



# UNIVERSIDAD MODELO

## **Universidad Modelo**

### **Estudiante:**

Diego José Morales Pérez

### **Matrícula**

### **Carrera**

Ingeniería Biomédica

**Desarrollo de membranas asimétricas de PPSU y MOFs con potenciales aplicaciones en la remoción de herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D)**

### **Anteproyecto a realizar en:**

Centro de Investigación Científica de Yucatán, unidad de membranas, laboratorio de membranas

### **Director de Tesis**

Dr. Ángel de Jesús Montes Luna

### **Co-Directora de Tesis**

Dra. Rita del Rosario Sulub Sulub

Periodo: Marzo – Septiembre 2026



# UNIVERSIDAD MODELO

## Introducción:

La calidad del agua es de vital importancia a nivel mundial, en la península de Yucatán no es la excepción, debido a la cantidad de desechos que llegan al manto acuífero, que es la única fuente de agua dulce con la que se cuenta en la región. Pacheco y colaboradores han realizado estudios exhaustivos donde encontraron la presencia del herbicida 2,4-D presente en el anillo de cenotes de la península de Yucatán. Además, se ha reportado ampliamente que las consecuencias y enfermedades que tienen este herbicida sobre el cuerpo humano. Por lo anterior, es de vital importancia la búsqueda de sistemas para la eliminación de contaminantes del agua. Los métodos tradicionales de desinfección como lo son los métodos químicos y físicos tienen las desventajas de formar subproductos, generar una contaminación secundaria y ser de baja eficiencia. Por otro parte, la tecnología de membranas ha contribuido al 53 % de los procesos de producción de agua limpia a nivel mundial. Aunque, las membranas se suelen impregnar y ensuciar con sustancias de desecho disminuyendo su desempeño y su vida de tiempo útil. Sin embargo, la incorporación de partículas puede mejorar el desempeño de las membranas poliméricas. Por lo que, el desarrollo de materiales compuestos formulados con estructuras metal-orgánicas MOFs pueden ser una alternativa para la eliminación de contaminantes del agua. Las MOFs son partículas cristalinas porosas están compuestas de un centro metálico y ligantes orgánicos capaces de ofrecer procesos viables alternativos a la separación en el tratamiento del agua, debido a la respuesta a la luz produce efecto de degradación fotocatalítica, mejorando la eficiencia de las membranas, además, debido a la presencia de grupos químicos COOH, OH y un centro metálico de la estructura de los MOF proporcionan mejor selectividad, permeabilidad y rendimiento antiincrustante.

En este trabajo se plantea la síntesis de MOFs a base de Zn con ligantes como el ácido tereftálico (BDC) y con grupos funcionales amina (BDC-NH<sub>2</sub>) para estudiar el efecto de las propiedades fisicoquímicas y estructurales sobre la eliminación de contaminantes como el 2,4-D. Así también, preparar membranas compuestas por el método de inversión de fase para la evaluación del desempeño en la eliminación de contaminantes del agua.



# UNIVERSIDAD MODELO

## Objetivos:

### General:

Desarrollar un sistema de membranas compuestas a base de PPSU y estructuras organometálicas a base de zinc con potencial aplicación en la eliminación de contaminantes del agua como el 2,4-D.

### Específicos:

- I. Establecer las condiciones de síntesis de Zn-MOFs mediante el método solvotérmico.
- II. Realizar la caracterización fisicoquímica de los Zn-MOFs por las técnicas (XRD, FTIR y SEM) y validar la acción foto catalítica de las Zn-MOFs sobre la eliminación de azul de metileno y 2,4-D.
- III. Elaborar membranas compuestas asimétricas por el método de inversión de fase a base de PPSU como matriz y partículas Zn-MOFs.
- IV. Realizar caracterización morfológica de las membranas (SEM).
- V. Validar el desempeño de las membranas PPSU y PPSU/Zn-MOFs sobre las propiedades de flujo y eliminación de contaminantes.

## Parte experimental

Para poder realizar la parte experimental es necesario conocer sobre los procesos de síntesis de los MOFs y consecuente a esto evaluar mediante caracterización fisicoquímica, morfológica y propiedades de permeabilidad y separación para así conocer el desempeño de las membranas obtenidas.

