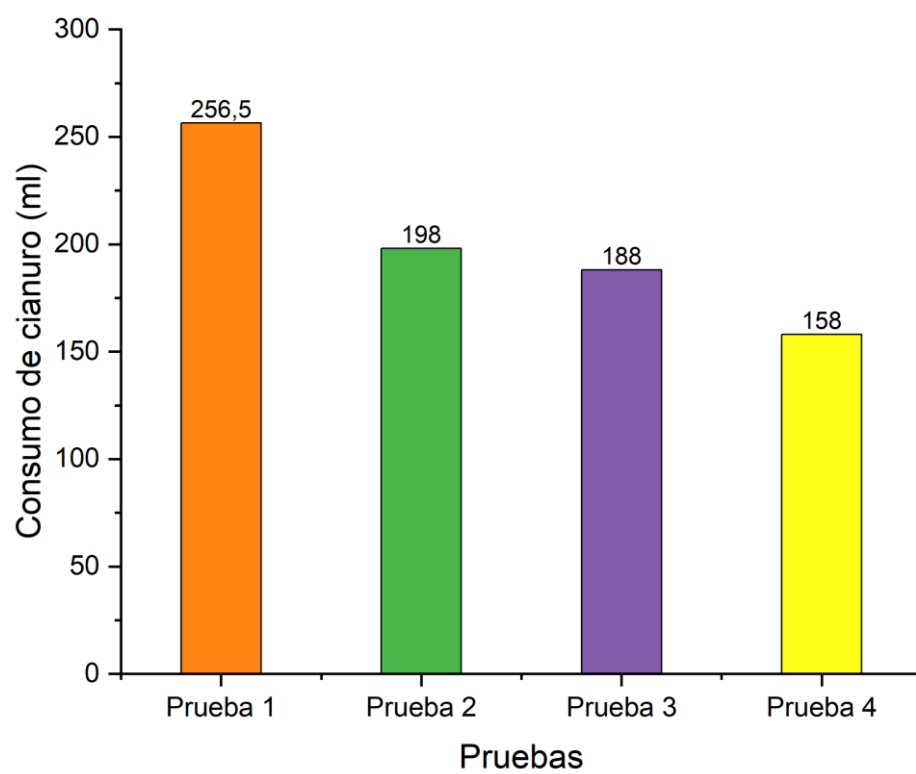
### 3.2 Consumo de CN<sup>-</sup>

Mediante el Gráfico 9, podemos observar una representación visual detallada del consumo total de reactivos en cada una de las pruebas realizadas. Este gráfico revela una tendencia decreciente en el consumo de reactivos a medida que aumenta la cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proporcionada en cada prueba.

A medida que se incrementa la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el gráfico muestra claramente cómo el consumo de otros reactivos, como el NaCN, disminuye de manera gradual. Esta relación inversa sugiere que la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> juega un papel crucial en la optimización del proceso de lixiviación, permitiendo una reducción en el uso de cianuro sin comprometer la eficiencia de la extracción de oro.

El Gráfico 9 no solo facilita la comprensión de esta dinámica, sino que también proporciona una base visual sólida para comparar el rendimiento y la eficiencia de cada prueba. Al analizar estas tendencias, podemos identificar la combinación óptima de reactivos que maximiza la recuperación de oro mientras minimiza el consumo total de reactivos, contribuyendo a un proceso de lixiviación más sostenible y económico.

Grafica 9 Consumo de  $\text{CN}^-$  en cada prueba



Fuente: Elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

- En la presente investigación, se logró una recuperación favorable de oro, destacándose especialmente la prueba 4, en la cual se utilizó una mayor cantidad de  $H_2O_2$ . Esta prueba no solo mostró una mayor eficiencia en la recuperación de oro, sino que también se observó una disminución considerable en el uso de  $CN^-$ . Estos resultados indican que el peróxido de hidrógeno puede ser un agente eficaz en la optimización del proceso de lixiviación.
- La materia prima utilizada en esta investigación fue obtenida de una mina cercana a la ciudad. Este material fue sometido a un proceso común de molienda para alcanzar una consistencia adecuada para el proceso de lixiviación. La preparación del mineral es un paso crucial para asegurar la eficacia del proceso y garantizar la máxima recuperación de oro.
- El consumo de cianuro mostró una notable disminución en comparación con las pruebas en las que no se utilizó  $H_2O_2$ . Este hallazgo sugiere que la adición de peróxido de hidrógeno mejora significativamente la eficiencia del proceso de lixiviación, permitiendo una reducción en el uso de cianuro sin comprometer la recuperación de oro. Esta reducción es especialmente importante desde una perspectiva ambiental y económica, ya que el cianuro es un reactivo costoso y potencialmente peligroso.
- En cuanto a la recuperación de oro, se observó que el uso de  $H_2O_2$  no solo no afecta negativamente, sino que mejora la recuperación de oro. Las pruebas demostraron que a medida que se incrementa el uso de  $H_2O_2$ , la recuperación de oro también aumenta, sin que se vean alteraciones negativas por la disminución del  $CN^-$ . Este resultado es alentador y sugiere que el peróxido de hidrógeno puede ser un complemento valioso en los procesos de lixiviación para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.



