



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



**NANOPARTICULAS DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO AGENTE BIOCIDA
INCRUSTADOS EN MEMBRANAS DE MICROFILTRACIÓN ELECTROHILADAS
PARA TRATAMIENTO DE AGUAS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**

LEYDI JOHANA SANDOVAL ACUÑA

DANIELA ASTRID TORRES BECERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA, 18 DE FEBRERO DEL 2021



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



**NANOPARTICULAS DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO AGENTE BIOCIDA
INCRUSTADOS EN MEMBRANAS DE MICROFILTRACIÓN ELECTROHILADAS
PARA TRATAMIENTO DE AGUAS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**

LEYDI JOHANA SANDOVAL ACUÑA

DANIELA ASTRID TORRES BECERRA

Trabajo De Grado Como Requisito Para Optar al Título de Ingeniero Ambiental

Director: Sully Segura Peña

Codirector: Ángela Patricia Sánchez Cepeda

Codirector: Ever Humberto Sáchica Castillo

Codirector: Luz Amanda Montes Malagón

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

TUNJA, 18 DE FEBRERO DEL 2021

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por habernos permitido culminar esta etapa de nuestras vidas a pesar de la situación por la que la humanidad está pasando, es importante para nosotras llegar a este momento tan importante en la formación profesional. A nuestros padres, por su apoyo incondicional y cariño que siempre será la fuerza para cada una de las metas propuestas. Queremos agradecer de todo corazón a nuestros codirectores de tesis, por su paciencia y sobre todo por su confianza puesta en nosotras, para la finalización de este trabajo, a nuestra querida directora por confiar y siempre darnos la voz de aliento para continuar, y especialmente a nuestras familias y parejas, por su voto de confianza y apoyo absoluto, para lograr esto y la fuerza de obtener muchos triunfos más.

AGRADECIMIENTOS

Llegar a este punto no es sencillo, pero quizás la fuerza y la dedicación nos trajeron hasta acá, a nuestros padres, nuestro especial agradecimiento, por su confianza y optimismo en nosotras, queremos agradecerles a nuestros docentes, este logro es en gran parte gracias a ustedes, ya que con sus conocimientos nos guiaron hacia el camino correcto para la realización de este trabajo, a nuestras familias, por brindarnos su apoyo y consejos para motivarnos a seguir día a día. Concluir este trabajo con éxito, es el principio de muchos logros que están por venir, ya que terminar este logro académico, da inicio a la vida profesional que añoramos. Muchas gracias a todas aquellas personas, que siempre tuvieron una voz de aliento en el camino académico, desde el inicio de la carrera hasta el final, los llevaremos siempre en nuestros corazones.

Contenido

1. Introducción	20
2. Objetivos.....	22
2.1. Objetivo General	22
2.2. Objetivos Específicos.....	22
3. Antecedentes.....	23
4. Marco Teórico.....	27
4.1. Métodos para tratamiento de aguas en la eliminación de microorganismos....	28
4.1.1. Desinfección por cloración.....	29
4.1.2. Desinfección por ozonización.	30
4.1.3. Desinfección por rayos ultravioleta.....	30
4.1.4. Desinfección por técnicas que hacen uso de las nanotecnologías.....	31
4.2. Técnica de Electrospinning	31
4.2.1. Parámetros de electrohilado.....	35
4.3. Materiales para la fabricación de membranas electrohiladas	37
4.3.1. Materiales orgánicos.	38
4.3.2. Materiales inorgánicos.....	41
4.4. Microorganismos presentes en aguas	43
4.4.1. Bacterias.....	44
4.4.2. Protozoos parásitos.....	45
5. Metodología	47

5.1.	Fase 1: Planificación	47
5.2.	Fase 2: Búsqueda de Documentos en Las Bases de Datos	51
5.3.	Fase 3: Extracción de datos.....	52
5.4.	Fase 4: Análisis de Datos Extraídos de Parsifal.....	59
6.	Análisis y Discusión de Resultados	60
6.1.	Materiales Compuestos Utilizados en la Elaboración de Membranas Poliméricas Electrohiladas de MF Para la Eliminación de Microorganismos	60
6.2.	Caso Estudio 1: Membranas de MF de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas de coaxial PLA /PAN Modificadas con NCC y NCQ.	66
6.2.1.	Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PAN vs PLA/PAN.	67
6.2.2.	Ventajas y Desventajas del uso de NPs Ag/GO vs NCC y NCQ.	70
6.3.	Microorganismos Que Pueden Ser inhibidos o eliminados Con Membranas Poliméricas Electrohiladas en el Proceso de MF	73
6.4.	Parámetros de Electrohilado de Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag / GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos	79
6.5.	Características físicas, químicas y mecánicas de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ para la Eliminación de Microorganismos	82
6.6.	Caso Estudio 2: Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO ₂	84
6.6.1.	Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PVDF Vs PA-6.....	86
6.6.2.	Ventajas y Desventajas del uso de los NPs GO Vs TiO ₂	88
6.6.3.	Ventajas y Desventajas del uso de NPs GO Vs NPs de TiO ₂	89
6.7.	Microorganismos que pueden ser inhibidos o eliminados con membranas poliméricas electrohiladas en el Proceso de MF de PVDF modificadas con NPs de GO Vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO ₂	90