### 1. Síntesis de MOFs por procesos tradicionales

Establecer las condiciones de síntesis de Zn-MOFs por un proceso solvotérmico.



# UNIVERSIDAD MODELO

Para la síntesis de las MOFs de ácido tereftálico, se necesita primero preparar dos soluciones, una conteniendo el núcleo metálico de la MOF, el cual en este caso es el Nitrato de Zinc Hexahidratado, y la otra conteniendo el ligante orgánico, siendo este el ácido tereftálico. La proporción entre el núcleo metálico y el ligante orgánico es de 1:1 mmol. Las dos soluciones también están compuestas de un solvente constituido por 12.5 ml de Dimetilformamida y 7.5 ml de etanol, los cuales suma un total de 20 ml por cada solución. Al estar usando un matraz de balón en esta metodología, la capacidad de producto y solvente se incrementa, por lo que se pueden hacer hasta 3 veces la cantidad de producto de manera simultánea, por lo que las soluciones incrementan a 37.5 ml de Dimetilformamida y 22.5 ml de etanol, los cuales suman un total de 60 ml por cada solución.

- Sol. 1: 498.3 mg de ácido Tereftálico, 37.5 ml de Dimetilformamida y 22.5 ml de etanol.
- Sol. 2: 892.5 mg de Nitrato de Zinc Hexahidratado, 37.5 ml de Dimetilformamida y 22.5 ml de etanol.

Las soluciones se dejan agitar por al menos 40 minutos para asegurar la completa disolución de los compuestos en el solvente y se añaden por método de goteo usando un embudo de adición, vertiendo la solución que contiene el centro metálico hacia la solución que contiene el ligante orgánico, este proceso se debe realizar a goteo lento durando un total de 50 minutos. Las soluciones se vierten dentro de un matraz de balón y se dejan agitar usando una placa de agitación durante 24 horas.

Pasadas las 24 horas de agitación, se lleva la mezcla a un sistema de reflujo para lograr que la solución se encuentre a unos 125 °C mientras está en agitación. La mezcla se deja calentar y agitar unas 48 horas seguidas, esto para que la mayor cantidad de MOF se pueda formar.

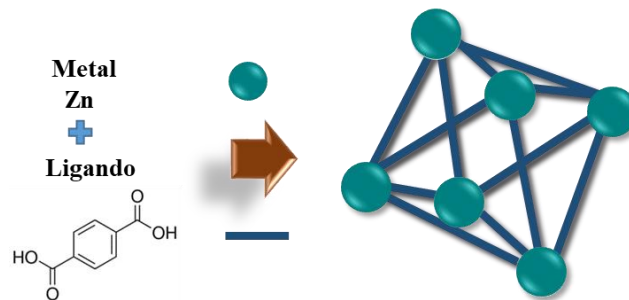
Pasadas las 48 horas de calentamiento y agitación, se retira el solvente del matraz y se extrae el producto hacia tubos de ensayo con la ayuda de etanol, cuidando y procurando de que no se llenen a más de  $\frac{3}{4}$  de su capacidad total, estos tubos de ensayo luego se llevan a una centrifugadora, en donde se dejan centrifugar a 4000 rpm por 5 minutos para posteriormente sacarlos, quitar el etanol y



# UNIVERSIDAD MODELO

volverlos a lavar con este y repetir el proceso. Esto se hace al menos 2 veces. Posteriormente se deja reposar por al menos 1 día.

Por último, se introduce el producto a una estufa, en donde se pone la configuración para que alcance los 90 °C. Una vez se verifica que la temperatura esta estable, se deja secar durante 24 horas. Una vez terminadas las 24 horas, se extrae el producto del tubo de ensayo y se almacena.



