



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“Evaluación de diferentes membranas catiónicas para la remoción de cobre  
por electrodiálisis de un efluente del procesamiento de minerales”**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:**

Maestro en Sistema Ambientales

**Presenta:**

IBQ. Judith Ivonne Fierro Rivera

**Director de la tesis:**

Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes

**Fecha de examen de titulación:**

**Durango, Dgo., México**

**Fecha de elaboración: junio 2024**





**“Evaluación de diferentes membranas catiónicas para la remoción de cobre por electrodiálisis de un efluente del procesamiento de minerales”**

**Presenta:**

IBQ. Judith Ivonne Fierro Rivera

**COMITÉ TUTORIAL**

Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes

Director(a)

Firma

Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez

Asesor(a)

Firma

Dr. Félix Alonso Alcázar Medina

Asesor(a)

Firma

Dr. Roberto Valencia Vázquez

Asesor(a)

Firma

M.C. Tania Montoya García

**Coordinadora de la Maestría en  
Sistemas Ambientales**

Dr. Francisco Javier Godínez García

**Jefe de la División de Estudios de  
Posgrado e Investigación**



Victoria de Durango, Dgo., a **31 / Mayo / 2024**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 269 / 24.

**ASUNTO:** Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**C. JUDITH IVONNE FIERRO RIVERA**  
**No. DE CONTROL C13040800**  
**P R E S E N T E .**

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

**"Evaluación de diferentes membranas catiónicas para la remoción de cobre por electrodiálisis de un efluente del procesamiento de minerales"**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**A T E N T A M E N T E .**

*Excelencia en Educación Tecnológica  
"La Técnica al Servicio de la Patria"*

**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



FJGGammc



Victoria de Durango, Dgo., a **31 / Mayo / 2024****DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**DEPI / C / 268 / 24.****ASUNTO:** Autorización de Tema de Tesis de Maestría.**C. JUDITH IVONNE FIERRO RIVERA**  
**No. DE CONTROL G13040800**  
**P R E S E N T E .**

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales** cuyo título es:

**"Evaluación de diferentes membranas catiónicas para la remoción de cobre por electrodiálisis de un efluente del procesamiento de minerales"**

**CONTENIDO:**

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
|               | RESUMEN                        |
|               | ABSTRACT                       |
| CAPÍTULO I.   | INTRODUCCIÓN                   |
| CAPÍTULO II.  | MARCO TEÓRICO                  |
| CAPÍTULO III. | MATERIALES Y MÉTODOS           |
| CAPÍTULO IV.  | RESULTADOS Y DISCUSIÓN         |
| CAPÍTULO V.   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES |
| CAPÍTULO VI.  | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS     |
| CAPÍTULO VII. | ANEXOS                         |

Sin otro asunto en particular, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE.***Excelencia en Educación Tecnológica*  
*"La Técnica al Servicio de la Patria"*  
**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

FJGG/amhc





Victoria de Durango, Dgo. a 10 de mayo de 2024

Por este conducto se hace constar que la tesis denominada "Evaluación de diferentes membranas catiónicas para la remoción de cobre por electrodiálisis de un efluente del procesamiento de minerales", de la alumna Judith Ivonne Fierro Rivera, con número de control 13040800, estudiante del programa de Maestría en Sistemas Ambientales, revisada por primera vez, se sometió al software Turnitin Similarity para ser examinado, en donde el reporte del software mencionado mostró un porcentaje de 7% de similitud general.

Con base en el reporte de Turnitin, al criterio ético y profesional del director de tesis y al área del programa, se considera que cumple con los criterios de originalidad.

Con base en lo anterior se emite el siguiente dictamen.

*Sé autoriza dar inicio a los trámites de obtención de grado.*

Atentamente,

Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes

Director de la Tesis

Vo.Bo.

Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez

Asesor

Dr. Roberto Valencia Vázquez

Asesor

Cp

Alumno

Coordinación del programa

Dr. Félix Alonso Alcazar Medina

Asesor

**LICENCIA DE USO OTORGADA POR JUDITH IVONNE FIERRO RIVERA** de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en Calle Pelicano # 125, Fraccionamiento Real del Mezquital Durango, Dgo., en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **"EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEMBRANAS CATIÓNICAS PARA LA REMOCIÓN DE COBRE POR ELECTRODIÁLISIS DE UN EFLUENTE DEL PROCESAMIENTO DE MINERALES"** en adelante **"LA OBRA"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **"EL AUTOR Y/O EL TITULAR"**, a favor del Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, y con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, se establecen las cláusulas siguientes:

**PRIMERA –OBJETO:** **"EL AUTOR Y/O TITULAR"**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **"LA OBRA"**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

**SEGUNDA - TERRITORIO:** La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

**TERCERA -ALCANCE:** La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **"LA OBRA"** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

**CUARTA – EXCLUSIVIDAD:** La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Durango; por lo tanto, **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** conserva los derechos patrimoniales y morales de **"LA OBRA"**, objeto del presente documento.

**QUINTA – CRÉDITOS:** El Instituto Tecnológico de Durango y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **"AUTOR Y/O TITULAR"** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **"LA OBRA"**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

**SEXTA – AUTORÍA:** **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **"LA OBRA"** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Durango, Dgo., a los diez días del mes de mayo de 2024.

