

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL  
PROCESO DE HEMODIÁLISIS.”

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

PRESENTA

INN. ESP. CYTA NADIA JOCELYN TALAMANTES  
MORALES

DIRIGIDO POR

DR. JOSÉ ALBERTO RODRÍGUEZ MORALES

QUERÉTARO, QRO. A JULIO 2023.



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Desarrollo e implementación de un sistema de  
tratamiento de aguas residuales del proceso de  
hemodiálisis.

**por**

Nadia Jocelyn Talamantes Morales

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** FQMAC-217638



## FACULTAD DE QUÍMICA

# “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE HEMODIÁLISIS.”

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

PRESENTA

INN. ESP. CYTA NADIA JOCELYN TALAMANTES  
MORALES

DIRIGIDO POR

DR. JOSÉ ALBERTO RODRÍGUEZ MORALES

### SINODALES

DR. JOSÉ ALBERTO RODRÍGUEZ MORALES \_\_\_\_\_

DIRECTOR

DRA. MINERVA GUERRA BALCÁZAR \_\_\_\_\_

SECRETARIO

DR. VÍCTOR PÉREZ MORENO \_\_\_\_\_

ASESOR

DR. MIGUEL ÁNGEL RICO RODRÍGUEZ. \_\_\_\_\_

ASESOR

DR. WALTER NOÉ VELÁZQUEZ ARJONA \_\_\_\_\_

ASESOR

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	2
ÍNDICE DE CUADROS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
DEDICATORIA .....	8
AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	11
II. ANTECEDENTES.....	13
2.1 Agua en nuestro entorno .....	13
2.2 Contaminación del agua .....	13
2.3 Agua residual.....	13
2.4 Aguas residuales hospitalarias .....	13
2.5 Centros de hemodiálisis .....	14
2.6 Hemodiálisis en México y el mundo .....	14
2.7 Hemodiálisis .....	14
2.8 Pre tratamiento .....	15
2.9 Post tratamiento.....	15
2.10 Plantas de tratamiento.....	15
2.10.2 Tratamiento biológico .....	16
2.10.1 Tratamiento lecho empacado .....	16
2.11 Nanofiltración.....	17
2.12 Membranas poliméricas.....	20

III. JUSTIFICACIÓN.....	23
IV. HIPÓTESIS .....	24
V. OBJETIVOS .....	25
5.1 Objetivo general.....	25
5.2 Objetivos específicos .....	25
VI. METODOLOGÍA.....	26
6.1 Muestreo y parámetros para determinar la calidad del agua. ....	26
6.2 Bioreactor .....	29
6.3 Sistema de filtración .....	31
6.4 Membrana polimérica .....	33
6.5 Material adsorbente .....	35
VII. RESULTADOS .....	37
7.1 Muestreo y parámetros para determinar la calidad del agua. ....	37
7.1.1 Parámetros físicos del agua problema. ....	38
7.1.2 Parámetros microbiológicos del agua problema.....	42
7.2 Bioreactor .....	42
7.3 Sistema de filtración .....	45
7.4 Membrana polimérica. ....	45
7.5 Material adsorbente. ....	46
7.5.1 Caracterización del óxido de grafeno por RAMAM.....	47
7.5.2 Caracterización del óxido de grafeno por Microscopio electrónico de barrido (SEM) y Espectroscopía de energía dispersa (EDS).....	49
7.5.3 Caracterización del óxido de grafeno por Microscopio electrónico de transmisión (TEM).....	50
VIII. DISCUSIÓN .....	52

VIII. CONCLUSIÓN .....	55
X. REFERENCIAS.....	56

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Membranas utilizadas para la remoción de contaminantes en el agua.	18
Cuadro 2. Parámetros físicos de la NOM-127-SEMARNAT-1994.....	26
Cuadro 3. Parámetros químicos de la NOM-003-SSA3-2010 para el proceso de hemodiálisis.....	27
Cuadro 4. Límites máximos permisibles de contaminantes, según la NOM-003-SEMARNAT-1997.....	27
Cuadro 5. Parámetros microbiológicos de la NOM-127-SEMARNAT-1994.....	28
Cuadro 6. Calidad del agua de hemodiálisis al entrar al tren de tratamiento y al terminar el proceso.....	38
Cuadro 7. Parámetros permisibles químicos empleados para hemodiálisis y resultados del agua tratada por el reactor biológico, el sistema de filtración convencional y la membrana polimérica con óxido de grafeno.....	40
Cuadro 8. Resultados de los análisis microbiológicos.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Montaje de biorreactor.....	29
Figura 2. Vista superior del empaque con las botellas PET.....	30
Figura 3. Planta de tratamiento de aguas del Campus Aeropuerto UAQ, fuente de los lodos activados para nuestro ensayo. ....	31
Figura 4. Sistema de filtración convencional.....	32
Figura 5. Filtros empacados, 2 filtros de carbón activado y uno de zeolita y osmosis inversa localizada en la parte superior.....	33
Figura 6. Impresora 3D.....	34
Figura 7. Diseño de membrana por el programa solid works.....	35
Figura 8. Óxido de grafeno sintetizado por el método de hummers modificado...	36
Figura 9. Gráfica de las unidades de color arrojadas durante 60 días.....	39
Figura 10. Características físicas del agua durante el tratamiento propuesto. H=Hemodiálisis, RB=Reactor biológico, SF=Sistema de filtración MG= Membrana con óxido de Grafeno. ....	40
Figura 11. Biorreactor a los 10 días de alimentación con lodos y agua residual...	42
Figura 12. Reactor biológico a los 15 días y 90 días.....	43
Figura 13. Reactor biológico a los 180 días.....	44
Figura 14. Sistema de filtración operando con agua tratada del reactor biológico.	45
Figura 15. Membrana polimérica fabricada por Impresión 3D.....	46
Figura 16. Filtro empacado con la membrana y materiales adsorbentes.....	47
Figura 17. Espectro Raman de óxido de grafeno (GO) óxido de grafeno modificado (Vázquez, et al., 2020). ....	48
Figura 18. Espectro Raman de óxido de grafeno modificado sintetizado en laboratorio. ....	48
Figura 19. SEM del óxido de grafeno a 50 $\mu$ m.....	49
Figura 20. Análisis TEM del óxido de grafeno. ....	51

## DEDICATORIA

Mi tesis la dedico a una persona muy especial en mi vida, quién ha estado conmigo desde la Licenciatura, apoyándome en todo momento, empezó siendo mi maestra y terminó como mi Directora de tesis. Para mí es un gran ejemplo a seguir, como persona, maestra, investigadora y tutora, su nombre es Minerva Guerra Balcázar. Desde la licenciatura he tenido una inclinación notoria por el cuidado del medio ambiente y una vez que salí de la especialidad la Dra. me ofreció seguir mis estudios pero haciendo un aporte a la sociedad, dirigido al sector salud, especialmente a las personas con insuficiencia renal.

También dirijo mi tesis a mi familia, por siempre estar impulsándome y apoyándome en cualquier situación.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Minerva por apoyarme en los congresos donde llevamos el proyecto y por facilitarnos el contacto para recolectar el agua de hemodiálisis en la policlínica Nexus.

Agradezco a mi director de tesis por recibirme como su estudiante y por todo el tiempo que me estuvo asesorando.

Y por último agradezco a CONACYT por brindarme el soporte económico para culminar mi maestría.

## RESUMEN

El agua es un recurso indispensable en nuestras actividades cotidianas, por lo que, se busca constantemente la recuperación y reutilización de éste, mediante el tratamiento del agua a nivel doméstico, industrial y hospitalario. Cada empresa tiene como obligación llevar a cabo un correcto manejo de sus residuos, antes de ser vertidos en el drenaje, por ejemplo, en el caso de los hospitales, no sólo se debe remediar el agua; sino también encontrar una alternativa al gasto excesivo de agua que se maneja en algunas áreas, como hemodiálisis. Éste es un tratamiento costoso que les permite a los pacientes con insuficiencia renal limpiar su organismo de toxinas por medio de una máquina de hemodiálisis, realizando dos sesiones de cuatro horas por semana, utilizando aproximadamente 300 L de agua potable la cuál desemboca directamente al drenaje. Para la elaboración de este proyecto, se utilizó agua, obtenida de un centro de hemodiálisis en Querétaro, con las siguientes concentraciones, 16 mg/L de magnesio, 135 mg/L de potasio y 3,283 mg/L de sodio, donde por medio de un reactor anaerobio se eliminó la materia orgánica. Posteriormente, se llevó a un proceso de filtrado de tres pasos, siendo éstos zeolita y dos de carbón activado. Finalmente, fue acoplado a un filtro elaborado por impresión 3D con ácido poliláctico (PLA) y óxido de grafeno, previamente sintetizado por el método de Hummers. El tren de tratamiento fue capaz de reducir 7 de los 11 parámetros permisibles de la NOM-003-SSA3-2010, entre los que destacan, calcio con 1.2 mg/L, potasio con 3 mg/L, sodio 55 mg/L.

Palabras clave: hemodiálisis, tratamiento de aguas, membrana polimérica, óxido de grafeno.

## ABSTRACT

Water is an essential resource in our daily activities, therefore, its recovery and reuse are constantly sought through water treatment at the domestic, industrial and hospital levels. Each company has the obligation to carry out proper waste management, before being discharged into the drain, for example, in the case of hospitals, not only should the water be remedied; but you will also find an alternative to the excessive consumption of water that is managed in some areas, such as hemodialysis. This is an expensive treatment that allows patients with kidney failure to clean their body of toxins by means of a hemodialysis machine, performing two four-hour sessions of four hours per week, using approximately 300 L of drinking water which flows directly to the drain. For the elaboration of this project, water was extracted, it was obtained from a hemodialysis center in Querétaro; where by means of a biological reactor the organic matter was eliminated. Subsequently, a three-step filtering process was carried out, these being zeolite and two activated carbon. Finally, it was coupled to a filter packed with adsorbent materials and the membrane made by 3D printing with polylactic acid (PLA) and using graphene, previously synthesized by the Hummers method, as adsorbent material. The treatment train was able to reduce 7 of the 11 permissible parameters of NOM-003-SSA3-2010, for its reuse.

Keywords: hemodialysis, water treatment, polymeric membrane, graphene.

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios contenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reportó detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.



## I. INTRODUCCIÓN

La hemodiálisis es un proceso que reemplaza las actividades fisiológicas en pacientes con insuficiencia renal, ayudando a limpiar la sangre de toxinas, sales, urea, creatinina, iones, altas concentraciones de potasio, sales orgánicas, entre otros (Mollahosseini et al., 2020).

En México se desconoce el número exacto de personas que presentan algún tipo de enfermedad renal, debido a que no existe un registro nacional del mismo sin embargo se tiene un estimado de 7.5 millones de personas, de las cuales por el sistema de salud en nuestro país, se han logrado tratar únicamente la mitad del total de personas.

Cada paciente de hemodiálisis semanalmente necesita tres sesiones de cuatro horas en promedio. Es sabido que para cada sesión se utilizan aproximadamente 300 L de agua potable entre el tratamiento previo, generación del dializante, proceso de hemodiálisis, limpieza del equipo, mezclados con dos litros de desechos del paciente.

