

# ESCUELA DE POSGRADO NEWMAN

MAESTRÍA EN  
GESTIÓN MINERA Y AMBIENTAL



**“Propuesta de mejora mediante el tratamiento de minerales refractarios de oro y plata utilizando el proceso de nanofiltración en minera Lagunas Norte Perú - 2023”**

**Trabajo de Investigación  
para optar el Grado a Nombre de la Nación de:**

Maestro en  
Gestión Minera y Ambiental

**Autor:**  
Bach. Eduardo Cossío, Morales

**Docente Guía:**  
Mgtr. Lewis Zúñiga, Patricio Federico.

TACNA – PERÚ

2023

# "Propuesta de mejora mediante el tratamiento de minerales refractarios de oro y plata utilizando el proceso de nanofiltración en minera Lagunas Norte Perú-2023"

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

**20%**

INDICE DE SIMILITUD

**18%**

FUENTES DE INTERNET

**6%**

PUBLICACIONES

**3%**

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

“El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en este trabajo es de exclusiva responsabilidad del autor”

## INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO.....	3
Índice de Tablas.....	2
Índice de Figuras.....	4
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO I. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.....	13
1.1. Título del tema.....	13
1.2. Planteamiento del problema.....	13
1.2.1. Problema general.....	15
1.2.2. Problemas específicos.....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
1.4. Justificación.....	17
1.4.1. Justificación teórica.....	17
1.4.2. Justificación Metodológica.....	18
1.4.3. Justificación practica.....	19
1.4.4. Justificación tecnológica.....	19
1.5. Definiciones.....	20
1.6. Alcances y limitaciones.....	22
1.6.1. Ubicación.....	22
1.6.2. Alcances:.....	23
1.6.3. Limitaciones.....	23
1.6.4. Cronograma.....	25
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Conceptualización de las variables o tópicos clave.....	30
2.1.1. Minerales Refractarios:.....	30
2.1.2. Nanofiltración:.....	31
2.1.3. Recuperación de Oro y Plata:.....	31
2.1.4. Eficiencia del Proceso:.....	32
2.1.5. Reducción de Impurezas:.....	32
2.1.6. Sostenibilidad Ambiental:.....	32
2.1.7. Costos Operativos:.....	32
2.1.8. Normativas y Regulaciones:.....	32
2.1.9. Innovación Tecnológica:.....	33
2.1.10. Gestión de Riesgos:.....	33

2.1.11.	Procesos para la producción de los minerales de Oro y Plata en Mina.....	33
2.2.	Importancia de las variables o tópicos clave .....	40
2.2.1.	Eficiencia en la Recuperación de Metales Preciosos: .....	40
2.2.2.	Minimización de Pérdidas y Residuos: .....	40
2.2.3.	Reducción de Impurezas y Mejora en la Pureza: .....	41
2.2.4.	Sostenibilidad Ambiental: .....	41
2.2.5.	Reducción de Costos Operativos: .....	41
2.2.6.	Innovación Tecnológica: .....	41
2.2.7.	Cumplimiento Normativo y Legal: .....	41
2.2.8.	Gestión de Riesgos .....	42
2.2.9.	Reputación y Atracción de Inversiones: .....	42
2.2.10.	Contribución a la Comunidad Local: .....	42
2.2.11.	Tecnologías de Membrana .....	42
2.2.12.	Nanofiltración .....	55
2.2.13.	Tratamiento del drenaje ácido de mina.....	58
2.2.14.	Procesos del tratamiento del drenaje ácido de mina .....	59
2.2.15.	Aguas ácidas.....	62
2.2.16.	Drenaje ácido de mina .....	65
2.2.17.	Problemas generados por el drenaje ácido de mina.....	66
2.3.	Análisis crítico .....	68
2.1.	Análisis comparativo .....	70
CAPITULO III.    MARCO REFERENCIAL .....		72
3.1.	Reseña Histórica.....	72
3.2.	Filosofía Organizacional .....	74
3.2.1.	Misión .....	74
3.2.2.	Visión .....	75
3.2.3.	Principios y valores.....	75
3.3.	Diseño Organizacional.....	76
3.4.	Productos y/o Servicios .....	77
3.5.	Diagnóstico Organizacional .....	78
3.6.	Descripción de los Sistemas de Procesamiento de Mineral .....	80
3.6.1.	Instalación de Molienda CCS (Área 1) .....	81
3.6.2.	Circuito CIL (Área 2). .....	91
3.6.3.	Filtración de Residuos CIL (Área 3).....	94
3.6.4.	Plantas de Tratamiento Instaladas en Mina .....	98
CAPITULO IV.    RESULTADOS .....		100
3.7.	Diagnóstico .....	100
3.7.1.	Problemática Actual.....	100
3.8.	Diagrama de Procesos de Producción de la Minera.....	108

