



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Química
Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



Maestría en Ingeniería Química

Título de Tesis:

“Obtención de nanofibras de alcohol polivinílico, plata y óxido de zinc con propiedades bactericidas para agua de consumo humano”

Que presenta:

I.Q. Ana Belen Morales Alvarado

Para obtener el grado de:

MAESTRA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Directora de tesis:

Dra. Claudia Santacruz Vázquez

Codirectora de tesis:

Dra. Verónica Santacruz Vázquez

H. Puebla de Zaragoza, noviembre 2022

Agradecimientos

Mientras Dios nos colme de salud, lo demás corre por nuestra cuenta y aun mejor de la mano de María Auxiliadora que no me abandona en cada paso de mi vida. Se dice que los tiempos de Dios son perfectos, decidir hacer un posgrado, fue en el momento justo, gracias por brindarme la oportunidad de seguir creciendo como persona y profesionista.

Gracias familia por ser apoyo en cada decisión y fortaleza en cada momento de duda, gracias, papás, por darme la vida, ser mi motor y estar en cada paso que doy; gracias, hermanos, por ser mi apoyo, mis mejores confidentes y mis compañeros de vida; gracias abuelos por seguir disfrutando conmigo cada momento, deseo que sean muchos años más; gracias, mi amor, por darme el empujón que necesitaba para tomar la decisión, por estar, por tener paciencia y por crecer juntos, gracias a la familia Velasco Franco por estar al pendiente y siempre darme palabras de aliento.

Gracias a los colegas que se han cruzado en mi camino, por compartir sus conocimientos y por brindarme su confianza y sobre todo gracias a los que fueron mis profesores desde el propedéutico hasta finalizar el posgrado, me ayudaron a recordar, reforzar y adquirir nuevos conocimientos, sin ellos no sería posible el llegar hasta aquí.

Gracias a los amigos que me siguen en el camino y a los que me han abierto recientemente su corazón para conocerme y sobre todo apoyarme, en especial a las Ingenieras Ángeles Ojeda, Miriam Miguel y Kasia Pouget, por su apoyo, conocimientos y facilidades prestadas para concluir los análisis de calidad.

“Doy gracias a la vida por cada lección que me da y que me permite seguir aprendiendo”.

Agradecimientos Institucionales

Gracias a la Benemérita Universidad de Puebla (BUAP), por ser parte de mi formación profesional desde la preparatoria.

A la directora de tesis, la Dra. Claudia Santacruz Vázquez, que desde la licenciatura me ha apoyado, y también a mi codirectora la Dra. Verónica Santacruz Vázquez, a ambas gracias por brindarme su apoyo, confianza, por la dedicación y el tiempo para este proyecto.

Gracias al comité evaluador conformado por el Dr. Enrique González Vergara y la Dra. Beatriz Espinosa Aquino, por brindarme su apoyo, conocimientos, paciencia y tiempo para evaluar mi trabajo y poder lograr un proyecto de calidad.

Gracias al Dr. Efraín Rubio Rosas, y a la Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento, por el apoyo y facilidades que se me otorgaron para poder realizar las pruebas de caracterización del material.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la Maestría en Ingeniería Química.

Al Centro Universitario de Vinculación y Transferencia de Tecnología (CUVyT) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el apoyo en la caracterización de las muestras obtenidas en esta tesis.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrados (VIEP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el apoyo económico para la culminación de este proyecto de tesis.

Productividad asociada a esta tesis de Maestría:

- **Presentación de cartel y obtención de tercer lugar en el concurso de Carteles Científicos, categoría POSGRADO en el marco de la Semana Internacional de Química celebrado el 28 de octubre 2021.**
- **Presentación en el 1er Congreso de Estudiantes de Posgrado en Ingeniería Química, (CEPIQ), celebrado de forma virtual los días del 17,18 y 19 de noviembre del 2021.**
- **Publicación de artículo de divulgación en la revista virtual RD-ICUAP, Volumen 8, Número 22 publicado en enero 15,2022, Claudia Santacruz Vázquez, Verónica Santacruz Vázquez, Ana Belén Morales Alvarado. “Electrospinning: una tecnología para obtener nanofibras en la purificación de agua para consumo humano”. ISSN: 2448-5829.**
- **Presentación en el 2do Congreso de Estudiantes de Posgrado en Ingeniería Química, (CEPIQ), celebrado de forma virtual los días del 9,10 y 11 de noviembre del 2022.**
- **Presentación en Latin Food 2022 10th Food Science, Biotechnology & Safety Congress, celebrado en la ciudad de Puebla, los días 16, 17 y 18 de noviembre 2022.**

CONTENIDO

	Página
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	8
Introducción	9
Justificación	10
Hipótesis	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
 CAPITULO I: Antecedentes Teóricos	
1.1. Nanotecnología	12
1.1.1. Nanomateriales	14
1.1.2. Nanobicidas	15
1.2. Electrohilado	15
1.2.1. Parámetros de operación	16
1.2.2. Polímero: Alcohol Polivinílico PVA	18
1.3. Propiedades de los materiales de inclusión	19
1.3.1. Plata	19
1.3.2. Óxido de Zinc	21
1.4. Reticulación (crosslinking)	22
1.5. Proceso de filtración	24
1.6. Normatividad Vigente en agua para consumo humano	31
1.7. Estado del Arte	33
 CAPITULO II: Materiales y Métodos.	
2.1. Obtención de nanofibras con inclusión de óxido de zinc y plata	37
2.2. Caracterización de las NFsQ	37
2.3. Muestreo de Campo y análisis de Agua Potable	38
2.3.1. Análisis Fisicoquímicos del agua potable	39
2.3.2. Caracterización microbiológica del agua	40
2.4. Construcción del sistema piloto	42
 CAPITULO III: Resultados y Discusión.	
3.1. Proceso de electrohilado	44
3.2. Caracterización de las nanofibras	49
3.2.1. Determinación de capacidad microbiana	49
3.2.2. Análisis morfológico a partir de la microscopía de barrido SEM.....	54
3.2.3. Espectroscopía Infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).....	59
3.2.4. Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	63

CONTENIDO

3.3. Construcción de Dispositivo Piloto para purificación de agua	66
3.3.1. Análisis de costos del sistema de purificación	69
3.4. Evaluación de la Calidad del Agua	70
3.5. Cálculos del sistema de purificación	77
3.6. Impacto ambiental.....	80
Conclusiones	82
Referencias	84

Índice de Figuras

Figura 1.1. Escala nanométrica	12
Figura 1.2. Esquema de electrohilado	16
Figura 1.3. Esquema de la actuación de a nanopartículas de plata sobre una bacteria	20
Figura 1.4. Esquema de la actuación de a nanopartículas de plata sobre una bacteria	22
Figura 1.5. Ilustración esquemática de la reacción de PVA con GA y su cruce intermolecular y/o intramolecular Producto de enlace y el extremo sin reaccionar del aldehído	24
Figura 1.6. Proceso de purificación de agua	25
Figura 1.7. Principio de la filtración tangencial (en tubo)	26
Figura 1.8. Diagrama de descripción de técnicas de filtración con membranas	27
Figura 1.9. Comparación de técnicas de filtración por membranas	28
Figura 1.10. Geometría de poros en función de la estructura de la membrana. (a) poros cilíndricos, (b) y (c) poros con geometría compleja.....	29
Figura 2.1. Diagrama de implementación de filtro seleccionado para el sistema de Purificación	42
Figura 2.2. Diagrama de Proceso para la obtención de nanofibras	43
Figura 3.1. Representación del proceso de electrohilado de PVA, AgNO ₃ Y ZnO	48
Figura 3.2. A) Fibra obtenida sin proceso de reticulación. B) Fibra obtenida con proceso de reticulación.	49
Figura 3.3. Evaluación antimicrobiana de las nanofibras con inclusión de plata y óxido de zinc a concentraciones bajas.	50
Figura 3.4. Placa de micro dilución de la evaluación antimicrobiana de las nanopartículas Comerciales	51
Figura 3.5. Actividad microbiana de PVA/ NPs-ZnO, NPs-Ag NFs contra Escherichia coli. y los efectos en el diámetro de la zona de inhibición.	53
Figura 3.6. Gráfico de diámetros promedios de las nanofibras obtenidas. *Fibras reticuladas	58
Figura 3.7. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA.....	59
Figura 3.8. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/NPs-ZnO.....	60
Figura 3.9. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/NPs-Ag.....	61
Figura 3.10. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/ NPs-Ag /NPs-Zn.....	62
Figura 3.11. Termograma de TGA y DSC de fibras finales.....	63
Figura 3.12. Análisis termogravimétrico de las fibras finales	64
Figura 3.13. Análisis DSC de las fibras finales	65
Figura 3.14. Representación del dispositivo piloto de purificación de agua	66
Figura 3.15. Estructura del filtro con las nanofibras obtenidas	68
Figura 3.16. Sistema de purificación piloto instalado en toma de agua potable	69
Figura 3.17. Esquema que ilustra la interacción de nanopartículas aéreas en el ambiente	81

Índice de Tablas.

Tabla 1.1. Aplicaciones de la nanotecnología	13
Tabla 1.2. Aplicaciones de la nanotecnología en la rama ambiental.....	14
Tabla 1.3. Clasificación de nanomateriales	14
Tabla 1.4. Investigaciones previas sobre nanofibras y agua	33
Tabla 2.1. Equipo propuesto para utilizar durante el proceso de experimentación	34
Tabla 2.2. Límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994	41
Tabla 3.1. Soluciones para electrohilado, concentraciones bajas	44
Tabla 3.2. Fibras de PVA a diferentes concentraciones.....	45
Tabla 3.3. Nanofibras obtenidas de soluciones con componentes antibacterianos.....	46
Tabla 3.4. Medición de características de soluciones poliméricas.....	48
Tabla 3.5. Actividad antimicrobiana de las NF de PVA con aumento de NPs-ZnO, NPs-Ag (% en peso)	52
Tabla 3.6. Micrografías de las NF de PVA con NPs-ZnO, NPs-Ag a concentraciones bajas.....	55
Tabla 3.7. Micrografías de las NF de PVA con NPs-ZnO, NPs-Ag con aumento de concentración en %masa. a, b, c: nanofibras después de electrohilado; d, e, f: nanofibras después de proceso de reticulación.....	57
Tabla 3.8. Características de medios filtrantes.....	67
Tabla 3.9. Grosor de los filtros obtenidos	68
Tabla 3.10. Costo de materias primas.....	69
Tabla 3.11. Costo de reactivos.....	70
Tabla 3.12. Parámetros y Normas de Referencia.....	71
Tabla 3.13. Límites máximos permisibles de Normas: pruebas fisicoquímicas.....	72
Tabla 3.14. Resultados de pruebas fisicoquímicas	72
Tabla 3.15. Límites máximos permisibles de Normas para Coliformes Totales.....	75
Tabla 3.16. Resultados de pruebas Microbiológicas	76
Tabla 3.17. Resultados de DBO5.....	77
Tabla 3.18. Especificaciones del sistema piloto de purificación	78

Introducción

La nanotecnología es considerada una rama que estudia la materia a nivel nanométrico, en una escala equivalente a 10^{-9} metros. A partir de ello se han obtenido diferentes materiales los cuales cuentan con propiedades y características que mejoran algunos productos o bien se crean nuevos, con aplicaciones en áreas como son: la medicina, textil, ambiental, por mencionar algunos (Antuez, 2000).

Entre los materiales nanotecnológicos se encuentran las nanofibras, materiales ultrafinos con un diámetro inferior a los 500 nanómetros, que son obtenidos por diversas técnicas, entre ellas el proceso de electrohilado, considerada la técnica más aplicada para la elaboración de nanofibras, la cual consiste en usar un campo eléctrico que se forma dentro de dos placas paralelas.

Por otro lado, el agua es de vital importancia para la vida y más aún para el consumo humano, cada persona necesita diariamente entre 20 y 50 litros de agua para beber y para la higiene. No obstante, el agua también es fuente de contaminación microbiana, misma que transfiere algunas enfermedades infecciosas que cobran anualmente hasta 3.2 millones de vidas, lo que equivale a un 6% de las defunciones totales en el mundo.

En el presente trabajo se desarrollaron nanofibras de alcohol polivinílico, con inclusión de componentes biocidas, las cuales fueron caracterizadas por distintas técnicas y aplicadas en un dispositivo piloto de purificación de agua empleando la nanofiltración; pretendiendo obtener agua apta para consumo humano con las características establecidas en la normatividad mexicana vigente.

Justificación

En México como en el resto del mundo es de suma importancia, innovar tecnologías que ayuden a abastecer agua potable a las regiones vulnerables.

En la actualidad existen diversos procesos para la purificación de agua para consumo humano, entre ellos se encuentran: la aplicación de ozono, desinfección por rayos ultravioleta, por osmosis inversa y el uso de filtros, no obstante, es necesario la búsqueda de nuevas opciones tecnológicas eficientes y económicas que permitan la obtención de agua apta consumo humano.

Entre las nuevas tecnologías, en el área de materiales se encuentra el proceso de electrohilado, que es un proceso innovador que permite la obtención de membranas a partir de nanofibras poliméricas y junto con la inclusión de agentes antimicrobianos como sales y óxidos de metales pesados pudiese ser una opción tecnológica viable para la obtención membranas que permitan procesos de purificación de agua para consumo humano.

Por otro lado, la plata y óxido de zinc se consideran nanobcidas eficientes para aplicaciones biológicas y procesos relacionados con la desinfección del agua (Fahimirad *et al.*, 2019; Mukherjee *et.al*, 2018).

Aunado a lo anterior en la presente investigación se evaluó la eficiencia bactericida de nanofibras poliméricas de alcohol polivinílico (PVA) con la inclusión de metales considerados nanobcidas, aplicadas a sistemas piloto de purificación de agua para generar una alternativa para la distribución de agua potable, enfermedades provocadas por consumo de agua contaminada, por mencionar algunas.

Hipótesis

Es posible desarrollar una membrana a partir de nanofibras de PVA, plata y óxido de zinc con propiedades bactericidas cuya implementación en un sistema purificador de agua permita la obtención de agua para consumo humano.

Objetivo general

Obtener nanofibras de alcohol polivinílico (PVA), con nanopartículas de plata (Ag) y óxido de zinc (ZnO) con propiedades bactericidas, para su implementación en un sistema piloto purificador de agua para consumo humano.

Objetivos específicos

- Obtener nanofibras de PVA, con nanopartículas de plata y óxido de zinc a partir del método de electrohilado.
- Determinar las características físicas y químicas de las nanofibras obtenidas.
- Determinar la efectividad bactericida de la nanofibras.
- Construir un dispositivo piloto para realizar el proceso de purificación de agua de consumo humano.
- Evaluar la calidad del agua obtenida en el purificador de agua y determinar el cumplimiento con la normatividad mexicana vigente.

Capítulo I: Antecedentes teóricos.

1.1. Nanotecnología

De acuerdo con la Real Academia Española, el término nanotecnología se define como “Tecnología de los materiales y de las estructuras en la que el orden de magnitud se mide en nanómetros, con aplicación a la física, la química y la biología” (RAE, 2020). La figura 1.1 muestra una representación de las escalas de las estructuras con tamaño nanométrico y otros materiales u organismos, lo que permite comprender mejor el tamaño de estos materiales.

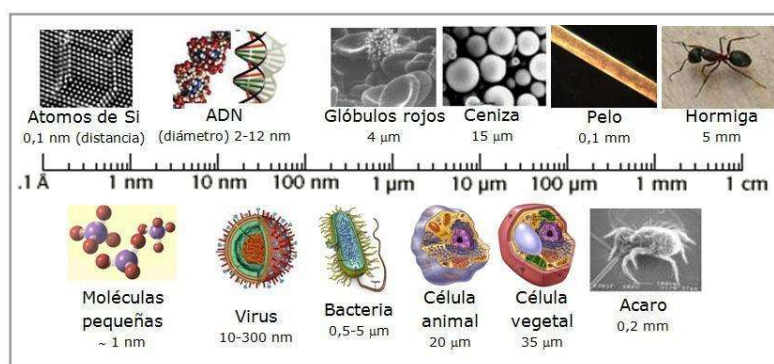


Figura 1.1. Escala nanométrica
Extraído de: Britto, M., & Castro, R. (2012).

La nanotecnología apunta a soluciones vanguardistas para la remediación de problemas ambientales y muchos otros enfrentados por la humanidad (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2010). A pesar de ser una rama de la tecnología quizá poco estudiada se han logrado resultados favorables con aplicaciones importantes, en la tabla 1.1 se muestran algunas de ellas.

Tabla 1.1. Aplicaciones de la nanotecnología

Ítems	Campo	Nanomateriales	Uso	Autores
1	Medicina	Nanorobot, medicamento nano encapsulado	Diagnóstico y terapias	Madrid & Jesús (2014)
2	Textil	Estructuras nanométricas	Hilados, tejidos, indumentarias médicas	Pardo & Milagros (2017)
3	Productos farmacéuticos	Nano-sensores, nano-cerámica	Embalajes para alimentos y productos farmacéuticos	Talavera <i>et.al</i> (2018)
4	Industria Alimentaria	Semillas nano-encapsuladas, nano-materiales orgánicos	Agricultura y ganadería	Tapia (2017)
5	Ambiental	Nanopartículas	Aplicación en el agua aire y suelo	Alarcón (2014)
6	Otras aplicaciones	Nanopartículas	Cosmetología, higiene, electrodomésticos y pinturas	Guerra (2012)

Nota. Fuente: Calcina Mamani Raque y Vigo Rivera Juan Eduardo, (2020).

En el campo ambiental, el desarrollo y aplicación de la nanotecnología, de manera general incluye el uso de las nanopartículas para atrapar contaminantes en el agua, suelo y aire o en su defecto para mejorar los sensores de emisiones de gases. En la tabla 1.2 se muestran los métodos de aplicación de nanomateriales aplicables a esos rubros.

Tabla 1.2. Aplicaciones de la nanotecnología en la rama ambiental.

Remediación	Aplicación	Método de aplicación
Aire	Aire con sustancias contaminantes	Barreras reactivas permeables y otros
Suelo	Tierras contaminadas con petróleo y metales pesados	Nanomateriales encapsuladores y otros
Agua	Remediación de agua	Filtros, coaguladores, etc.

Nota. Fuente: López *et al.* (2018).

1.1.1. Nanomateriales (NsM)

Los nanomateriales se definen como los materiales conformados por aglomerados, cristales o moléculas, que tienen dimensiones entre 1 a 100 nanómetros, y que de acuerdo con esto se pueden clasificar como lo indica la siguiente tabla 1.3 (Rodríguez, 2009).

Tabla 1.3. Clasificación de nanomateriales.

Nanoestructura	Tamaño	Materiales
Aglomerados, nanocristales (Quantum dots)	Radio, 1-10 nm	Metales, semiconductores, materiales magnéticos.
Otras partículas	Radio, 1-100 nm	Óxidos cerámicos
Nanobiomateriales	Radio, 1-5 nm	Membranas proteicas
Nanoalambres	Diámetro, 1-100 nm	Metales, semiconductores, óxidos, sulfuros, nitruros.
Nanotubos	Diámetro, 1-100 nm	Carbono, BN, GaN.
Nanobiovarillas	Diámetro, 5 nm	DNA
Superficies y películas delgadas	Grosor, 1-100 nm	Semiconductores, metales, DNA.
Arreglos bidimensionales de nanopartículas	Área, varios nm ² -µm ²	Semiconductores, materiales magnéticos.
Súper celdas 3D	Pocos nm en las tres dimensiones	

Nota. Fuente: Rodríguez, J. (2009).

Los nanomateriales cuentan con propiedades diferentes a las macroestructuras debido principalmente al efecto superficial, causante de la resistencia eléctrica y el efecto cuántico enfocado en el estado energético, ambos afectan de manera directa en las propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas y magnéticas, y por tanto a su estabilidad estructural (Rodríguez, 2009).

1.1.2. Nanobicidas

Los nanobicidas son materiales de tamaño nanométrico capaces de eliminar bacterias; cabe resaltar que, la presencia de bacterias es uno de los principales factores que se deben evaluar para determinar la calidad microbiológica del agua (Fahimirad *et.al*, 2020).

Los nanobicidas o también llamadas nanopartículas antimicrobianas se dividen en tres categorías, metales y óxidos metálicos, siendo los más estudiadas Ag, ZnO, CuO, TiO₂; otros nanomateriales muy empleados son los modificados o sintetizados fullerenos, como la nanomagnetita (nC₆₀) y nanotubos de carbono y finalmente también se han estudiado sustancias antibacterianas naturales, como aceites esenciales, extractos vegetales y biopolímeros como el quitosano (Fahimirad *et.al*, 2020).

En la presente investigación se evaluó la eficacia de las nanopartículas metálicas para eliminar las bacterias presentes en agua, mismas que fueron incluidas en nanofibras elaboradas por la técnica de electrohilado (Noriega-Treviño, 2012).

1.2. Electrohilado

El electrohilado, es una técnica de fabricación de fibra electrostática, que ha despertado interés y atención en los últimos años, debido a su versatilidad y aplicación potencial que incluyen ingeniería de tejidos, biosensores, filtración, apósitos para heridas, administración de fármacos e inmovilización de enzimas (Travis, 2008).

El electrohilador utiliza fuerzas electrostáticas para producir fibras finas, cuyo diámetro medio varía entre 100 nm y 500 nm. Las ventajas del proceso de electrohilado son su sencillez, técnica y su fácil adaptabilidad (Subbiah, 2005).

En la figura 1.2 se aprecia el montaje para la ejecución de la técnica de electrospeinning, mismo que consta de un capilar que expulsa la solución polimérica (aguja, cono, etc.); una fuente de alto voltaje que posee dos electrodos, los cuales deben conectarse uno al lugar de salida de la solución y otro directamente al plato colector (lamina de metal conductor, mandril rotativo, etc.) donde se depositarán las fibras posteriores a la evaporación del disolvente (Thandavamoorthy, 2004).