El agua potable utilizada para el proceso de hemodiálisis debe pasar por pre tratamiento, siendo éste, uno de los pasos más importantes, debido a que el uso de agua no biocompatible es considerada como la segunda causa de muerte en pacientes con enfermedad renal crónica (Murtas et al., 2020; Souza et al., 2019).

El agua residual de cada sesión de hemodiálisis es descargada de forma directa en el drenaje, eliminando la posibilidad de reúso. La contaminación del agua tiene un impacto en el medio ambiente y en la salud del ser humano (McClaran et al., 2020).

Por lo que es un tema de interés para la generación de nuevas tecnologías de remoción de contaminantes (Etale et al., 2020; Glick et al., 2019; Ismail et al., 2020; Khanzada et al., 2020; Riaz, 2020).

Una máquina de hemodiálisis tiene un gasto aproximado de 300 L de agua durante cada sesión, teniendo un total de 900 L de agua por paciente, debido a que necesitan al menos 3 sesiones por semana. En Querétaro el centro de hemodiálisis Nexus atiende cerca de 150 pacientes a la semana, resultando 135,000 L de agua,

los cuales se destinan de forma directa al alcantarillado, sin un tratamiento y mucho menos un reúso.

Este proyecto propone, el desarrollo de una planta de tratamiento, utilizando agua real de un centro de hemodiálisis, mediante un reactor biológico, un sistema de filtración acoplado a una membrana de PLA por medio de impresión 3D con óxido de grafeno, finalizando con la parte de desinfección. Para finalmente comparar los parámetros iniciales con la NOM-003-SSA3-2010 del proceso de hemodiálisis.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Agua en nuestro entorno

El agua es uno de los compuestos de mayor importancia en la naturaleza, tanto para los seres vivos, como para el medio ambiente. Nuestro planeta está compuesto en su mayoría por agua, manteniéndose por años, por el ciclo del agua. Además de ser uno de los recursos que se usan a diario en casas, granjas, industrias y escuelas. El agua es considerada al realizar diferentes tareas para la economía como agricultura, ganadería, textiles, construcciones, por ser el disolvente universal.

### 2.2 Contaminación del agua

El uso y consumo del agua en nuestra vida diaria, se vuelve prácticamente necesario e indispensable, por lo que se podría recomendar el aprovechamiento del agua o al menos un tratamiento previo a su descarga, para poder aportar al medio ambiente y así disminuir la contaminación del agua.

### 2.3 Agua residual

El agua es considerada residual debido a sus características físicas, químicas y biológicas. La descarga de aguas residuales en los diferentes ámbitos de la vida cotidiana ha llevado a la necesidad de su tratamiento para su reutilización. Para el tratamiento y reúso de las mismas, es necesario eliminar sólidos suspendidos, patógenos, minerales, metales pesados, etc (Olmos et al., 2003).

### 2.4 Aguas residuales hospitalarias

Otra de las razones por las cuales se han implementado plantas de tratamiento, ha sido por el uso de antibióticos, por una parte, está regulado el destino final del medicamento caduco. Pero no es la única forma de desecho de éste, sino que los humanos tan solo absorbemos hasta un 30% de los antibióticos. Lo que provoca la acumulación de antibióticos en las plantas de tratamiento, donde existen numerosas cantidades de bacterias, las cuales se pueden hacer resistentes a dichos

antibióticos. Cabe destacar que podría ser evitado, sin embargo muchos hospitales no tratan las aguas residuales o lo hacen de forma inadecuada (Vo et al., 2019).

## 2.5 Centros de hemodiálisis

En algunos hospitales y centros de salud, también se tienen cuartos de hemodiálisis, para tratar a los pacientes con insuficiencia renal. Si bien, se aborda el tema de aguas residuales, la práctica de hemodiálisis es uno de los procesos que más agua utiliza y se descarga directamente al drenaje.

## 2.6 Hemodiálisis en México y el mundo

En el 2010 el número de pacientes de hemodiálisis rondaba entre los 4,000 y 10,000 millones a nivel mundial, lo cual seguirá aumentando cada década (Dou, 2020). En México es una de las principales causas de muerte, debido a la detección tardía, pocos centros debido a los altos costos de inversión. Hasta la fecha no se lleva un registro exacto de los paciente con insuficiencia renal, sin embargo se estiman un total de 377 pacientes por millón de habitantes(Méndez-Durán, 2010). Cerca del 80% de los pacientes, son atendidos por instituciones como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), teniendo un crecimiento del 11% anualmente, la hemodiálisis es de gran demanda, también es sabido que, de cada 10 pacientes, dos reciben hemodiálisis y las restantes diálisis peritoneal. En el 2011 se registraron 312 unidades de hemodiálisis en México (Tirado-Gómez et al., 2012).

## 2.7 Hemodiálisis

La hemodiálisis es un proceso realizado en pacientes con insuficiencia renal, es decir, cuando el riñón no es capaz de llevar a cabo su función purificando la sangre y el cuerpo de toxinas. Las máquinas de hemodiálisis también son llamadas, riñón artificial. Para llevar a cabo el proceso es indispensable purificar el agua antes de entrar a la máquina, para simular las concentraciones de sangre, se utiliza un

dializante, el cuál entrará en el cuerpo y durante 4 horas nos ayudará a recircular la sangre para lograr la purificación de la sangre, para finalizar con la eliminación de los desechos del paciente, siendo dos litros por día (Matthew et al., 2001).

## 2.8 Pre tratamiento

La segunda causa de muerte en pacientes de hemodiálisis es por uso de agua contaminada con microorganismos, debido a que el tratamiento del agua no fue el adecuado. Si bien, es saludable el consumo de agua potable para los seres humanos, el uso de agua potable directamente en pacientes con hemodiálisis podría ser mortal, es por ello que está reglamentado el tratamiento previo, además del equipo por la NOM-197-SSA1-2000, para tener logar la biocompatibilidad del agua que entra a la máquina de hemodiálisis (Souza et al., 2019).

## 2.9 Post tratamiento

Cada sesión de hemodiálisis ocupa al menos 300 L de agua por paciente y si tomamos en cuenta que en cada centro de hemodiálisis, se trabajan las máquinas 12 horas al día, por 6 días a la semana, nos podemos dar una idea de la cantidad excesiva de agua que es utilizada durante el proceso. Por lo que debería ser regulado el tratamiento final para su reúso en lugar de ser descargado al drenaje, de esta forma cuidaríamos el medio ambiente y reducirían costos. En el 2008 Tarrass y colaboradores realizaron un estudio donde compararon el agua estándar para el uso de agricultura contra el agua residual del proceso de hemodiálisis, teniendo como resultado que el agua salía con niveles altos de conductividad, nitrógeno, sulfatos, bacterias, fósforo y cloro principalmente (Tarrass, 2008).

## 2.10 Plantas de tratamiento

El tratamiento de aguas residuales ha surgido a lo largo de los años para la reducción de costos e impacto ambiental en industrias, casas, granjas, etc., evitando la descarga directa y contaminación de cuerpos de agua (Najafpoor et al., 2020).

Todo tratamiento debe ser direccionado, observando el agua problema y el tipo de contaminantes que ésta contiene y solucionando con un tratamiento específico, ya que no sería lo mismo tratar el agua residual de un hospital, que de una industria de textiles. Por lo que cada tratamiento, tiene tecnologías específicas como lo sería una sedimentación, filtración ozonificación, radiación UV, etc., según sea la necesidad. Por ejemplo, en el caso específico de los hospitales toda la parte de desinfección que incluiría una ozonificación, cloración, radiación UV, sería indispensable para evitar la propagación de virus y bacterias (Wang et al., 2020).

#### 2.10.2 Tratamiento biológico

Existen varias formas para tratar el agua residual una de ellas es por humedales artificiales que con el paso del agua, los contaminantes se van adhiriendo a las plantas y los filtros de grava, siendo éste un método efectivo comprobado en China para la eliminación de materia orgánica con una retención hidráulica de 3 días (Shibao, Liang, & Xiao, 2015). Para la eliminación de materia orgánica en aguas residuales principalmente domésticas, se utilizan tecnologías biológicas por medio de reactores con lodos activados, en Venezuela se utilizó incluso para eliminar microorganismos patógenos y algunos nutrientes (Cárdenas, et al., 2012). Sin embargo, actualmente los estudios se han inclinado por un nuevo método utilizando lodos granulares aerobios el cuál nos permite separar de forma efectiva el agua de los contaminantes y así evitar el uso excesivo de lodos activados, éste fue probado en la India (Yarlagadda & Manjunath, 2019)

#### 2.10.1 Tratamiento lecho empacado

Además de este tipo de reactor también tenemos los biorreactores de lecho empacado, que en ocasiones se utilizan con microorganismos o enzimas inmovilizadas y siendo así, es importante cuidar la temperatura y el pH para la permanencia de estos, en Colombia realizaron un biorreactor de lecho empacado con el hongo (Zapata & Mario Arias Zabala, 2003). En el 2021 Alférez y

colaboradores se enfocaron en la adsorción de fluoruros, haciendo pasar una solución de 30 mg/L en un lecho empacado, obteniendo el mayor rendimiento en los primeros minutos (García Alférez & Tovar Gómez, 2021). En Colombia utilizaron un reactor de lecho empacado para la remediación de las vinazas, las cuales son un residuo orgánico producido por proceso de fermentación de la caña de azúcar, éstas salen con una coloración intensa, un pH ácido, sales, materia orgánica, entre otros agentes. Con ayuda de un hongo, consiguieron remover el 84% del color y determinaron que la mejor actividad se dio durante los primeros 7 días (Tapie, Prato Garcia, & Sánchez Guerrero, 2016).

## 2.11 Nanofiltración

La nanofiltración por su parte nos permite la eliminación de pequeñas partículas orgánicas, es más económica que el uso de osmosis inversa, al tener menor consumo energético (Mendret et al., 2019).

En Canadá se realizaron estudios sobre los avances que se han tenido en las membranas utilizadas para la hemodiálisis, si bien no son membranas para remediación de aguas residuales, éstas se utilizan para la eliminación de desechos o residuos metabólicos en los pacientes con insuficiencia renal. La nanofiltración con grafeno ha sido una de las membranas más usadas en la actualidad, debido a la facilidad del grafeno para ser funcionalizado con nanopartículas (NPS) de plata (Ag) para añadir la función antibacterial o con nanotubos de carbono (NTC) (Mollahosseini et al., 2020).

De igual manera en Brasil se dieron a la tarea de realizar una remoción rápida de bacterias, específicamente de *Candida parapsilosis* presente en el dializante de la hemodiálisis, siendo ésta la segunda causa de muerte en pacientes con insuficiencia renal. Para llevar a cabo el proceso utilizaron luz ultravioleta y visible en electrodos nanoporosos de  $W/WO_3$ , siendo una buena opción al inactivar al microorganismo (Souza et al., 2019).

En China y Malasia nos hablan de la importancia que existe para la remediación del agua contaminada, ya que no sólo afecta al ambiente sino también a la salud de las

personas. Es por ello que se han llevado a cabo nuevas tecnologías para la fabricación de membranas hidrofílicas de nanofibras electrohiladas para el tratamiento de aguas residuales en la remoción de aceites que afectan al agua potable, subterránea y marina (Cui et al., 2020; Ismail et al., 2020).