6.8. Parámetros de electrohilado de membranas de MF de PVDF modificadas con NPs de GO Vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO_2 en la eliminación de microorganismos.....	93
6.9. Características físicas, químicas y mecánicas de las Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO_2 en la Eliminación de Microorganismos.....	96
7. Impacto Social Y Humanístico Del Proyecto	99
8. Conclusiones	100
9. Recomendaciones	103
10. Anexos.....	147
10.1. Técnicas de caracterización	148
10.2. Técnica de electrospinning coaxial	149

Lista de figuras

Figura 1. Montaje equipo electrospinning.	32
Figura 2. Equipo electrospinning laboratorio química inorgánica, Universidad Santo Tomas Sede Tunja.	33
Figura 3. Equipo electrospinning laboratorio colector estacionario.	33
Figura 4. Estructura bidimensional plana del óxido de grafeno.	42
Figura 5. Preguntas de Calidad Realizadas a Cada uno de los Artículos Aceptados en la Fase 2.	55
Figura 6. Formulario Extracción de Datos 1.	56
Figura 7. Formulario Extracción de Datos 2.	56
Figura 8. Formulario Extracción de datos 3.	57
Figura 9. Diámetros de las Fibras Electrohiladas en comparación con microorganismos y Objetos Microscópicos.	61
Figura 10. Diferencia de presión (bar) para procesos de filtración con el uso de membranas.	62
Figura 11. Montaje equipo electrospinning coaxial.	150

Lista de tablas

Tabla 1. Protocolo PICOC.....	48
Tabla 2. Preguntas de Investigación Planteadas.	49
Tabla 3. Criterios de Inclusión y Criterios de Exclusión.	50
Tabla 4. Cadenas de Búsqueda Avanzada Realizada en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.	51
Tabla 5. Artículos seleccionados, aceptados, duplicados, rechazados obtenidos en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.	54
Tabla 6. Cantidad de artículos seleccionados en cada uno de los filtros realizados en el software Parsifal.....	57
Tabla 7. Estudios de caso utilizados para dar respuesta a las preguntas de investigación.	59
Tabla 8. Principales Polímeros utilizados en el proceso de MF	63
Tabla 9. Principales Nanocompuestos Utilizados en el Proceso de Microfiltración. .	65
Tabla 10. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PAN vs PLA/PAN.	69
Tabla 11. Ventajas y Desventajas del uso de NPs Ag/GO vs NCC y NCQ.....	71

Tabla 12. Propiedades de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ	72
--	----

Tabla 13. Microorganismos que Pueden Inhibir o Eliminar las Membranas de MF de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ.....	74
--	----

Tabla 14. Efectividad de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos.....	76
--	----

Tabla 15. Actividad Antibacteriana de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO Vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos.....	78
---	----

Tabla 16. Parámetros de la Solución del Polímero.	80
--	----

Tabla 17. Condiciones de Procesamiento Técnica de Electrospinning.....	81
--	----

Tabla 18. Condiciones Ambientales para el Proceso de la Técnica de Electrospinning.....	82
---	----

Tabla 19. Caracterización Física, química, mecánica de las membranas Poliméricas Modificadas.	83
--	----

Tabla 20. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PVDF Vs PA-6.	87
--	----

Tabla 21. Ventajas y Desventajas del uso de NPs GO Vs NPs de TiO ₂	88
--	----

Tabla 22. Propiedades de las Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO ₂	89
--	----

Tabla 23. Microorganismos que pueden inhibir o eliminar las membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO ₂	91
---	----

Tabla 24. Efectividad de las Membranas de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO ₂ en la Eliminación de Microorganismos.	92
--	----