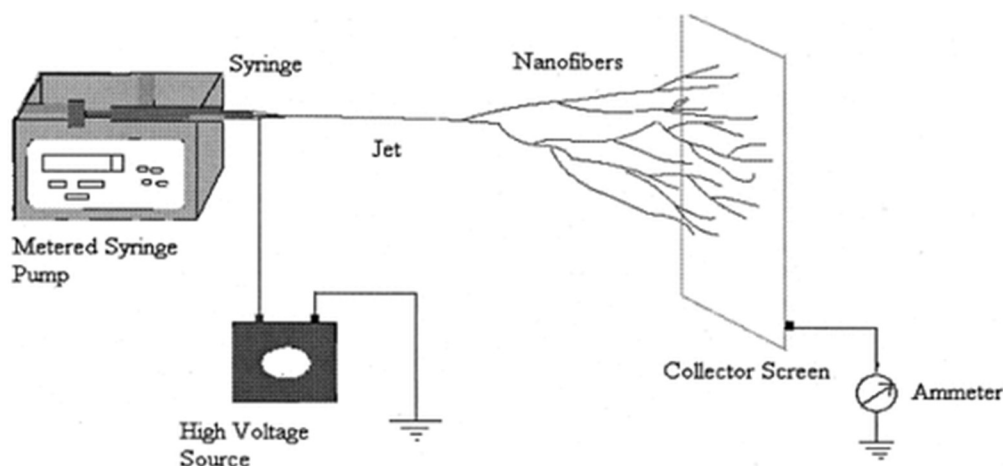


Figura 1.2. Esquema de Electrohilado
Extraído de: Thandavamoorthy Subbiah, G. B. (2004).

1.2.1. Parámetros de operación

Para la obtención de nanofibras se deben tomar en cuenta diversos parámetros operacionales, entre ellos: la velocidad de alimentación de la solución, el voltaje aplicado, la distancia entre la boquilla, el colector, así como también las propiedades del material, la concentración de la solución, viscosidad, tensión superficial, conductividad, y la presión de vapor (Li Wan-Ju, 2002).

a) Voltaje.

Dentro de las variables de proceso o también denominada externas se presenta el voltaje. El voltaje es uno de los parámetros más importantes dentro del proceso de electrospinning, algunos autores (Li Wan-Ju, 2002) afirman que aplicar voltajes altos se obtienen fibras con mayores diámetros en el colector y en caso contrario a voltajes bajos decrece el diámetro de las nanofibras y surge la posible aparición de defectos en las fibras (gotas). La influencia del voltaje depende además de las propiedades viscoelásticas de la solución polimérica, por ello es importante analizar el comportamiento para cada polímero con su respectivo disolvente.

b) Flujo de salida.

Un flujo bajo de la solución polimérica del inyector podría ser benéfico, ya que el disolvente tendría más tiempo para evaporarse evitando la formación de defectos en las fibras (Zong, 2002). Es importante que durante la experimentación se identifique el flujo óptimo de la solución a la salida del inyector para obtener un cono de Taylor estable (Li Wan-Ju, 2002).

c) Distancia entre la punta de la aguja y el plato colector.

Las propiedades de la solución y la variación de la distancia entre el inyector y el plato colector tienen efectos en la morfología y diámetro de las fibras. Al trabajar con una distancia muy grande las fibras electrohiladas podrían romperse debido a su propio peso, especialmente si las fibras son de diámetro pequeño, mientras que una mínima distancia es requerida para dar a las fibras el tiempo suficiente para que el disolvente se evapore antes de alcanzar el plato colector. Con distancias muy grandes o demasiado pequeñas se ha observado la aparición de gotas o fibras húmedas y por consecuencia fibras aplanadas o con forma de cintas. Si bien no se limita la distancia de la aguja y el colector se han realizado investigaciones con distancias de 6 a 18 cm, aunque la mayoría de los autores coinciden en que con mayores distancias la solución tendrá mayor tiempo de vuelo lo que promoverá un mayor estiramiento de las fibras antes de depositarse en el plato colector (Kang, *et.al.* 2010).

1.2.2. Polímero: Alcohol polivinílico PVA

El polímero debe estar diluido en el o los disolventes que permitan una dilución completa del mismo (para evitar taponamiento del inyector durante el proceso) pero que a la vez promuevan la obtención de fibras homogéneas. Los polímeros empleados en el proceso de electrohilado son dieléctricos y en presencia de un campo eléctrico pueden considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente (Dekker, 1959).

El alcohol polivinílico (PVA por sus siglas en inglés) es un polímero no tóxico, altamente soluble en agua y es ampliamente utilizado en química biomédica y alimentaria porque tiene biodegradabilidad y biocompatibilidad y tiene excelentes propiedades para formar películas, tiene propiedades emulsionantes y como adhesivo, también, alta resistencia y flexibilidad, así como altas propiedades de barrera para el oxígeno y los aromas, es totalmente degradable y se disuelve rápidamente, con un punto de fusión de 230°C. (Narayanan *et.al.*, 2020).

Dentro de las aplicaciones del PVA están los recubrimientos, además se ser utilizado para la síntesis de otros polímeros como el nitrato de polivinilo (PVN) y se ha usado en medicamentos de liberación controlada, entre otros. De acuerdo con sus propiedades se ha considerado adecuado para realizar fibras electrohiladas, ya que se obtienen nanofibras libres de perlas suaves y uniforme.

Previamente las fibras electrohiladas han tenido a aplicaciones en la rama de agua en procesos de filtración para desalinización, eliminación de metales, filtración de materiales orgánicos, micropartículas y eliminación de microorganismos debido a su morfología porosa interconectada y la distribución de nanoporos uniformes en dichas fibras (Wang *et al.*, 2013)

Aunado a lo anterior la inclusión de partículas metálicas ha sido parte de las investigaciones para mejorar las propiedades de la nanofibras, los cuales han tenido resultados favorables, por lo que es importante conocer las características fisicoquímicas de los compuestos de inclusión previo a realizar el proceso de experimentación.

1.3. Propiedades de los metales de inclusión

Los compuestos de inclusión propuestos en esta tesis son considerados agentes antibacterianos, con diversas aplicaciones en diferentes sectores industriales, incluidos el medio ambiente.

Se pueden clasificar en dos tipos, orgánicos e inorgánicos. La mayoría de los agentes antibacterianos orgánicos son sensibles a la temperatura o la presión, mientras que los inorgánicos como el metal y el óxido de metal han recibido más reconocimiento en la última década debido a su mayor durabilidad, menor toxicidad, mayor selectividad y resistencia al calor (Guo, *et.al.* 2015).

En el proceso de experimentación se utilizaron nanopartículas de plata (NPs-Ag) y nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) comerciales. Estos metales han obtenido resultados favorables en diversos trabajos, Tan *et.al.* 2015, se concluyó que las nanofibras que contenían AgNP exhibieron efectos inhibitorios crecientes contra las cepas patógenas microbianas con posibles aplicaciones en componentes de apósitos para heridas, recubrimientos protectores, dispositivos biomédicos y purificación del agua, y en el caso las NPs-ZnO, Shekh *et.al.* 2018 se encontró que las nanofibras de PVA y NPs-ZnO inhibieron eficazmente el crecimiento de bacterias grampositivas, *B. subtilis*.

De acuerdo con lo anterior se evaluó el efecto biocida que tienen partículas de plata (NPs-Ag) y de óxido de zinc (NPs-ZnO) en las fibras de PVA. Cabe resaltar que, ambos óxidos no son tóxicas, para el ser humano, por lo que su uso para el proceso de purificación es viable (Shohreh Fahimirad, 2020).

1.3.1. Plata

La plata es uno de los metales considerado el biocida más eficiente empleado en filtros antimicrobianos, material para vendajes para heridas, desinfección de agua, sensores, filtración de químicos y gases, tela protectora y filtración de aire, ya que es el elemento más tóxico para los microorganismos. La plata posee 3 mecanismos de acción para actuar sobre los virus y bacterias, que consiste en (Leyva Gómez, 2013):

1. Los iones metálicos influyen en la permeabilidad de la membrana celular. Esto debilita considerablemente los microorganismos y los hace vulnerables a los biocidas oxidantes.
2. La plata se une al puente de sulfuro de las proteínas destruyendo de este modo la actividad enzimática de los microorganismos, dado que la plata forma puentes sulfuro con grupos tiol, grupos carboxilos y aminos de las enzimas, causando su desactivación. Este fenómeno limita la posibilidad de producir energía de la célula, causando su muerte.
3. La plata forma complejos con el material hereditario de los microorganismos (ADN y ARN) impidiendo de esta forma la reproducción. Su proliferación disminuye hasta eliminarse por completo.

La amplia gama de actividades antibacterianas y los efectos de virulencia de los iones Ag^+ hacia varios microorganismos (por ejemplo, bacterias, virus y hongos) se lleva a cabo en presencia de bajas concentraciones de los iones, siendo este una ventaja importante de su uso (Shohreh Fahimirad, 2020).

La figura 1.3, muestra los mecanismos que pueden ocasionar las nanopartículas sobre una bacteria.

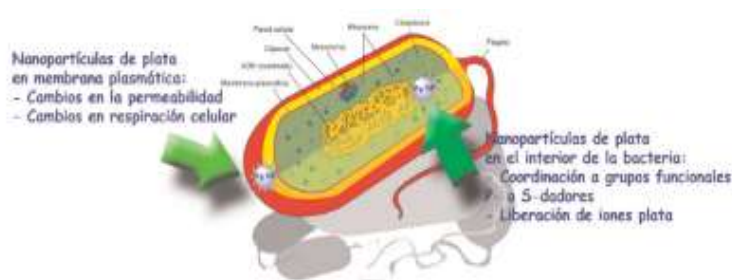


Figura 1.3. Esquema de la actuación de las nanopartículas de plata sobre una bacteria.

Extraído de: Monge Miguel (2009).

1.3.2. Óxido de Zinc

Muchos estudios han demostrado que algunas nanopartículas (NPs) hechas de óxidos de metales, tales como las nanopartículas de ZnO, tienen una toxicidad selectiva para las bacterias y sólo exhiben un efecto mínimo sobre las células humanas, por lo que se recomienda su uso potencial en las industrias agrícolas y de alimentos. El óxido de zinc (ZnO), se caracteriza por la capacidad foto catalítica contra especies químicas y biológicas, es un material semiconductor de la familia II-VI, ya que el Zn y O pertenecen a los grupos II y VI respectivamente, con una amplia banda de energía de 3.3 eV y una elevada energía de excitación (60 meV) a temperatura ambiente (Sirelkhatim *et al.*, 2015).

Recientemente, el óxido de zinc (ZnO) ha recibido mucha atención debido a su perfil no tóxico, como semiconductor con una banda prohibida ancha (3.3 eV), es abundante en la naturaleza y respetuoso con el medio ambiente a un precio bajo, aunado a lo anterior se ha informado que las nanopartículas de ZnO exhiben fuertes actividades antibacterianas en un amplio espectro de bacterias y por ello su actividad antibacteriana eficaz, contra Bacterias Gram-positivas, Gram-negativas e incluso contra esporas (Guo *et al.*, 2015), tiene gran poder adsorbente, con estabilidad mecánica, química y térmica frente a diversas condiciones ambientales (Tiwari *et al.*, 2018). Las NPs de ZnO se consideran bioseguros y biocompatible (Hameed *et al.*, 2016; Farrokhi *et al.*, 2019). Existen varios mecanismos que se han propuesto para explicar la actividad antibacteriana de nanopartículas de ZnO. La generación de peróxido de hidrógeno en la superficie de ZnO se considera como un medio eficaz para la inhibición de crecimiento bacteriano, otro puede ser la liberación de especies de oxígeno (ROS) de la superficie del ZnO, las cuales causan daño a los microorganismos, dañando el ADN, las membranas y las proteínas celulares (Figura 1.4).

Las nanofibras compuestas que contienen nanopartículas de zinc y plata muestran una fuerte actividad antibacteriana.

Por ello se cree que los filtros de nanofibras electrohiladas que contienen un agente antibacteriano pueden ser una solución prometedora para la filtración eficaz de

microorganismos, no solo en el agua sino en el aire, específicamente en instalaciones cerradas como hospitales u otros lugares que son más propensos a las infecciones bacterianas (Chaudhary, Gupta, Mathur, 2014).

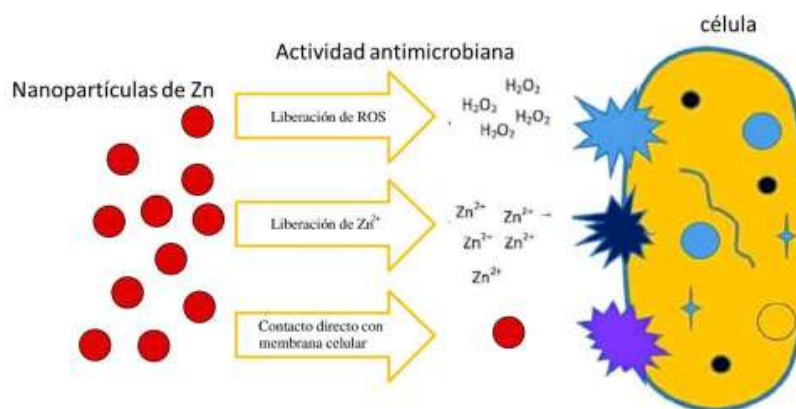


Figura 1.4. Esquema de la actuación de las nanopartículas de óxido de zinc sobre una bacteria.
Extraído de: Urdapilleta Inchaurregui Vianey (2020).

1.4. Reticulación (crosslinking)

El alcohol polivinílico tiene entre sus principales características su hidrosolubilidad, siendo una condición necesaria cambiar su solubilidad para poder usarlo como medio filtrante en el proceso purificación, por ello se debe realizar un proceso de reticulación (Chen *et.al* 2021).

De acuerdo con las definiciones encontradas, el proceso de reticulación se refiere a la interconexión de redes, que en un enfoque químico se utiliza para reacciones en las que las moléculas se unen mediante la introducción de uniones covalentes y la formación de redes tridimensionales entre los componentes (Destaye et al., 2013).

Para el proceso de reticulación se usan varios reactivos como agentes de reticulación entre ellos el gliceraldehído, la genipina, la carbodiimida, la epíclorhidrina, la procianida, el polimetáfosfato de sodio, el glucano modificado, la sacarosa oxidada, y el glutaraldehído,(GA), este último es económico y de alta eficiencia de reticulación, lo que puede disminuir en gran medida la solubilidad en agua y mejorar las propiedades mecánicas de las nanofibras; es un compuesto

químico de la familia de los aldehídos que se usa principalmente como desinfectante de equipos médicos, odontológicos y de laboratorio, y se considera un compuesto estable lo que implica que no haya riesgo de polimerización (Zhan *et.al*, 2016).

Se han experimentado con diferentes técnicas para realizar el proceso de reticulación y obtener materiales con las características deseadas, puede ser incluyéndolo en la solución polimérica previa a electrohilar (Chen *et.al*. 2021); sumergiendo las nanofibras en glutaraldehído y acetona, (Hulupi, M., & Haryadi, H. (2019), El último es a partir de exposición de la fibra con los gases que desprende el glutaraldehído ya sea inducidos a alta temperatura o bien a temperatura ambiente (Ullah *et.al*. 2020). Se han evaluado diferentes concentraciones de glutaraldehído y acetona y tiempo de permanencia y han tenido resultados favorables, siendo menos abrasivo ya que no hay un contacto directo con la fibra, sino solo los vapores.

Los nanocompuestos de polímero reticulado tienen una estructura única, especialmente en combinación con polímeros solubles en agua. Las propiedades del material original del polímero se conservan, en el caso de PVA por ejemplo ser no tóxico, sin embargo, se obtiene mejor resultado en características de la superficie de la fibra. La reticulación de GA afecta el área de superficie específica de las nanofibras compuestas y afecta la hidrofobicidad de la superficie. (Chen *et al.*, 2021).

De acuerdo con la reacción de entrecruzamiento se debe a la formación de puentes de acetal entre los grupos hidroxilo en PVA y la molécula de aldehído de GA. Estas reacciones de entrecruzamiento entre PVA y GA pueden ser entrecruzamientos intramoleculares y/o intermoleculares (Figura 1.5) (Destaye et al., 2013).

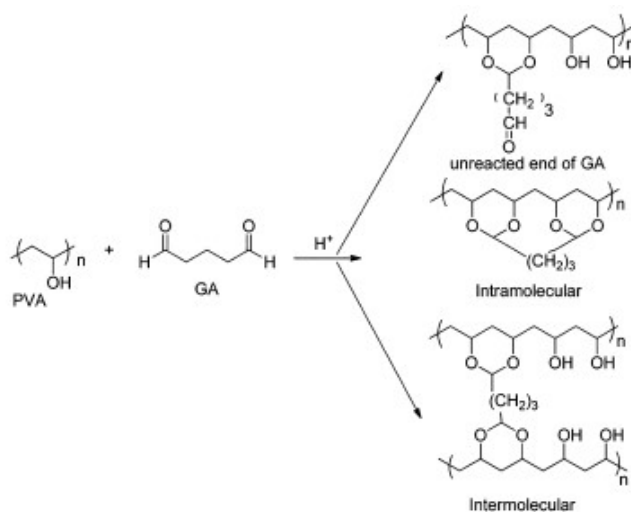


Figura 1.5. Ilustración esquemática de la reacción de PVA con GA y su cruce intermolecular y/o intramolecular. Producto de enlace y el extremo sin reaccionar del aldehído
Extraído de: Addisu Getachew Destaye, Cheng-Keng Lin, and Cheng-Kang Lee, 2013.

El estudio de Hulupi y Haryadi, en (2018), las nanofibras de PVA reticuladas tienen una solubilidad más baja designada por un pequeño porcentaje en el grado de hinchamiento en un 27 %, en comparación con las nanofibras poliméricas no reticuladas. Y Destaye *et.al* (2019), demostraron que las nanofibras de PVA electrohiladas, pueden reticularse de manera efectiva al exponerla a GA en fase de vapor y hacerla insoluble en agua.

1.5. Proceso de Filtración.

El proceso de purificación de agua consiste en una serie de pasos en el cual se somete agua para eliminar microorganismos y residuos con el fin de obtener agua de mayor pureza y por tanto de calidad consumible.

Como se observa en la figura 1.6 existen diversos procesos para la purificación del agua, los cuales se pueden clasificar según su operación y son: deposición de materia suspendida, tratamiento físico/químico de coloides y el tratamiento biológico.



Figura 1.6. Proceso de purificación de agua

Extraído de: <https://www.aquanext.cl>

Como se puede observar durante el proceso de purificación, se aplica la filtración.

La filtración es una operación unitaria donde se separan los sólidos que se encuentran suspendidos en un medio líquido haciendo pasar la suspensión a través de un medio poroso, el cual va a retener las partículas sólidas dejando pasar el líquido. Los sólidos quedarán retenidos en función de su granulometría y según sea el tamaño de los poros.

Se le conoce como medio filtrante a la barrera que retiene los sólidos y deja pasar el líquido, puede ser un tamiz, una tela, un tejido de fibras, fieltro, membranas poliméricas o un lecho de sólidos. El líquido que atraviesa el medio filtrante se denomina filtrado.

El proceso de filtración se puede realizar a partir de 3 fuerzas impulsoras: gravedad, presión o vacío y centrífuga (Guizard, 1999).

Existen varias técnicas de filtración que emplean membranas entre ellas la Microfiltración, la Ultrafiltración, Nanofiltración y la Osmosis. Estas técnicas tienen una transferencia de materia bajo el efecto de un gradiente de presión y se llevan a cabo en un modo de filtración tangencial (Figura 1.7), es decir, cuando el líquido a filtrar circula de manera permanente y con cierta velocidad a lo largo de la superficie de la membrana.

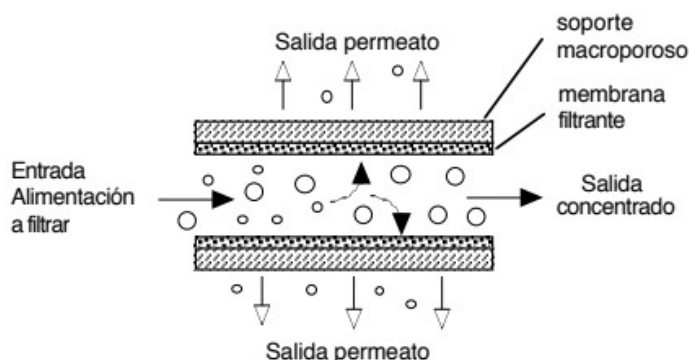


Figura 1.7. Principio de la filtración tangencial (en tubo)
Extraído de: Guizard, (1999)

Estas especies pueden presentarse en suspensión o en solución en el líquido a tratar (Guizard, 1999). Las técnicas de filtración tangencial que utilizan membranas artificiales empiezan con la separación de partículas microscópicas o de especies biológicas tales como las bacterias, en cuyo caso se trata de microfiltración. Para especies o fragmentos de materias más pequeñas como los coloides, las macromoléculas o los virus, se emplea la ultrafiltración. En cuanto a las pequeñas moléculas de masa molecular inferior a 1000 se separan por una técnica llamada nanofiltración. Esa técnica permite también separar iones multivalentes de iones monovalentes. En cuanto a la ósmosis inversa es la técnica que permite detener la casi totalidad de las especies contenidas en un líquido. Se utiliza principalmente en un medio acuoso para obtener agua ultrapura. La figura 1.8 muestra las técnicas de filtración con membranas y algunas de sus características (Guizard, 1999).