En España se considera de gran impacto ambiental el deshecho de fármacos aún en bajas concentraciones. Esta investigación se enfoca en la remoción de fármacos tales como amoxicilina, penicilina, entre otros, de aguas residuales municipales utilizando nanofiltración para su reúso (Egea-Corbacho et al. 2019).

Investigaciones elaboradas tanto en China como en la India, mencionan la importancia de la remoción de sales del agua proveniente de empresas textiles, debido a que las sales impiden la degradación de contaminantes orgánicos, por lo que han utilizado la nanofiltración como opción de remediación (Kang et al., 2020; Li et al., 2020; M. Pal et al., 2020; P. Pal et al., 2019; Zhong et al., 2020).

En Francia se realizó un análisis del uso de nanofiltración mezclada con ozonificación, comparando con el uso de osmosis inversa (RO) para la remediación de contaminantes orgánicos en aguas residuales urbanas. Se menciona el bajo consumo energético, bajas presiones, menor cantidad de aditivos químicos, como algunas ventajas sobre el RO (Mendret et al., 2019).

En Corea se ha investigado el uso de membranas fotocatalíticas basadas en  $TiO_2$ , debido a su bajo costo, alta estabilidad química y térmica, así como su baja toxicidad para la remediación de aguas residuales con contaminantes orgánicos e inorgánicos (Riaz & Park, 2020).

En el Cuadro 1 se resumen algunos tratamientos implementados para remediar aguas residuales con distintos contaminantes en el mundo.

Cuadro 1. Membranas utilizadas para la remoción de contaminantes en el agua.

País	Contaminante en agua	Tratamiento	Referencia
------	----------------------	-------------	------------

China, Malasia	Aceite comestible	Membranas de nanofibraselectrohiladas , membrana polimérica	Cui et al., 2020; Ismail et al., 2020
España , Taiwán	Fármaco (amoxicilina, penicilina)	Nanofiltración y ozonificación	(Egea- Corbacho et al., 2019)(Vo et al., 2019)
China, India	Sales en industria de textiles	Osmosis nanofiltración	(Kang et al., 2020; Li et al., 2019; M. Pal et al., 2020; P. Pal et al., 2019)
Canadá	Residuos metabólicos y <i>Candida parapsilosis</i>	Nanofiltración con grafeno y NPS Ag, UV y electrodos nanoporosos de W/WO <sub>3</sub>	(Mollahossein i et al., 2020; Souza et al., 2019)
China	Químicos	Membrana óxido de grafeno, nanofiltración.	(Zhong et al., 2020)

Francia	Orgánicos	Nanofiltración y ozonificación	(Mendret et al., 2019)
Corea	Orgánicos e inorgánicos	Membranas fotocatalíticas con TiO <sub>2</sub>	(Riaz & Park, 2020)

Para lograr el correcto tratamiento, es necesario contar con un soporte para que las partículas estén adheridas y de esta manera cumplan su función, de lo contrario al estar hablando de micro y nano partículas, sería complicado lograr que no se pierdan con el flujo del agua. Otra de las tecnologías más conocida es la osmosis inversa, tiene una alta asertividad, sin embargo, en un método costoso. Por otra parte, el uso de carbón activado para tratar el agua ha sido de los más utilizados desde las primeras plantas de tratamiento implementadas, pero aun así existen otras tecnologías.

## 2.12 Membranas poliméricas

Algunas membranas biocompatibles inicialmente fueron basadas en celulosa, actualmente se utilizan diversos materiales compuestos como el alcohol polivinílico (PVA), triacetato de celulosa (CTA), polimetilmetracrilamida (PMMA), poliacrilonitrilo (PAN), polisulfonados (PSF), polietersulfonados (PES), poliamidas (PA), entre otros (Mollahosseini et al., 2020).

Las membranas poliméricas son las más utilizadas debido a su alta eficiencia, bajo consumo de energía y además de su bajo impacto ambiental, por ejemplo para el tratamiento de aguas se han utilizado membranas basadas en PSF, polipropileno (PP), entre otras (Zhong et al., 2020).

En Noruega elaboraron biocompósitos a partir de micro cristales de celulosa soportados en una matriz polimérica de PLA, encontrando la degradación térmica como un punto a mejorar para ampliar el uso de dichos biocompósitos (Oksman et al., 2006).

La celulosa es un recurso natural utilizado para la industria del papel, éste puede ser transformado en nano celulosa al retener cadenas, además de ser un material comparable con los nanotubos de carbono en cuestión a sus propiedades. Algunos materiales utilizados en la actualidad serían los nanocristales de celulosa (CNC) y las nanofibras de celulosa (CNF).

En Australia se dieron a la tarea de fortalecer membranas compuestas de óxido de grafeno con CNF obtenido de la madera, al ser tratadas con plasma para que aumentara su permeabilidad al agua. Mientras que en Sudáfrica se utilizaron CNC desde un subproducto como el aserrín que se un desecho de la madera, aprovechar los recurso que tenemos aporta de forma ecológica y económica para el desarrollo de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales (Adeniyi et al., 2020; Mohammed et al., 2021).

#### 2.12.1 Ácido poliláctico (PLA)

Los biopolímeros para la fabricación de membranas, es lo que algunos investigadores están adaptando a sus estudios para disminuir el impacto ambiental. Uno de los biopolímeros más mencionados en la actualidad, es el ácido poliláctico (PLA), es un polímero no tóxico, por lo contrario es compostable, biocompatible, amigable con el ambiente, reciclable, además de ser obtenido de algunos recursos como maíz y arroz (DeStefano et al., 2020; Plavec et al., 2020).

El término biodegradable nos indica que el material se puede degradar naturalmente y no perdura en el ambiente por 500 años como los polímeros convencionales, su degradación depende de diversos factores como pH, temperatura, entre otros.

Algunos biopolímeros se degradan con el contacto o por el agua, el PLA por su parte no es soluble en agua lo que lo hace un material ideal para su uso, como en plantas de tratamiento (DeStefano et al., 2020).

Además de ser un material biodegradable, también es económicamente viable, debido a que su gasto energético es aproximadamente menor al 50% a la fabricación de polímeros obtenido a partir del petróleo.

En este proyecto propone la remediación del agua residual del proceso de hemodiálisis a partir de la implementación de un tren de tratamiento específico, que logrará la purificación del agua para que pueda ser reutilizada en el pretratamiento del proceso de hemodiálisis, de esta manera evitar el gasto excesivo de agua y su posible rehusos.

### III. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto está diseñado para generar una alternativa de reutilización del agua de los centros de hemodiálisis. Tomando en cuenta que la insuficiencia renal crónica es la onceava causa de muerte a nivel mundial y que para la sesión de cada paciente se necesitan 600 L de agua potable los cuales pasan por un pretratamiento, donde 300 L de agua son de rechazo y el restante entra a la máquina de hemodiálisis cumpliendo con la NOM-003-SSA3-2010 del proceso de hemodiálisis; sin embargo, el agua que resulta de cada sesión es desechada por el drenaje. Por lo que se considera indispensable, realizar un tren tratamiento que nos ayude a remediar el agua que contiene gran cantidad de materia orgánica mediante un reactor anaerobio y eliminar contaminantes como sales, metales, entre otros elementos por medio de un sistema de filtración acoplado a una membrana polimérica con óxido de grafeno para poder destinar el agua resultante como agua de uso siguiendo la NOM-003-SSA3-2010.

#### IV. HIPÓTESIS

La hemodiálisis es un tratamiento con un gran impacto ambiental, debido a los 300 L de agua potable utilizados por sesión, se considera viable el tratamiento del agua residual por medio de un tren de tratamiento acoplado a una membrana polimérica con óxido de grafeno para la remediación del agua del proceso de hemodiálisis hasta llegar a los parámetros de la NOM-003-SSA3-2010 (NOM-003- SEMARNAT) del proceso de hemodiálisis.

## V. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Desarrollar una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del proceso de hemodiálisis, mediante la implementación de un sistema de filtración acoplado a una membrana polimérica con óxido de grafeno.

### 5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la calidad microbiológica, además de los parámetros fisicoquímicos respecto a la NOM-003-SSA3-2010, presentes en aguas residuales del proceso de hemodiálisis, para establecer un tren de tratamiento.
- Elaborar la planta de tratamiento prototipo y acoplar al sistema de filtración, una membrana de PLA con óxido de grafeno, para llevar a cabo la comparación del agua tratada contra los parámetros de la NOM-003-SSA3-2010.

## VI. METODOLOGÍA

### 6.1 Muestreo y parámetros para determinar la calidad del agua.

Se recolectaron en dos ocasiones el agua problema correspondiente de junio del 2021 y en octubre del 2021, las cuáles fueron extraídas de una máquina de hemodiálisis elegida de forma aleatoria en el área de hemodiálisis de la Policlínica Nexus, la cual cuenta con 15 máquinas y la misma fue distribuida en 10 garrafas de 20 L para su almacenamiento a temperatura ambiente, en el laboratorio de aguas de la Universidad Autónoma de Querétaro en el Campus Aeropuerto.

#### 6.1.1 Parámetros físicos del agua problema.

Para la caracterización física del agua residual de hemodiálisis, se tomó como base lo establecido en la NOM-127-SEMARNAT-1994, como se muestra en el Cuadros 2 (SEMARNAT, 1994).

Cuadro 2. Parámetros físicos de la NOM-127-SEMARNAT-1994.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	LÍMITE PERMISIBLE
Color	> 20 Pt-Co
Olor	Agradable

Se midió el color por medio del equipo DR/890 Colorimeter de manera continua para detectar los cambios a partir del muestreo y durante el tratamiento del agua de hemodiálisis. A su vez se utilizó HI98191 para la medición del pH.

#### 6.1.2 Parámetros químicos del agua problema.

Por otra parte para los parámetro químicos se analizaron respecto a la NOM-003-SSA3-2010, para la práctica de hemodiálisis (Secretaría de Salud, 2010). Se analizaron 100 mL del agua residual del proceso de hemodiálisis en el Laboratorio de análisis químicos analíticos de la Facultad de Química en la Universidad Autónoma de Querétaro, mediante espectroscopia de emisión atómica electrotrémica.

Cuadro 3. Parámetros químicos de la NOM-003-SSA3-2010 para el proceso de hemodiálisis.

Concentraciones máximas en mg/L	
	FDA
Aluminio	0.01
Arsénico	0.005
Cadmio	0.001
Cromo total	0.014
Cobre	0.1
Plomo	0.005
Calcio	2
Magnesio	4
Potasio	8
Sodio	70
Cloro	0

La calidad del agua se analizará, comparando los parámetros establecidos por la SEMARNAT.

NOM-003-SEMARNAT-1997 “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”, como se muestra en el Cuadro 3 (SEMARNAT, 1997).

Cuadro 4. Límites máximos permisibles de contaminantes, según la NOM-003-SEMARNAT-1997.

CONTACTO DIRECTO CON PÚBLICO	CONTACTO INDIRECTO CON EL PÚBLICO
---------------------------------	--------------------------------------

Coliformes fecales (NMP/L)	240	1000
Huevos de Helminto (h/L)	<1	<5
Grasas y aceites (mg/L)	15	15
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	20	30
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	20	30

### 6.1.3 Parámetros microbiológicos del agua problema.

Para la caracterización microbiológica del agua residual de hemodiálisis, se tomó como base lo establecido en la NOM-127-SEMARNAT-1994, como se muestra en el Cuadros 5 (SEMARNAT, 1994).

