

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“Remoción de iones sulfato presentes en un drenaje ácido de mina
mediante una celda de electrodiálisis”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Sistemas Ambientales

Presenta:

I.Q. Karla Daniela Alvarez Martinez

Director de tesis:

Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes

COMITÉ TUTORIAL

<u>Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes</u> Director(a)	 Firma
<u>Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez</u> Asesor(a)	 Firma
<u>Dr. Félix Alonso Alcázar Medina</u> Asesor(a)	 Firma
<u>Dr. Felipe Samuel Hernández Rodarte</u> Asesor(a)	 Firma


Dra. Tania Montoya
Coordinador de la Maestría en
Sistemas Ambientales


Dra. Tania Montoya
Jefa de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación



Educación
Secretaría de Educación Pública



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **17 / Marzo / 2026.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 085 / 2026.

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. KARLA DANIELA ALVAREZ MARTINEZ

Nº. DE CONTROL G17040359

PRESENTE.

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:

"Remoción de iones sulfato presentes en un drenaje ácido de mina mediante una celda de electrodiálisis"

Si más otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®

"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. TANIA MONTOYA GARCÍA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TMG:ammc.



2026
100 años
Margarita
Maza



Bvd. Felipe Pescador No. 1630 Dte., Durango, Dgo., C.P. 34080

e-mail: deposgrado@itdurango.edu.mx

www.itdurango.edu.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE ACADÉMICOS



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **17 / Marzo / 2026**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 084 / 2026.

Asunto: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. KARLA DANIELA ALVAREZ MARTINEZ
No. DE CONTROL G17040359
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 Sistema Ambientales** cuyo título es:

"Remoción de iones sulfato presentes en un drenaje ácido de mina mediante una celda de electrodiálisis"

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

BIBLIOGRAFÍA

Lo anterior con la finalidad de que se le dé el seguimiento correspondiente.

ATENTAMENTE,

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

C. TANIA MONTOYA GARCÍA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TUG/gmddc



2026
Margarita
Maza



Dist. Indus. Francisco Iba. 3630 Col. Durango, Dgo., C.P. 34090

e-mail: dep@posgrado@itdurango-conamex

telcel.mx | itdurango.edu.mx



Victoria de Durango, Dgo. a 18 de marzo de 2026

Por este conducto se hace constar que la tesis denominada "Remoción de iones sulfato presentes en un drenaje ácido de mina mediante una celda de electrodiálisis", de la alumna Karla Daniela Álvarez Martínez, con número de control 17040359, 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.

Se 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. Félix Alonso Alcázar Medina

Asesor

Dr. Felipe Samuel Hernández Rodarte

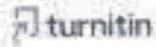
Asesor

Cc:

Alumno

Coordinación del programa





Página 2 de 124 - Distribución general de integridad

Identificador de la entrega: 20715544537544

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluido las fuentes principales y el filtro.

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores o menos de 10 palabras

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

Nº de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan detectar una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarse.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problema. Sin embargo, recomendamos que preste atención a la misma.



LICENCIA DE USO OTORGADA POR KARLA DANIELA ALVAREZ MARTINEZ, de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en Privada caoba #101 colonia nuevo amanecer, Durango, Dgo., en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada "Remoción de iones sulfato presentes en un drenaje ácido de mina mediante una celda de electrodiálisis" 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 doce días del mes de marzo de 2026.

"EL AUTOR Y/O TITULAR"

Karla Daniela Álvarez Martínez



Resumen

La minería satisface numerosas necesidades sociales, pero sus procesos generan impactos ambientales significativos, como el alto consumo de agua y la descarga de contaminantes que afectan la calidad de los ecosistemas. Entre los principales problemas destaca la formación de drenajes ácidos de mina (DAM), caracterizados por elevadas concentraciones de iones sulfato (SO_4^{2-}) derivados de la oxidación de minerales sulfurosos. Ante esta problemática, la electrodiálisis se presenta como una alternativa sostenible para la remoción eficiente de sulfatos. Este proceso electroquímico, basado en el uso de membranas de intercambio iónico y la aplicación de un campo eléctrico, permite la migración selectiva de los iones y el tratamiento continuo de grandes volúmenes de agua con alta eficiencia energética y selectividad iónica. En este trabajo se evaluó la remoción de iones sulfato en un drenaje ácido de mina mediante un sistema continuo de electrodiálisis, considerando la influencia de la densidad de corriente, la concentración y tipo de electrolito, así como el tiempo de retención, con el fin de optimizar las condiciones operativas del proceso.

La electrodiálisis demostró ser un método eficiente para la eliminación de iones sulfato tanto en efluentes reales como en soluciones sintéticas que simulan drenajes ácidos de mina, alcanzando eficiencias superiores al 95%. En el modo batch se observó que la concentración del electrolito y la densidad de corriente son factores clave para el desempeño del proceso. Las mejores condiciones se alcanzaron con 30 g/l de NaNO_3 y 85 A/m², logrando incluso una eliminación total (100%) de sulfatos en el efluente real. El aumento de la concentración de NaNO_3 permitió mejorar la eficiencia debido a la reducción de las pérdidas óhmicas y al incremento de la fuerza iónica. Aunque el NH_4Cl mostró buen comportamiento a bajas concentraciones, el NaNO_3 presentó mayor estabilidad y una eficiencia global superior.





Abstract

Products extracted from mines cover a wide range of social needs; however, extraction processes can have negative environmental impacts such as water demand, vegetation removal and the discharge of pollutants, This reduces the quality of surface and ground water, air and soil, and ecosystems. As this industry has generated significant environmental challenges, one of the most pressing to solve is the generation of mine acid drains (DAM). These represent a significant environmental challenge, since they contain high concentrations of sulphate ions, resulting from the interaction of sulphurous minerals with water and air during mining. In response to this problem, electrodialysis has emerged as a promising technique for the efficient removal of sulphate ions from these contaminated effluents. Electrodialysis uses an electrochemical cell with ion-exchange membranes and electrodes to apply an electrical potential to contaminated water. This process induces the selective migration of sulphate ions, separating them from the water flow and concentrating them in specific compartments. The effectiveness of the electrodialysis cell lies in its ability to continuously treat significant volumes of water, providing a sustainable solution for sulfate ion removal. In addition, this method provides advantages such as increased ion selectivity and energy efficiency. Continuous recirculation improves the removal efficiency, generating an effluent treated with reduced sulphate concentrations. Electrodialysis emerges as a key strategy to mitigate the environmental impacts associated with acid mine drains, highlighting its role in responsible management of water resources and environmental protection. Therefore, this work will evaluate the removal of sulphate ions in the treatment of an acid mine drainage, depending on the current density, concentration and type of carrier electrolyte, in addition to the retention time by electrodialysis technique in a continuous system.