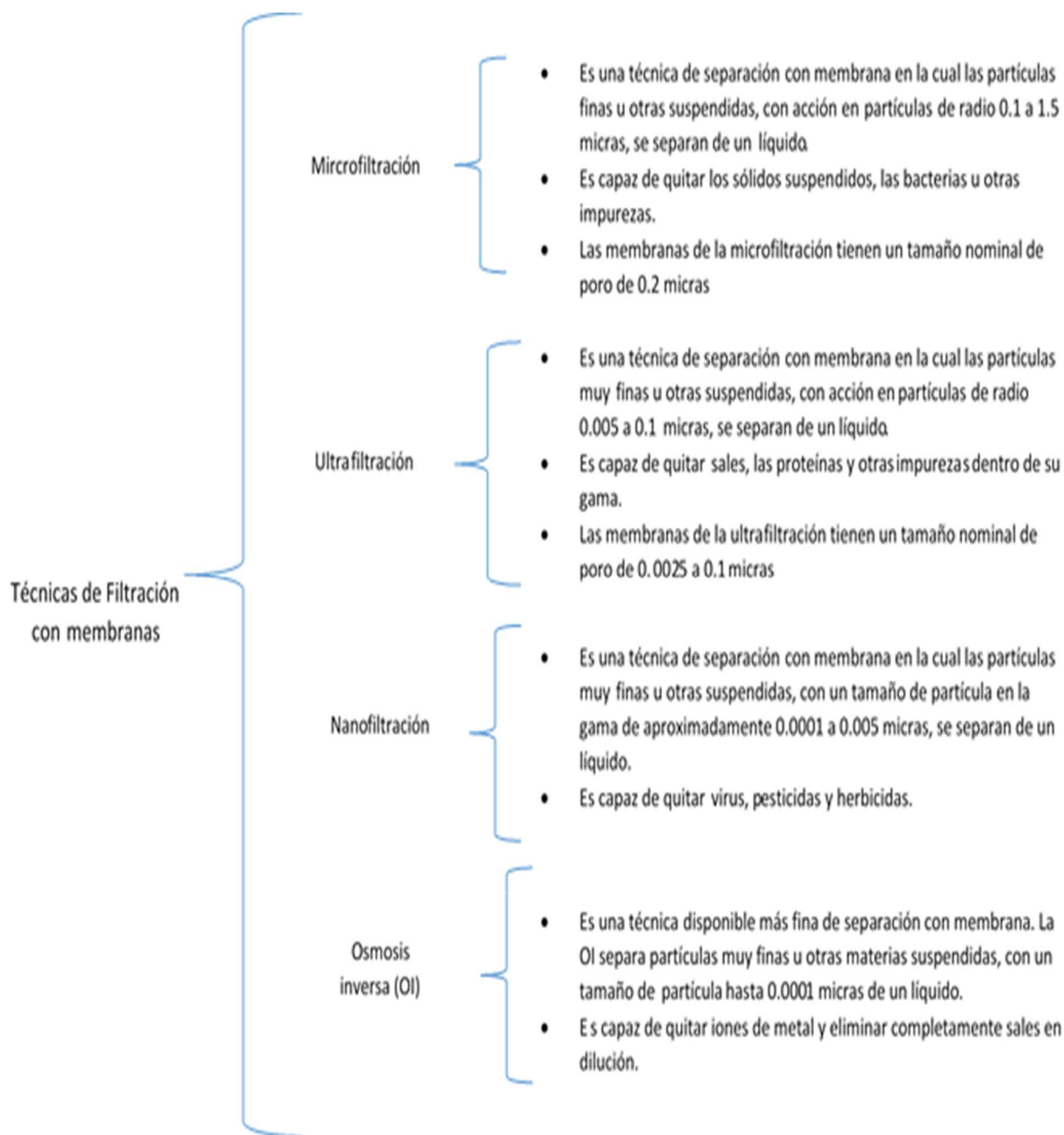


Figura 1.8. Diagrama de descripción de técnicas de filtración con membranas

Extraído de: Autoría Propia

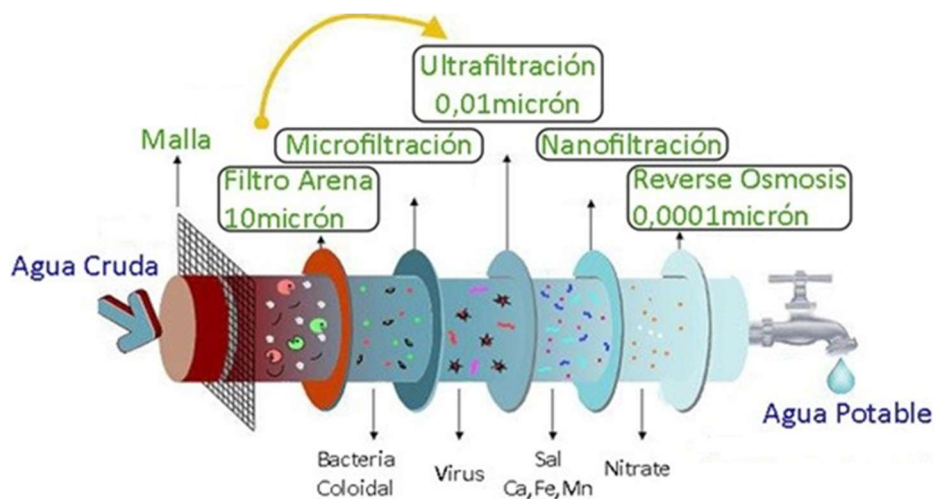


Figura 1.9. Comparación de técnicas de filtración por membranas
Extraído de: <https://www.aquatreatment.co/filtracion-por-membrana>

La figura 1.9 muestra los diferentes tipos de filtración por membranas y los organismos o sales que se eliminan de acuerdo con el tamaño de poro de cada tipo de membrana.

Es necesario que las membranas presenten ciertas características como son: alta permeabilidad, selectividad de contaminantes y mayor resistencia a la adherencia de microorganismos en la superficie; a la fecha se sigue trabajando en la obtención de membranas con estas propiedades (Hoek et al., 2003; Lind et al., 2009; Jeong et al., 2007). En la figura 1.10 se puede observar las distintas geometrías que puede tener una membrana, y dependiendo de ello serán las características que se obtienen.

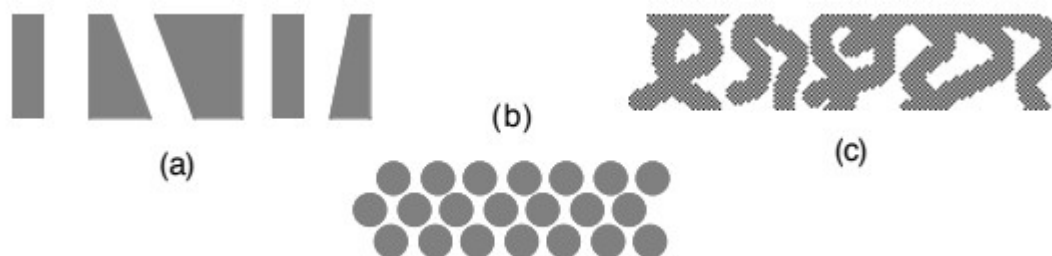


Figura 1.10. Geometría de poros en función de la estructura de la membrana. (a) poros cilíndricos, (b) y (c) poros con geometría compleja.

Extraído de: Guizard, (1999)

Durante el proceso de filtración suceden diversos fenómenos que con ayuda de diversas expresiones matemáticas se pueden comprender, tal es el caso de La Ley de Darcy, la cual establece la relación entre la velocidad de descarga y el gradiente hidráulico del flujo del agua en un medio poroso (Durán-Pinzón *et.al.* 2017).

$$\frac{-p}{L} = \frac{32v}{D^2}$$

(Ec. 1) Ley de Darcy

Se sabe que dependerá del medio filtrante para obtener un proceso de filtración eficiente, dentro de los materiales empleados se encuentran la tela, papel o material poroso y debe cumplir con ciertas características como es, tener facilidad para remover la fase sólida; ofrecer la mínima resistencia al flujo para la rápida formación de la torta de filtración; tener resistencia a las condiciones del proceso es decir, ser lo suficientemente fuerte para soportar la torta y aguantar bajo condiciones extremas del proceso; no debe obstruirse o sesgarse, es decir, tener alto rendimiento del líquido para un ΔP dado; debe ser químicamente inerte y no tóxico y debe permitir facilidad del retiro de la torta limpia; finalmente, no ser de alto precio (Martín *et.al* 2011). La resistencia total que se establece sobre el medio, incluyendo la de las partículas incrustadas, se llama resistencia del medio filtrante y es importante durante los primeros momentos de la filtración. La resistencia que ofrecen los sólidos, y que no se debe al medio filtrante, se llama

resistencia de torta. La resistencia de la torta es cero al iniciar la filtración, a causa de la deposición continua de sólidos sobre el medio, esta resistencia aumenta continuamente con el tiempo de filtración. En él existen resistencias que bloquean el paso del líquido de un lado al otro, siendo las dos más importantes y caso de estudio la resistencia de la torta (α) y la resistencia del medio filtrante (R_m), estas expresiones se conocen a partir de la ecuación general de la filtración (Hernández, 2022).

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\alpha \cdot C \cdot \mu}{(-\Delta P) g_c \cdot A^2} \frac{V}{A} + \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A}$$

(Ec. 2) Ecuación general de la filtración

Finalmente, con ayuda del número de Reynolds (Re), que es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido, dependiendo su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Cabe resaltar que la ecuación de Darcy es válida tanto para flujo laminar como para flujo turbulento de cualquier líquido en una tubería. El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido (Smiths, 2003). Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

Si el número de Reynolds es menor a 2300, el flujo será laminar y, si es mayor de 4000, el flujo será turbulento (Smiths, 2003).

$$Re = \frac{\rho V_s D}{\mu}$$

(Ec. 3) Ecuación de número de Reynolds

En el proceso de purificación de agua no es la excepción, es por ello por lo que debe ser evaluado y esto se realiza a partir de análisis químicos y físicos del agua que se obtiene. Para ello existen técnicas fisicoquímicas que permiten evaluar la calidad del agua, y normatividad que indica el rango de aceptación para confirmar que el proceso de purificación ha sido eficiente.

1.6. Normatividad vigente en agua para consumo humano

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFM) menciona distintos tipos de normas oficiales mexicanas entre las que se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX).

Es indispensable conocer las leyes y normas relativas al suministro de agua potable ya que ellas definen las funciones y responsabilidades de quienes suministran el servicio y constituyen la base para que la autoridad competente determine si se está prestando adecuadamente el servicio.

Las NOM son de uso obligatorio en su alcance, y para consumo humano se pueden identificar las siguientes:

La norma oficial mexicana NOM 012-SSA1-1993, "Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados" establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados para proteger el agua de contaminación.

La norma señala que debe preservarse la calidad bacteriológica del agua en cualquier parte del sistema, hasta en los puntos más alejados de la red de distribución mediante una desinfección continua y permanente que garantice la existencia de cloro residual libre entre 0.5 a 1.0 mg/L. La vigilancia del cumplimiento de esta Norma corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas.

El objetivo de NOM 201-SSA1-2015, "Productos y servicios, agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel, especificaciones sanitarias", tiene como objetivo establecer las características y especificaciones sanitarias que deben cumplir el agua y el hielo para consumo

humano que se comercialice preenvasado o a granel y los establecimientos que se dediquen al proceso o importación de dichos productos. La norma se considera de observancia obligatoria en el territorio nacional para las personas físicas o morales que se dedican al proceso o importación de agua y hielo para consumo humano.

La 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” tiene como objetivo establecer los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Las NOM’s citadas son responsabilidad del Sector Salud quien las vigila en coordinación con la Comisión Nacional del Agua y la observancia de estas tres normativas permite la obtención y aseguramiento de agua de calidad para consumo humano.

Dentro de las NOM se mencionan normas NMX, las cuales sugieren procedimientos para la determinación de los parámetros evaluados.

1.7. Estado del Arte

La nanotecnología enfocada a la elaboración de materiales o bien su mejora ha sido un área ampliamente investigada, y en el caso de las nanofibras no es la excepción, la investigación teórica nos dio pauta al diseño de la metodología, esperando los resultados favorables en la aplicación a la purificación del agua.

En la tabla 1.4 se enlistan los trabajos previamente realizados sobre el tratamiento de agua usando nanofibras de óxidos y sales metálicas con efecto bactericida resaltando que los nanobactericidas como las nanopartículas metálicas y los nanomateriales artificiales, se incorporan con éxito en nanofibras cuyo resultado muestran una alta actividad antimicrobiana y estabilidad en el agua (Marelize & Thomas, 2010).

Tabla 1.4. Investigaciones previas sobre nanofibras y agua

Título	Autor (es)
Nanopartículas de óxido de grafeno como agente biocida incrustados en membranas de microfiltración electrohiladas para tratamiento de aguas: una revisión sistemática	(Sandoval Acuña & Torres Becerra, 2021)
Eliminación eficiente de bacterias y virus del agua mediante nanofibras electrohiladas	(Fahimirad <i>et al.</i> , 2021)
Desarrollo de un purificador de agua portátil multifuncional avanzado	(Taheran <i>et al.</i> , 2019)
Nanotecnología para la depuración de agua: Membrana nanofibrosa electrohilada en el tratamiento de agua y aguas residuales	(Tlili & Alkanhal, 2019)
El potencial de las nanofibras y nanobactericidas en la depuración de agua	(Marelize & Thomas Eugene, 2017)
Membranas electrohiladas de doble acción para tratamiento de agua	(Amariei <i>et al.</i> , 2016)
Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas.	(Sánchez <i>et al.</i> , 2012)
Separación de partículas micrónicas a submicrónicas del agua: membranas nanofibrosas de nailon 6 electrohiladas como prefiltros	(Aussawasathien <i>et al.</i> , 2008)

Nota. Fuente: Autoría propia

Actualmente se tienen herramientas para evaluar las condiciones de los materiales aplicados a nuevos métodos, a partir del cálculo de propiedades específicas, mismas que en el proceso de experimentación son clave para obtener resultados positivos.

Capítulo II: Materiales y Métodos.

Los materiales y equipos que se utilizaron en la parte experimental se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Equipo propuesto para utilizar durante el proceso de experimentación

Equipo	Función	Características	Imagen
Electrohilado	Obtención de micro y nanofibras	Marca: Prendo Control de Temp. Digital rango de temperatura: ambiente a 60°C sensibilidad de temperatura: +/- 0.5°C voltaje 120V Watts 381W.	
Reómetro	Análisis reológico	Anton Paar modelo RheolabQC (E.U.A.)	

Microscopio MEB de bajo vacío	Estructura de las micro y nanofibras	Modelo JSM- 5300 (E.U.A.) el cual trabaja con una diferencia de potencial de 10KV, detectando electrones retro- dispersados y en amplificaciones de 5,000, 10,000 y 20,000X.	
Calorímetro de Barrido TA Q500	Caracterización térmica de fibras	TA Q500 de TA Instruments	

FTIR modelo VERTEX 70	Confirmar la presencia de sales metálicas.	Marca: Vertex 70, Bajo un rango espectral de 370 a 5,000 cm ⁻¹ Temperatura de 24°C, Este equipo se encuentra en el Centro Universitario de Vinculación y Transferencia de Tecnología de la BUAP. Software: Origin 8.	
Micro balanza	Isotermas de adsorción	Marca GAHN modelo C-33	

Nota. Fuente: Autoría propia

La investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería en Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química, perteneciente a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

2.1. Obtención de nanofibras con plata y óxido de zinc

Las nanofibras se obtuvieron a partir de una solución polimérica homogénea de alcohol polivinílico (PVA) al 10% w/v en relación 1:1 con nanopartículas comerciales de plata (NPs-Ag) y óxido de zinc (NPs-ZnO), ambas marcas Sigma-Aldrich, posteriormente se realiza el proceso de electrohilado. Los parámetros de electrohilado se fijaron a 12 kV, 12 cm de distancia inyector-colector, velocidad de flujo 0.6 mL/h y velocidad del colector de 88 rpm. Posteriormente fueron reticuladas con vapores de glutaraldehído 48 h a temperatura ambiente con la finalidad de evitar la solubilidad del soporte.

2.2. Caracterización de las Nanofibras (NFsQ)

a) Microscopía Electrónica de Barrido

Se tomó 1 cm² de cada una de las nanofibras electrohiladas y se sometieron a un baño de oro al alto vacío durante 1 minuto con ayuda de una unidad de devastado y bombardeo de iones marca Denton Vacuum modelo Desk V.

Las micrografías se obtuvieron a 500X, 1000X, y 5000X con un voltaje de aceleración de 25 kV en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6610 equipado con el software Smile ViewTM. La determinación del diámetro de las nanofibras se realizó con el software de procesamiento de imágenes Image Jv1.51j8.

b) Espectroscopia de Infrarrojo

Los espectros de infrarrojo de las nanofibras electrohiladas se obtuvieron con un espectrofotómetro IR con transformada de Fourier (FT-IR) marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 100 equipado con ATR. Los espectros de infrarrojo se colectaron con el software SpectrumTM 10 incluido en el equipo, en un intervalo de número de onda entre 600 y 4000 cm⁻¹.

c) Calorimetría Diferencial de Barrido

El análisis térmico de las nanofibras se llevó a cabo en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) marca TA Instruments modelo 2010 equipado con un flujómetro de la misma marca y calibrado con indio ($T_m = 429.75 \text{ K}$). En una de las dos celdas de aluminio se agrega aproximadamente 2 mg de las fibras, mientras que la otra celda se coloca vacía para poder medir las diferencias de flujo de calor entre ambas. El análisis se realiza en atmósfera de nitrógeno con un flujo de 70 mL/min, mientras que la rampa de calentamiento fue establecida en 10 C/min en un intervalo de 25 a 600 °C. Las temperaturas de transición vítrea (T_g) y de fusión (T_m), así como las entalpías de fusión son calculadas haciendo uso del software Universal Analysis 2000 v4.5A.

d) Evaluación de actividad antimicrobiana.

Los efectos de la actividad antimicrobiana de las nanofibras se evaluaron mediante el método de difusión en disco, contra *Escherichia coli*, bacterias gramnegativas. Para el crecimiento bacteriano se utilizó agar de soja TRYPTICASA. Se colocaron las nanofibras de PVA con las NPs-ZnO, NPs-Ag, en discos de filtro (5 mm de diámetro) y se incrustaron en placas de Petri inoculadas (60 mm), posteriormente se incubaron a 37 °C durante 24 h. Estas pruebas se realizaron por triplicado.

2.3. Muestreo de Campo y análisis de Agua potable

Se recolectó muestra de agua potable del laboratorio 105 del edificio FIQ perteneciente a la Facultad de Ingeniería Química, esto de acuerdo con Norma Mexicana NMX-AA-014-1980 para el muestreo de cuerpos receptores y los parámetros son evaluados de acuerdo con la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994, de "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

2.3.1. Análisis fisicoquímicos del agua potable

a) Determinación de Turbiedad

La determinación se realizó con el turbidímetro o el nefelómetro, aplicando un método cuantitativo. La muestra se analizó en un tiempo no mayor a las 24 horas de colectada, a temperatura ambiente (NOM-038,2001).

b) Determinación de Sólidos disueltos totales (Met. Gravimétrico)

Se determinó la cantidad de sales solubles en el agua, a partir de su evaporación a 180°C a 100 mL agua previamente filtrada. La muestra homogenizada se pasó por un filtro estándar y luego se evaporó en una placa hasta sequedad, la cual se pesó hasta un obtener un valor constante a $180 \pm 2^\circ\text{C}$. La diferencia de peso de la cápsula corresponde a los sólidos totales disueltos, empleando una Balanza analítica de precisión 0.0001 marca Sartorius

c) Determinación de pH

La muestra homogenizada se sometió a la lectura de un potenciómetro, previamente verificado (pHmetro Thermo Instrument, H18424) hasta obtener un valor estable.

d) Determinación de Dureza total (Met. Complejométrico)

La dureza total se determinó por método volumétrico, con soluciones de EDTA y Negro de Eriocromo T como indicador, con viraje de color de rojo vino hasta color azul. El punto final de la titulación se obtuvo con un buffer que estabilice el pH a 10 (NOM-072,2001).

e) Determinación de color

Se realizó a partir de un comparador manual para tubos Nessler de 50 mL con escala de vidrios coloridos estandarizados equivalentes desde 2,5 a 100 Unidades Pt-Co. La muestra se analizó en un tiempo no mayor a las 24 horas de colectada, a temperatura ambiente (NOM-045,2001).

f) Determinación de cloro residual

El cloro residual se efectuó a partir de un medidor de color el cual tiene como principio colorimétrico (NOM-108,2001).

g) Determinación de cloruros

La determinación de cloruros realizó a partir de en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo, así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración (NOM-073,2001).

h) Determinación de AOX

El método se basa en la determinación de AOX en muestras de agua acidificada con ácido nítrico. Mediante la adición de nitrato sódico a la muestra y tratamiento del carbón activado tras la fase de adsorción con una solución de nitrato sódico exento de haluros, los compuestos halogenados inorgánicos, son desplazados del carbón, a continuación, el carbón activado cargado es quemado con corriente de oxígeno, con lo que los halógenos de compuestos orgánicos se convierten en haluros de oxígeno. Estos son transportados a la celda de valoración donde se cuantificaron por microcoulombimetría. Este parámetro indica la concentración en una muestra de agua de estos compuestos, que contienen cloro, bromo o yodo (ISO 9562,2004).

2.3.2. Caracterización microbiológica del agua

Se determinó la calidad microbiológica del agua potable, considerando los parámetros: Oxígeno disuelto (OD), DBO y calidad microbiológica.

a) Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Estas pruebas se realizaron de acuerdo con la norma NMX-AA-028-SCFI-2001, la cual consiste en la medición de la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) de cada muestra problema al inicio después de agregar sales, airar la muestra y depositarlas en botellas tipo Winkler, posteriormente

en 5 días medir el OD final. Los valores de oxígeno disuelto serán convertidos a DBO siguiendo la Ecuación 5.

$$DBO_i = OD_i - OD_6 \quad (5)$$

DBO_i= Demanda biológica de oxígeno al día i en mg/L de muestra.

OD_i=Oxígeno consumido por la sustancia de prueba al día i en mg/L.

OD₆=Oxígeno consumido por el medio mineral al día 5 en mg/L.

b) Cuantificación Microbiológica de coliformes

La NOM-127-SSA1-1994, establece que los agentes biológicos nocivos a la salud que deben cuantificarse son los microorganismos coliformes, para ello se siguió la técnica del número más probable, según la NOM-127-SSA1-1994, misma que establece los límites máximos expresados en UFC (Tabla 2.2)

Tabla 2.2. Límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM -127-SSA1-1994

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml
	2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml
	Cero UFC/100 ml

Nota. Fuente: Autoría propia

Para la técnica de filtración por membrana los resultados se expresaron en UFC/100 mL (unidades formadoras de colonias por 100 mL), para la técnica del número más probable los resultados se reportan en unidades de NMP/100 mL (número más probable por 100 mL).