La metodología para la síntesis de las MOFs de ácido aminotereftálico fue diseñada con base en la metodología de la síntesis de las MOFs de ácido tereftálico, con algunas diferencias significativas. Se necesita primero preparar dos soluciones, una conteniendo el núcleo metálico de la MOF, el cual en este caso es el Nitrato de Zinc Hexahidratado, y la otra conteniendo el ligante orgánico, siendo este el ácido aminotereftálico. La proporción entre el núcleo metálico y el ligante orgánico es de 2:1 mmol. Las dos soluciones también están compuestas de un solvente constituido por 7.5 ml de Dimetilformamida y 12.5 ml de etanol, los cuales suman un total de 20 ml por cada solución. Al estar usando un matraz de balón en esta metodología, la capacidad de producto y solvente se incrementa, por lo que se pueden hacer hasta 3 veces la cantidad de producto de manera simultánea, por lo que las soluciones incrementan a 22.5 ml de Dimetilformamida y 37.5 ml de etanol, los cuales suman un total de 60 ml por cada solución.



# UNIVERSIDAD MODELO

- Sol. 1: 543 mg de ácido Tereftálico, 12.5 ml de Dimetilformamida y 7.5 ml de etanol.
- Sol. 2: 1785 mg de Nitrato de Zinc Hexahidratado, 12.5 ml de Dimetilformamida y 7.5 ml de etanol.

Las soluciones se dejan agitar por al menos 40 minutos para asegurar la completa disolución de los compuestos en el solvente y se añaden por método de goteo usando un embudo de adición, vertiendo la solución que contiene el centro metálico hacia la solución que contiene el ligante orgánico, este proceso se debe realizar a goteo lento durando un total de 50 minutos. Las soluciones se vierten dentro de un matraz de balón y se dejan agitar usando una placa de agitación durante 24 horas.

Pasadas las 24 horas de agitación, se lleva la mezcla a un sistema de reflujo para lograr que la solución se encuentre a unos 125 °C mientras está en agitación. La mezcla se deja calentar y agitar unas 48 horas seguidas, esto para que la mayor cantidad de MOF se pueda formar.

Pasadas las 48 horas de calentamiento y agitación, se retira el solvente del matraz y se extrae el producto hacia tubos de ensayo con la ayuda de etanol, cuidando y procurando de que no se llenen a más de  $\frac{3}{4}$  de su capacidad total, estos tubos de ensayo luego se llevan a una centrifugadora, en donde se dejan centrifugar a 4000 rpm por 5 minutos para posteriormente sacarlos, quitar el etanol y volverlos a lavar con este y repetir el proceso. Esto se hace al menos 2 veces. Posteriormente se deja reposar por al menos 1 día.

Por último, se introduce el producto a una estufa, en donde se pone la configuración para que alcance los 90 °C. Una vez se verifica que la temperatura esta estable, se deja



# UNIVERSIDAD MODELO

secar durante 24 horas. Una vez terminadas las 24 horas, se extrae el producto del tubo de ensayo y se almacena.

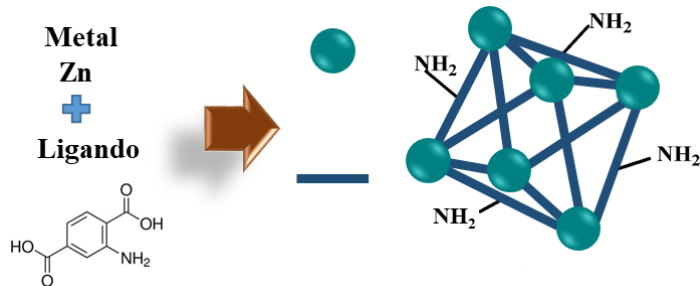


Figura X. Síntesis de MOF con ligante BDC-NH<sub>2</sub>.

## 2. Caracterización de las MOFs

Las partículas obtenidas serán caracterizadas por métodos fisicoquímicos como FTIR, XRD y SEM.

**Análisis Infrarrojo (FTIR):** Se utiliza un espectrómetro para realizar el análisis infrarrojo por transformada de Fourier. Las muestras se analizarán utilizando pastillas KBr, con un rango de número de ondas de 4000 a 650 cm<sup>-1</sup> y resolución de 4 cm<sup>-1</sup>.

