



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN QUÍMICA Y AUTOFLOCULACIÓN PARA LA
RECUPERACIÓN DE BIOMASA MICROALGAL CRECIDA EN
AGUA RESIDUAL**

TESIS

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

Presenta:

IBQ. Lilian Marcela Soto Gallarzo

Director de tesis:

Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán

Asesores:

Dra. Dulce Jazmín Hernández Melchor

M.I. María Dolores Josefina Rodríguez Rosales

Dr. Sergio Valle Cervantes

Durango, Dgo. México

Mayo 2025



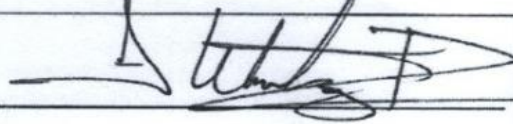

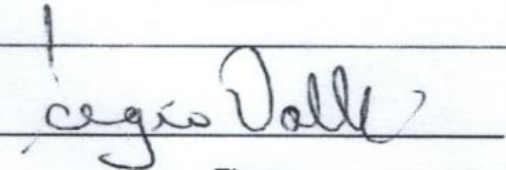
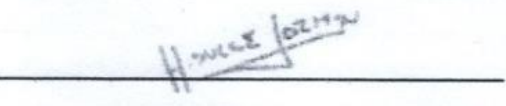



**COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN
QUÍMICA Y AUTOFLOCULACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE BIOMASA
MICROALGAL CRECIDA EN AGUA RESIDUAL**


Presenta:

IBQ. Lilian Marcela Soto Gallarzo

COMITÉ TUTORIAL

<p><u>Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán</u> Director</p>	 Firma
<p><u>M.I. María Dolores Josefina Rodríguez</u> <u>Rosales</u> Asesora</p>	 Firma
<p><u>Dr. Sergio Valle Cervantes</u> Asesor</p>	 Firma
<p><u>Dra. Dulce Jazmín Hernández Melchor</u> Asesora</p>	 Firma


C. Tania Montoya García
Coordinadora de la Maestría en
Sistemas Ambientales


C. Francisco Javier Godínez García
Jefe de la División de Estudios de Posgrado
e Investigación

Durango, Dgo. México

Mayo 2025



Victoria de Durango, Dgo., a **30 / Mayo / 2025**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 294 / 2025.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. LILIAN MARCELA SOTO GALLARZO
No. DE CONTROL G09040580
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:

“Comparación de los procesos de coagulación-floculación química y autofloculación para la recuperación de biomasa microalgal crecida en agua residual”

Sin otro particular de momento, 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'ammc.



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Rivd. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx
tecna.mx | itdurango.edu.mx





Victoria de Durango, Dgo., a **30 / Mayo / 2025.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 293 / 2025.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. LILIAN MARCELA SOTO GALLARZO
No. DE CONTROL G09040580
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:

“Comparación de los procesos de coagulación-floculación química y autofloculación para la recuperación de biomasa microalgal crecida en agua residual”

CONTENIDO:

	RESUMEN
	ABSTRACT
CAPÍTULO I.	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II.	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III.	MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV.	RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN
CAPÍTULO V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFÍA
	ANEXOS

Sin otro asunto en particular, 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



FJGG'ammc.



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Bldv. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx
tecna.mx | itdurango.edu.mx





LICENCIA DE USO OTORGADA POR LILIAN MARCELA SOTO GALLARZO, de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en Calle González de la Vega #227 , Fraccionamiento González de la Vega, Durango, Dgo., en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **“COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN QUÍMICA Y AUTOFLOCULACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE BIOMASA MICROALGAL CRECIDA EN AGUA RESIDUAL”** 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 veinte días del mes de mayo de 2025.

“EL AUTOR Y/O TITULAR”

LILIAN MARCELA SOTO GALLARZO

Durango, Dgo., a 20 de mayo de 2025

Por este conducto se hace constar que la tesis denominada **“Comparación de los procesos de coagulación-floculación química y autofloculación para la recuperación de biomasa microalgal crecida en agua residual”**, de la alumna **IBQ. Lilian Marcela Soto Gallarzo**, con número de control **IBQ. Lilian Marcela Soto Gallarzo**, estudiante del programa 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 **19%** de similitud general.

En base al 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. En base a lo anterior se emite el siguiente dictamen: **Se autoriza dar inicio a los trámites de obtención de grado.**

Atentamente,



Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán
Director de la Tesis

Vo.Bo.



M.I. María Dolores Josefina Rodríguez Rosales
Asesor



Dr. Sergio Valle Cervantes
Asesor



Dra. Dulce Jazmín Hernández Melchor
Asesor

Cp Alumno
Coordinación del programa





I. Tabla de contenido

Resumen	10
Summary	11
1. CAPÍTULO 1	12
1.1 Introducción	12
1.2 Antecedentes	14
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo General.....	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
2. CAPÍTULO 2	19
2.1 Marco teórico.....	19
2.1.1 <i>Chlorella vulgaris</i>	22
2.1.2 Sistema de cultivo de microalgas	24
2.1.3 Factores que influyen en el cultivo de microalgas	27
2.1.4 Técnicas de separación de la biomasa microalgal	29
2.1.5 Coagulantes químicos	31
2.1.6 Cloruro férrico.....	33
3. CAPÍTULO 3	35
3.1. Metodología y materiales	35
3.1.1 Microalga empleada y medios de cultivo	35
3.1.2 Fotobiorreactor	35
3.1.3 Unidad de determinación.....	35
3.1.4 Métodos analíticos.....	36
3.1.4. Estrategia experimental.....	37
4. CAPÍTULO 4	38
4.1 Resultados y discusiones	38
4.1.1 Experimentación medio Mineral Basal Bold (BBM)	39