2.4. Construcción del Sistema Piloto

Se construyó un sistema de filtrado durante el proceso de experimentación, mismo que se presenta a continuación en la figura 2.1:

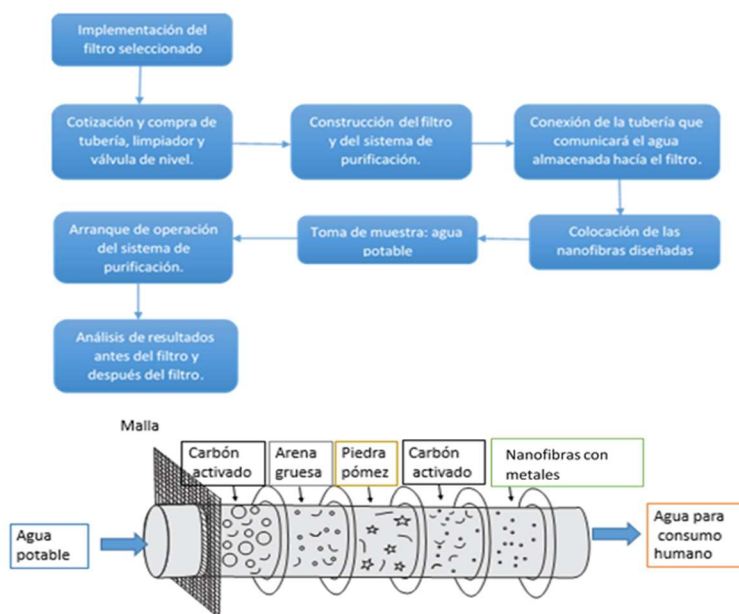


Figura 2.1. Diagrama de implementación de filtro seleccionado para el sistema de purificación.

Extraído de: Autoría propia

En el diagrama de la figura 2.2 se presenta el proceso que se llevó a cabo para el presente proyecto.

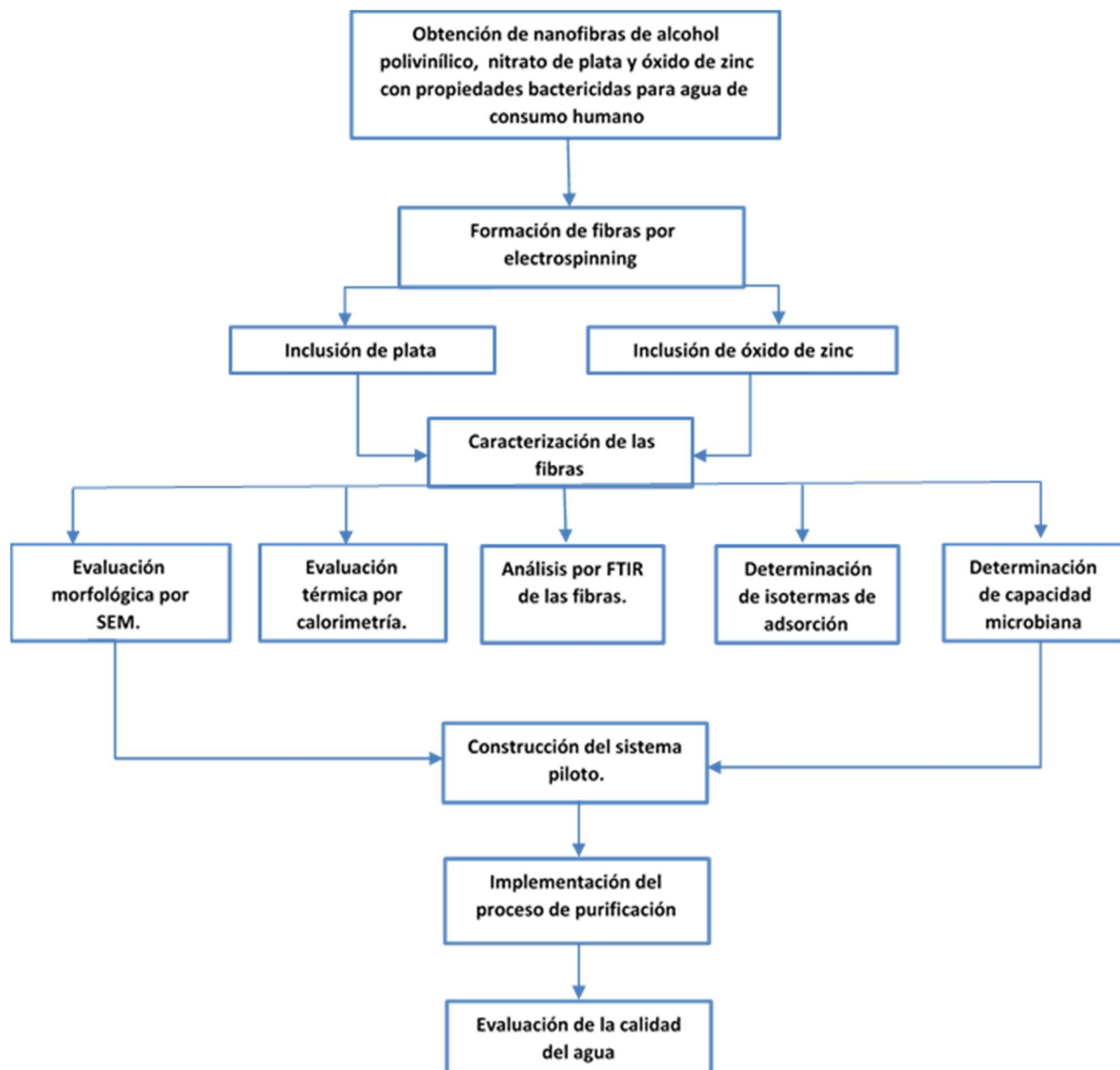


Figura 2.2. Diagrama de Proceso para la obtención de nanofibras.

Extraído de: Autoría propia

Capítulo III: Resultados y Discusión.

3.1. Proceso de electrohilado.

Para efectuar la inclusión de compuestos metálicos en las nanofibras electrohiladas, se reportan dos procesos, el primero a partir de una post modificación de la nanofibra hecha y el segundo proceso consiste en agregar los compuestos metálicos en la mezcla con la solución polimérica, previa al proceso de electrohilado. En el presente trabajo se realizó la inclusión empleando el segundo proceso, dónde se incluyeron las nanopartículas de plata y óxido de zinc en la mezcla polimérica de alcohol polivinílico (PVA) (Pillay et al., 2013; Fahimirad y Ajalloueian, 2019). Las soluciones preparadas se enlistan en la tabla 3.1 variando las concentraciones de las nanopartículas de plata y óxido de zinc.

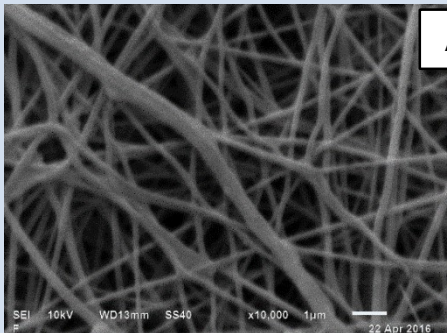
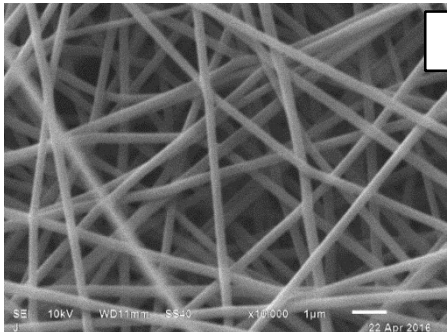
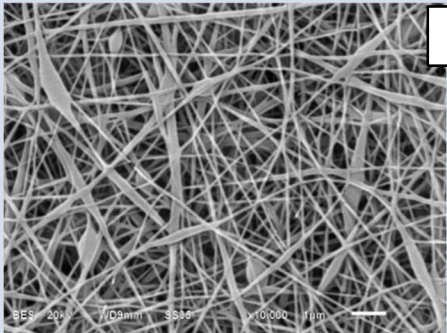
Tabla 3.1. Soluciones para electrohilado concentraciones bajas.

No. De solución	Descripción	No. De solución	Descripción
Solución 1	PVA 10% + Ag (1%)	Solución 6	PVA 10% + Ag (15%)
Solución 2	PVA 10% + ZnO (1%)	Solución 7	PVA 10% + ZnO (5%)
Solución 3	PVA 10% + Ag (1%) + ZnO (1%)	Solución 8	PVA 10% + ZnO (7%)
Solución 4	PVA 10% + Ag (5%)	Solución 9	PVA 10% + Ag (15%) + ZnO (5%)
Solución 5	PVA 10% + Ag (5%) + ZnO (1%)		

Las condiciones de operación del equipo fueron determinados de acuerdo con los resultados que se obtuvieron en la investigación titulada “Caracterización de las propiedades morfológicas y térmicas de fibras de aceite de oliva encapsulado obtenidas por electrospinning empleando como agente encapsulante alcohol polivinílico PVA” en la cual se variaron las concentraciones de PVA. En la tabla 3.2 se puede observar las características más sobresalientes de las soluciones de PVA al 8,10 y 12%. Se puede observar que las nanofibras obtenidas con mejor morfología fueron las

de la solución de PVA al 10%, donde las fibras se consideran regulares, presentando una morfología lineal homogénea sin abultamientos (Silva González, 2016).

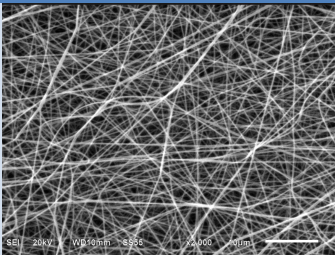
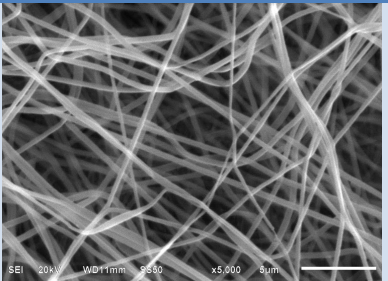
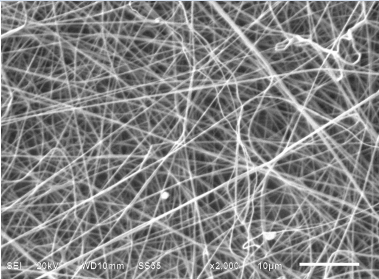
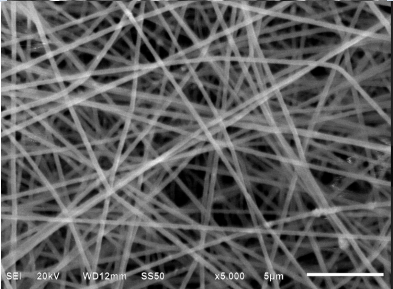
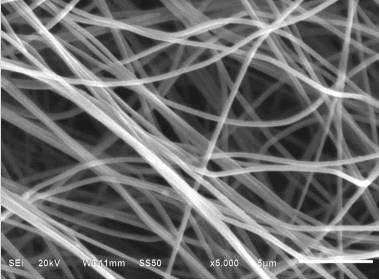
Tabla 3.2. Fibras de PVA a diferentes concentraciones.

Condiciones de electrohilado	Imagen SEM	Observaciones
12 Kv polo positivo 12 Kv polo negativo 0.1 mL/h velocidad de inyección 20 cm de distancia 150 rpm velocidad rotativa del rodillo	PVA 8% 	Debido a la relación que existe entre el agua y el alcohol polivinílico, se observan fibras no homogéneas y no definidas, endebles, las condiciones empleadas en el proceso de electrohilado no permitieron la evaporación del solvente.
12 Kv polo positivo 12 Kv polo negativo 0.1 mL/h velocidad de inyección 20 cm de distancia 150 rpm velocidad rotativa del rodillo	PVA 10% 	Las condiciones de electrohilado, así como la composición del PVA es la adecuada para la obtención de fibras regulares, presentando una morfología lineal homogénea sin abultamientos en comparación con las soluciones de PVA 8% y PVA 12%.
12 Kv polo positivo 12 Kv polo negativo 0.1 mL/h velocidad de inyección 20 cm de distancia 150 rpm velocidad rotativa del rodillo	PVA 12% 	Las fibras obtenidas a la composición de PVA12% son de morfología irregular con presencia de gotas (beads) las cuales nos indican que las condiciones empleadas no son las adecuadas para dicha composición.

Nota. Fuente: Silva González, 2016

Durante el proceso de electrohilado no se tuvieron problemas con ninguna de las nueve soluciones preparadas, en la tabla 3.3 se muestran algunas imágenes de las nanofibras obtenidas de algunas soluciones.

Tabla 3.3. Nanofibras obtenidas de soluciones con componentes antibacterianos.

Composición de la solución polimérica	Imagen SEM	Composición de la solución polimérica	Imagen SEM
Solución de PVA al 10% y 1% de óxido de zinc		Solución de PVA al 10% y 15% de plata	
Solución de PVA al 10% y 1% de plata		Solución de PVA al 10%, 5% de óxido de zinc y 15% de plata	
Solución de PVA al 10% y 5% de óxido de zinc			

Es importante considerar las características físicas de las soluciones poliméricas ya que de ello depende la morfología de las nanofibras electrohiladas obtenidas. Para evaluarlo se realizó la

medición de conductividad, viscosidad y pH de las soluciones elegidas consideradas más eficaces, para formar el filtro.

Los resultados se muestran en la tabla 3.4 y se tomó como referencia la solución de PVA al 10% debido a que se han obtenido fibras con buenas características. Los datos de conductividad de las soluciones oscilaron entre 400-500 μS y viscosidad de 550-900 Cp. De acuerdo con la bibliografía, se sabe que los parámetros de viscosidad y conductividad afectan directamente al tamaño de diámetro de las fibras obtenidas, ejemplificando el aumento de la conductividad eléctrica de la solución, produce una disminución significativa en el diámetro de las nanofibras electrohiladas. De otra forma la solución tiende a disminuir su capacidad de electrohilarse, cuando disminuye la conductividad de la solución; generando una elongación insuficiente del chorro de la solución debido a una reducción de la fuerza eléctrica para producir una fibra uniforme; y con ello se pierde la capacidad de electrohilarse (Hayati y col., 1987). Con respecto a la viscosidad si las soluciones presentan un valor muy bajo se favorece la interrupción del chorro continuo pero un exceso de ella provoca el secado y taponeo prematuro en la salida de la aguja del inyector.

La figura 3.1 muestra gráficamente el proceso de electrohilado y como los compuestos metálicos se encuentran en una solución homogénea junto con el polímero. En este caso se puede observar que al adicionar los compuestos metálicos existe un aumento en densidad y viscosidad para las soluciones de PVA al 10%/ 15% de plata y PVA al 10%/ 5% de óxido zinc. Sin embargo, para la solución de PVA al 10% y 7% de óxido de zinc no sucede lo mismo, la conductividad disminuye de manera considerable, observando que no existe una relación directa entre la conductividad y la viscosidad.

Con respecto a la morfología de las nanofibras, los resultados obtenidos para la solución de PVA al 10% y las diferentes concentraciones de sales metálicas permiten concluir que se logró realizar el proceso de electrohilado de manera satisfactoria.

Los datos de pH de las soluciones electrohilables oscilan entre 4 y 7 considerando que es un indicador de los iones libres presentes en la solución, condiciones que no impidieron que se

realizara de forma adecuada el proceso de electrohilado y que se hayan obtenido nanofibras con propiedades fisicoquímicas aptas para la construcción del filtro.

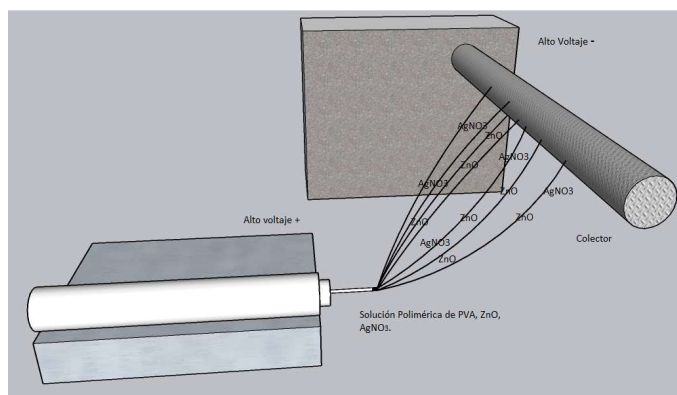


Figura 3.1. Representación del proceso de electrohilado de PVA, AgNO_3 y ZnO .

Extraído de: Autoría personal.

Tabla 3.4. Medición de características de soluciones poliméricas.

	Conductividad (μS)	Viscosidad (Cp)	pH
Solución de PVA al 10%	416	824	4-5
Soluciones de PVA al 10% y plata 15%	805	922	4-5
Soluciones de PVA al 10% y 5% óxido de zinc	753	1184	6-7
Soluciones de PVA al 10% y 7% óxido de zinc	143	2168	6-7

Posteriormente al proceso de electrohilado las nanofibras obtenidas, se removieron del soporte utilizado y fueron colocadas sobre papel filtro y se introdujeron al proceso de reticulación mismo que genera la hidrofobicidad de la fibra electrohiladas. Para ello se dejaron en un frasco hermético con glutaraldehído al 25% marca Sigma- Aldrich por un tiempo de 48 horas. Se observó encogimiento de la película de nanofibras electrohiladas entre 15% y 20 % al entrar en contacto con el glutaraldehído (Figura 3.2). Dicho comportamiento es atribuible a un efecto de evaporación del agua presente en la fibra, posteriormente fueron colocadas en un desecador con gel de sílice, previo al armado de filtro final.



Figura 3.2. A) Fibra obtenida sin proceso de reticulación. B) Fibra obtenida con proceso de reticulación.
Extraído de: Cámara digital.

3.2. Caracterización de las nanofibras

3.2.1. Determinación de Capacidad microbiana.

Se realizaron pruebas para evaluar la capacidad antimicrobiana de las nanofibras de PVA con las NPs-ZnO, NPs-Ag comerciales a partir de las soluciones: 1,2,3,4 y 5 de la tabla 3.1. A partir del proceso de reticulación se nombrará el material obtenido como membrana.

Tabla 3.1. Soluciones para electrohilado concentraciones bajas.

No. De solución	Descripción	No. De solución	Descripción
Solución 1	PVA 10% + Ag (1%)	Solución 6	PVA 10% + Ag (15%)
Solución 2	PVA 10% + ZnO (1%)	Solución 7	PVA 10% + ZnO (5%)
Solución 3	PVA 10% + Ag (1%) + ZnO (1%)	Solución 8	PVA 10% + ZnO (7%)
Solución 4	PVA 10% + Ag (5%)	Solución 9	PVA 10% + Ag (15%) + ZnO (5%)
Solución 5	PVA 10% + Ag (5%) + ZnO (1%)		

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto antimicrobiano de las membranas. Para ello se evaluaron concentraciones del 1-5% y posteriormente 10-15% y se determinó la concentración de NPs en la solución polimérica de PVA que permitió la inhibición del crecimiento bacteriano. En la figura 3.2 se muestra la imagen de las primeras pruebas realizadas a las soluciones 1,2, 3, 4 y 5, las cuales fueron sembradas en agar de soja Trypticase y se inocularon un millón de bacterias por separado de *Salmonella typhi* y *Escherichia coli*. Desafortunadamente no se obtuvo la inhibición en el crecimiento bacteriano que se esperaba, esto en contraste con publicaciones previas como las de Tan *et.al.*, 2016 que obtienen actividad antibacteriana de las fibras a partir de soluciones poliméricas de PVA y NPs-Ag al 0.1% y de acuerdo con los datos presentados en la investigación de Khan, *et.al.* (2019) se han utilizado concentraciones de NPs-ZnO de 5%,7% y 10%.



Figura 3.3. Evaluación antimicrobiana de las nanofibras con inclusión de plata y óxido de zinc a concentraciones bajas.

Extraído de: Cámara digital.

Como consecuencia de los primeros resultados obtenidos y presentados en la sección anterior, se evaluó el efecto antimicrobiano de las membranas electrohiladas elaboradas con nanopartículas soportada en PVA mediante el método de micro dilución en medio de cultivo TSB y como indicador de viabilidad se empleó *Resazurina* a cinco concentraciones 0.33 mg/mL, 0.83 mg/mL, 1.67 mg/mL, 2.5 mg/mL y 3.33 mg/mL, con la cepa de *E. coli* ATT 8739EA.

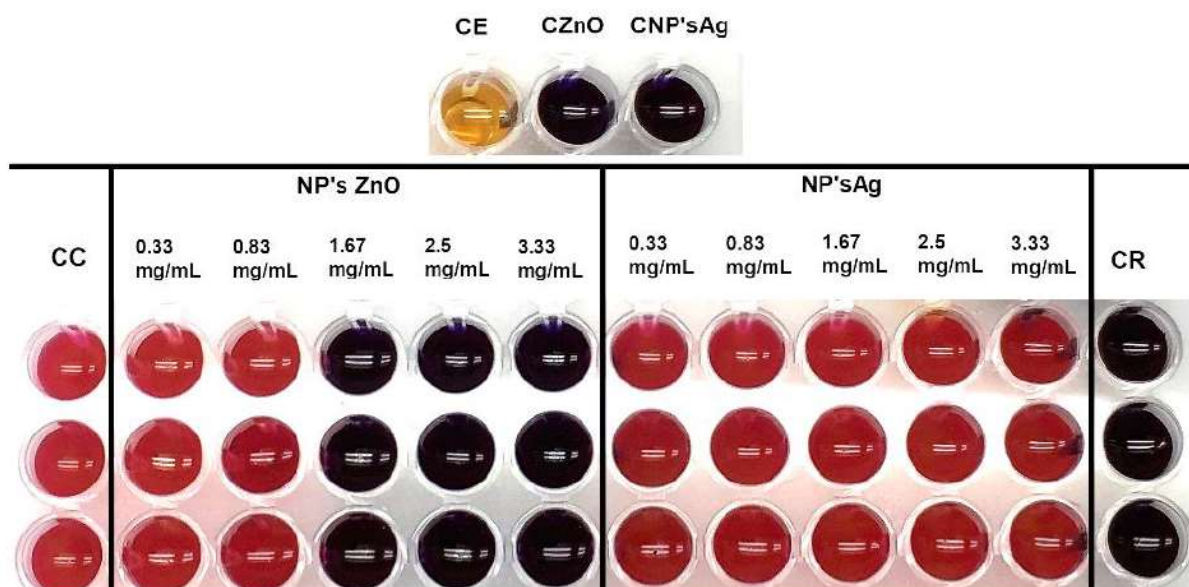


Figura 3.4. Placa de micro dilución de la evaluación antimicrobiana de las nanopartículas comerciales
Extraído de: Reporte de análisis de resultados.