**Caracterización por difracción de rayos X (DRX):** se utiliza un DRX para tratar de elucidar la estructura cristalina de las partículas obtenidas. Los difractogramas de las partículas se obtendrán utilizando un difractómetro Bruker D-8 advance con las siguientes condiciones: tiempo de paso de 0.5 s, tamaño de paso de 0.020, con una fuente de radiación de CuK $\alpha$  (L: 1.542 Å a 40 Kv y 30 mA).

**La microscopía electrónica de barrido (SEM):** se fundamenta en la emisión de un barrido de haz de electrones sobre la muestra, los cuales interactúan con la misma produciendo diferentes tipos de señales que son recogidas por detectores. Finalmente, la información obtenida en los detectores es transformada para dar lugar a una imagen de alta definición, con una resolución de 0,4 a 20 nanómetros. Por lo anterior, es posible obtener una



# UNIVERSIDAD MODELO

imagen de alta resolución de la topografía de la superficie de la muestra. Así, es posible determinar la morfología de las partículas MOFs.

### 3. Preparación de membranas poliméricas y compuestas por inversión de fase

#### Preparación de membranas poliméricas

Las membranas poliméricas serán preparadas a base de polifenilsulfona (PPSU), con proporciones específicas del solvente NMP, el mismo polímero y el generador de poro Polietileno Glicol:

- 4.545 ml de NMP
- 0.4361 g de Polietileno Glicol
- 1.1214 g de Polifenilsulfona

Una vez teniendo las soluciones poliméricas, se agitan durante 24 horas, para luego ser colocadas en un panel de vidrio y, con la ayuda de un rizador a 230  $\mu\text{m}$ , esparcir la solución por todo el panel de vidrio. Por ultimo se coloca el panel en un baño compuesto de ácido acético para realizar la inversión de fase, se deja durante 20 minutos, se retira la membrana y se almacena.

#### Preparación de membranas compuestas a base de PPSU/Zn-MOFs

Las membranas poliméricas serán preparadas a base de polifenilsulfona (PPSU) y se les incorporara las MOF en porcentajes de 3% y 1%, con proporciones específicas del solvente NMP, la emulsión TWEEN, la MOF sintetizada, el mismo polímero y el generador de poro Polietileno Glicol:

- 4.545 ml de NMP
- 0.4361 g de Polietileno Glicol
- 0.82236 g de Polifenilsulfona MOF 3% -> 0.94696 g MOF 1%
- 105.7  $\mu\text{l}$  de TWEEN



# UNIVERSIDAD MODELO

- 0.1869 g de MOF 3% -> 0.0623 g MOF 1%

Una vez teniendo las soluciones poliméricas, se agitan durante 24 horas, para luego ser colocadas en un panel de vidrio y, con la ayuda de un rizador a 230  $\mu\text{m}$ , esparcir la solución por todo el panel de vidrio. Por último se coloca el panel en un baño compuesto de ácido acético para realizar la inversión de fase.

#### 4. Caracterización de las membranas poliméricas y compuestas

Para determinar el desempeño de las membranas obtenidas, estas serán caracterizadas mediante SEM, pruebas de permeabilidad y de eliminación de colorantes.

SEM: Las membranas obtenidas serán caracterizadas por SEM para conocer su morfología, la distribución de las porosidades, tipo de porosidad y distribución de las partículas MOFs.

Pruebas de permeabilidad: Se realizarán pruebas de permeabilidad de las membranas polimérica y compuestas, donde se variarán los tiempos de permeado por 1 ciclo de flujo, 3 de permeado con BSA y 1 de recuperación de la membrana, y se determinara la retención de BSA por UV.

Eliminación de contaminantes del agua utilizando las MOFs y las membranas preparadas: se realizarán pruebas de eliminación de contaminantes como el 2,4-D por fotocátalisis.

#### Resultados esperados

Comprobar si existe o no una mejora en las características de las membranas al incorporarles MOFs de Zn en su elaboración, para lo cual se analizarán los resultados obtenidos de las distintas caracterizaciones de este trabajo.