Cuadro 5. Parámetros microbiológicos de la NOM-127-SEMARNAT-1994.

CARACTERISTICAS MICROBIOLÓGICAS	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 mL 2 UFC/100 mL

---

	No detectable
Organismos coliformes fecales	NMP/100 mL
	Cero UFC/100 mL

---

Los análisis realizados fueron con un grado de sensibilidad mayor al que se establece en la NOM-003-SSA-2010. Se realizaron los análisis microbiológicos preparando medios de cultivo y agar para posteriormente sembrar la muestra del agua residual.

Se prepararon 500 mL de caldo lactosado para la obtención de 40 tubos con 10 mL cada uno a doble concentración, además de 150 mL Caldo Bilis Verde Brillante (CLBVB) para obtener 40 tubos con 3 mL y 150 mL de para la detección de *E. Coli* en 40 tubos con 3 mL del caldo (EC-MUG), todo el material se llevó al autoclave por 20 min a 120 °C. Se dejaron por 24 horas a 35 °C (Fernández-santisteban, 2017).

## 6.2 Bioreactor

Para el montaje se utilizó un reactor prototipo con una capacidad de 100 L, con dos bombas y dos llaves de salida por la parte inferior para la obtención del líquido de purga como se muestra en la Figura 1.

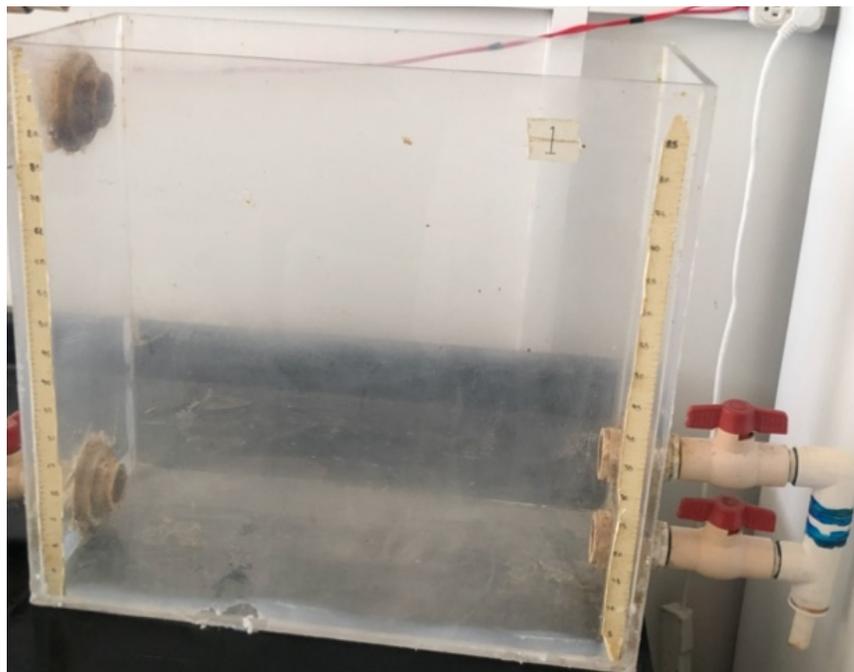


Figura 1. Montaje de biorreactor

Continuando con el montaje se obtuvieron 90 botellas de plástico polietileno tereftalato (PET) de Altamare una empresa que se dedica al reciclaje de residuos. Se eligieron 45 botellas de 1.5 L y 45 botellas de 500 mL similares para facilitar el montaje. Las mismas se utilizaron como soporte para la fijación de la biomasa y así aumentar la superficie de contacto.

Para la obtención de la superficie de contacto se usaron las fórmulas 1 y 2 para determinar el área total de contacto (Purcell et al., 2007).

Fórmula del cilindro

$$A_c = b \times h = (2\pi r) \times (h) \quad (1)$$

Fórmula del cono truncado

$$A_{Total} = \pi \left( \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \right) (R + r) + R^2 + r^2 \quad (2)$$

Para la preparación de las botellas se les retiró la tapa, se lavó cada botella, se cortó la parte inferior y se perforaron con ayuda de un cautín. Una vez listas, se insertaron las botellas de 500 mL dentro de las botellas de 1.5 L y se acomodaron dentro del reactor de forma concéntrica, hasta llenarlo como se muestra en la Figura 2.

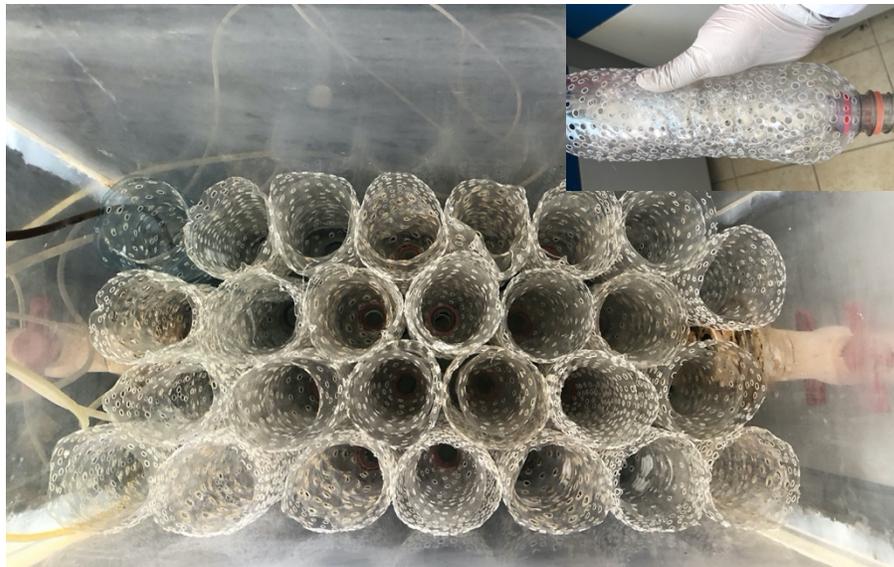


Figura 2. Vista superior del empaque con las botellas PET.

Al tener el reactor establecido, fue inoculado con lodos activados, obtenidos de la planta de tratamiento de la UAQ Campus Aeropuerto (CA). Drenando 10 L del reactor y alimentó con 2 L lodos activados y 8 L de agua residual hasta obtener la biopelícula en los soportes de PET.

Para la obtención de lodos activados se sedimentaron previamente en cubetas de 10 L para dejar precipitando los lodos. En la Figura 3 se muestra la planta de tratamiento del campus aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, de donde fue extraída el agua residual y los lodos para el proceso de aclimatación del reactor biológico en 180 días como se muestra en la Figura 4.



Figura 3 Planta de tratamiento de aguas del Campus Aeropuerto UAQ, fuente de los lodos activados para nuestro ensayo.

### 6.3 Sistema de filtración

Una vez finalizado el proceso por el reactor biológico se procedió a la etapa de filtración donde se colocó el de agua tratada previamente pasada por el reactor biológico como se puede ver en la Figura 4. En la parte de en medio hay una tina translúcida con una manguera blanca, dicha manguera blanca va conectada a una bomba para llevar el agua directo al sistema de filtración sistema que está integrado

por 3 etapas, para mayor eficiencia, siendo zeolita el primer filtro, seguido de dos filtros de carbón activado como se muestra en la Figura 5, finalizando en la parte superior por ósmosis inversa.

Para la parte final se establecieron 2 salidas la primera con el agua filtrada, la cual se puede observar en la parte de atrás de la bomba del lado izquierdo de la Figura 4 y la última con el agua de rechazo en una garrafa de 5 L mostrada a la derecha en la Figura 4.



Figura 4. Sistema de filtración convencional.



Figura 5. Filtros empacados, 2 filtros de carbón activado y uno de zeolita y osmosis inversa localizada en la parte superior.

#### 6.4 Membrana polimérica

Para la elaboración de la membrana polimérica se utilizó una impresora 3D Hornet con PLA de la marca Hatchbox con un diámetro de 1.75 mm como se muestra en la Figura 6.

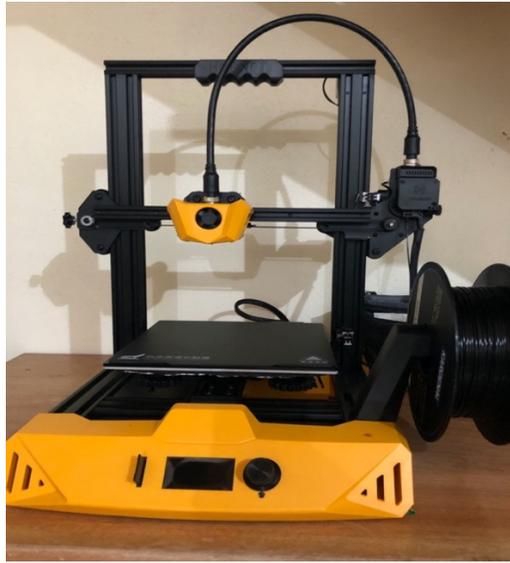


Figura 6. Impresora 3D

Siendo éste un robot de tipo cartesiano de 6 ejes que cuenta con un actuador de extrusión para filamento PLA. El PLA es extraído de almidón de maíz o caña de azúcar para posteriormente ser polimerizado y obtener el producto, siendo éste un biopolímero, biodegradable a ciertas condiciones, ayudando de esta manera a reducir el impacto ambiental del proyecto (Plavec et al., 2020).

Para la fabricación de la membrana se llevó el diseño a la empresa impresión3Dqro donde se modeló el diseño en el programa de solid works como se muestra en la Figura 8 y se mandó imprimir en una impresora Hornet. Para su correcta elaboración, el extrusor deberá llegar a la temperatura de fusión del PLA de 190 °C, para depositarlo de manera líquida sobre el área de impresión siguiendo la trayectoria generada por el programa.

Una vez que se tiene la membrana de PLA, ésta se utilizará como soporte para introducir nuestro material adsorbente utilizando óxido de grafeno.

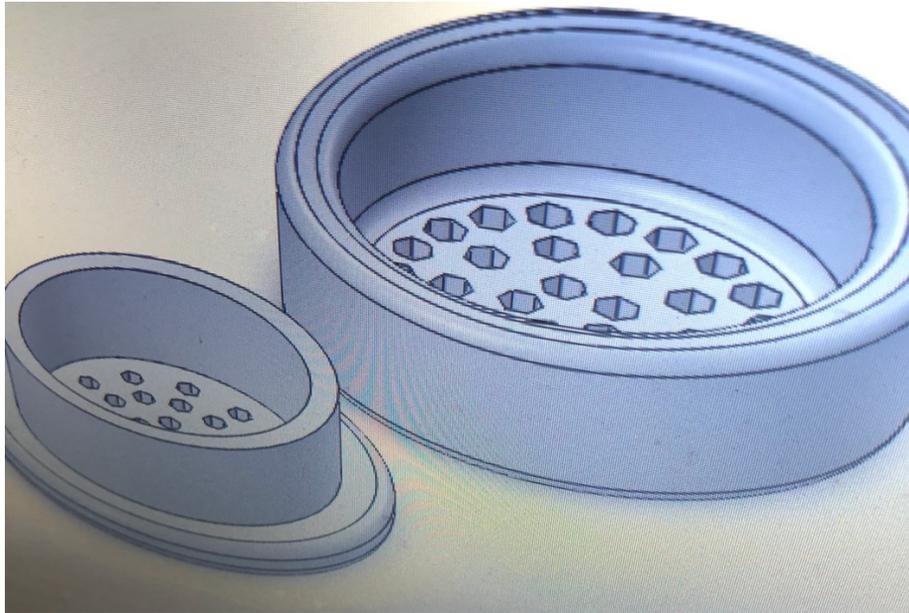


Figura 7. Diseño de membrana por el programa solid works.