La figura 3.4 muestra los resultados obtenidos y de acuerdo con el reporte emitido se puede observar que las NPs-ZnO inhibieron el crecimiento de la bacteria a una concentración de 1.67 mg/mL, y se cree que las NPs-ZnO detuvieron el metabolismo redox de la bacteria manteniendo el color azul del indicador utilizado, mientras que las NPs-Ag no mostraron actividad antibacteriana, pudiendo observar el cambio de color de azul a rosado lo que indica que el metabolismo redox de la bacteria está intacto, esto debido posiblemente a la baja concentración que contiene el producto de 0.02 mg/mL en la solución estabilizadora.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se decidió incrementar la concentración de las nanopartículas en la solución del polímero, previo al proceso de electrohilado, proponiendo las soluciones 6, 7, 8 y 9 (Tabla 3.5) y posteriormente se efectuó el proceso de electrohilado. Finalmente se evaluó la capacidad antibacteriana, eligiendo la bacteria *Escherichia coli*. En la tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.5. Actividad antimicrobiana de las NF de PVA con aumento de NPs-ZnO, NPs-Ag (% en peso).

	Solución	Promedio de zonas de inhibición formadas (mm)
6	PVA 10% + Ag (15%)	3.88±1.15
7	PVA 10% + ZnO (5%)	8.25±1.40
8	PVA 10% + ZnO (7%)	9.38±1.85
9	PVA 10% + Ag (15%) + ZnO (5%)	6.38±1.55

De acuerdo con el trabajo realizado con Khan *et.al.* 2019 se obtuvieron datos de inhibición de 5mm con un 9% de NPs-ZnO para *E. Coli*, manteniendo constante la concentración de PVA al 10%, y resultados obtenidos en la presente investigación se consideran favorables ya que se obtiene una zona de inhibición de 6 a 9 mm para el caso de las membranas que contienen nanopartículas de óxido de zinc. En los trabajos antes mencionados se muestra una mayor zona de inhibición a concentraciones más altas de NPs-ZnO, sin embargo, no fue posible electrohilar soluciones con concentración mayor de 7% de NPs-ZnO, debido a un incremento de la viscosidad, y a un taponamiento de la aguja por ello solo se trabajó con soluciones del 5% de NPs-ZnO.

En el caso de la plata, en investigaciones previas como la de Pupkevičiūtė *et.al* (2015), se reportan resultados de inhibición para *E. coli*, con concentraciones de NPs-Ag de 0.02 y 0.04 % en una solución al 15% de PVA; y en el trabajo de Tan *et.al.* 2016 se reporta el uso de una solución de PVA al 12% con concentraciones de 1.5 y 10 % de NPs-Ag; los resultados obtenidos de los trabajos anteriores obtienen zonas de inhibición promedio para *E.Coli* de 8mm y 10 mm para ambas concentraciones de sales de plata respectivamente.

Los resultados obtenidos en este estudio presentaron datos de inhibición de 3.88 mm para las soluciones de PVA y 15% de sales de plata, siendo menor en comparación con los resultados presentados por Tan *et.al.* 2016.

Para la membrana obtenida de la mezcla de las nanopartículas biocidas con PVA muestra una inhibición de 6.38 mm.

Activación de las Membranas.

De acuerdo con el proceso experimental después de electrohilar la nanofibra se somete al proceso de reticulación para prevenir que la membrana se disuelva con el contacto con agua, posteriormente se evaluó la actividad antibacteriana, en donde se observó que las membranas obtenidas después de haber sido secadas a temperatura ambiente en un desecador no muestran actividad antibacteriana. En consecuencia, de lo anterior se procedió a humedecer las membranas y se obtuvieron resultados favorables, lo que indica que las nanopartículas de plata quedan adsorbidas en la superficie de las nanofibras durante el proceso de electrohilado y de reticulación, concluyendo que es necesario humedecer las fibras para obtener un efecto antibacteriano. La figura 3.5 muestra las pruebas con las membranas secas del lado izquierdo y humedecidas del lado derecho en cada placa, observando las zonas de inhibición de las membranas humedecidas.

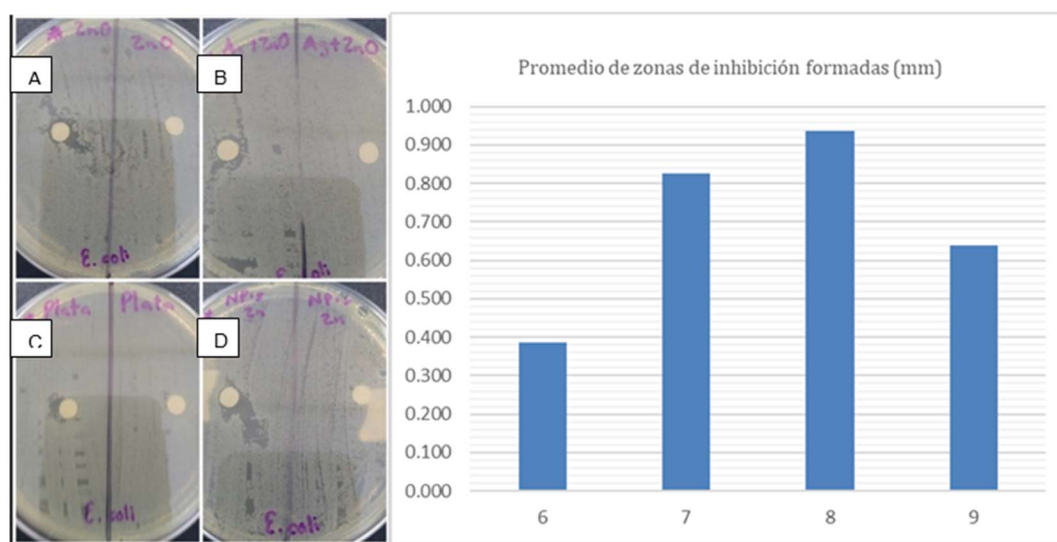


Figura 3.5. Actividad microbiana de PVA/ NPs-ZnO, NPs-Ag NFs contra *Escherichia coli*. y los efectos en el diámetro de la zona de inhibición. A) PVA10%+7%NPs-ZnO B) PVA10%+NPs-Ag 15%+ NPs-5%ZnO C) PVA10%+15%NPs-Ag D) PVA10%+7%NPs-ZnO

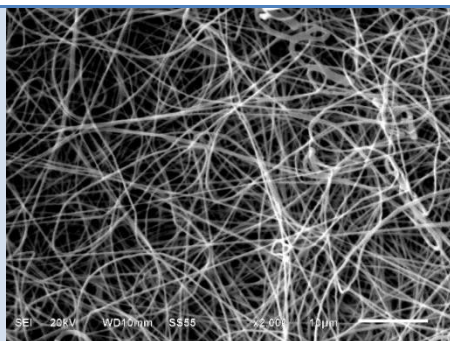
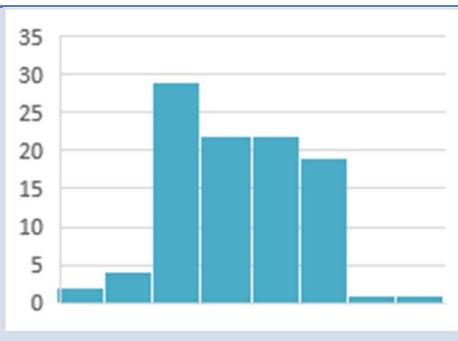
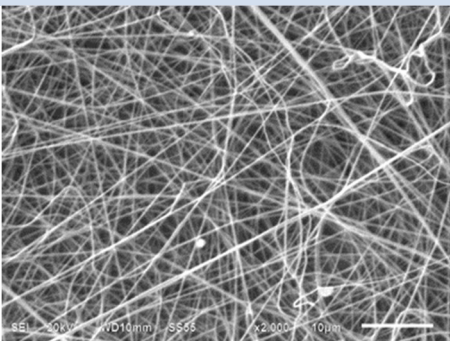
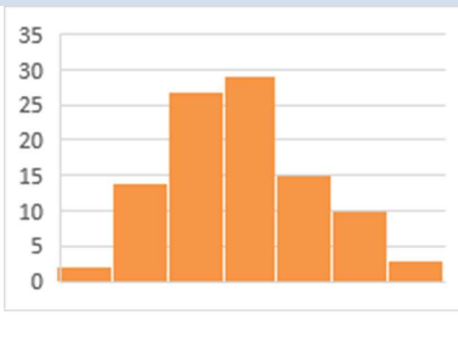
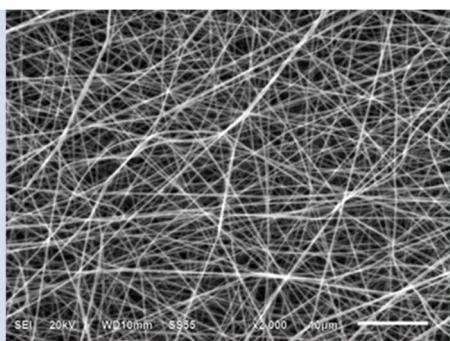
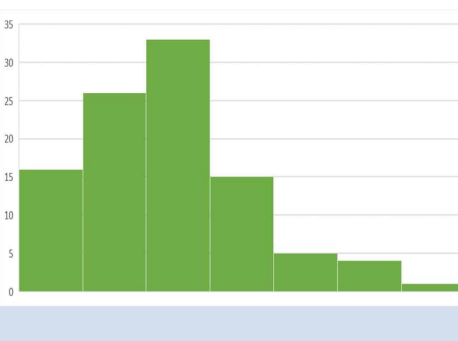
Extraído de: Reporte de análisis de resultados.

3.2.2. Análisis morfológico a partir de la microscopía de barrido SEM.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, proporcionando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para obtener información de la superficie de la muestra. Con las imágenes obtenidas de las nanofibras y las membranas se determinó su diámetro con ayuda del software ImageJ. Y de acuerdo con la literatura, un mínimo 100 mediciones en la micrografía permitirán la obtención de resultados representativos, por lo que cada una se dividió en 4 cuadrantes realizando 25 mediciones de cada uno.

La tabla 3.6, muestra las nanofibras obtenidas a concentraciones del 1% de los materiales biocidas, que en su mayoría se observan nanofibras homogéneas, con diámetro promedio de 350 ± 97.15 nm a 424 ± 91.50 nm. Cabe resaltar que de acuerdo con resultados de Kharaghani *et.al.* 2018 en su trabajo realizado con PVA y NPs-Ag obtuvieron nanofibras con diámetros menores a 500 nm, datos que coinciden con los datos de las fibras obtenidas. Las NFs obtenidas en este estudio a partir de soluciones al 10%PVA y 1% de ZnO presentan una mejor definición, a diferencia de las fibras que contienen NPs de plata y en caso de las NF de PVA se observa que al agregarle los metales su diámetro disminuye, para las fibras de PVA/NPs-ZnO es de $350.81 \text{ nm} \pm 97.15 \text{ nm}$ y para las fibras de PVA/NPs-Ag es de $392.16 \text{ nm} \pm 81.49 \text{ nm}$.

Tabla 3.6. Micrografías de las NF de PVA con NPs-ZnO, NPs-Ag a concentraciones bajas.

Diámetro promedio	Imagen SEM	Histograma de Diámetros Eje x=diámetro Eje y= frecuencia																		
1. Nanofibras obtenidas de PVA al 10%. Diámetro promedio: 424.03±91.50 nm		 <table border="1"><caption>Data for PVA 10% Histogram</caption><thead><tr><th>Diámetro (nm)</th><th>Frecuencia</th></tr></thead><tbody><tr><td>250-300</td><td>2</td></tr><tr><td>300-350</td><td>4</td></tr><tr><td>350-400</td><td>28</td></tr><tr><td>400-450</td><td>22</td></tr><tr><td>450-500</td><td>22</td></tr><tr><td>500-550</td><td>18</td></tr><tr><td>550-600</td><td>1</td></tr><tr><td>600-650</td><td>1</td></tr></tbody></table>	Diámetro (nm)	Frecuencia	250-300	2	300-350	4	350-400	28	400-450	22	450-500	22	500-550	18	550-600	1	600-650	1
Diámetro (nm)	Frecuencia																			
250-300	2																			
300-350	4																			
350-400	28																			
400-450	22																			
450-500	22																			
500-550	18																			
550-600	1																			
600-650	1																			
2. Nanofibras obtenidas de PVA al 10%/NPs-Ag 1% Diámetro promedio: 392.16±81.49 nm		 <table border="1"><caption>Data for PVA 10%/NPs-Ag 1% Histogram</caption><thead><tr><th>Diámetro (nm)</th><th>Frecuencia</th></tr></thead><tbody><tr><td>250-300</td><td>2</td></tr><tr><td>300-350</td><td>14</td></tr><tr><td>350-400</td><td>26</td></tr><tr><td>400-450</td><td>28</td></tr><tr><td>450-500</td><td>15</td></tr><tr><td>500-550</td><td>10</td></tr><tr><td>550-600</td><td>3</td></tr></tbody></table>	Diámetro (nm)	Frecuencia	250-300	2	300-350	14	350-400	26	400-450	28	450-500	15	500-550	10	550-600	3		
Diámetro (nm)	Frecuencia																			
250-300	2																			
300-350	14																			
350-400	26																			
400-450	28																			
450-500	15																			
500-550	10																			
550-600	3																			
3. Nanofibras obtenidas de PVA al 10% /NPs-ZnO al 1% Diámetro promedio: 350.81±97.15 nm		 <table border="1"><caption>Data for PVA 10%/NPs-ZnO 1% Histogram</caption><thead><tr><th>Diámetro (nm)</th><th>Frecuencia</th></tr></thead><tbody><tr><td>250-300</td><td>16</td></tr><tr><td>300-350</td><td>26</td></tr><tr><td>350-400</td><td>33</td></tr><tr><td>400-450</td><td>15</td></tr><tr><td>450-500</td><td>5</td></tr><tr><td>500-550</td><td>4</td></tr><tr><td>550-600</td><td>1</td></tr></tbody></table>	Diámetro (nm)	Frecuencia	250-300	16	300-350	26	350-400	33	400-450	15	450-500	5	500-550	4	550-600	1		
Diámetro (nm)	Frecuencia																			
250-300	16																			
300-350	26																			
350-400	33																			
400-450	15																			
450-500	5																			
500-550	4																			
550-600	1																			

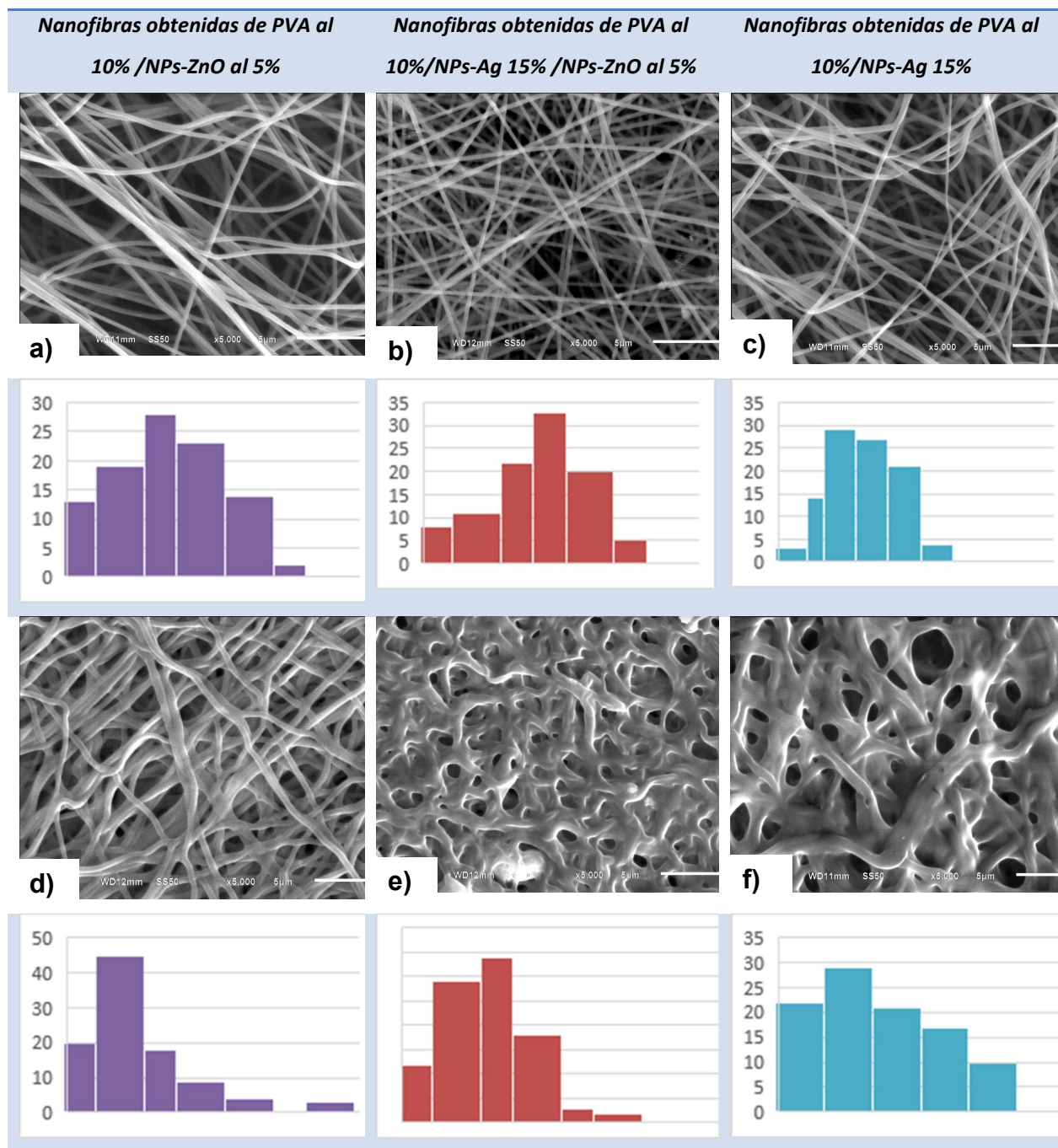
La tabla 3.7 muestra las nanofibras y membranas de NPs-Ag y NPs-ZnO, las imágenes a, b y c muestran las nanofibras obtenidas después del proceso de electrohilado, se puede observar que las nanofibras con concentraciones de 5%, 7% y 15% muestran una morfología más uniforme en comparación con las nanofibras obtenidas con concentraciones menores de nanopartículas de

plata y óxido de zinc, de la Tabla 3.7. En cada una de las nanofibras obtenidas se realizó el mismo procedimiento para conocer el diámetro de cada una, mostrando los histogramas siendo el eje de las x el diámetro obtenido y el eje de la y la frecuencia; las NF de PVA/NPs-ZnO (a) tienen en promedio un diámetro de 337.29 ± 64.55 nm, siendo las que se obtuvieron un menor diámetro, seguidas de las NF de PVA/NPs-Ag (c) con 366.87 ± 83.94 nm y finalizando con la mezcla de ambos metales biocidas (b) con 374.64 ± 30 nm quien también representa una menor desviación lo que indica más uniformidad en las nanofibras.

Las imágenes d, e y f, muestran las membranas obtenidas después del proceso de reticulación, el cual tiene como objetivo formar enlaces más fuertes para evitar que sean solubles en agua. Se observa un cambio en la morfología de la nanofibra, específicamente en su diámetro, lo que ocasiona que haya menor cantidad de espacios vacíos en la membrana, de manera general las tres nanofibras obtenidas presentan las mismas características, previo al proceso de reticulación se observa una morfología homogénea, sin gotas del disolvente, y con diámetros menores a 500 nm y posterior al proceso de reticulación, el hinchamiento de cualquier película polimérica y fibras en un solvente se ve afectado en gran medida por el coeficiente de difusión del solvente, la tasa de relajación de las regiones amorfas de la cadena polimérica y grado de cristalinidad (Hulupi & Haryadi, 2019), lo que implicaría mayor retención, estabilidad y que no sean solubles.

Tabla 3.7. Micrografías de las NF de PVA con NPs-ZnO, NPs-Ag con aumento de concentración en %masa.

a, b, c: nanofibras después de electrohilado; d, e, f: nanofibras después de proceso de reticulación.



El gráfico de la figura 3.6 muestra en resumen los distintos diámetros de las nanofibras y membranas obtenidas de la tabla 3.7, después del proceso de electrohilado con concentraciones mayores a 5% y los indicados con un asterisco (*) son las membranas después del proceso de reticulación. Se observa que las nanofibras con concentraciones mayores al 5% tienen diámetros similares, todos menores de 400 nm y posterior al proceso de reticulación, como se puede observar en las imágenes d),e), f) el diámetro tuvo un aumento casi del doble, siendo la membrana de PVA/NPs-Ag con mayor diámetro 697.84 ± 157.37 ; la mezcla de las nanopartículas tuvo un menor aumento con 511.44 ± 128.56 , lo que indicaría que la combinación de la nanopartículas es otro factor a tomar en cuenta para la morfología de la membrana obtenida. Finalmente, como se observa en la imagen d) la membrana de PVA/NPs-ZnO no obtiene tanto entrecruzamiento, sin embargo, sigue la tendencia de aumentar su diámetro al doble, 667.67 ± 223.98 pero con una mayor desviación entre las 100 mediciones realizadas.