3.8.1.	Configuración del Proceso de Tratamiento de Efluentes en Zona Oeste.....	108
3.8.2.	Configuración del Proceso de Tratamiento de Efluentes en Zona Este: .....	109
3.9.	Diseño de Mejora.....	111
3.9.1.	Caracterización de la Membrana:.....	111
3.9.2.	Selección de la Membrana .....	115
3.9.3.	Configuración de la Membrana.....	118
3.9.4.	Factores a considerar para elegir una membrana.....	120
3.10.	Caso de Aplicación con la Tecnologías de Membranas .....	121
3.10.1.	Caso 1. Prueba Experimental .....	121
3.10.2.	Caso 2. Caso de Estudio .....	131
3.10.3.	Caso 3. Prueba Experimental .....	149
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		164
5.1.	Conclusiones .....	164
5.1.	Recomendaciones .....	169
Bibliografía .....		171
Anexos .....		177

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Ecuaciones fenomenológicas relacionadas con la fuerza impulsora (gradientes).....	46
<b>Tabla 2</b> Rango.....	47
<b>Tabla 3</b> Operaciones de separación por membrana en función de la fuerza impulsora .....	47
<b>Tabla 4</b> Criterios clave de diseño de procesos CIL .....	91
<b>Tabla 5:</b> Criterios clave de diseño del proceso de filtración de residuos CIL.....	96
<b>Tabla 6</b> Presencia de cobre y sólidos .....	101
<b>Tabla 7</b> Efluente Poza de Sedimentación.....	102
<b>Tabla 8</b> Efluente Poza de Sedimentación Oeste.....	103
<b>Tabla 9</b> Límites Máximos para afluentes .....	106
<b>Tabla 10</b> Porcentajes de Minerales a extraídos durante el Procesamiento para la Optimización de los Minerales Carbonosos (LNCMOP).....	107
<b>Tabla 11</b> Clasificación de minerales .....	108
<b>Tabla 12</b> Porcentaje de contenido de cobre en minerales con la presencia de Sulfuros. ....	108
<b>Tabla 13</b> Características de las Membranas. Jastorff, Störmann y Wölcke en 2003. ....	116
<b>Tabla 14</b> Caracterización Química de la Solución Rica. ....	124
<b>Tabla 15</b> Caracterización de las Aguas del Proceso.....	125
<b>Tabla 16</b> Resultado del Análisis Químico de las Muestras de Periodo Experimental. ....	126
<b>Tabla 17</b> Balance por Etapas 1 al 2.....	126
<b>Tabla 18</b> Balance por Etapas 1 al 3.....	126