#### 6.5 Material adsorbente

Un gramo de polvo de grafito y 0.5 g de nitrato de sodio, se añadió a 23 mL de ácido sulfúrico concentrado, después se añadieron 3 g de permanganato de potasio gradualmente. La solución se colocó en un baño de hielo para mantener la temperatura menor a 20 °C, a su vez la solución se mantuvo en agitación durante 2 h y se añadieron 46 mL de agua desionizada lentamente. Después, la mezcla se diluyó en 14 mL de agua y 1 mL de peróxido de hidrógeno al 30 %. El óxido de grafito se lavó cinco veces con ácido clorhídrico al 5% y se secó en un horno a 70 °C por 12 h. Finalmente el óxido de grafeno se llevó a radiación ultrasónica por dos horas y el resultado el proceso se puede observar en le Figura 8, el óxido de grafeno resultante fue utilizado sin molienda para sus caracterizaciones y para integrar un gramo en la membrana polimérica (Vazquez-Jaime et al., 2020).



Figura 8. Óxido de grafeno sintetizado por el método de hummers modificado.

Al ser sintetizado el óxido de grafeno, este fue necesario llevar a caracterizar bajo diferentes técnicas. La primera fue por espectroscopia Raman, esta técnica consiste en irradiar luz sobre la muestra, para observar las vibraciones moleculares y así ver la composición química del material, cristalinidad, contaminación o defectos del material. La siguiente técnica empleada fue SEM que por sus siglas en inglés significa microscopio electrónico de barrido, este equipo como su nombre lo indica, mediante un microscopio hace un barrido con un haz de electrones, sobre la muestra, arrojando una imagen donde podemos observar, forma, composición química y textura. Continuando con la espectroscopía de rayos X de energía dispersiva EDS, esta técnica indica de forma específica los elementos que contiene la muestra y con la intensidad, la concentración de cada uno. Finalizando con microscopía electrónica de transmisión (TEM), la cuál irradia un haz de electrones sobre la muestra de tal manera que con una definición mayor no arroja una imagen para observar la estructura de la muestra.

## VII. RESULTADOS

### 7.1 Muestreo y parámetros para determinar la calidad del agua.

Se recolectaron en dos ocasiones 100 L del agua problema en junio del 2021 y en octubre del 2021, las cuáles fueron extraídas de una máquina de hemodiálisis elegida de forma aleatoria en el área de hemodiálisis de la Policlínica Nexus, la cual cuenta con 15 máquinas y la misma fue distribuida en 10 garrafas de 20 L para su almacenamiento a temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 9, en el laboratorio de aguas de la Universidad Autónoma de Querétaro en el Campus Aeropuerto.



Figura 9. Garrafa de 20 L con agua residual del proceso de hemodiálisis.

### 7.1.1 Parámetros físicos del agua problema.

En el Cuadro 6 podemos observar las propiedades físicas iniciales al momento de la toma de muestra del agua de hemodiálisis, en la columna de entrada y los datos obtenidos al termino de los 180 días en el reactor biológico en la columna de salida.

Cuadro 6. Calidad del agua de hemodiálisis al entrar al tren de tratamiento y al terminar el proceso.

	Entrada	Salida
Color	550 UPtCo	64 UPtCo
pH	8.8	7.7
Temperatura	24 °C	22 °C
Olor	Desagradable	Aceptable

En el Cuadro 6 se puede observar los cambios durante el tren de tratamiento establecido, donde se tiene la primera columna los datos obtenidos al recuperar el agua de hemodiálisis directamente saliendo del proceso, con 550 UptCo y un pH de 8.8, con un olor fuerte y desagradable a una temperatura de 24° C. La NOM-127-SEMARNAT-1994, como se puede observar en el cuadro 2 establece que 20 UptCo sería el parámetro permisible para agua de consumo y uso humano y en la columna 2 se observa que hubo una disminución considerable en el color, pH y olor; sin embargo, aún no se llegó a los parámetros permisibles de la norma para agua potable.

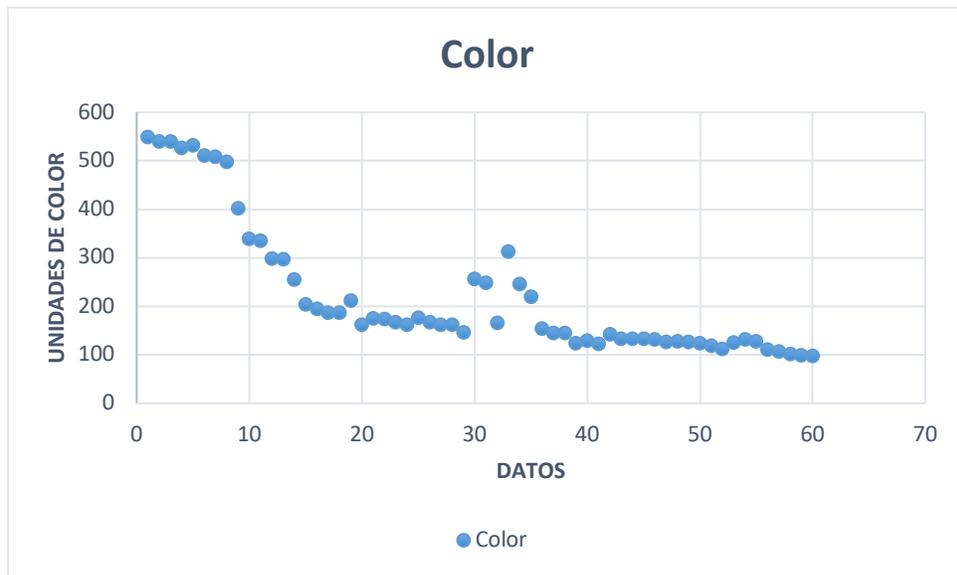


Figura 10. Gráfica de las unidades de color arrojadas durante 60 días.

En la Figura 10 se observa la variación en las unidades de color, obtenidas durante 60 días en el laboratorio del Campus Aeropuerto, para determinar la aclimatación del reactor biológico. Se logró una disminución considerable a los 15 días pasando de 550 unidades de color a 204 unidades de color y llegando hasta 98 unidades de color.



Figura 1. Características físicas del agua durante el tratamiento propuesto.  
H=Hemodiálisis, RB=Reactor biológico, SF=Sistema de filtración MG=  
Membrana con óxido de Grafeno.

En la Figura 11 se observan 4 vasos precipitados representando cada etapa del tren de tratamiento para observar los cambios visibles. Para el vaso H se observa el agua de hemodiálisis al salir de la máquina con un color blanquecino, turbio y con burbujas en la superficie, para el siguiente vaso H+RB nos indica que el agua pasó por el tratamiento del reactor biológico observando un color entre café y amarillo dejando de lado la turbiedad del vaso anterior y ahora se puede ver que el líquido deja pasar la luz. Siguiendo con el vaso H+RB+SF el agua fue pasada por un sistema de filtración convencional dejando de lado el color café amarillento del vaso anterior y teniendo un color amarillo claro que deja pasar la luz, además se observan burbujas en la superficie. Por último, para el vaso H+RB+SF+MG nos indica el tratamiento final donde el agua fue pasada por una membrana polimérica con óxido de grafeno además de una cloración final para donde se observa el agua prácticamente clara, cristalina, sin burbujas, sin color.

#### 7.1.2 Parámetros químicos del agua problema.

Para los análisis químicos se tomó una muestra al azar del agua residual del proceso de hemodiálisis y se llevó a analizar al laboratorio de análisis químicos analíticos, realizando el mismo proceso con cada etapa del proyecto, siguiendo con el sistema de filtración, el reactor biológico y finalizando con la membrana PLA con óxido de grafeno. Todos los datos fueron comparados con los parámetros permisibles de la NOM-003-SSA-2010 del proceso de hemodiálisis para la entrada de la máquina.

Cuadro 7. Parámetros permisibles químicos empleados para hemodiálisis y resultados del agua tratada por el reactor biológico, el sistema de filtración convencional y la membrana polimérica con óxido de grafeno.

NOM-003	H	H-RB-SF	H-RB-SF- MG
---------	---	---------	-------------

Aluminio	0.01	0.16	0.16	0.16
Arsénico	0.005	0.009	0.009	0.009
Cadmio	0.001	0.38	< 0.0006	< 0.0006
Cromo total	0.014	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Cobre	0.1	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Plomo	0.005	0.02	0.02	0.02
Calcio	2	18.3	2	1.2
Magnesio	4	16	14	24
Potasio	8	135	43	3
Sodio	70	3,283	55	55
Cloro	0	0	0	0

NOM-003: Calidad del agua que se requiere para el sistema de hemodiálisis (NOM-003-SSA)

H: calidad del agua de salida de la máquina de hemodiálisis

H-RB-SF: agua de hemodiálisis con tratamiento biológico y sistema de filtración

H-RB-SF-MG: agua de hemodiálisis con tratamiento biológico, sistema de filtración y membrana de óxido de grafeno.

En la primera columna del Cuadro 7 se observan los parámetros permisibles de la NOM-003-SSA-2010, los cuales fueron utilizados como base para direccionar los resultados hacia un objetivo. En la columna 2 se encuentran los resultados del proceso de hemodiálisis para la entrada de la máquina, estos valores nos demuestran la calidad del agua con la que sale del proceso de hemodiálisis obteniendo valores por encima de la norma, haciendo énfasis en el sodio principalmente con un valor de 3283 mg/L. Finalmente en la columna 3 y 4 se muestran los resultados del tren de tratamiento pasando por el reactor biológico y el sistema de filtración, seguido de la membrana de óxido de grafeno, teniendo como resultados que 7 parámetros químicos de 11 analizados entran dentro de la NOM-003-SSA-2010 y 9 parámetros químicos de los 11 analizados respetan la NOM-127-SEMARNAT-1994 del agua potable. Quedando aluminio, arsénico y magnesio

pendientes para modificaciones del tren de tratamiento y así lograr el total de parámetros permisibles para la norma que se establezca.

### 7.1.2 Parámetros microbiológicos del agua problema.

De acuerdo con los análisis realizados, las bacterias se encuentran dentro de los límites permisibles de la NOM-003-SSA-2010 con 100 col/mL. Con el fin de complementar la investigación, se realizaron los análisis pertinentes para descartar presencia de coliformes totales, enterococos, en el Cuadro 8 se pueden ver los valores establecidos por las normas y los obtenidos después del tratamiento.