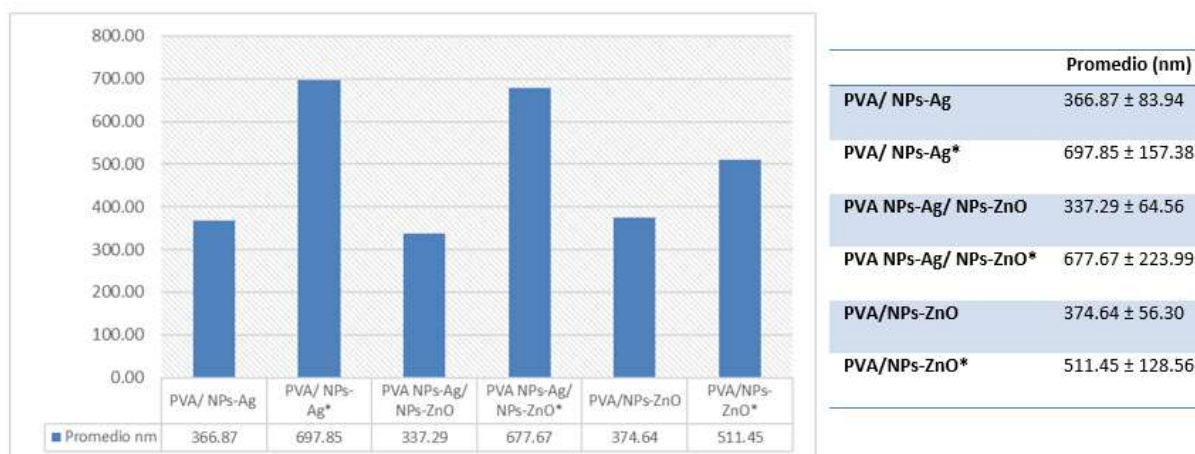


Figura 3.6. Gráfico de diámetros promedios de las nanofibras obtenidas. *Fibras reticuladas.

3.2.3. Espectroscopía Infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica de gran utilidad en la identificación de grupos funcionales presentes en sustancias orgánicas e inorgánicas. Estos grupos funcionales suelen absorber la radiación infrarroja con la consecuente excitación de varios de sus modos vibracionales y rotacionales, generando señales muy características que permiten hacer algunas deducciones sobre la naturaleza química de la sustancia en estudio. En el caso de nanopartículas, estas vibraciones y rotaciones nos ayudarán a comprender y a monitorear los cambios en una síntesis.

Se realizó el infrarrojo para la nanofibra compuesta solo de PVA (figura 3.7) para poder identificar los grupos presentes y descartar una posible contaminación previa a la inclusión de las NPs-ZnO y NPs-Ag.

Las grandes bandas observadas entre $3500 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ están ligadas al estiramiento O-H de los enlaces de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares. La banda de vibración entre $3000 - 2800 \text{ cm}^{-1}$ se refiere al estiramiento C-H de los grupos alquilo, y los picos entre $1750 - 1690 \text{ cm}^{-1}$ se deben al estiramiento C=O y C-O del grupo acetato restante de PVA.

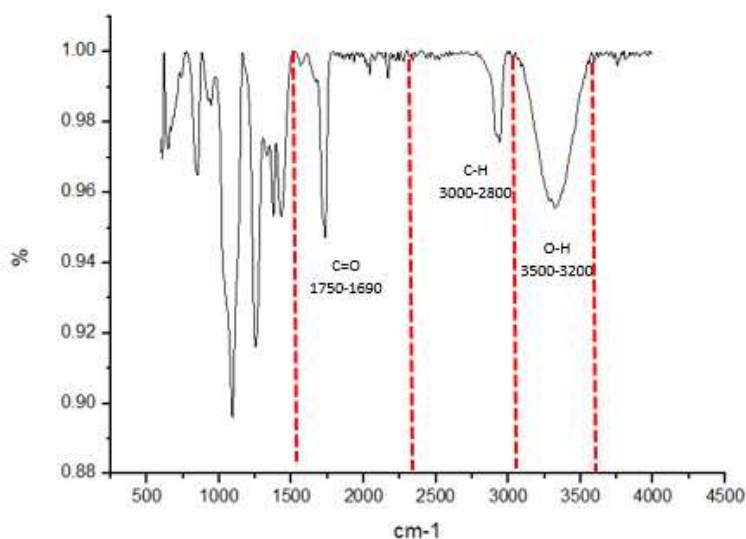


Figura 3.7. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA.

Extraído de: FTIR modelo VERTEX 70.

Para investigar la interacción química entre el PVA y nanopartículas de ZnO, el estudio de espectroscopio infrarrojo por transformada de Fourier se realizó como se muestra en la Figura 3.8. Los espectros mostraron que, en las nanofibras de PVA, las bandas en aproximadamente 3320 cm^{-1} , 2940 cm^{-1} , 1437 cm^{-1} , 1093 cm^{-1} y 850 cm^{-1} se asignan a las vibraciones de OH, $-\text{CH}_2\text{CH}_2$, C–C y C–O grupo de PVA, respectivamente. Los nuevos anchos de banda intensos de 1100 cm^{-1} a 1000 cm^{-1} ya 750 cm^{-1} se asignan a vibraciones de Zn–O de nanopartículas de ZnO que indican las nanofibras compuestas de PVA y ZnO.

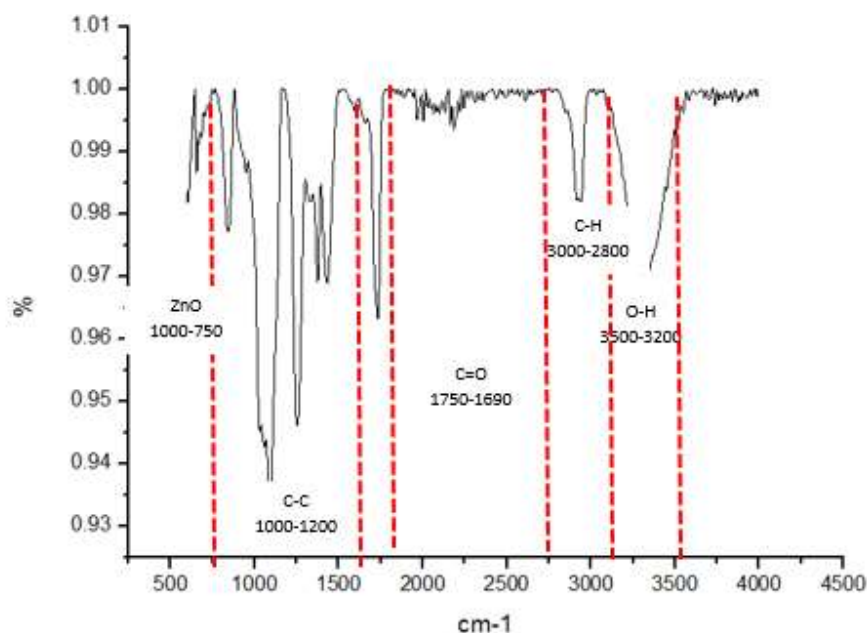


Figura 3.8. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/NPs-ZnO.

Extraído de: FTIR modelo VERTEX 70.

Las fibras que contienen plata en el análisis del espectro FT-IR (figura 3.11), la banda ancha en 3436 cm^{-1} se asigna a la vibración de estiramiento de -OH al final de la cadena polimérica, y también puede deberse a la absorción de humedad. La banda de 2954 cm^{-1} se atribuye a la vibración de estiramiento de $-\text{CH}_2$. La banda a 1660 cm^{-1} es asignado a la vibración de

estiramiento de los grupos carbonilo libres. Las bandas a 1433 cm^{-1} y 651 cm^{-1} se corresponden con el plano y vibración oscilante fuera del plano de C-H, respectivamente. La banda en 1286 cm^{-1} se asigna al estiramiento antisimétrico y simétrico vibración de N-OH.

Además, la banda de N-OH a 1286 cm^{-1} se debilita drásticamente.

La aparición de una banda alrededor de 424 nm en la curva indica la formación de AgNP, sin embargo, no se puede ver en la Figura. 3.9 lo que se atribuye a la baja concentración que contienen las nanopartículas.

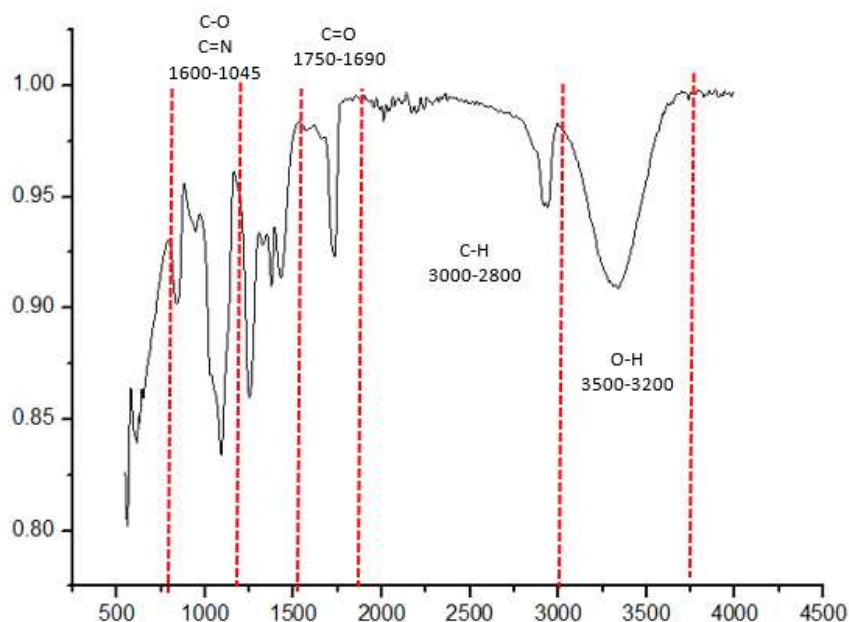


Figura 3.9. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/NPs-Ag.
Extraído de: FTIR modelo VERTEX 70.

Finalmente, la figura 3.10 muestra el análisis IR de las fibras que contiene ambas nanopartículas, se muestra la prevalencia de las bandas características del PVA entre 3500 –

3200 cm^{-1} están ligadas al estiramiento O-H de los enlaces de hidrógeno, en menor proporción los anchos de banda intensos de 1100 cm^{-1} a 1000 cm^{-1} y a 750 cm^{-1} de las nanopartículas de ZnO y tampoco se aprecia la formación de la banda antes de los 500 que indican NPs de plata, aunque se esperaría con mayor intensidad.

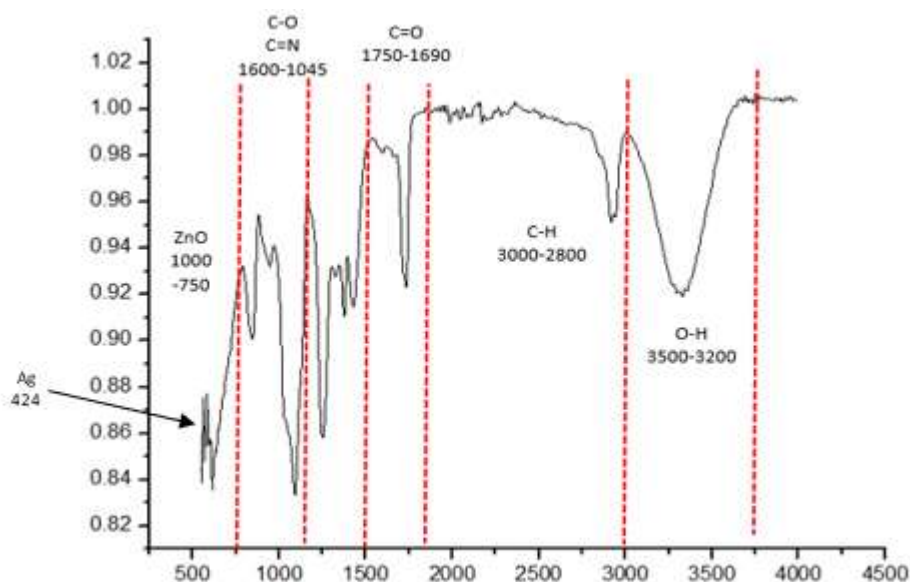


Figura 3.10. Análisis de espectros FT-IR de nanofibras de PVA/NPs-Ag/NPs-ZnO.

Extraído de: FTIR modelo VERTEX 70.

3.2.4. Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

El TGA y DSC son técnicas de análisis térmico con las cuales se determina el cambio de las propiedades físicas de los compuestos químicos y materiales en función de la temperatura o el tiempo. Para conocer las características térmicas de las fibras, se sometieron a dichas pruebas y se identificaron de la siguiente forma:

- 1) PVA al 10% y NPs-ZnO al 5%
- 2) PVA al 10% y NPs-Ag/Ag al 15%
- 3) PVA al 10%, NPs-Ag/Ag coloidal al 15% y NPs-ZnO al 5%

La figura 3.11 muestra el termograma emitido por el equipo de ambas técnicas, se puede observar que las tres muestras de fibras siguen una tendencia similar, a continuación, se muestran por separado para poder realizar una mejor descripción.

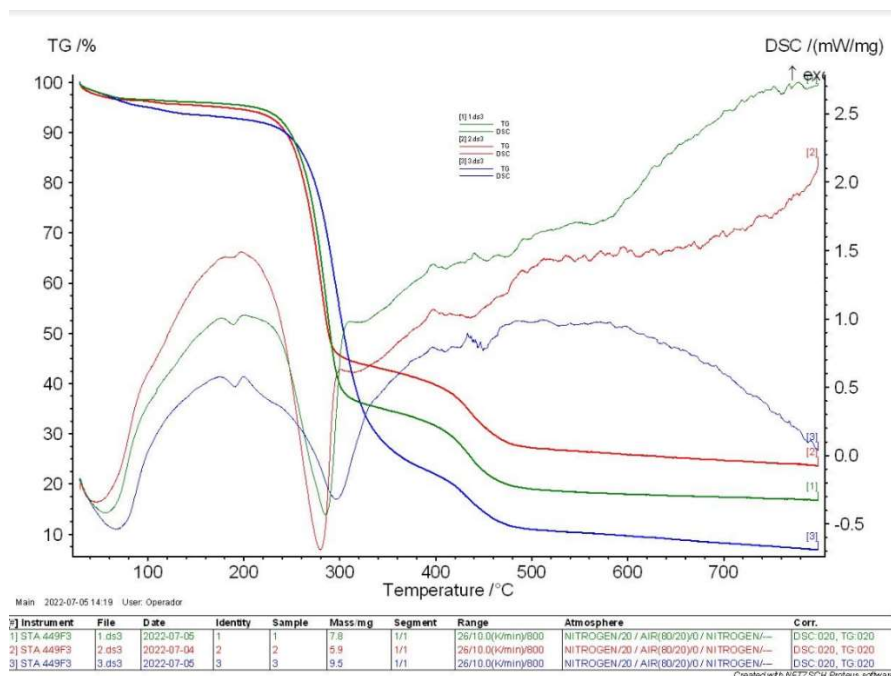


Figura 3.11. Termograma de TGA y DSC de fibras finales.

Extraído de: Equipo TGA/DSC.

El Análisis Termogravimétrico (TGA), mide la masa (pérdida o ganancia) de una muestra cuando ésta se somete a un programa controlado de temperatura, en la figura 3.12 se muestra el termograma de las muestras de las fibras después de haber pasado por el proceso de electrohilado y reticulación. De acuerdo con a la tendencia del termograma se puede definir que existe una descomposición en escalones múltiples y también que se considera un desprendimiento de humedad, el primer cambio se realiza a los a los 260°C aproximadamente para las tres fibras, la segunda pérdida se dio de manera similar para las muestras 1 y 2 a los 405°C, para la muestra 3 que contiene la mezcla de nanopartículas de componentes biocidas se dio de manera similar pero con una tendencia diferente, aunque en todos los casos podría referirse la descomposición de los componentes orgánicos del PVA y por otra parte la ausencia de pérdida adicional de peso sugiere la presencia únicamente de contenidos inorgánicos puros, para los 3 materiales evaluados, la temperatura de calcinación se puede ubicar a partir de los 500°C en adelante.

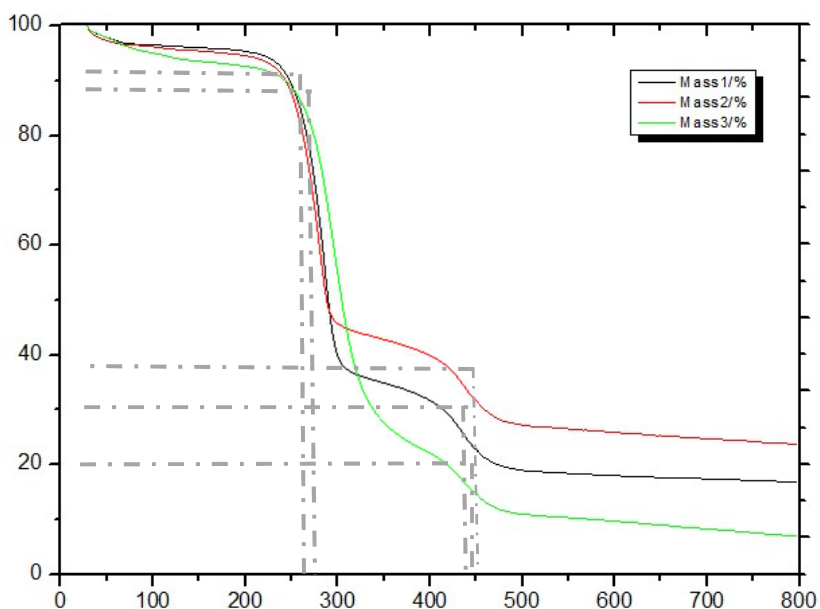


Figura 3.12. Análisis termogravimétrico de las fibras finales.
Extraído de: Equipo TGA/DSC.

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), proporciona información sobre los efectos térmicos, los cuales son caracterizados por un cambio en la entalpía y por un intervalo de temperatura cuando la muestra se calienta o se enfría. En la figura 3.13 se puede ver que hay dos picos, uno de ellos endotérmico, que se da entre las temperaturas de 100 y 216°C, que se considera asociado a la evaporación de agua. El segundo pico se observa a los 300°C y por la forma se deduce que el material se derrite. Quien presenta una mayor entalpía es la muestra 2, la cual contiene NPs-Ag, con un valor de 1.49035 mW/mg a los 198 °C, lo que podría revelar que tiene una mayor estabilidad térmica, caso contrario de la fibra que contiene ambas nanopartículas. Esta disminución de la entalpía está relacionada con el impedimento estérico producido durante el proceso de reticulación por el GA y las interacciones físicas entre la fibra, esto mismo pueden provocar las nanopartículas, reduciendo la densidad de reticulación del revestimiento al afectar a su comportamiento

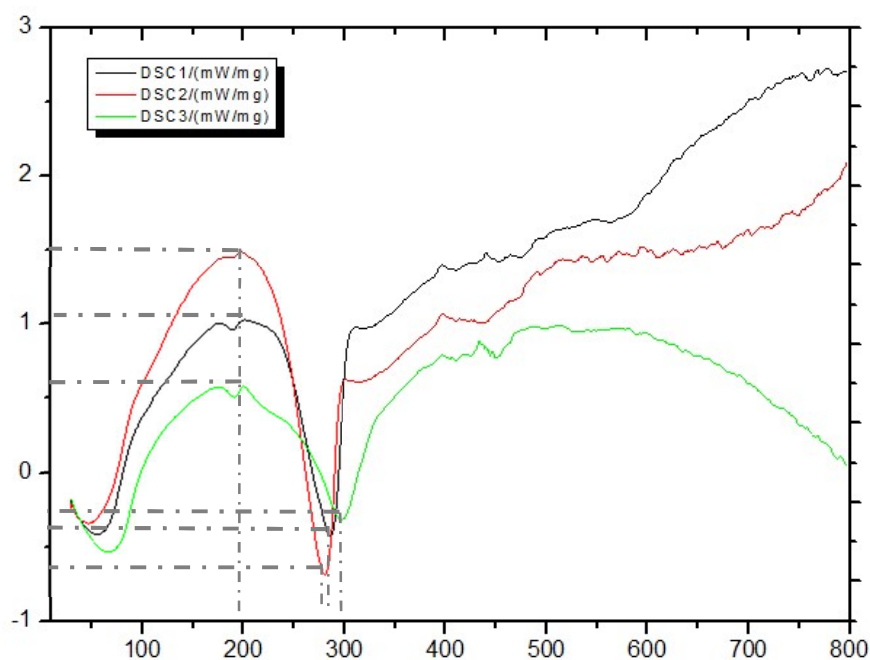


Figura 3.13. Análisis DSC de las fibras finales.
Extraído de: Equipo TGA/DSC.

3.3. Construcción de Dispositivo Piloto para purificación de agua.

El sistema piloto se construyó considerando como base un ducto de policloruro de vinilo (PVC) de 5 pulgadas, debido a su bajo costo y su amplio uso en instalaciones hidráulicas domésticas. Dentro de las ventajas de utilizar este material es su amplia resistencia a la corrosión lo que implica que no transmite ningún olor ni sabor al agua y también pueden soportar altas presiones y una temperatura hasta 60 °C aunado a esto el material es liviano, lo que lo hace de fácil manejo.

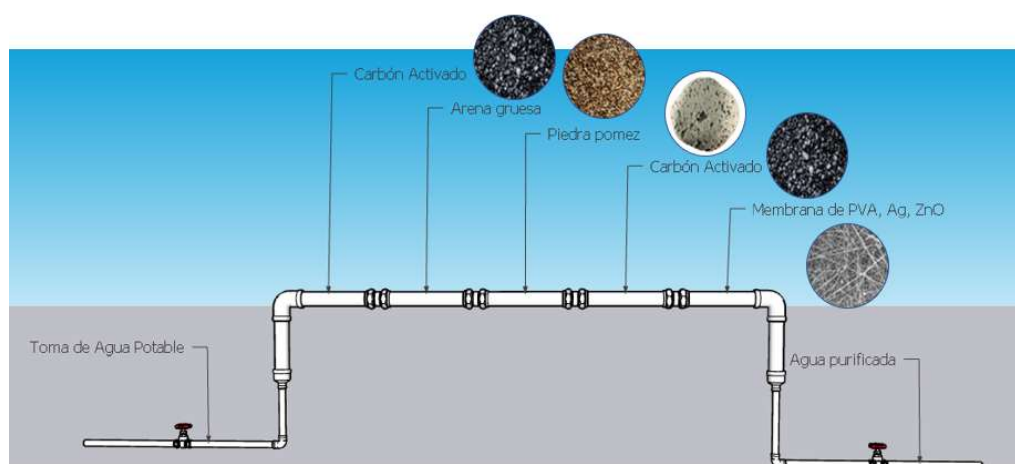


Figura 3.14. Representación del dispositivo piloto de purificación de agua
Extraído de: Autoría personal.