<b>Tabla 19</b> Balance Total. ....	127
<b>Tabla 20</b> Balance Global para las 3 etapas. ....	127
<b>Tabla 21</b> Porcentaje de Recuperación en 2 etapas.....	128
<b>Tabla 22</b> Porcentaje de Recuperación en 3 etapas.....	128
<b>Tabla 23</b> Características de efluentes en la mina de oro. ....	131
<b>Tabla 24</b> Resultado de las características de las 05 membranas probadas.....	134
<b>Tabla 25</b> Características del Efluente Sintético utilizando el análisis de la membrana zeta potencial.....	136
<b>Tabla 26</b> Rendimiento de las membranas para tratar el efluente de la minería de oro con respecto a la resistencia intrínseca de la membrana, la resistencia al ensuciamiento y el flujo de permeado final. ....	140
<b>Tabla 27</b> Resultados de parámetros fisicoquímicos del efluente crudo y permeados obtenidos con diferentes membranas y sus respectivas eficiencias de retención. .	141
<b>Tabla 28</b> La conductividad del permeado NF90 en función del pH de la alimentación .....	148



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación de Lagunas Norte .....	22
<b>Figura 2</b> Ubicación de Lagunas Norte .....	25
<b>Figura 3</b> Esquema de un proceso de separación con membrana .....	44
<b>Figura 4</b> Esquema de un proceso de separación con membrana de flujo tangencial .....	44
<b>Figura 5</b> El rango de tamaño de separación de algunos compuestos .....	48
<b>Figura 6</b> Membrana con poros asimétricos y simétricos .....	50
<b>Figura 7</b> Osmosis Inversa.....	58
<b>Figura 8</b> Diferencias entra la filtración estática y dinámica .....	60
<b>Figura 9</b> Proceso Circular de Valores.....	76
<b>Figura 10</b> Organigrama.....	77
<b>Figura 11</b> Análisis DAFO .....	78
<b>Figura 12</b> Análisis DAFO Minera Lagunas Norte .....	79
<b>Figura 13</b> Implementación del Proceso de Optimización del Procesamiento de Minerales Carbonosos.....	80
<b>Figura 14</b> Overall Layout - Standalone CMOP .....	81
<b>Figura 15</b> CCS-Grinding Circuit.....	82
<b>Figura 16</b> 3140 - Ore Storage and Handling .....	83
<b>Figura 17</b> Ore Preparation (Scrubbing & Screening) .....	86
<b>Figura 18</b> Ore Preparation (Oversize Stockpile) .....	86
<b>Figura 19</b> 4110 – Molienda .....	89
<b>Figura 20</b> Espesamiento de Molienda .....	90
<b>Figura 21</b> CIL .....	94
<b>Figura 22</b> 4132 – Espesamiento y Filtración de Residuos CIL .....	98

<b>Figura 23</b> Configuración actual del proceso de Tratamiento de Efluentes Zona Oeste. ....	109
<b>Figura 24</b> Configuración propuesto correspondiente al proceso de Tratamiento de Efluentes Zona Este .....	110
<b>Figura 25</b> Determinación de la permeabilidad al agua pura. Jastorff, Störmann y Wölcke en 2003 .....	116
<b>Figura 26</b> Configuración propuesto correspondiente al proceso de Tratamiento de Efluentes Zona Oeste.....	117
<b>Figura 27</b> Configuración propuesto correspondiente al proceso de Tratamiento de Efluentes Zona Este. ....	118
<b>Figura 28</b> Esquema de una membrana en configuración en Espiral. ....	120
<b>Figura 29</b> Materiales utilizados en la prueba.....	124
<b>Figura 30</b> Resistencia al ensuciamiento en función del pH del alimento y la tasa de recuperación.....	145
<b>Figura 31</b> Potencial Zeta de NF90 medido con una solución salina con concentraciones similares al efluente de la minería de oro. ....	146
<b>Figura 32</b> Características técnicas de la membrana NF270 de Dow Chemical y HYDRACoRe70pHT. ....	149
<b>Figura 33</b> Esquema de funcionamiento de una membrana de NF .....	150
<b>Figura 34</b> Flujo Volumétrico vs La Presión Transmembrana .....	157
<b>Figura 35</b> Caudales aplicados en las pruebas para las membranas NF270 e HIDROCORE.....	157
<b>Figura 36</b> Caudales aplicados en las pruebas para las membranas NF270 e HIDROcore .....	158
<b>Figura 37</b> Los datos analizados podrán ver en las tablas N° 02.....	159