## 5. RECOMENDACIONES

- Determinar el intervalo de tiempo ideal para la lixiviación que permita alcanzar la máxima recuperación de oro sin comprometer la eficiencia en el consumo de reactivos. Este análisis debe considerar tanto la cinética de disolución del oro como la estabilidad de los reactivos utilizados.
- Garantizar que el almacenamiento y manejo del peróxido de hidrógeno cumpla estrictamente con las regulaciones de seguridad. Es esencial implementar procedimientos adecuados para prevenir accidentes y minimizar riesgos asociados con la manipulación de este reactivo y potencialmente peligroso.
- Implementar sistemas eficientes y robustos de tratamiento de efluentes para neutralizar el cianuro residual y el peróxido de hidrógeno. Asegurar que las descargas cumplan con todas las normativas ambientales vigentes, minimizando el impacto ecológico y garantizando la sostenibilidad del proceso.
- Realizar ensayos a escala piloto para validar los resultados obtenidos en el laboratorio. Esta fase es crucial para evaluar la viabilidad económica y técnica de la aplicación del peróxido de hidrógeno a escala industrial, permitiendo ajustes y optimizaciones antes de una implementación completa.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Zhang, Y.; Cui, M.; Wang, J.; Liu, X.; Lyu, X. A Review of Gold Extraction Using Alternatives to Cyanide: Focus on Current Status and Future Prospects of the Novel Eco-Friendly Synthetic Gold Lixiviants. *Miner Eng* **2022**, *176*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336>.
- (2) Yessengarayev, Ye. K.; Surimbayev, B. N.; Baimbetov, B. S.; Mamyachenkov, S. V.; Kanaly, T. S. Ore Treatment Hydrogen Peroxide during Heap Leaching of Gold. *Complex Use of Mineral Resources*. **2021**, *316* (1), 5–14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>.
- (3) Aroquipa Pacho, J. C. Optimización Del Proceso de Cianuración Mediante El Uso de Peróxido de Hidrogeno En Planta Metalurgica Chala One S.A.C, 2019.
- (4) Ahn, J.; Wu, J.; Lee, J. Investigation on Chalcopyrite Leaching with Methanesulfonic Acid (MSA) and Hydrogen Peroxide. *Hydrometallurgy* **2019**, *187*, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.001>.
- (5) Shumilova, L. V. Enhancement of Gold Heap Leaching by Using a Reagent Complex Containing Hydrogen Peroxide. *Metallurgist* **2020**, *64* (7–8), 665–677. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01043-3>.
- (6) Vargas Panigua, J. Estudio Ambiental y Optimización En La Extracción Del Oro Utilizando El Cianuro. *Ciencia & Desarrollo* **2021**, 75–80.
- (7) Guillermo, C.; Solano, P. Evaluación de Una Metodología Alternativa a La Cianuración Para La Disolución de Oro Utilizando Solventes Orgánicos, 2016.
- (8) Ruiz-Córdoba, J. A.; Lopez-Cañas, C. A.; Carmona-Arango, M. E.; Bolívar-García, W. H. Modelamiento Estadístico y Optimización Del Proceso de Cianuración de Un Mineral Aurífero. *Revista Facultad de Ingeniería* **2019**, *28* (53), 33–51. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9745>.
- (9) Salazar Banda, B. M.; Carrillo Pedroza, F. R.; López Saucedo, F. de J.; Soria Aguilar, M. de J.; González Anaya, J. A. Termodinámica de La Determinación de Oro Por La Técnica de ensayo al Fuego, Una Revisión. *CienciAcierta* **2023**, *76*, 66–81.
- (10) Huere, L. Cinética de Lixiviación y Recuperación de Oro, de Finos En La Lixiviación Por Percolación Con y Sin Aglomeración. *Tecsup* **2019**, *13*.