Tabla 25. Actividad Antibacteriana de las Membranas de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO ₂ en la Eliminación de Microorganismo.	93
--	----

Tabla 26. Parámetros de la Solución del Polímero.	94
--	----

Tabla 27. Condiciones de Procesamiento Técnica de Electrospinning.	95
---	----

Tabla 28. Condiciones Ambientales del Procesamiento Técnica de Electrospinning.	96
--	----

Tabla 29. Caracterización Física, química, mecánica de las membranas Poliméricas Modificadas.	97
--	----

Tabla 30. Técnicas de caracterización.	148
---	-----

Lista de gráficos

Grafico 1. Resultados Obtenidos en la Importación de Estudios Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct al software Parsifal.	52
Grafico 2. Documentos Aceptados, Rechazados, Duplicados en las bases de datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.....	53
Grafico 3. Artículos seleccionados, aceptados, duplicados, rechazados obtenidos en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.	54
Grafico 4. Resultados Obtenidos en la Importación de artículos publicados entre los años 2007 al 2021.....	58

Sección de Abreviaturas

Abreviatura	Nombre
GO	Óxido de Grafeno
Ag	Plata
TiO ₂	Dióxido de Titanio
CuO	Óxido de Cobre
ZnO	Óxido de Zinc
NCC	Nanocristales de Celulosa
NCQ	Nanocristales de Quitina
NFC	Nanofibras de Carbono
MF	Microfiltración
UF	Ultrafiltración
NF	Nanofiltración
OI	Ósmosis Inversa
Conc.	Concentración
Ref.	Referencia
NPs	Nanopartículas
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>

<i>S. aureus</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
TC	Tetraciclina
SEM	Microscopia electrónica de barrido
TEM	Microscopía Electrónica de Transmisión
AFM	Microscopía de fuerza atómica
DMF	Dimetilformamida
PAN	Poliacrilonitrilo
PVDF	Poli (fluoruro de vinilideno)
PLA	Poli (ácido láctico)
PU	Poliuretano
PET	Tereftalato de polietileno
PTFE	Politetrafluoroetileno
PES	Polietersulfona
PP	Polipropileno
PE	Polietileno
PEEK	Polieteretercetona
PMMA	Polimetacrilato
PA-6	Policaprolactama (poliamida 6)
UV	Luz Ultravioleta

UFC	Unidades Formadoras de Colonias
%w/w	Porcentaje peso/peso
%v/v	Porcentaje volumen/volumen
FT-IR	Espectroscopia Infrarroja Transformada

Resumen

En los últimos años, ha tenido gran relevancia el uso de nuevos materiales como las nanopartículas (NPs) de óxido de grafeno (GO) en la fabricación de fibras poliméricas compuestas obtenidas por la técnica de electrospinning a escala micro y nanométricas para aplicaciones en la eliminación de microorganismos presentes en el agua. En este estudio, se realizó una metodología de revisión sistemática con el uso del Software Parsifal, mediante 4 fases: planificación, búsqueda de documentos en las bases de datos, extracción de datos y análisis de datos extraídos. La investigación llevo a un total de 906 artículos donde 169 eran duplicados, quedando 737 artículos a los cuales se realizó un filtro de clasificación por exclusión e inclusión: total artículos seleccionados, aceptados, rechazados y duplicados. De acuerdo al formulario e extracción de datos se utilizaron 222 artículos dando respuesta a las preguntas de investigación que se plantearon en esta revisión sistemática.

El desarrollo de esta investigación condujo a la identificación de las propiedades de NPs de GO como agentes biocidas de dos casos de estudio de membranas poliméricas desnudas o puras, (matriz polimérica), las cuales fueron modificadas de la siguiente forma: caso 1, membranas de microfiltración (MF) de poliacrilonitrilo (PAN) modificadas con NPs de plata/óxido de grafeno (Ag/GO) vs membranas de Poli (ácido láctico)/poliacrilonitrilo (PLA/PAN) modificadas con nanocristales de celulosa (NCC) y nanocristales de quitina (NCQ). Para el estudio del caso 2, las membranas de MF de Poli (fluoruro de vinilideno) (PVDF) modificadas con NPs de GO vs membranas de

Policaprolactama también llamada (poliamida 6) (PA-6) modificadas con NPs de dióxido de titanio (TiO_2).