<b>Figura 38</b> Porcentaje de concentrado en mina con diferentes PH.....	160
<b>Figura 39</b> Porcentaje de concentrado en mina con la membraba NF270 .....	162
<b>Figura 40</b> Porcentaje de concentrado en mina con la membrana HIDROCORE .....	163

## **DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído el Reglamento de la Protección de la Propiedad Intelectual de la Escuela de Postgrado Newman y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en este Reglamento. Asimismo, autorizo a la Escuela de Postgrado Newman para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en las leyes, decretos y reglamentos de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_  
Nombre: Eduardo Cossío Morales  
D.N.I 10129967

## RESUMEN

El objetivo de la presente propuesta de mejora es reducir la emisión de efluentes contaminantes producidos en el proceso de extracción de los minerales de oro y plata en la minera Lagunas Norte, mejorando los métodos existentes y utilizando tecnologías emergentes, eficientes y seguras, cuidadosas con el medio ambiente como es el tratamiento de efluentes por medio del sistema de nanofiltración, la cual permite el tratamiento de minerales lixiviados y el procesamiento de los minerales carbonosos que son efluentes líquidos los cuales presentan una alta contaminación de metales pesados, esta tecnología de nanofiltración permite una alta recuperación de permeado mediante el ajuste del PH.

La unidad minera Lagunas Norte, es de tajo abierto que explota los minerales del oro y plata. El beneficio de los minerales explotados se realiza mediante el proceso de lixiviación en pilas y para luego realizar el procesamiento en las plantas del tipo Merrill Crowe y Carbón de Columnas (CIC), para la obtención del Doré como producto final.

El proceso el drenaje ácido en mina (AMD) constituye el principal problema de contaminación ambiental asociado a la industria minera, constituyendo el resultado de la interacción entre el ambiente y los minerales sulfurados presentes en las rocas los cuales se caracterizan por poseer elevadas concentraciones de sulfato, metales disueltos y presentan una gran acidez. Una de las alternativas más prometedoras para su mitigación es el tratamiento mediante membranas de nanofiltración (NF), a diferencia de tratamientos convencionales, su fácil operación resulta en aguas de alta calidad, no genera grandes cantidades de lodos ni requiere la costosa adición de productos químicos. El procesamiento de las aguas de drenaje ácido en mina (AMD) mediante el sistema de nanofiltración (NF) no ha sido muy aplicada, la reducida

literatura no incorpora suficientes modelos mecánicos que aporten con el estudio del ensuciamiento del mineral a fin de proponer medidas de pretratamiento y optimización de la operación. La presente investigación tiene por objetivo evaluar el efecto de variables como la presión, pH, la temperatura y el tipo de membrana sobre el ensuciamiento utilizando un modelo semi- empírico y herramientas analíticas.

La nanofiltración (NF) y la osmosis inversa (RO) actualmente son los mejores procesos con capacidad para retener de manera efectiva iones obteniéndose un elevado potencial de recuperación de agua y metales asociados con el drenaje ácido en mina (AMD). Debido a esto, el proceso de nanofiltración (NF) pasa a ser una de las mejores alternativas en la retención de iones divalentes de manera eficiente llegando a producir una alta calidad de agua al igual que la osmosis inversa, con la diferencia de contar con una menor demanda energética y demostrando ser más eficiente al proporcionar una mayor permeabilidad de agua con menores presiones de operación.

La oxidación de minerales sulfurados asociados con el drenaje ácido en mina (AMD) ha sido un problema ambiental para la industria minera en todo el mundo. El AMD se caracteriza de manera general por tener altas concentraciones de sulfato, metales pesados y metaloides y por tener un pH bajo. EL proceso de separación mediante membranas se ha convertido en una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas debido a su eficaz y eficiente remoción de especies.