Cuadro 8. Resultados de los análisis microbiológicos.

	NOM-127	NOM-003	Hemodiálisis
Bacterias	200 col/mL	100 col/mL	100 col/mL
Coliformes totales	2 NMP/100 mL		2 NMP/100mL

### 7.2 Bioreactor

Una vez montado el reactor biológico se alimentó de forma continua por 90 días para la obtención de lodos, los cuales comenzaron a formar biopelícula dentro de las botellas de PET como se muestra en la Figura 11.



Figura 2. Biorreactor a los 10 días de alimentación con lodos y agua residual.

A los 15 días ya se puede observar cómo se adhiere la biopelícula en las paredes del soporte como se muestra en la Figura 12. Este proceso tuvo una duración de 90 días para lograr cubrir los soportes y continuar con el proceso de aclimatación.



Figura 3. Reactor biológico a los 15 días y 90 días.

Para el proceso de aclimatación se continuó alimentando el reactor el biorreactor con el 50% de agua residual y el 50% de agua de hemodiálisis hasta completar los 180 días en la Figura 14 se puede apreciar cómo se encontraba el biorreactor al terminar el proceso



Figura 14. Reactor biológico a los 180 días.

Los soportes utilizados fueron botellas de PET reutilizadas de 1 L y 1.5 L y para la obtención del área de contacto, dando como resultado el área de contacto del cono trunco  $2.2619 \text{ m}^2$  y el área del cilindro  $9.801 \text{ m}^2$ , siendo  $12.0636 \text{ m}^2$  el área de contacto por cada botella de PET.

El TRH fue obtenido por dos fórmulas, la Fórmula 3 se usó para poder saber el Caudal el cuál se midió tomando en cuenta los 10 L que se extraían del reactor en 5 minutos al día dando como resultado  $0.08 \text{ m}^3/h$ .

Una vez obtenido el caudal se utilizó la fórmula 4 para obtener el TRH tomando 70 L el volumen total que se tenía en el reactor biológico, dando como resultado 54 minutos.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

### 7.3 Sistema de filtración

Para operar el sistema de filtración convencional se añadieron 30 L del agua tratada directamente del reactor biológico, como se muestra en la Figura 15 una vez pasada por el sistema de filtración convencional se obtuvo el agua tratada para llevar a analizar y también para hacer pasar por el último tramo de del tren de tratamiento con la membrana polimérica y el óxido de grafeno.



Figura 15. Sistema de filtración operando con agua tratada del reactor biológico.

### 7.4 Membrana polimérica.

Para finalizar con el tren de tratamiento se diseñó y fabricó la membrana polimérica por impresión 3D con PLA como se muestra en la Figura 16. Esta membrana se imprimió en 2 partes, la parte inferior es donde se colocó el óxido de grafeno y la superior es la cubierta para que éste quede empacado.



Figura 16. Membrana polimérica fabricada por Impresión 3D

#### 7.5 Material adsorbente.

La membrana de PLA con óxido de grafeno se colocó al final de la columna seguida de 250 g de algunos materiales adsorbentes como grava, carbón activado y arena, como se observa en la Figura 17, para retener partículas grandes y así mejorar la calidad final del agua.



Figura 17. Filtro empacado con la membrana y materiales adsorbentes.

#### 7.5.1 Caracterización del óxido de grafeno por RAMAN

Para el material adsorbente se tomó una muestra y se llevó a analizar por RAMAN, al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica con el Dr. Walter Noé Velázquez Arjona. Se tomaron parámetros de  $1000\text{ cm}^{-1} - 1800\text{ cm}^{-1}$ , donde normalmente se encuentran los picos característicos del óxido de grafeno. En la Figura 18, Vázquez y colaboradores compararon las bandas características del óxido de grafeno y del óxido de grafeno modificado, siendo éste el sintetizado en el actual proyecto. Dichas bandas se observan a  $1325\text{ cm}^{-1}$  y  $1590\text{ cm}^{-1}$ , comparado con nuestro material adsorbente con bandas a  $1300\text{ cm}^{-1}$  y a  $1560\text{ cm}^{-1}$  con una intensidad similar, como se muestra en la Figura 19.

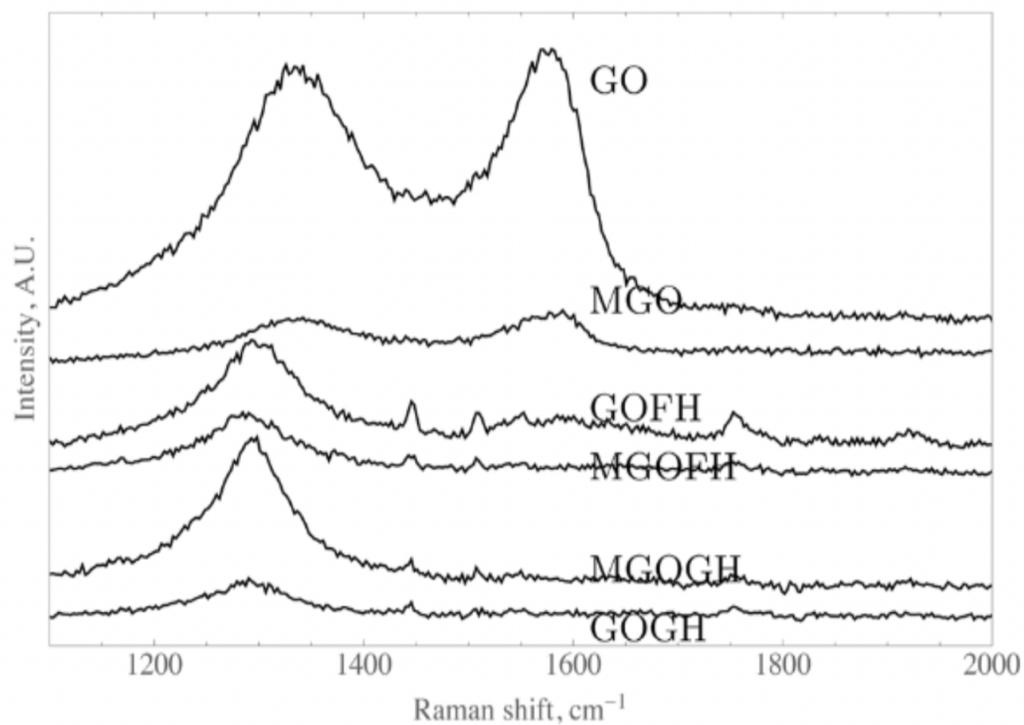


Figura 18. Espectro Raman de óxido de grafeno (GO) óxido de grafeno modificado (Vázquez, et al., 2020).

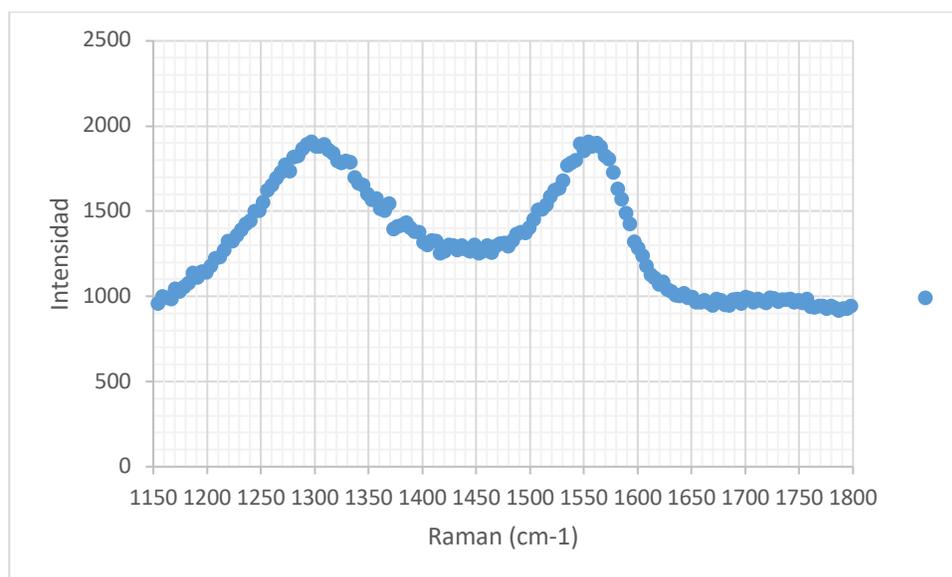


Figura 19. Espectro Raman de óxido de grafeno modificado sintetizado en laboratorio.

### 7.5.2 Caracterización del óxido de grafeno por Microscopio electrónico de barrido (SEM) y Espectroscopía de energía dispersa (EDS)

Continuando con la caracterización del grafeno, se analizó una muestra por SEM y EDS, al Centro de Investigación de Materiales Avanzados con la Dra. Anabel de la Cuz Delgado.

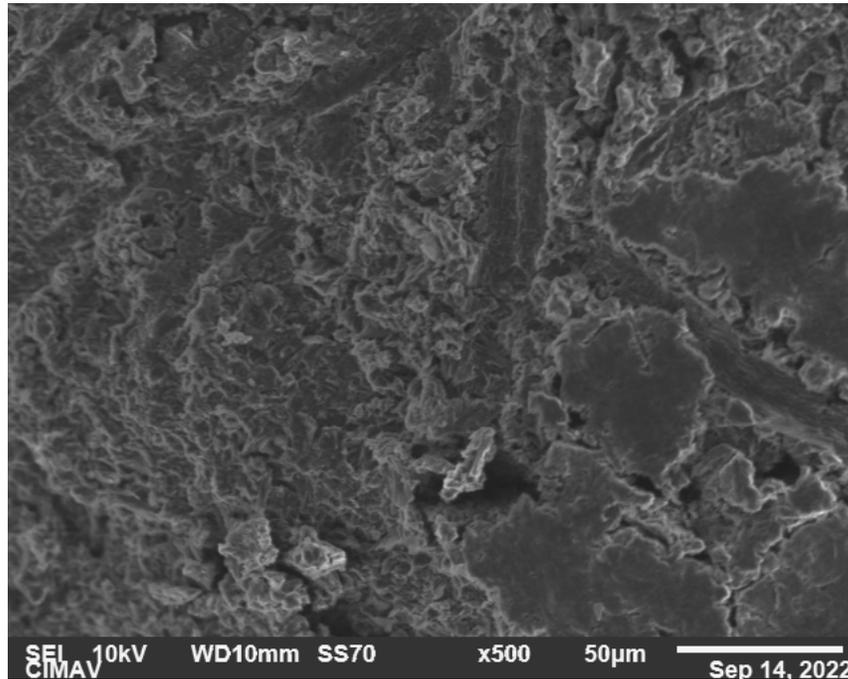


Figura 20. SEM del óxido de grafeno a 50μm.

En la Figura 20 se puede observar el material adsorbente como una superficie irregular, rugosa, con gránulos sueltos. En la imagen se tiene la referencia de 50 μm.