Se segmentó el tubo de PVC para separar los medios filtrantes, cada uno tiene una longitud de 15 cm por lo que el sistema en total tiene una longitud 1.30 cm y en la etapa dónde se integra el filtro se reduce el diámetro de contacto a 1.9 cm, esto con el fin de que haya una mayor superficie de contacto con las nanofibras que contienen las nanopartículas. Los medios de filtración están integrados por carbón activado, arena gruesa, piedra pómez y el filtro integrado por las nanofibras obtenidas, sostenidas en papel filtro de celulosa y tela de poliéster la cual permite el proceso de filtración.

Los medios filtrantes representan la barrera donde las partículas sólidas dispersas se acumulan dentro del medio filtrante a través de filtración profunda o por filtración de torta en parte superior del medio filtrante (Koch & Krammer, 2015). El orden de los medios filtrantes seleccionados se realiza en relación con sus características en la tabla 3.8 se muestran las principales características de los materiales utilizados.

Tabla 3.8. Características de medios filtrantes.

Material	Característica
Piedra Pómez	Se considera excelente medio filtrante y de acuerdo con Velastegui Vásconez, (2018), ayuda a la disminución de algunas características de biodegradabilidad (DBO5, DQO y Sólidos Totales).
Arena Gruesa	La arena es el material más empleado como medio filtrante. Es la encargada de retener las partículas sólidas en suspensión, la filtración rápida de arena es un método altamente eficaz para eliminar la turbidez si se aplica correctamente.
Carbón Activado	El carbón activado se utiliza en plantas de tratamiento de agua potable para eliminar las impurezas y contaminantes como materia orgánica, gases y partículas más pequeñas. Después de pasar por filtros de carbón activado, el agua sale clara y sin olor. Las aplicaciones más benéficas del carbón activado tienen que ver con la reducción del sabor y olor a cloro, sedimentos y compuestos orgánicos
Tela poliéster	Es un textil sintético que tiene entre sus principales características ser liviano, poco higroscópico. Su fibra puede resistir periodos de humedad repetitivos, es bastante resistente a la presencia de moho y hongos. Su resistencia húmeda es igual que la seca y adquieren electricidad estática con lo cual atraen a partículas de suciedad, aceites y grasas.

Finalizando con la caracterización de las fibras obtenidas se procede a realizar el filtro para agregarlo al sistema de purificación. Se diseña un multifiltro en relación con la efectividad bactericida que se obtuvo, por lo que el primer contacto con el agua es la fibra de PVA al 10% y NPs-ZnO al 7%, seguido de la fibra de PVA al 10%, NPs-ZnO al 7% y NPs-Ag al 15%, finalizando con

I.Q. Ana Belen Morales Alvarado

la fibra de PVA al 10% Y NPs-Ag al 15%, entre cada fibra se agrega papel filtro y a los extremos una reja de plástico como soporte y forrado con tela poliéster (figura 3.15).

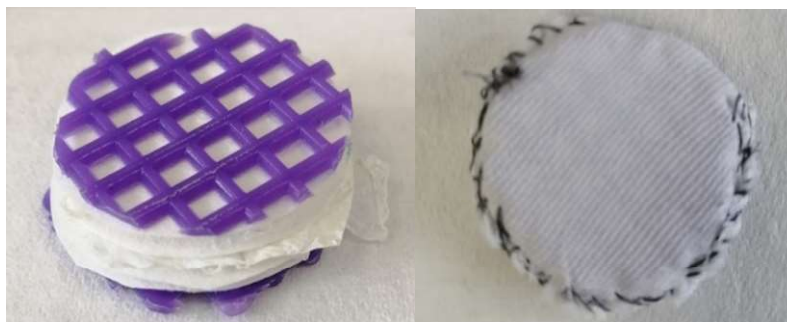


Figura 3.15. Estructura del filtro con las nanofibras obtenidas

Extraído de: Cámara digital.

El diámetro del filtro es de 3 cm y con apoyo de un vernier se midió el grosor de las fibras obtenidas posterior al proceso de reticulación, dichos datos se registran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Grosor de los filtros obtenidos.

PVA 10% + Ag (15%)	0.38 mm
PVA 10% + ZnO (5%)	0.16 mm
PVA 10% + Ag (15%) + ZnO (5%)	0.18 mm
Filtro completo	3.98 mm

El dispositivo piloto de purificación fue diseñado para ser conectado en una línea de abastecimiento de agua potable, por lo que es dispositivo fue instalado en la toma de agua potable del laboratorio 105 del Edificio FIQ4 de la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (figura 3.16).



Figura 3.16. Sistema de purificación piloto instalado en toma de agua potable
Extraído de: Cámara digital.

3.2.1. Análisis de costos del sistema de purificación

El sistema de purificación prototipo se sugiere que sea de bajo costo en comparación con los sistemas que se encuentran en el mercado en la tabla 3.10 se muestran los costos de las materias primas que integran el sistema piloto.

Tabla 3.10. Costo de materias primas.

Material	Cantidad	Costo total	Costo unitario
Tubo de PVC 2"	1 metro	\$80.00	\$60.00
Malla de acero	½ metro	\$30.00	\$10.00
Tubo de PVC ¾"	1 metro	\$25.00	\$40.00
Llaves de paso	2	\$80.00	\$80.00
Coples	7	\$35.00	\$35.00
Reducciones	2	\$35.00	\$35.00
Pegamento PVC	1	\$48.00	\$20.00
Tela poliéster	1 metro	\$50.00	\$10.00
Carbón activado	30g	\$80.00	\$80.00
Piedra Pómez	100 g	\$10.00	\$3.00
Arena gruesa	500 g	\$70.00	\$15.00
Total		\$543.00	\$388.00

El costo de la membrana se muestra en la tabla 3.11, mostrando el precio unitario en relación con las cantidades que se utilizan para realizar la solución polimérica de 50 ml para el electrohilado y así obtener la membrana que se instala en el dispositivo piloto.

Tabla 3.11. Costo de reactivos.

Reactivo	Marca	Cantidad	Precio	Precio por membrana
Nanopartículas de plata	Sigma-Aldrich	25 mL	\$3,332.00	\$13.00
Nanopartículas de óxido de Zinc	Sigma-Aldrich	100 g	\$1,048.00	\$1.00
Alcohol Polivinílico (PVA)	Meyer	100 g	\$400.00	\$20.00
Glutaraldehído	Sigma-Aldrich	1 L	\$35,262	\$4.00
Total			\$40,042.00	\$38.00

Obteniendo así un costo total para el dispositivo de purificación de \$426 pesos mexicanos, esto implica materia prima para la realización del sistema purificador y es necesario considerar para un estudio más profundo, considerando el gasto de la energía aplicada al equipo de electrohilado, así como costo de mano de obra. A pesar de lo anterior el producto obtenido de la presente investigación se considera viable y económico.

3.4. Evaluación de la Calidad del Agua.

La calidad de agua es definida como el conjunto de características químicas, físicas y biológicas incluso radiológicas, las cuales ayudan a clasificar el agua como: potable, dulce, salada, residual o purificada. Las referencias de los análisis efectuados dependerán de lo que requieran las especies y la misma necesidad humana, o bien a que sector va dirigido su consumo, y están fijados por normas nacionales e internacionales. Es importante conocer los requisitos de calidad para casa uso a fin de determinar si se requiere tratamiento y qué procesos se deben aplicar para alcanzar la calidad deseada. Los estándares de calidad también se usan para vigilar los procesos de tratamiento y corregirlos de ser necesario.

Para evaluar la calidad del agua obtenida se realizaron una serie de análisis con técnicas basadas en su mayoría en normas NMX, las cuales no se consideran obligatorias, ya que sirven de referencia para determinar la calidad de productos y servicios con el objetivo de orientar y proteger a los consumidores.

Previo a la instalación de sistema de purificación se tomó una muestra de 1L en un envase de plástico, posteriormente se cerró, se identificó como muestra 1 y se almacenó a 4°C como se indica en la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Después se instaló el dispositivo piloto, se dejó correr agua durante 20 min esto para dar un lavado a los medios filtrantes, posteriormente se tomó un litro de agua a la salida del sistema purificador y se identificó como muestra 2 siguiendo los mismos parámetros de preservación que la muestra 1. La tabla 3.12, muestra una relación de los análisis efectuados, identificando la técnica y la norma de referencia.

Tabla 3.12. Parámetros y Normas de Referencia.

Parámetro	Norma de Referencia
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001
Cloro residual	NMX-AA-108-SCFI-2001
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza total	NMX-AA-072-SCFI-2001
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2015
Compuestos orgánicos halogenados (AOX)	ISO 9562:2004 (E)

Los análisis fisicoquímicos se realizaron dentro de las especificaciones requeridas en cada una de las técnicas para obtener resultados confiables y que sea referencia para evaluar la eficiencia del sistema purificador piloto. En la tabla 3.13 se muestra un resumen de los límites máximos permisibles que presentan las normas a evaluar, es decir, la cantidad máxima que debe contener el agua para que sea apta para consumo. Como se observa la NOM 201 contiene menos

requerimientos que la NOM 127, sin embargo, ambas regulan los criterios de agua para consumo humano.

Tabla 3.13. Límites máximos permisibles de Normas: pruebas fisicoquímicas.

Parámetro	NOM 201	NOM 127	Unidades
Color	15	20	Pt/Co
Turbiedad	3	5	UNT
Cloro residual	0.1	0.1	mg/L
Cloruros	---	250	mg/L
Dureza total	---	200	mg/L
pH	---	6.8-8.5	s/u
Solidos disueltos totales	---	1000	mg/L
Compuestos orgánicos halogenados (AOX)	0.0005	0.01	mg/L

Los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas que se realizaron de ambas muestras se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Resultados de pruebas fisicoquímicas.

Parámetro	Muestra Grifo	Muestra filtro	Unidades
Olor	No	No	NA
Sabor	No	No	NA
Color	<5	<5	Pt/Co
Turbiedad	1.378	1.016	UNT
pH	7.42	7.53	NA
AOX	0.0099	0.009	mg/L
Yodo	0.0	0.0	mg/L
Cloro residual	0.0	0.0	mg/L
Cloruros	14.989	14.289	mg/L
Dureza Total	258.72	215.84	mg/L
Solidos disueltos	462	401	mg/L
SST	5.0	2.0	mg/L

En la provisión de agua se debe tener especial cuidado en las características físicas como son los sabores, olores, colores y la turbidez del agua que se brinda.

Las características organolépticas que incluyen, sabor y olor, se deben a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición, las mediciones de estos se hacen por observación humana, y en este caso, se consideran ambas muestras inoloras e insaboras.

El color del agua se debe a la presencia de minerales como hierro y manganeso, materia orgánica, residuos coloridos de las industrias, o contaminación durante el proceso de purificación o potabilización, el resultado que se obtiene es de <5 unidades Pt/Co es decir dentro del a escala de color está por debajo, lo que implica que cumple con los límites máximos permisibles de las Normas.

La turbidez además de que es objetable desde el punto de vista estético, puede contener agentes patógenos adheridos a las partículas en suspensión. El agua con suficientes partículas de arcilla en suspensión (10 unidades de turbidez), se aprecia a simple vista. Las mediciones de turbidez se basan en las propiedades ópticas de la suspensión que causan que la luz se disperse o se absorba. En este caso observamos una disminución del 76% de turbidez en el agua después de haber pasado por el sistema de purificación piloto.

En el caso del pH, se sabe que es una medida que indica acidez o alcalinidad del agua, y se define como la concentración de iones d hidrógeno en el agua. El rango normal de pH en el agua superficial es de 6.5 a 8.5, incluso las normas de referencia incluyen un intervalo similar, de 6.8 a 8.5, de acuerdo con lo que se observa en la tabla 3.14 el pH de la muestra filtrada aumenta ligeramente y se puede atribuir al CO₂ del aire que se disuelve en el agua y forma una especie de cojín (ácido carbónico H₂CO₃) o bien a los minerales de calcio y magnesio que provienen de los medios filtrantes, sin embargo, no es cambio significativo.

Los posibles compuestos químicos disueltos presentes en el agua pueden ser de origen natural o industrial y dependiendo de la concentración pueden ser benéficos o bien dañinos.

Se evaluó la concentración de cloruros, en agua potable se hacen presentes debido al proceso de desinfección en las plantas potabilizadoras, en altas concentraciones y en combinación con otras

sales puede producir sabores desagradables, el sistema purificador de agua disminuyó 0.7 mg/L, el límite máximo permisible para la NOM 127 es de 250 mg/L por lo que la muestra de agua cumple con dicha concentración. El cloro residual también es un parámetro que depende totalmente del proceso de desinfección, ambas muestras se encuentran dentro de los límites permisibles de las normas a evaluar.

La dureza en el agua se considera que es causada por los iones metálicos divalentes entre los que destacan sales de magnesio y calcio, representa más un problema económico por las incrustaciones en cañerías, que un problema de salud. El dispositivo piloto mejoró la condición de la dureza en el agua evaluada, sin embargo, no logra conseguir la concentración menor a 200 mg/L, que solicita el cumplimiento de la Norma 127.

Los sólidos disueltos totales son el residuo que queda después de evaporar una muestra de agua incluye sales, minerales, metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua; por otra parte los sólidos suspendidos totales son lo que quedan retenidos en un filtro de 1.5 micras, la NOM 127 menciona que el límite son 1000 mg/L, pero un estudio hecho por la Organización Mundial de la Salud (OMS), clasifica de acuerdo a los niveles de los sólidos disueltos el agua

- 0-300 Excelente
- 300-600 Nivel bueno
- 600-900 Nivel aceptable
- 900-1200 Nivel no recomendable
- 1200 o más inaceptable.

Los resultados obtenidos se encuentran por debajo de lo solicitado en la NOM 127 y de acuerdo con los datos OMS el agua es de buena calidad, el sistema purificador disminuye la concentración de sólidos disueltos, mientras que para los sólidos suspendidos son 0 mg/L lo que se considera despreciable por lo que los sólidos totales de acuerdo con la NMX-AA-034 es la suma de ambos parámetros siendo igual a 467 y 403 mg/L respectivamente.

El parámetro AOX por sus siglas en inglés son los orgánicos halogenados adsorbibles, e indica la concentración de compuestos que contienen cloro, bromo o yodo. En dado caso que su concentración sea alta indica que existe una posible contaminación, estos compuestos al ser adsorbibles, quiere decir que pueden ser retenidos por carbón activados, parte del sistema de purificación, como se observa en la tabla 3.10 hubo una disminución lo que indicaría que el carbón activado está cumpliendo su función, pero no de la forma esperada. La concentración de yodo en ambas muestras fue de cero, por lo que se sugiere que la concentración reportada de AOX la determina los compuestos de bromo y cloro.

El agua posee una gran variedad de elementos biológicos desde los microorganismos hasta peces, y su origen puede ser natural o provenir de la contaminación por vertido cloacales y/o industriales. Y es por ello por lo que es de suma importancia evaluar la cantidad de microorganismos que existe en el agua que se consume.

Los indicadores microbiológicos de calidad del agua son organismos que tienen un comportamiento similar a microorganismos patógenos cuya procedencia, concentración, hábitat y reacción a factores externos es la de la mayoría. Requieren la identificación y cuantificación de microorganismos por índices de diversidad ajustados a intervalos que califican la calidad del agua y, aunque la información microbiológica obtenida a partir de su análisis no reemplaza los análisis fisicoquímicos, reduce costos y aporta información en el monitoreo de la calidad del agua.

En la presente investigación se realizaron pruebas para evaluar la cantidad de Bacterias aerobias mesófilas o heterótrofos (BAM) y a los grupos de coliformes totales y fecales, siendo estos últimos los considerados en las NOM 201 y 127, En la tabla 3.15 se muestra los límites máximos permisibles para cada una de las normas.

Tabla 3.15. Límites máximos permisibles de Normas para Coliformes Totales

	NMP/100mL	UFC/100mL	Organismos/100 mL
NOM 201	<1.1	Cero	Ausencia
NOM 127	2 NMP/100 mL.	2 UFC/100 mL.	---

El grupo de bacterias heterótrofas mesófilas aerobias que incluyen una gran variedad de géneros y especies, la presencia en altas cantidades evidencias problemas de higiene y de contaminación del agua.

Tabla 3.16. Resultados de pruebas Microbiológicas.

	Bacterias Mesofílicas Aerobias	Coliformes Fecales y Totales
Muestra grifo	539 UFC/mL.	Ausencia
Muestra filtro	380 UFC/mL.	Ausencia

Cuando el recuento de bacterias Mesófilas es mayor que 500 UFC/mL, como la muestra tomada del grifo del Laboratorio de alimentos, se considera que el agua está expuesta a contaminación general y es un ambiente propicio para la multiplicación de microorganismos. El recuento se aplica como indicador de la eficacia del proceso de potabilización del agua, y la concentración disminuyó en la muestra que se tomó a la salida del sistema piloto de purificación siendo de 380 UFC/mL, lo que indicaría que es eficiente el sistema incluyendo la membrana.

En ambas muestras hubo ausencia de coliformes fecales y totales por lo que cumplen con las normas evaluadas sin ninguna observación.

El oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica del oxígeno (DBO) son parámetros que no están solicitados en las Normas Mexicanas para agua de consumo humano, sin embargo, se consideró de suma importancia evaluarla ya que miden la cantidad de oxígeno y esto implica conocer si se puede crecer la actividad microbiana en la muestra final, entre mayor es la DBO, menor es el oxígeno disponible para las formas de vida acuática y se tiene agua más contaminada por componentes biodegradables.

A nivel orientativo se muestran intervalos en donde se determina la calidad del agua de acuerdo con la concentración de DBO.

- Agua Pura: desde 0 a 20 mg/litro
- Agua Levemente Contaminada: desde 20 a 100 mg/litro
- Agua Moderadamente Contaminada: desde 100 a 500 mg/litro
- Agua Muy Contaminada: desde 500 a 3.000 mg/litro
- Agua Extremadamente Contaminada: desde los 3.000 mg/litro

De acuerdo con datos de SEMARNAT (2012) resultados de DBO5 inferiores a los 3 mg/L, se clasifica como de una excelente calidad del agua.

Tabla 3.17. Resultados de DBO5.

	OD Inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	DBO5 (mg/L)	Promedio (mg/L)
Muestra Grifo 1	4.7	1.8	2.90	2.95±0.07
Muestra Grifo 2	4.9	1.9	3.00	
Muestra Filtro 1	4.5	1.8	2.70	2.85±0.21
Muestra Filtro 2	4.5	1.5	3.00	

En la tabla 3.16 se muestran los datos obtenidos del análisis de DBO5 realizados por duplicado para la toma del grifo y la salida del sistema purificador. Se puede observar que ambas están por debajo de los 3 mg/L y que el purificador disminuye ligeramente en la concentración final, lo que implica la eficiencia del sistema piloto de purificación.

3.5. Cálculos del sistema de purificación.

El proceso de filtración es uno de los más utilizados en el tratamiento de agua, y es de suma importancia conocer el comportamiento del flujo del agua durante dicho proceso. La separación durante un proceso de filtración es debida a la presión, fuerza motriz del proceso. El comportamiento de una membrana puede cambiar en los procesos de filtración tangencial al presentarse disminución del flux de permeado debido a la acumulación de partículas en la superficie de la membrana (Ortíz *et.al.* 2008). Una de las leyes más usadas es la Ley de Darcy, la cual dice que el caudal que atraviesa el medio poroso es directamente proporcional a las diferencias de presiones e inversamente proporcional a la distancia que debe atravesar el fluido (Pinzón *et.al.* 2018) en la cual el flux de permeado es función de la presión transmembranaria y de una resistencia total.

La tabla 3.16 muestra algunos datos del sistema de purificación, la presión, fue establecida en relación con documentos técnicos que establecen las características que deben tener las tuberías para abastecimiento de agua potable en zonas habitacionales y el resto se toma de las características del tubo de PVC y datos generales del agua a temperatura ambiente.

Tabla 3.18. Especificaciones del sistema piloto de purificación.

Temperatura	25°C
Presión	67 kN/m ²
Viscosidad agua	8.937x10 ⁻⁴ kg/ms
Densidad agua	997 kg/m ³
Concentración solidos totales	0.467 Kg/m ³
Área de los segmentos del filtro	0.0018 m ²
Diámetro interno del tubo de PVC de 2 in	0.048 m
Distancia del sistema de purificación	0.75 m
Longitud de segmento por medio filtrante	0.15 m

A partir de datos de la tabla 3.16, de las ecuaciones de Darcy y de la ecuación de velocidad de filtración (2) se obtuvieron las constantes de resistencia a la transferencia de masa (α =Resistencia específica de la torta de filtrado, R_m = Resistencia del medio filtrante).

$$\frac{-p}{L} = \frac{32v}{D^2} \quad (1)$$

$$\frac{dt}{dV} = \frac{c_s}{A^2(-p)} V + \frac{R_m}{A(-p)} = K_p V + B \quad (2)$$

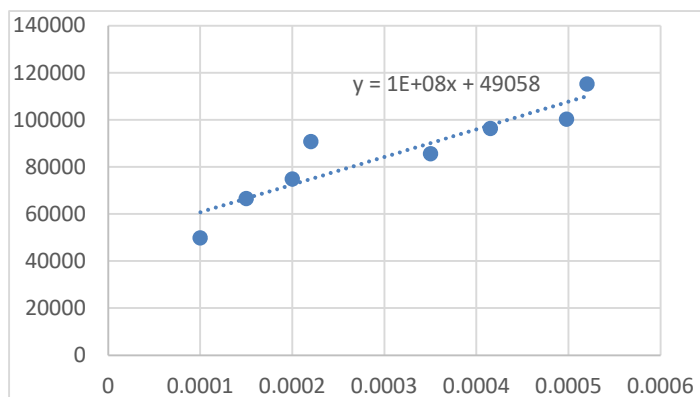
De ambas ecuaciones se obtiene la ecuación 3 y dividiendo entre volumen “V” se obtiene la 4 que tiene la misma forma que la ecuación de la recta.

$$t = \frac{K_p}{2} V^2 + BV \quad (3)$$

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B \quad (4)$$

Donde la pendiente de la recta es $m = \frac{K_p}{2}$ y B=Ordenada al origen. Se registraron datos experimentales realizados en el laboratorio, y se posteriormente se grafican la siguiente figura muestra el grafico resultante.

t (seg)	V (ml)	V (m ³)	t/V (s/ m ³)
5	100	0.0001	50000
10	150	0.00015	66667
15	200	0.0002	75000
20	220	0.00022	90909
30	350	0.00035	85714
40	415	0.000415	96386
50	498	0.000498	100402
60	520	0.00052	115385



Identificando las variables en el grafico se sabe que Las resistencias a la transferencia de masa son:

$$m = \frac{K_P}{2} = 1 \times 10^8(5)$$

Por lo tanto, $K_P=2 \times 10^6$ y $B=49058$ se tomó en cuenta la concentración de solidos totales, debido a que el parámetro que puede indicar que hay una cierta saturación en el sistema piloto de purificación.

$$\frac{\mu \alpha c_s}{A^2(-\Delta p)} = K_p \quad (6) \quad \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R_m = B \quad (7)$$

Sustituyendo, se obtiene que $\alpha = 462914922.7 \text{ m/Kg}$ y $R_m = 6620112.79 \text{ m}^{-1}$, lo que nos indica que el sistema cuenta con una amplia resistencia en los medios filtrantes incluido el filtro con las nanofibras.