**"EL AUTOR Y/O TITULAR"**

JUDITH IVONNE FIERRO RIVERA



## Resumen

La minería es uno de los sectores productivos de mayor importancia en México, ya que representa una actividad que aporta tanto en el PIB nacional (Producto Interno Bruto), como en la generación y estabilidad de empleos, además de tener una importante influencia en el comercio internacional. El cobre, especialmente en México, juega un papel de relevancia ya que es el segundo metal después del oro con mayor participación económica en la producción minera y la segunda mina de cobre más grande del mundo está localizada en nuestro país. Sin embargo, este el sector minero es uno de los que más contamina el ambiente debido a la naturaleza de los residuos que genera, así como las altas concentraciones de metales pesados que representan un peligro para el ecosistema y toda forma de vida.

Las minas suelen almacenar sus aguas residuales que contienen altas concentraciones de metales pesados en presas de jales; pese a ello, suelen ser un peligro potencial para el ambiente, debido a que suelen rebasarse los límites de contención, desgastarse estructuralmente y están expuestas a cielo abierto. Después de suceder eventos pluviales inesperados o exceder el límite de almacenamiento, se pueden desencadenar accidentes catastróficos ocasionando desbordamientos de miles de litros de agua mezclada con diversos jales mineros en concentraciones fuera de los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Ocasionando con ello, la contaminación de cuerpos de agua superficiales cercanos que, usualmente son la fuente de abastecimiento de comunidades y contienen diversas especies marinas, terrestres y/o cultivos y, la flora en general.

Para la extracción de metales se necesitan altos volúmenes de agua fresca que son tomados de fuentes superficiales, esto ha contribuido a que la disponibilidad de agua escasee con mayor frecuencia en varios estados del país, dejando a miles de pobladores sin el vital líquido ya que hoy en día, más del 90% del país sufre de presión hídrica. El sector minero suele tratar sus aguas residuales con el principal objetivo de recuperar las altas concentraciones del metal extraído a partir de lo denominado como





“pulpa”. No obstante, el remanente del proceso contiene altos volúmenes de agua y concentraciones considerables de metales que muchas veces es difícil o costoso remover por tratamientos convencionales; por lo cual, terminan siendo depositados en presas de jales mineros. El proceso de la electrodiálisis ha demostrado ser un tratamiento potencialmente benéfico para la remoción de metales pesados como el cobre en efluentes, sobre todo en grandes volúmenes de agua y concentraciones trazas. Además, el proceso de la electrodiálisis podría utilizarse para obtener volúmenes de agua tratada que sea reutilizada al interior de la mina y con ello disminuir el consumo de agua fresca. El presente trabajo de investigación se enfocó en buscar las mejores condiciones operacionales para remover iones de cobre de un efluente minero, evaluando la interferencia de variables como el modelo de membrana en función de la permselectividad de las membranas, así como la conductividad transferida a través de la concentración del electrolito alimentado y de la densidad de corriente aplicada al sistema. Así mismo, se calculó la eficiencia de corriente y el consumo de energía para determinar los costos energéticos. Finalmente, mediante un análisis de los resultados y su tratamiento estadístico se obtuvo el modelo de membrana con mejor costo/beneficio para la remoción de cobre en un efluente minero por medio del tratamiento de electrodiálisis.

### **Abstract**

Mining is one of the most productive sectors and a significant contributor to Mexico's GDP (Gross Domestic Product), providing jobs and an important influence in the international trade market. Copper, a crucial metal in the national mining sector, plays a relevant role after gold as second metal in economic importance, whilst also Mexico host the world's second-largest copper mine. However, the mining sector is also a significant environmental polluter, generating wastewater containing high concentrations of heavy metals that pose a significant environmental risk to the surrounding ecosystem.







Mines often store these wastewaters in tailings dams, which can overflow contaminating nearby surface water sources, affecting surrounding communities and ecosystems. After extreme precipitation events or the storage limit is exceeded, catastrophic accidents may be triggered, causing overflow of thousands of liters of water mixed with mining tailings with concentrations outside the environmental regulations (NOM-001-SEMARNAT-2021).

Contaminating nearby surface waterbodies which are potable water sources of communities, in which live diverse marine and fluvial species and sustain terrestrial species, crops and flora in general. The mining sector's water consumption also exacerbates water scarcity phenomena in several northern states on Mexico. The mining companies usually treat wastewater with the main objective of recovering the high residual concentrations of the extracted metal which is known as "pulp". Nevertheless, the residual mass of the process contains high volumes of water and considerable concentrations of different metals that are often difficult or expensive to recover by conventional treatments, leading being deposited in mining tailings dams. The electrodialysis process has shown to be an effective treatment technology for removing heavy metals, like copper from mining effluents. This research focused on optimizing the operational conditions for copper removal using the electrodialysis process, evaluating the performance of different membranes using different electrolyte concentrations and the current density on treatment efficiency and energy consumption.

Finally, the statistical analysis of the results allowed to develop a membrane model with the lowest cost-benefit ratio for copper removal of a mining effluent using the electrodialysis process.