- (11) de Andrade Lima, L. R. P.; Hodouin, D. Performance Evaluation of Free Cyanide Control Strategies in a Simulated Gold Leaching Circuit. *Canadian Journal of Chemical Engineering* **2021**, *99* (12), 2647–2657. <https://doi.org/10.1002/cjce.24046>.
- (12) Rui Xu, X. N. F. M. Q. L. X. C. Y. Y. B. X. and T. J. Efecto de La Concentración de Tiourea En La Lixiviación de Oro En La Minera Antuyo. *Revista de Investigaciones* **2023**, *12* (2), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/MIN10090811>.
- (13) Soto Mayorga, A. F.; Calla Choque, D.; Santos Munguia, P. C.; Rojas Montes, J. C. Mineragraphic Evaluation for Gold Recovery. *Ingeniería Investigación y Tecnología* **2023**, *24* (3), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.3.022>.
- (14) Jia, R.; You, F. Multi-Stage Economic Model Predictive Control for a Gold Cyanidation Leaching Process under Uncertainty. *AIChE Journal* **2021**, *67* (1). <https://doi.org/10.1002/aic.17043>.
- (15) Galvan, J. M.; Carrillo, F. R.; Soria, M. de J.; Aguilar, E. N. Una Comparación de Reactivos Alternos al Cianuro Como Lixivantes Del Oro. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* **2023**, *7*, 2410–2434. <https://doi.org/https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/8864/3190>.
- (16) Medina, D.; Anderson, C. G. A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates. *Metals*. MDPI AG July 1, **2020**, pp 1–11. <https://doi.org/10.3390/met10070897>.
- (17) Feijo, C. Estudio de La Remoción de Cianuro Con La Utilización de Una Variedad de Biomosas: Una Revisión. *Revista Científica del Instituto de Investigación Geológica y Energetico* **2020**, *3* (2), 13–23.
- (18) LI, Q.; XIE, F.; CHANG, Y. feng; WANG, W.; ZHANG, L. bo. Behavior and Mechanism of Cyanide Loss in Ultrasound-Assisted Gold Leaching Process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* **2023**, *33* (2), 609–618. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66132-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66132-6).
- (19) Barani, K.; Dehghani, M.; Azadi, M. R.; Karrech, A. Leaching of a Polymetal Gold Ore and Reducing Cyanide Consumption Using Cyanide-Glycine

Solutions. *Miner Eng* **2021**, *163*.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106802>.

- (20) Anning, C.; Wang, J.; Chen, P.; Batmunkh, I.; Lyu, X. Determination and Detoxification of Cyanide in Gold Mine Tailings: A Review. *Waste Management and Research*. SAGE Publications Ltd November 1, **2019**, pp 1117–1126. <https://doi.org/10.1177/0734242X19876691>.
- (21) Aydoğan, S.; Motasim, M.; Ali, B. The Novelty of Silver Extraction by Leaching in Acetic Acid with Hydrogen Peroxide as an Organic Alternative Lixiviant for Cyanide. *Heliyon* **2024**, *10* (2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784>.
- (22) Yoğurtcuoğlu, E. Investigation of the Effect of Cyanidation after Microwave Roasting Treatment on Refractory Gold/Silver Ores by Characterization Studies. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* **2023**, *59* (1). <https://doi.org/10.37190/ppmp/157487>.
- (23) Kenzhaliyev, B.; Surkova, T.; Koizhanova, A.; Yessimova, D.; Amanzholova, L.; Dosymbayeva, Z. Study of the Cyanide Leaching of Gold from Low-Grade Raw Materials in the Presence of Amino Acids. *Inorganics (Basel)* **2023**, *11* (12). <https://doi.org/10.3390/inorganics11120461>.
- (24) Azizitorghabeh, A.; Mahandra, H.; Ramsay, J.; Ghahreman, A. Gold Leaching from an Oxide Ore Using Thiocyanate as a Lixiviant: Process Optimization and Kinetics. *ACS Omega* **2021**, *6* (27), 17183–17193. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00525>.
- (25) Ruiz Córdoba, J. A.; López Cañas, C. A.; Carmona Arango, M. E.; Bolívar Gómez, W. Vista de Modelamiento Estadístico de La Lixiviación Con Cianuro de Un Mineral Del Municipio de Andes, Colombia, Como Alternativa al Proceso de Amalgamación. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología* **2019**, *11* (2), 126–137. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22335/rctv.v11i2.826>.
- (26) Gámez, S.; De la Torre, E. Recuperación de Oro a Partir de Minerales Polisulfurados Con Soluciones Amoniacales de Tiosulfato de Sodio. *Revista Politecnica* **2019**, *36* (2).
- (27) Terán Bojórquez, D. G.; Alonso González, O.; Santos Munguía, P. C.; Elizondo Álvarez, M. A.; Bello Teodoro, S. Agente Lixivante Alterno al Cianuro Para Minerales Refractarios de Teluro de Oro. *EPISTEMUS* **2022**, *15* (31), 7–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.196>.