Los resultados indican que las membranas comerciales enrolladas en espiral demostraron tener una alta capacidad de retención de minerales y sulfatos, demostrándose en las pruebas de caracterización realizadas.

## INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales es una actividad importante del Perú, debido a que genera una cantidad de divisas importante para país, siendo la extracción del Oro y Plata, los minerales que son explotados por mineras como Lagunas Norte pertenecientes a la Minera Boroo.

La industria extractiva constituye uno de los cimientos primordiales para el progreso de la actividad económica peruana, evidenciándose un crecimiento en la última década en diversas magnitudes macroeconómicas tales como la producción, inversión, generación de empleo, exportaciones, transferencias, entre otros indicadores. En el año 2022, el Perú figuró entre los principales productores mundiales de minerales, exhibiendo preeminencia en 8 de los minerales más transados, a saber, cobre, oro, zinc, plata, plomo, hierro, estaño y molibdeno. La nación peruana afianzó su posición como el segundo mayor productor global de cobre y zinc, además de ostentar el primer puesto a nivel latinoamericano en la producción de zinc y estaño. Añadiendo a esto, detenta las reservas más considerables de plata a nivel global y se posiciona en el tercer lugar en reservas de cobre y molibdeno.

En la minera Lagunas norte viene mejorando el desarrollo de los procesos de obtención de minerales mediante el tratamiento de lixiviación y el proceso de optimización de minerales carbonosos por lo que se generan en promedio 4,200 m<sup>3</sup>/h de solución rica de mineral tales como el oro, plata, cobre, zinc y cadmio como minerales más importantes.

Este incremento en la producción del mineral en estos últimos años ha acrecentado la utilización de solución cianurada en la mina y ha puesto en evidencia la necesidad de mejorar el tratamiento de las aguas acidas, por lo que actualmente dispone de dos plantas de tratamiento de drenaje de roca ácida o planta de tratamiento

ARD este y oeste.

Cada una de las plantas ARD reciben agua de las pozas de colección del drenaje ácido, los lodos descartados son impulsados hacia la poza de lodos existentes, sin embargo el agua obtenida es tratada en una planta de ajuste de PH, para luego ser recuperada y vertida a la quebrada, esta agua antes de su vertimiento requiere ser tratada mediante un método eficiente a fin de disminuir la concentración de minerales encontrados como el principalmente el cobre, plomo y zinc a fin de cumplir con los estándares de calidad de agua y puedan ser vertidos a la quebrada sin problemas, disminuyendo los impactos ambientales.

Por lo que se propone implementar un método eficiente y menos costoso como es la implementación el proceso de nanofiltración mediante el uso de membranas.

Escasas son las pesquisas que han afrontado la manipulación del agua de drenaje en yacimiento (AMD) mediante membranas de nanofiltración (NF); por ende, uno de los propósitos de esta labor consiste en valorar la instauración de la nanofiltración y su perfeccionamiento en el procedimiento ininterrumpido de operación en la explotación minera Lagunas Norte. En el presente trabajo se desarrollará la siguiente:

En el primer apartado, se establecen los antecedentes de la investigación, donde se profundiza en la problemática vinculada a la seguridad de la información en la compañía. Se aborda también la identificación y definición de variables, así como la delineación de los objetivos y supuestos de la indagación.

En el segundo capítulo, se examina el marco teórico, en el cual se refleja la reelaboración de las variables a partir de la bibliografía consultada.

El tercer capítulo presenta el Marco Referencial, que proporciona una



descripción detallada de la empresa Lagunas Norte.

El cuarto capítulo aborda el marco metodológico, donde se expone el desarrollo de la investigación, el tratamiento de los datos recopilados y sus respectivos resultados.

En el quinto capítulo, se elaboran sugerencias basadas en los resultados obtenidos de los objetivos de la investigación, proponiendo recomendaciones o sugerencias de implementación según corresponda.