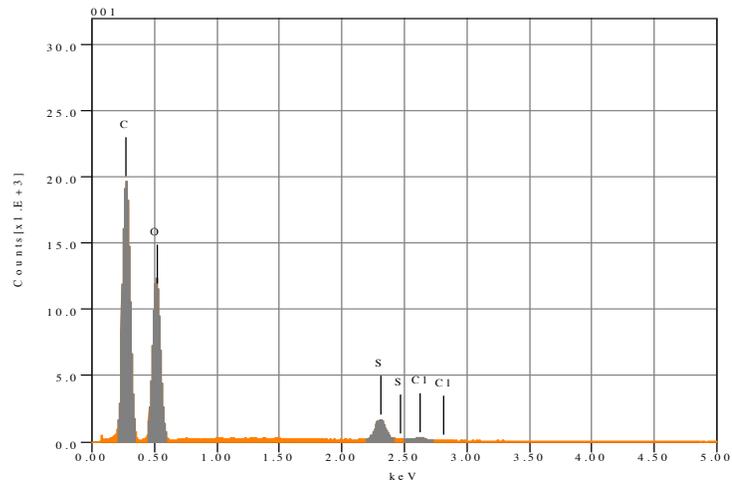


Figura 21. Análisis EDS del óxido de grafeno.

En la Figura 21 se observa la composición del material por EDS, donde la posición nos indica el elemento y la intensidad nos habla de la concentración del mismo elemento en el material. Los elementos presentes en el material son carbón con un 68 %, oxígeno con un 29% y trazas de azufre y cloro.

### 7.5.3 Caracterización del óxido de grafeno por Microscopio electrónico de transmisión (TEM)

Para finalizar la parte de caracterización, se analizó una muestra por TEM, en el Centro de Investigación de Materiales Avanzados con la Dra. Anabel de la Cuz Delgado.

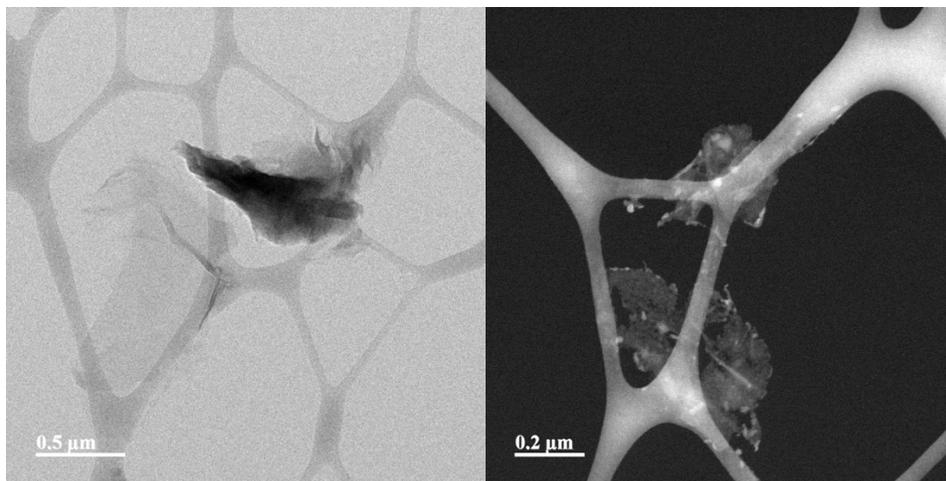


Figura 22. Análisis TEM del óxido de grafeno.

En la Figura 22 se puede observar una red con fibras de  $0.25\ \mu\text{m}$ , donde claramente se puede apreciar las hojuelas del óxido de grafeno dentro de la red, en la imagen de la derecha se tiene un acercamiento mayor con una referencia de  $0.2\ \mu\text{m}$ .

## VIII. DISCUSIÓN

Atendiendo a la problemática del gasto excesivo de agua potable en el proceso de hemodiálisis, se analizó la posibilidad de implementar un tren de tratamiento específico para la remediación del agua residual de hemodiálisis. Basados en los principios de la economía circular para el sector social, que nos indica gestionar los residuos para reutilizarlos en el proceso y así consumirlos para gestionar nuevamente, intentando alcanzar el objetivo de cero residuos; sin embargo, consideramos que no es viable totalmente debido a que con cada tratamiento siempre tendremos agua de rechazo, la cual su reuso implicaría mayor gasto económico por la eliminación de minerales que la misma contiene. Tomando en cuenta que la entrada del agua potable al proceso de hemodiálisis es de 600 L de los cuáles se utilizan 300 L en el proceso y éstos son dirigidos al drenaje, consideramos indispensable el reuso de la misma para minimizar el gasto de agua y a su vez se reducir el impacto ambiental, Estableciendo un tren que consta de tres etapas. Cada una ayudó para la recuperación del agua problema en las mejores condiciones, comenzando por un reactor biológico el cuál se alimentó de forma continua con lodos y agua residual de la planta de tratamiento del Campus Aeropuerto y con agua de hemodiálisis, ésto sería un gran aporte biotecnológico para los hospitales, debido a que de ésta forma podrían juntar el agua del hospital, con el agua de hemodiálisis para aportar la materia orgánica suficiente y así llevar a cabo el proceso y cumplir con la norma del agua residual total. Para dicho reactor se utilizó un tanque de 100 L, se realizó el proceso de aclimatación en un periodo de 180 días, con un tiempo de retención hidráulica de 54 minutos. La siguiente etapa consistió en un sistema de filtración convencional que con ayuda de carbón activado, zeolita, se llegó a clarificar un poco el agua y además dejarla prácticamente libre en gran parte de contaminantes y finalmente se utilizó el lecho empacado con grava y arena para retener partículas grandes y al final de la columna empacada se encontraba una membrana de PLA con óxido de grafeno para su filtración final, gracias a las propiedades de adsorción del óxido de grafeno fue posible reducir en su mayoría los parámetros establecidos por la norma. Logrando

así la remediación del agua residual del proceso de hemodiálisis, principalmente disminuyendo algunos parámetros físicos químicos con respecto a la NOM-003-SSA3-2010 del proceso de hemodiálisis.

Tarrass y colaboradores en el 2021 realizaron una investigación de cómo se podría obtener cero residuos en el proceso de hemodiálisis, dando como alternativas el reúso del agua para riego y para ello se ocuparía un sistema de filtración para disminuir las concentraciones de sodio y cloro en específico, para lograr los parámetros permisibles de aguas grises para riego. Por otra parte, se habla de la alternativa sustentable que sería el utilizar membranas en conjunto con tratamientos biológicos para la remediación del agua. Siendo éstos algunos puntos que se tomaron en cuenta para llevar a cabo el proyecto, viendo la principal preocupación de la recuperación del agua y diseñando un tren de tratamiento (Tarrass, et al., 2021). En otras investigaciones se realizaron simulaciones de nanofiltración y osmosis inversa para el tratamiento del agua residual de hemodiálisis, al ser escasa la información al respecto se compararon los resultados en cuanto a costos con una desalinización de agua del mar, por lo que se observa el interés y preocupación respecto al tema, pero poca respuesta en operación de proyectos (Tarras et al., 2008).

Wen y colaboradores utilizaron un biorreactor de membrana sumergida para remediar aguas residuales hospitalarias, teniendo buenos resultados al disminuir 93 % de nitratos, bacterias, 80 % de demanda química de oxígeno y 83 % de turbidez en el agua, logrando una mejor calidad de agua que la requerida en la normatividad de salida de efluente en hospitales de China (Wen, et al., 2004).

En Estados Unidos se dieron a la tarea de investigar algunas aplicaciones del PLA, siendo éste un biopolímero, biodegradable que ha sido utilizado en compañía de algunos compuestos como hidroxiapatita, microcristales de celulosa, entre otros. En estos casos los compuestos eran añadidos previo a la extrusión del polímero; sin embargo, también se han realizado estudios sobre el uso de membranas compuestas con PLA. Plavec y colaboradores reutilizaron PLA junto con otro biopolímero y analizaron el cambio de color conforme se degradaba el material,

siendo ésta una alternativa económica y sustentable para reúso y observación del periodo de degradación (DeStefano, et al., 2020, Plavec, et al., 2020).

Si bien ya es conocido el uso de grafeno como material adsorbente para el tratamiento de aguas, Zhong y colaboradores hicieron una investigación respecto al uso de membranas poliméricas compuestas con grafeno para la remediación de aguas residuales, aumentando así la eficiencia, logrando una eficiencia del 96% de retención de tintas en aguas residuales. Comparado con Zheng y colaboradores que lograron un 90% de remoción de azul de metileno con nanopartículas de plata y óxido de grafeno (Zhong, et al., 2020, Zheng, et al., 2020).

Como se puede observar el tema del tratamiento de aguas residuales del proceso de hemodiálisis, es de gran preocupación debido al gasto excesivo que se genera durante cada sesión. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con mucha información acerca de personas que lleven a cabo tratamientos después del proceso de hemodiálisis. Por lo tanto es difícil tener comparación directa con nuestro proyecto, por lo cual se tomaron como base algunas investigaciones sobre tratamientos de agua que emplean el uso de membranas poliméricas con óxido de grafeno, para la remediación de aguas residuales.

Sin duda es un proyecto muy amplio que tiene como interés disminuir el impacto ambiental producido por el uso de agua potable para fines clínicos en los centros de hemodiálisis, buscando el cubrir la normatividad correspondiente a los centros de hemodiálisis, al remediar contaminantes como metales pesados, sales, bacterias, turbidez, pH, entre otros parámetros, para lograr los estándares. De esta manera se lograría una economía circular captando el agua residual, tratándola y reutilizándola en el proceso de hemodiálisis. Considero que este proyecto puede seguir mejorando hasta lograr su objetivo y el mismo podría entrar como propuesta para la apertura de algún centro de hemodiálisis, se hizo la propuesta para centros de hemodiálisis ya establecidos; sin embargo los dueños nos comentaban que era un gasto muy grande el disponer de un sitio para la nueva planta así como rediseñar salidas y entradas para implementar el proceso y por ello nos recomendaban llevarlo como propuesta a nuevos centros de hemodiálisis.

## VIII. CONCLUSIÓN

Se desarrolló con una planta piloto específica para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de hemodiálisis.

Se utilizó un reactor biológico con capacidad de 100 L utilizando soportes de PET en su interior para la formación de biopelículas y logrando la aclimatación del sistema a los 180 días, seguido de un sistema de filtración convencional y acoplado finalmente a una columna empacada con una membrana de PLA fabricada por impresión 3D con 1 g de óxido de grafeno para la adsorción final de cualquier contaminante.

Para cada etapa del proyecto se realizó la caracterización microbiológica y fisicoquímica del agua, tomando como referencia la NOM-003-SSA3-2010 del proceso de hemodiálisis.

El tren de tratamiento logró la disminución del pH de 8.8 a 7.7, en color de 550 UPtCo a 64 UPtCo y principalmente se alcanzaron 7 de los 11 los parámetros permisibles por la NOM-003-SSA3-2010, destacando algunos minerales como calcio de 18.3 mg/L a 1.2 mg/L, potasio de 135 mg/L a 3 mg/L y sodio de 3,283 mg/L a 55 mg/L.