Finalmente calculando el número de Reynolds (ecuación 8), tomando en cuenta que para tuberías domésticas la velocidad máxima es de 1.5 m/s para no provocar ruidos, se obtiene un valor de **80322** lo que indicaría que se trata de un flujo turbulento.

3.6. Impacto ambiental.

Los materiales usados en la elaboración del material se consideran poco abrasivos con el medio ambiente, sin embargo, la bioacumulación e interacción de este tipo de nanopartículas en el ambiente son desconocidos en gran parte, generando preocupación por los efectos potencialmente tóxicos que aún no han sido estudiados de forma adecuada, de ahí la importancia de conocer sus efectos en el ambiente.

Iniciando con el alcohol polivinílico (PVA) es un polímero sintético biocompatible y biodegradable, hidrofílico y no tóxico (Destaye *et.al* 2013). El glutaraldehído (GA) se utiliza a temperatura ambiente por el extremo sin reaccionar de GA en las nanofibras de PVA reticulado sin la adición de agentes reductores o tóxicos, lo que hace que el método sea más ecológico y respetuoso con el medio ambiente.

Las nanopartículas de plata podrán generar en el futuro un efecto sobre el medioambiente. El empleo de nanopartículas de plata debido a que se está proponiendo su uso en aplicaciones cotidianas como, en textiles o electrodomésticos, puede producir un efecto de aumento de concentración de nanopartículas en aguas residuales, lo que esta situación choca frontalmente con el empleo de bacterias nitrificantes en la depuración de aguas residuales ya que el aumento de la concentración de nanopartículas de plata produciría un efecto bactericida sobre estas nanopartículas beneficiosas disminuyendo su capacidad (Monge Miguel, 2009).

No se tienen claros los efectos ambientales de algunas nanopartículas metálicas como las de ZnO, cuyos mecanismos de absorción en plantas pueden ser complejos, ya que intervienen la bioacumulación y la interacción con bacterias fijadoras de nitrógeno, alterando su potencial de fijación (Abrica & Gómez, 2021).

La liberación de los nanomateriales puede ocurrir durante todo el ciclo de vida del producto, depende de las circunstancias de manufacturación como producción y procesamiento, uso del producto en ambientes específicos y su disposición al final de su ciclo de vida. El ciclo de vida del producto puede dividirse en tres fases generales: 1) manufacturación, 2) uso del producto

normal/comercial/consumición y 3) post consumición/final de vida/eliminación (García Ortíz,2017).

Debido a la variabilidad de propiedades fisicoquímicas, es difícil hacer una afirmación general sobre un impacto negativo de las nanopartículas en el medio ambiente. Por otro lado, entre las numerosas aplicaciones de las nanopartículas, puede tener un impacto beneficioso en la biorremediación y la descontaminación ambiental.

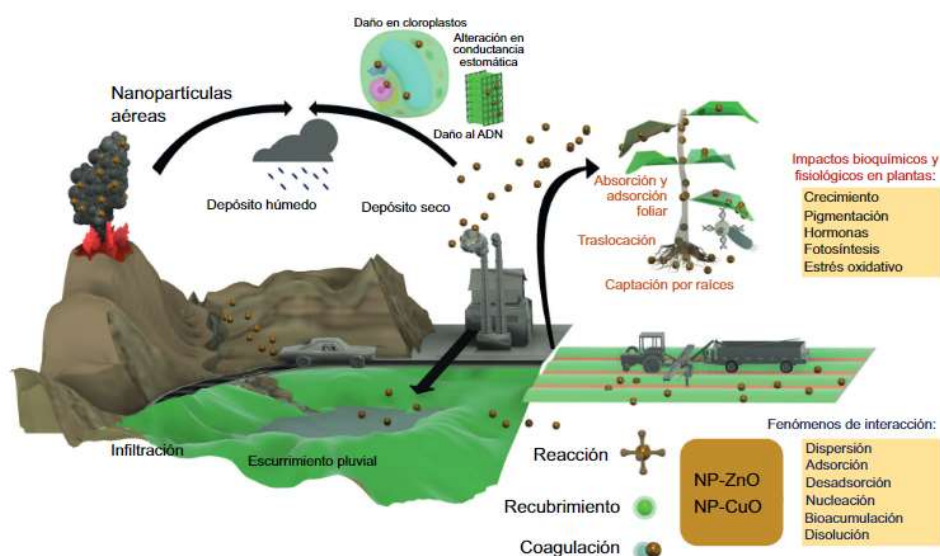


Figura 3.17. Esquema que ilustra la interacción de nanopartículas aéreas en el ambiente.
Extraído de: (Abrica & Gómez, 2021).

La fabricación de productos nanotecnológicos continúa en incremento, por lo cual deben buscarse alternativas para que el impacto en su ciclo de vida sea el menor posible. Para la síntesis de nanomateriales, se requiere de procesos físicos, mecánicos y químicos y de sustancias que funcionen como agentes reductores y estabilizantes.

Aunado a esto el objetivo del presente proyecto si bien es obtener agua purificada, se sugiere tener aportaciones para eliminación de algunos posibles contaminantes, los cuales se requieren estudiar, posteriormente a más profundidad.

Conclusiones

El agua es considerada potable cuando es apta para el consumo humano, es decir, beber, cocinar alimentos, higiene personal o tareas domésticas, es decir que no deberá suponer ningún riesgo para la salud de las personas, y estar libre de microorganismos y sustancias tóxicas, sin embargo, durante el abastecimiento que se tiene hasta llegar a los hogares, puede adquirir características que ya no son aptas para su consumo. Por otra parte, el agua purificada tiene como materia prima el agua potable, ya que es sometida a procesos posteriores al de potabilización, mejorando su calidad.

La hipótesis del presente proyecto se cumple al conseguir desarrollar la membrana a partir de PVA, adicionando, nanopartículas comerciales de plata y óxido de zinc, se evaluó la actividad bactericida de las mismas y se obtuvieron resultados favorables y finalmente se implementó en un sistema purificador piloto.

Durante la elaboración de las nanofibras el método de reticulación aplicado favoreció la hidrofobicidad de las fibras, lo que era indispensable para el proceso de filtración.

Las fibras obtenidas, tuvieron una morfología regular, esto de acuerdo con los resultados obtenidos durante las pruebas de caracterización, incluyendo el efecto bactericida, resultando mejor las nanopartículas de óxido de zinc.

El análisis de FT-IR ayudó a identificar la presencia de las nanopartículas en nanofibras, sin embargo, se recomienda efectuar un análisis en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) para identificar con mayor exactitud la distribución de las nanopartículas en la nanofibra.

La fabricación del dispositivo piloto se realizó de manera exitosa, con materiales sencillos; es importante resaltar que es necesario realizar un análisis de costos detallado y tomar en cuenta parámetros específicos, desde el proceso de electrohilado, gasto de energía, mano de obra e insumos.

La calidad del agua obtenida cumple con la NOM 201, debido a que evaluaron parámetros enfocados a la desinfección y físicos, como son cloro residual, turbiedad y color. Con respecto a la NOM 127, la concentración de dureza total está por encima de los límites máximos permisibles, lo que indica un incumplimiento con la norma, sin embargo, al pasar el agua de grifo por el sistema de purificación hubo una disminución de la concentración de dureza total de 30 mg/L. El resto de los parámetros fisicoquímicos evaluados cumplen con las especificaciones de la NOM 127 lo que indicaría que el agua que atraviesa el dispositivo cuenta con una mejor calidad que el agua del grifo.

En las pruebas microbiológicas para la calidad del agua se encontró una disminución de concentración de Bacterias Mesofílicas Aerobias de la muestra de agua que sale del sistema purificador, lo que indica que la membrana con nanopartículas está efectuando su efecto antimicrobiano, y no se encontró presencia de coliformos ni antes ni después del sistema purificador.

Aunado a lo anterior se recomienda realizar un estudio más detallado para obtener agua que cumpla con la NOM 127 específicamente en la concentración de la dureza total que podría generar incrustaciones en las tuberías.

Finalmente, se recomienda hacer un análisis más detallado de la dinámica de fluidos que se lleva a cabo en el dispositivo piloto, debido a que este fenómeno no estaba planteado dentro de los objetivos específicos.

La nanotecnología en definitiva da la oportunidad de ampliar la gama de materiales con aplicaciones en diversos campos por lo que es importante, seguir generando proyectos, que tengan la apertura de ser implementados y comercializados.

Referencias

- Abrica-González Paulina, & Gómez-Arroyo Sandra. (2021). Efectos y caracterización de nanopartículas atmosféricas (NP-CuO, ZnO) en plantas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 145–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.54303>
- Amariei, G., Morales Santiago, J., Boltes Espínola, K., Letón García, P., Rosal García, R., Rodríguez Fernández-Alba, A., & Martínez Bueno, M. J. (2016). Membranas electrohiladas de doble acción para tratamiento de agua (Patent No. ES 2663129A1). 2663129. uri: <http://hdl.handle.net/10835/6906>
- Antúñez García, J., Maytorena Córdova, J. A., Petranovskii, V., & Raymond Herrera, O. (2000). Preguntas y Respuestas Sobre El mundo Nano. Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM, 1–83.
- Aussawasathien, D., Teerawattananon, C., & Vongachariya, A. (2008). Separation of micron to sub-micron particles from water: Electrospun nylon-6 nanofibrous membranes as pre-filters. *Journal of Membrane Science*, 315(1–2), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.01.049>
- Britto, M., & Castro, R. (2012). Nanobiotechnology: towards a new scientific and technological gateway. *Química Viva*, 171–183.
- Calcina Mamani Raque y Vigo Rivera Juan Eduardo, Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para el consumo humano, Juliaca, septiembre 2020.
- Chaudhary Anisha, Gupta Ashish, Mathur B. Rakesh, Dhakate R. Sanjay, (2014), Effective antimicrobial filter from electrospun polyacrylonitrile-silver composite nanofibers membrane for conducive environment, *Advanced Materials Letters*, 5 810) 562-568.
- Chen, Z. C., Chang, T. L., Liou, D. S., Fan, J. Y., & Wang, C. P. (2021). Fabrication of a bio-inspired hydrophobic thin film by glutaraldehyde crosslinking electrospun composite self-cleaning nanofibers. *Materials Letters*, 298, 129975. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129975>
- Dekker, A. J. (1959). *Electrical Engineering Materials*. United States of America: Prentice Hall.
- Destaye, A. G., Lin, C. K., & Lee, C. K. (2013). Glutaraldehyde vapor cross-linked nanofibrous PVA mat with in situ formed silver nanoparticles. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(11), 4745–4752. <https://doi.org/10.1021/am401730x>
- Duran-Pinzón, M., Páez-Arango, J., & García-Guarín, P. J. (2018). Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos. *ITECKNE*, 15(1), 24. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1961>
- Fahimirad, S., Ajalloueian, F., Ghorbanpour, M., 2019. Synthesis and therapeutic potential of silver nanomaterials derived from plant extracts. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 168,260–278 Jan 30.
- Fahimirad S, Ajalloueian F. Naturally derived electrospun wound dressings for target delivery of bio-active agents. *Int. J. Pharm.* 2019 May 21.
- FAO. (07 de mayo de 2014). El agua: el recurso más básico y a la vez el más indispensable. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/231226/>

- Farrokhi, Z., Ayati, A., Kanvisi, M., Sillanpää, M., 2019. Recent advance in antibacterial activity of nanoparticles contained polyurethane. *J. Appl. Polym. Sci.* 136 (4), 46997 Jan 20.
- Federación, D. O. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA-2015 Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. México, D.F.
- Federación, D. O. (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso de consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Cd. de México.
- García, D. (2017). Evaluación del impacto ambiental de nanopartículas. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense, 21. http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/DIEGO_ANTONIO_GARCIA_ORTIZ.pdf
- Guizard, C. (1999). Técnicas membranarias de filtración de líquidos Microfiltración – Ultrafiltración – Nanofiltración – Ósmosis inversa. Módulo de Enseñanza En Fenómenos Interfaciales, 56.
- Guo, B.L., Han, P., Guo, L.C., Cao, Y.Q., Li, A.D., Kong, J.Z., Zhai, H.F., Wu, D., 2015. The antibacterial activity of Ta-doped ZnO nanoparticles. *Nanoscale Res. Lett.* 10 (1), 336 Dec 1.
- Hameed, A.S., Karthikeyan, C., Ahamed, A.P., Thajuddin, N., Alharbi, N.S., Alharbi, S.A., Ravi, G., 2016. In vitro antibacterial activity of ZnO and Nd doped ZnO nanoparticles against ESBL producing *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae*. *Sci. Rep.* 6 (1), 1–11 (Apr 13).
- Hayati, I., Bailey, A. I., & Tadros, T. F. (May 1987). Investigations into the mechanisms of electrohydrodynamic spraying of liquids: I. Effect of electric field and the environment on pendant drops and factors affecting the formation of stable jets and atomization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 205-221.
- Hernandez, M. M. P. (2022). Simulación de un proceso de filtración para el laboratorio de procesos de separación de la Universidad Metropolitana. *Tekhné*, 25(1), 16-16.
- Hoek, E. B. (2003). Effect of membrane surface roughness on colloid membrane. *Langmuir*, 19(11), 4836-4847.
- Hulupi, M., & Haryadi, H. (2019). Synthesis and Characterization of Electrospinning PVA Nanofiber-Crosslinked by Glutaraldehyde. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 13). www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings
- Jeong, B. H. (2007). A. Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: a new concept for reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 294(1-2), 1-7.
- Kang H, Zhu Y, Jing Y, Yang X, Li C. (2010). "Fabrication and Electrochemical Property of Ag-Doped SiO₂ Nanostructured Ribbons," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 356, 120.
- Khan, M. Q., Kharaghani, D., Nishat, N., Shahzad, A., Hussain, T., Khatri, Z., Zhu, C., & Kim, I. S. (2019). Preparation and characterizations of multifunctional PVA/ZnO nanofibers composite membranes for surgical gown application. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1328–1334. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.013>
- Koch, M., & Krammer, G. (2015). Permeability distribution for filter media characterization in solid liquid filtration. *Powder Technology*, 271, 182–186. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.042>
- Leyva Gómez, G. (2013). Nanopartículas de plata: tecnología para su obtención, caracterización y actividad biológica. *Investigation En Decapacitate* (1), 18–22.

- Lind, M. G. (2009). Influence of zeolite crystal size on zeolite-polyamide thin film nanocomposite membranes. *Langmuir*, 25(17), 10139-10145.
- Li Wan-Ju, C. T. (2002). Electrospun Nanofibrous Structure a Novel Scaffold for Tissue Engineering. *Biomedical Materials*, 613-621.
- López, G. D. (2018). Nanotecnología Aplicada a la Mitigación de Metales Pesados en Colas de Minería. *Congreso Argentino de Ingeniería*, 12-21.
- Martín, I., Salcedo, R., & Font, R. (2011). Mecánica de Fluidos Tema 5. Operaciones separación sólido-fluido. Universidad de Alicante, 15-27.
- Martínez-Gutiérrez, F. O.-G. (2010). Synthesis, characterization, and evaluation of antimicrobial and cytotoxic effect of silver and titanium nanoparticles. *s. Nanomedicine: Nanotechnology*, 6(5), 681-688.
- Marelize, B., & Thomas Eugene, C. (2017). The potential of nanofibers and nanobiocides in water purification. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.3109/10408410903397332>
- Monge Miguel. (2009). Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. *Real Sociedad Española de Química*, 33–41.
- Mukherjee, M., De, S., 2018. Antibacterial polymeric membranes: a short review. *Environmental Science: Water Research & Technology* 4 (8), 1078–1104.
- Narayanan, V., Mani, M. K., & Thambusamy, S. (2020). Electrospinning preparation and spectral characterizations of the inclusion complex of ferulic acid and γ -cyclodextrin with encapsulation into polyvinyl alcohol electrospun nanofibers. *Journal of Molecular Structure*, 1221, 128767. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128767>
- Noriega-Treviño, M. E., Quintero González, C. C., & Guajardo Pacheco, J. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 87-100.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). Cambio climático y salud humana. Obtenido de <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/water/es/>
- Ortiz Jerez, M. J., Pasos Vélez, A. C., Edinson Franco, M. (2008). Mathematical models of membrane fouling in crossflow micro-filtration. Vol. 28, Issue.
- Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y.E., Tyagi, C., Tomar, L., Kumar, P., du Toit, L.C., Ndesendo, V.M., 2013. A review of the effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications. *J. Nanomater.* 2013.
- Pupkevičiūtė, S., Adomavičiūtė, E., Pavilionis, A., Stanys, S., & Prosyčėvas, I. (2015). Formation and antibacterial property analysis of electrospun PVA nonwoven material with a small amount of silver nanoparticles. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 23(6), 48–54. <https://doi.org/10.5604/12303666.1167419>
- Real academia española: Diccionario de la lengua española. (s.f.). Diccionario de la lengua española, 23.ª ed., Obtenido de <https://dle.rae.es>
- Rodríguez, J. (2009). Centro de investigación en química aplicada análisis de métodos y técnicas de caracterización de materiales nano estructurados. Centro de Investigación En Química Aplicada, 6–18.

- Sirelkhatim, A.; S. Mahmud; A. Seenii; N. Mohamad; L. Chuo; S. Mohd; H. Hasan & D. Mohamad. 2015. Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism- Nano-Micro Lett, 2015; 7(3):219–242.
- Sánchez, M., Elpidio, J., Jasso, C., Eugenia, M., Eugenia, M., & Cristina, N. C. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III, 87–100.
- Sandoval Acuña, L. J., & Torres Becerra, D. A. (2021). Nanopartículas De Óxido De Grafeno Como Agente Biocida Incrustados En Membranas De Microfiltración Electrohiladas Para Tratamiento De Aguas: Una Revisión Sistemática. <https://emea.mitsubishielectric.com/ar/products-solutions/factory-automation/index.html>
- Shekh, M. I., Patel, K. P., & Patel, R. M. (2018). Electrospun ZnO Nanoparticles Doped Core–Sheath Nanofibers: Characterization and Antimicrobial Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(12), 4376–4387. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1310-8>
- Shohreh Fahimirad, Zahra Fahimirad, Mika Sillanpää, Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers, *Science of The Total Environment*, Volume 751, 2021.
- Silva González, J. A. (2016). Caracterización de las propiedades morfológicas y térmicas de fibras de aceite de oliva encapsulado obtenidas por electrospinning empleando como agente encapsulante alcohol polivinílico PVA”. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Smits, A. J. (2003). *Mecánica de fluidos. Una introducción física.*, Editorial Alfaomega, México.
- Subbiah Thandavamoorthy, Bhat GS, Tock RW, Parameswaran S., Ramkumar SS, (2005). Electrohilado de nanofibras. *Wiley Natural Sciences*, vol. 96, No. 2, 557-569.
- Taheran, M., Kumar, P., Naghdi, M., Brar, S. K., Knystautas, E. J., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2019). Development of an advanced multifunctional portable water purifier. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0054-6>
- Tan, G., Sağlam, S., Emül, E., Erdönmez, D., & Sağlam, N. (2016). Synthesis and characterization of silver nanoparticles integrated in polyvinyl alcohol nanofibers for bionanotechnological applications. *Turkish Journal of Biology*, 40(3), 643–651. <https://doi.org/10.3906/biy-1505-71>
- Tlili, I., & Alkanhal, T. A. (2019). Nanotechnology for water purification: Electrospun nanofibrous membrane in water and wastewater treatment. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 9(3), 232–247. <https://doi.org/10.2166/wrd.2019.057>
- Tiwari, V., Mishra, N., Gadani, K., Solanki, P.S., Shah, N.A., Tiwari, M., 2018. Mechanism of anti-bacterial activity of zinc oxide nanoparticle against carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*. *Front. Microbiol.* 6 (9), 1218 Jun.
- Thandavamoorthy Subbiah, G. B. (2004). *Electrospinning of Nanofibers*. Wiley InterScience, 557-568. Obtenido de Wile InterScience.
- Travis, H. A. (2008). *Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering*. Biomaterials, 1989-2006.

- Ullah, S., Hashmi, M., Hussain, N., Ullah, A., Sarwar, M. N., Saito, Y., ... & Kim, I. S. (2020). Stabilized nanofibers of polyvinyl alcohol (PVA) crosslinked by unique method for efficient removal of heavy metal ions. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101111.
- Urdapilleta Inchaurregui Vianey. (2020). Diseño y evaluación de filtro purificador de agua a partir de nanopartículas manufacturadas, nanopartículas de suelo y materiales reciclados. Instituto Politécnico Nacional.
- Velastegui Vásconez Víctor Hugo. (2017). Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del centro de faenamiento Ocaña del cantón quero. (Tesis) Universidad Técnica de Ambato
- Wang, R., Guan, S., Sato, A., Wang, X., Wang, Z., Yang, R., Hsiao, B.S., Chu, B., 2013. Nanofibrous microfiltration membranes capable of removing bacteria, viruses, and heavy metal ions. *J. Membr. Sci.* 446, 376–382 Nov 1.
- Zhan, J., Morsi, Y., Ei-Hamshary, H., Al-Deyab, S. S.; Mo, X. (2016). In vitro evaluation of electrospun gelatin–glutaraldehyde nanofibers. *Frontiers of Materials Science*. DOI 10.1007/s11706-016-0329-9
- Zong, K. K. (2002). Structure and Process Relationship of Electrospun Bioabsorbable Nanofiber Membranes. *Polymer*, 4403-4412.