4.1.1.1 Cinéticas de crecimiento de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en medio mineral Basal Bold en reactor.	39
4.1.1.2 Cinéticas de autofloculación de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en medio mineral Basal Bold.....	44
4.1.1.3 Pruebas de autofloculación de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en medio mineral Basal Bold en prototipo sedimentador.....	51
4.1.1.4 Pruebas de coagulación-floculación química de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en medio mineral Basal Bold en prototipo sedimentador.	53
4.1.2 Experimentación en agua residual	55
4.1.2.1 Cinéticas de crecimiento de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en agua residual en reactor.	55
4.1.2.2 Pruebas de autofloculación de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en agua residual en prototipo sedimentador.....	61
4.1.2.3 Pruebas de coagulación-floculación química de <i>Chlorella vulgaris</i> crecida en agua residual en prototipo sedimentador.	63
5. CAPÍTULO 5	66
5.1 Conclusiones y recomendaciones.....	66
6. REFERENCIAS	68
7. ANEXOS	73





II. INDICE DE TABLAS

Capítulo 2 Tabla 1. Coagulantes químicos.....	24
Capítulo 4 Tabla 2. Caracterización inicial del agua residual.....	50
Capítulo 4 Tabla 3. Caracterización final del agua residual.....	50
Capítulo 4 Tabla 4. Límites máximos permisibles para descargas de agua residual.....	53

III. INDICE DE FIGURAS





Capítulo 4 Figura 1. Concentración de clorofilas en reactor con medio BBM.....	32
Capítulo 4 Figura 2. Biomasa crecida en reactor con medio BBM.....	33
Capítulo 4 Figura 3. Concentración de fosfatos crecida en reactor con medio BBM.....	34
Capítulo 4 Figura 4. Concentración de nitratos crecida en reactor con medio BBM.....	35
Capítulo 4 Figura 5. Cinética de autofloculación a pH 4.....	37
Capítulo 4 Figura 6. Cinética de autofloculación a pH 6.....	38
Capítulo 4 Figura 7. Cinética de autofloculación a pH 8.....	39
Capítulo 4 Figura 8. Cinética de autofloculación a pH 10.....	40
Capítulo 4 Figura 9. Cinética de autofloculación a pH 12.....	41
Capítulo 4 Figura 10. Cinética de autofloculación a pH 12.95.....	42
Capítulo 4 Figura 11. Pruebas en sedimentador a pH 12.95.....	44
Capítulo 4 Figura 12. Pruebas en sedimentador con FeCl ₃	46
Capítulo 4 Figura 13. Concentración de clorofilas crecidas en reactor con agua residual.....	48
Capítulo 4 Figura 14. Biomasa crecida en reactor con agua residual.....	49
Capítulo 4 Figura 15. Concentración de Ch/T en el proceso de autofloculación..	54
Capítulo 4 Figura 16. Concentración de Ch/T en las pruebas de floculación en el sedimentador con FeCl ₃	56



Resumen

Las microalgas son organismos con metabolismo fotosintético capaces de producir biomasa utilizando nutrientes inorgánicos como el dióxido de carbono (CO_2), agua y energía solar. Las microalgas son conocidas desde muchos años atrás, utilizadas comúnmente por pueblos antiguos como suplemento alimenticio.

Diversos investigadores han centrado su estudio en las microalgas, ya que se ha descubierto que tienen una gran diversidad de aplicaciones y un alto valor en el mercado. Actualmente se reconoce la importancia comercial de distintas especies de microalgas; sin embargo, el desarrollo industrial es escaso, principalmente a causa de los elevados costos que su producción conlleva.

El proceso productivo de las microalgas consiste primero en cultivarlas, empleando diversas configuraciones de fotobiorreactores, para posteriormente recuperar la biomasa. Existen varios métodos que pueden facilitar la separación de la biomasa microalgal del medio de cultivo, donde uno de los más utilizados es la coagulación-floculación; en él se emplean sustancias orgánicas o inorgánicas que favorecen que el costo no se eleve respecto a otros métodos de separación.

En la presente investigación se compararon los procesos de coagulación- floculación química y autofloculación que permiten recuperar la biomasa de *Chlorella vulgaris* de manera eficiente. Esto se hizo evaluando el uso de cloruro férrico como coagulante, así como el efecto del pH para desencadenar la autofloculación. Lo anterior a fin de encontrar las máximas eficiencias de los procesos, obtenidas por una adecuada aglomeración de las células en suspensión.



Summary

Microalgae are photosynthetic organisms capable of producing biomass using inorganic nutrients such as carbon dioxide (CO₂), water, and solar energy. Microalgae have been known for many years and were commonly used by ancient peoples as a dietary supplement.

Many researchers have focused their studies on microalgae, as they have been found to possess a wide range of applications and high market value. Today, the commercial importance of different microalgae species is recognized; however, industrial development remains limited, mainly due to the high costs associated with their production.

The production process of microalgae first involves cultivation using various photobioreactor configurations, followed by biomass recovery. Several methods can facilitate the separation of microalgal biomass from the culture medium, with one of the most commonly used being coagulation-flocculation. This method employs organic or inorganic substances that help keep costs lower compared to other separation techniques.

In the present study, chemical coagulation-flocculation and autoflocculation processes were compared to efficiently recover biomass from *Chlorella vulgaris*. This was done by evaluating the use of ferric chloride as a coagulant, as well as the effect of pH in triggering autoflocculation. The aim was to determine the maximum efficiency of the processes, achieved through adequate agglomeration of suspended cells.