## X. REFERENCIAS

- Adeniyi**, A., González-Ortíz, D., Pochat-Bohatier, C., Oyewo, O., Sithole, B., & Onyango, M. Incorporation of cellulose nanocrystals (CNC) derived from sawdust into polyamide thin-film composite membranes for enhanced water recovery. *Alexandria Engineering Journal*. **2020**; 59(6):4201–4210. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.025>
- Cárdenas**, C., Yabroudi, S., Benítez, A., Páez, K., Perruolo, T., Angulo, N., . . . Herrera, L. Desempeño de un reactor biológico secuencial (RBS) en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Colombiana de Biotecnología*. **2012**.
- Cui**, J., Li, F., Wang, Y., Zhang, Q., Ma, W., & Huang, C. Electrospun nanofiber membranes for wastewater treatment applications. *Separation and Purification Technology*. **2020**;117116. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117116>
- DeStefano**, V., Khan, S., & Tabada, A. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*. **2020**;76–87. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.08.002>
- Dou**, P., Donato, D., Guo, H., Zhao, S., & He, T. Recycling water from spent dialysate by osmotic dilution: impact of urea rejection of forward osmosis membrane on hemodialysis duration. *Desalination*. **2020**;496:114605. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114605>
- Edwin** Joseph Purcell, Steven E. Rigdon, D. E. V. *Cálculo*. **2007**;299.
- Egea-Corbacho**, A., Gutiérrez Ruiz, S., & Quiroga Alonso, J. M. Removal of emerging contaminants from wastewater using nanofiltration for its subsequent reuse: Full-scale pilot plant. *Journal of Cleaner Production*. **2019**;214:514–523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.297>
- Etale**, A., Fielding, K., Schäfer, A. I., & Siegrist, M. Recycled and desalinated water: Consumers' associations, and the influence of affect and disgust on willingness to use. *Journal of Environmental Management*. **2020**;261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110217>

- Fernández-santisteban, M. T.** Determinación de coliformes totales y fecales en aguas de uso tecnológico para las centrifugas. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*. **2017**;51:70–73.
- Glick, D. M., Goldfarb, J. L., Heiger-Bernays, W., & Kriner, D. L.** Public knowledge, contaminant concerns, and support for recycled water in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*. **2019**;150:104419. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104419>
- Guerrero-Contreras, J., & Caballero-Briones, F.** Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method. *Materials Chemistry and Physics*. **2015**;153:209–220. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.01.005>
- Ismail, N. H., Salleh, W. N. W., Ismail, A. F., Hasbullah, H., Yusof, N., Aziz, F., & Jaafar, J.** (2020). Hydrophilic polymer-based membrane for oily wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*. **2020**;233: 116007. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116007>
- Kang, X., Cheng, Y., Wen, Y., Qi, J., & Li, X.** Bio-inspired co-deposited preparation of GO composite loose nanofiltration membrane for dye contaminated wastewater sustainable treatment. *Journal of Hazardous Materials*. **2020**;123121. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123121>
- Khazada, N. K., Farid, M. U., Kharraz, J. A., Choi, J., Tang, C. Y., Nghiem, L. D., An, A. K.** Removal of organic micropollutants using advanced membrane-based water and wastewater treatment: a review. *Journal of Membrane Science*. **2020**;598:117672. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117672>
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., Ruan, R.** Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: a review. *Bioresource Technology*. **2019**;291:121934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121934>
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Wu, X., Xin, J., Sun, S., Addy, M.** Influence of nanofiltration concentrate recirculation on performance and economic feasibility of a pilot-

- scale membrane bioreactor-nanofiltration hybrid process for textile wastewater treatment with high water recovery. *Journal of Cleaner Production*. **2020**;261:121067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121067>
- Matthew** Ka-Hang Tong, Wei Wang, Tze-Hoi Kwan, Lawrence Chan, T.-C. A. Water treatment for hemodialysis. *Hong Kong J Nephrology*. **2001**;137:317–324. <https://doi.org/10.1159/000060253>
- McClaran**, N., Behe, B. K., Huddleston, P., & Fernandez, R. T. Recycled or reclaimed? The effect of terminology on water reuse perceptions. *Journal of Environmental Management*. **2020**;261:110144. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110144>
- Méndez-Durán**, Antonio, J. Francisco Méndez-Bueno, Teresa Tapia-Yáñez, Ángelica Muñoz Montes y Leticia Aguilar- Sánchez. Epidemiología de la insuficiencia renal crónica en México. *Diálisis y Trasplante*. **2010**;31:7–11.
- Mendret**, J., Azais, A., Favier, T., & Brosillon, S. Urban wastewater reuse using a coupling between nanofiltration and ozonation: Techno-economic assessment. *Chemical Engineering Research and Design*. **2019**;145:19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.02.034>
- Mohammed**, S., Hegab, H. M., Ou, R., Liu, S., Ma, H., Chen, X., ... Wang, H. Effect of oxygen plasma treatment on the nanofiltration performance of reduced graphene oxide/cellulose nanofiber composite membranes. *Green Chemical Engineering*. 2021;2:122–131. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.12.001>
- Mollahosseini**, A., Abdelrasoul, A., & Shoker, A. A critical review of recent advances in hemodialysis membranes hemocompatibility and guidelines for future development. *Materials Chemistry and Physics*. **2020**;248:122911. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122911>
- Murtas**, S., Aquilani, R., Iadarola, P., Deiana, M. L., Secci, R., Cadeddu, M., & Bolasco, P. Differences and effects of metabolic fate of individual amino acid loss in high-efficiency hemodialysis and hemodiafiltration. *Journal of Renal*

*Nutrition*. 2020;1–12. <https://doi.org/10.1053/j.jrn.2019.12.003>

**Najafpoor**, A., Norouzian-Ostad, R., Alidadi, H., Rohani-Bastami, T., Davoudi, M., Barjasteh-Askari, F., & Zanganeh, J. Effect of magnetic nanoparticles and silver-loaded magnetic nanoparticles on advanced wastewater treatment and disinfection. *Journal of Molecular Liquids*. **2020**;303:112640. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112640>

**Oksman**, K., Mathew, A. P., Bondeson, D., & Kvien, I. Manufacturing process of cellulose whiskers/polylactic acid nanocomposites. *Composites Science and Technology*. **2006**;66:2776–2784. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.002>

**Olmos**, Raudel Ramos, Rubén Sepúlveda Marqués; Francisco Villalobos Moreto. *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. Autónoma de Baja California, México. **2003**;190.

**Pal**, M., Malhotra, M., Mandal, M. K., Paine, T. K., & Pal, P. Recycling of wastewater from tannery industry through membrane-integrated hybrid treatment using a novel graphene oxide nanocomposite. *Journal of Water Process Engineering*. **2020**;36:101324. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101324>

**Pal**, P., Sardar, M., Pal, M., Chakraborty, S., & Nayak, J. Modelling forward osmosis-nanofiltration integrated process for treatment and recirculation of leather industry wastewater. *Computers and Chemical Engineering*. **2019**;127:99–110. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.05.018>

**Plavec**, R., Hlaváčiková, S., Omaníková, L., Feranc, J., Vanovčanová, Z., Tomanová, K., Alexy, P. Recycling possibilities of bioplastics based on PLA/PHB blends. *Polymer Testing*. **2020**;92. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106880>

**Riñón**, F. M. *Fundación Mexicana del Riñón*. Obtenido de Fundación renal: [fundacionrenal.org](http://fundacionrenal.org). **2019**.

- Riaz, S., & Park, S. J.** An overview of TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic membrane reactors for water and wastewater treatments. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020;84:23–41. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.021>
- Secretaría de Salud**, Norma Oficial Mexicana NOM-003-SSA-2010. **2010**; 66–75.
- SEMARNAT**, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. **1994**; 75.
- Shibao, L., Liang, P., & Xiao, B. (2015). Study on method of domestic wastewater treatment through new-type multi-layer artificial wetland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11207-11214.
- Souza, B. A., Perini, J. A., Giannini, M. J. S. M., & Zanoni, M. V. B.** Fast removal of *Candida parapsilosis* from hemodialysis dialysate using ultraviolet or visible light at nanoporous W/WO<sub>3</sub> electrodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019;7:103104. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103104>.
- Tapie, W., Prato Garcia, D., & Sánchez Guerrero, H. (2016).** Biodegradation of sugarcane vinasses by the white-rot fungi *Pleurotus ostreatus* in packed bed reactor. GI *Pleurotus ostreatus* IN A PACKED BED REACTOR. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 145-150.
- Tarrass F., Benjelloun, O., & Benjelloun, M.** Towards zero liquid discharge in hemodialysis. Possible issues **2021**; 41: 620-624. <https://doi.org/10.1016/j.nefro.2020.12.012>
- Tarrass, F., Benjelloun, M., & Benjelloun, O.** Recycling wastewater after hemodialysis: an environmental analysis for alternative water sources in arid regions. *American Journal of Kidney Diseases*. **2008**;52:154–158. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2008.03.022>
- Tirado-Gómez, L. L., C, M., C, D., Durán-Arenas, J. L., Rojas-Russell, M. E., Pícol, L., López-Cervantes, M.** Las unidades de hemodiálisis en México: una evaluación de sus características, procesos y resultados. **2012**;53:1–8. Retrieved from [papers3://publication/uuid/E9F996C8-01B4-415D-8829-8042EADE1CA2](https://papers3://publication/uuid/E9F996C8-01B4-415D-8829-8042EADE1CA2)

- Vazquez-Jaime**, M., Arcibar-Orozco, J. A., Damian-Ascencio, C. E., Saldaña-Robles, A. L., Martínez-Rosales, M., Saldaña-Robles, A., & Cano-Andrade, S. Effective removal of arsenic from an aqueous solution by ferrihydrite/goethite graphene oxide composites using the modified Hummers method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **2020**;8. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104416>
- Vo**, T. K. Q., Bui, X. T., Chen, S. S., Nguyen, P. D., Cao, N. D. T., Vo, T. D. H., Nguyen, T. B. Hospital wastewater treatment by sponge membrane bioreactor coupled with ozonation process. *Chemosphere*. **2019**;230:377–383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.009>
- Wang**, J., Shen, J., Ye, D., Yan, X., Zhang, Y., Yang, W., Pan, L. Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: suggestions for disinfection strategy during coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in China. *Environmental Pollution*. **2020**;262:114665. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114665>
- Wen** Xianghua, Hangjiu Ding, Xia Huang, Ruopeng Liu. Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor. *Process Biochemistry*. **2004**, 39:1427-1431. DOI: 10.1016/S0032-9592(03)00277-2
- Yarlagadda , V., & Manjunath, S. (2019). Aerobic granular sludge process: a fast growing biological treatment for sustainable wastewater treatment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 57-65.
- Zapata**, A. D., & Mario Arias Zabala. Evaluating *Beauveria bassiana* fungal growth in packed bioreactor . *Revista colombiana de biotecnología*. **2003**. 65-72.
- Zheng** Alvin Lim Teik, Tossapon Phromsatit, Supakorn Boonyuen, Yoshito Andou. Synthesis of silver nanoparticles/porphyrin/reduced graphene oxide hydrogel as dye adsorbent for wastewater treatment. *Flat Chem*. **2020**;23:100174. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2020.100174>
- Zhong**, Y., Mahmud, S., He, Z., Yang, Y., Zhang, Z., Guo, F., Zhao, Y. Graphene oxide modified membrane for highly efficient wastewater treatment by dynamic

combination of nanofiltration and catalysis. *Journal of Hazardous Materials*.  
**2020**;397:122774. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122774>