*Tabla x. Descripción de actividades planeadas para Tesis.*

Nº de actividad	Descripción
1	Revisión bibliográfica para conocer el método de obtención de MOFs y preparación de membranas



# UNIVERSIDAD MODELO

2	Síntesis de MOFs por procesos tradicionales
3	Caracterización de las MOFs
4	Preparación de membranas poliméricas y compuestas por inversión de fase
5	Caracterización de membranas poliméricas y compuestas
6	Validación de MOFs y membranas en la eliminación de 2,4-D
7	Escritura de tesis

## 1. Calendario de actividades

Las actividades descritas en la Tabla 1 se calendarizan en la Tabla 2. Este cronograma representa la guía para el desarrollo del proyecto.

Tabla x. Cronograma de actividades.

N° de actividad	2026						
	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
1							
2							
3							
4							
5							
6							

## Referencias Bibliográficas

1. Estado, E. L., Los, D. E., de Tierras, R., Aguas, Y., Para, D. M., Alimentación, L. A., & Agricultura, L. A. (2021). *Sistemas al límite*. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
2. S. De Agricultura Y Desarrollo Rural, “Principales exportaciones de México,” *gob.mx*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/principales-exportaciones-de-mexico>
3. N. G. R. V. Sandoval, “Prenatal herbicide exposure in children of urban women in Mexico,” *Progressing Aspects in Pediatrics and Neonatology*, vol. 4, no. 2, Apr. 2023, doi: 10.32474/papn.2023.04.000185.
4. Nacional Autónoma De México, U., Escolero, M., Marín, O. ;, Steinich, L. E. ;, Pacheco, B. ;, Molina-Maldonado, J. A. ;, Anzaldo, A. ;, Geochemistry, J. M., Escolero, O., Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J. A., Molina-Maldonado, A., & Anzaldo, J. M. (n.d.). Geofísica Internacional Geochemistry of the hydrogeological



# UNIVERSIDAD MODELO

- reserve of Mérida, Yucatán, Mexico. *Mexico Geofísica Internacional*, 44(3), 301–314. Retrieved <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56844308>
5. Polanco Rodríguez, Á., Cabrera, F. Á., León, J. A. A., & Vargas, I. O. (n.d.). *Perspectivas de la contaminación del acuífero en Yucatán, México: plaguicidas y metales pesados*.
  6. Diamante, N. A., Ribeiro, A. A., Tibúrcio, V. G., Roviada, A. F. da S., Mari, R. de B., Stabille, S. R., & Germano, R. D. M. (2015). INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DO ÁCIDO 2,4 DICLOROFENOXIACÉTICO SOBRE DIFERENTES POPULAÇÕES DE NEURÔNIOS MIOENTÉRICOS DO DUODENO DE RATOS. *Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia Da UNIPAR*, 17(2). <https://doi.org/10.25110/arqvet.v17i2.2014.4926>
  7. M. Moharramnejad et al., “Zinc-based metal-organic frameworks: synthesis and recent progress in biomedical application,” *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 32, no. 9, pp. 3339–3354, Jul. 2022, doi: 10.1007/s10904-022-02385-y.
  8. 5. G. Gnanasekaran, S. Balaguru, G. Arthanareeswaran, and D. B. Das, “Removal of hazardous material from wastewater by using metal organic framework (MOF) embedded polymeric membranes,” *Separation Science and Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 434–446, Sep. 2018, doi: 10.1080/01496395.2018.1508232.
  9. 6. M. Kadhom and B. Deng, “Metal-organic frameworks (MOFs) in water filtration membranes for desalination and other applications,” *Applied Materials Today*, vol. 11, pp. 219–230, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apmt.2018.02.008.
  - 10.7. M. López-R, Y. Barrios, L. D. Perez, C. Y. Soto, and C. Sierra, “Metal-Organic Framework (MOFs) tethered to cotton fibers display antimicrobial activity against relevant nosocomial bacteria,” *Inorganica Chimica Acta*, vol. 537, p. 120955, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ica.2022.120955.
  - 11.8. A. Elrasheedy, N. Nady, M. Bassyouni, and A. El-Shazly, “Metal Organic Framework based Polymer Mixed Matrix Membranes: Review on applications in water purification,” *Membranes*, vol. 9, no. 7, p. 88, Jul. 2019, doi: 10.3390/membranes9070088.
  - 12.