- (28) Nicol, M. J. The Role and Use of Hydrogen Peroxide as an Oxidant in the Leaching of Minerals. 1. Acid Solutions. *Hydrometallurgy* **2020**, *193*. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105328>.
- (29) Fernandez Essenwanger, G. R.; Moreno Eustaquio, W. Influencia de La Concentración de Peróxido de Hidrógeno En La Detoxificación de Relaves Mineros Cianurados. *Revista Ciencia y Tecnología* **2023**, *19* (2), 27–36. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2023.02.02>.
- (30) Xu, R.; Nan, X.; Meng, F.; Li, Q.; Chen, X.; Yang, Y.; Xu, B.; Jiang, T. Analysis and Prediction of the Thiourea Gold Leaching Process Using Grey Relational Analysis and Artificial Neural Networks. *Minerals* **2020**, *10* (9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/min10090811>.
- (31) Lim, B.; Aylmore, M.; Grimsey, D.; Alorro, R. D. Technospheric Mining of Critical and Strategic Metals from Nickel Slag – Leaching with Citric Acid and Hydrogen Peroxide. *Hydrometallurgy* **2023**, *219*, 106066. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2023.106066>.
- (32) Tost, M.; Hitch, M.; Chandurkar, V.; Moser, P.; Feiel, S. The State of Environmental Sustainability Considerations in Mining. *J Clean Prod* **2018**, *182*, 969–977. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.051>.
- (33) Nava Alonso, F.; Elorza Rodríguez, E.; Uribe Salas, A.; Pérez Garibay, R. Análisis Químico de Cianuro En El Proceso de Cianuración: Revisión de Los Principales Métodos. *REVISTA DE METALURGIA* **2007**, *43*, 20–28.
- (34) Munganyinka, J. P.; Habinshuti, J. B.; Komadja, G. C.; Uwamungu, P.; Tanvar, H.; Ofori-Sarpong, G.; Mishra, B.; Onwualu, A. P.; Shuey, S. Optimization of Gold Dissolution Parameters in Acidified Thiourea Leaching Solution with Hydrogen Peroxide as an Oxidant: Implications of Roasting Pretreatment Technology. *Metals (Basel)* **2022**, *12* (10). <https://doi.org/10.3390/met12101567>.
- (35) Yessengarayev, Ye. K.; Surimbayev, B. N.; Baimbetov, B. S.; Mamyachenkov, S. V.; Kanaly, T. S. Ore Treatment Hydrogen Peroxide during Heap Leaching of Gold. *Complex Use of Mineral Resources*. **2021**, *316* (1), 5–14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>.
- (36) Zhang, Y.; Cui, M.; Wang, J.; Liu, X.; Lyu, X. A Review of Gold Extraction Using Alternatives to Cyanide: Focus on Current Status and Future Prospects

of the Novel Eco-Friendly Synthetic Gold Lixiviants. *Miner Eng* **2022**, 176.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336>.

## ANEXOS

### ANEXO A. Tratamiento preliminar de la muestra

#### *Recolección de mineral del molino de bolas*



### ANEXO B. Preparación de las soluciones

#### *Pesado de $\text{AgNO}_3$ y KI*



#### *Preparación de las soluciones para titulación*





**ANEXO C** Proceso de lixiviación

*Colocación de material al tanque de lixiviación*



*Lixiviación por 12 horas*





*Muestras recolectadas por cada hora de proceso*



*Limpieza del tanque de lixiviación*



**ANEXO D** Resultados*Resultado de análisis de la muestra solida*

<b>RESULTADOS</b>			
<b>Código MLM</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	<b>Oro (Au) Total g/t</b>	<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>
01 – 0635	ARENA / Mineral puro	19,10	2024-06-22
01 – 0636	ARENA / Mineral con Cianuro	6,77	2024-06-21
01 – 0637	ARENA / Mineral con Cianuro y Peróxido	7,75	2024-06-21

*Resultado de análisis de muestras liquida sin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*

<b>RESULTADOS</b>			
<b>Código MLM</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	<b>Oro (Au) Total g/m<sup>3</sup></b>	<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>
01 – Sol.	Muestra liquida No 0	NO DETECTADO	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 1 10:30	0,43	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 2 11:30	1,36	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 3 12:30	1,66	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 4 13:30	1,77	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 5 14:30	1,66	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 6 15:30	1,93	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 7 16:30	1,76	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 8 17:30	1,51	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 9 18:30	1,78	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 10 19:30	1,74	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 11 20:30	1,80	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra liquida No 12 21:30	1,82	2024-06-21

Resultado de análisis de muestras líquida con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50%

<b>RESULTADOS</b>			
<b>Código MLM</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	<b>Oro (Au) g/m<sup>3</sup></b>	<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>
01 – Sol.	Muestra líquida No 0 09:00	NO DETECTADO	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 1 10:00	1,19	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 2 11:00	0,94	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 3 12:00	1,02	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 4 13:00	1,36	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 5 14:00	1,31	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 6 15:00	1,26	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 7 16:00	1,31	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 8 17:00	1,35	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 9 18:00	1,51	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 10 19:00	1,75	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 11 20:00	2,05	2024-06-21
01 – Sol.	Muestra líquida No 12 21:00	1,92	2024-06-21