Como resultado a estos dos casos de estudio , para el caso 1 , las NPs de Ag/GO vs NCC y NCQ tuvieron una excelente actividad antibacteriana y antiincrustante con una efectividad en la eliminación de microorganismos con las NPs de Ag/GO y una tasa de reducción del 100% para la *E. coli* y un 87.6 % para el *S. aureus*, en comparación con los NCQ y NCC, la efectividad en la eliminación bacteriana con los dos nanocristales fue de un 85% para la *E. coli* por exclusión de tamaño y un 95% con el uso de NCQ.

Para el estudio del caso 2, las membranas de MF de (PVDF) modificadas con NPs de GO vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de (TiO_2), la respuesta fue una tasa de reducción de bacterias con el uso de las NPs de GO en un 100% para la *E. coli* y un 99% para el *S. aureus* y con las NPs de TiO_2 fue de un 99.99% para el *S. aureus* después de 6 h de exposición a rayos UV.

Palabras claves: óxido de grafeno, electrospinning, nanofibras, microorganismos, polímeros, materiales compuestos.

Abstract

In recent years, the use of new materials such as graphene oxide (GO) nanoparticles (NPs) has been of great relevance in the manufacture of composite polymeric fibers obtained by the electrospinning technique on a micro and nanometric scale for applications in removal of microorganisms present in the water. In this study, a systematic review methodology was carried out with the use of Parsifal Software, through 4 phases: planning, search for documents in databases, data extraction and analysis of extracted data. The research led to a total of 906 articles where 169 were duplicates, leaving 737 articles to which a classification filter by exclusion and inclusion was performed: total articles selected, accepted, rejected and duplicated. According to the data extraction form, 222 articles were used responding to the research questions posed in this systematic review.

The development of this research led to the identification of the properties of GO NPs as biocidal agents of two case studies of bare or pure polymeric membranes (polymeric matrix), which were modified as follows: case 1, membranes of microfiltration (MF) of polyacrylonitrile (PAN) modified with silver NPs / graphene oxide (Ag / GO) vs Poly (lactic acid) / polyacrylonitrile (PLA / PAN) membranes modified with cellulose nanocrystals (NCC) and chitin nanocrystals (NCQ). For the study of case 2, Poly (vinylidene fluoride) (PVDF) MF membranes modified with GO NPs vs polycaprolactam membranes also called (polyamide 6) (PA-6) modified with titanium dioxide NPs (TiO₂)

As a result of these two study cases, for case 1, the Ag / GO NPs vs NCC and NCQ had excellent antibacterial and antifouling activity with an effectiveness in the elimination of microorganisms with the Ag / GO NPs and a rate of reduction of 100% for *E. coli* and 87.6% for *S. aureus*, compared to NCQ and NCC, the effectiveness in bacterial elimination with the two nanocrystals was 85% for *E. coli* by exclusion of size and 95% with the use of NCQ.

For the case study 2, the MF membranes of (PVDF) modified with GO NPs vs PA-6 membranes modified with NPs of (TiO_2), the response was a reduction rate of bacteria with the use of the NPs of GO 100% for *E. coli* and 99% for *S. aureus* and with the TiO_2 NPs it was 99.99% for *S. aureus* after 6 h of UV exposure.

Keywords: graphene oxide, electrospinning, nanofibers, microorganisms, polymers, composite materials.

1. Introducción

Los esfuerzos medioambientales muestran una progresiva preocupación por el cambio climático, la contaminación hídrica y atmosférica, lo que ha desencadenado diversos estudios sobre la posibilidad de usar nuevas tecnologías y materiales para contrarrestar esta problemática. El uso nanofibras poliméricas obtenidas por la técnica de electrospinning, es una tecnología de última generación que se utiliza en sistemas de filtración de alta eficiencia, ya que pueden retener microorganismos, metales pesados, residuos sólidos, sales, entre otros (Fahimirad, Fahimirad, & Sillanpää, 2021). La contaminación de fuentes hídricas ocasiona la propagación de microorganismos patógenos (virus y bacterias), siendo los causantes de enfermedades gastrointestinales, provocando amenazas para la salud pública principalmente, en los países en vía de desarrollo (Q. Li et al., 2008).

Actualmente, se emplean métodos de desinfección química como sistemas de cloración de agua, donde los desinfectantes más usados para tratamiento de aguas convencionales son: cloraminas, cloro, dióxido de cloro, ozono y cloro gaseoso, dando una efectividad en el controlan los patógenos microbianos (Hossain, Perales-Perez, Hwang, & Román, 2014); sin embargo, la formación de subproductos de desinfección química puede ocasionar problemas en la salud humana principalmente enfermedades cancerígenas y además, en algunos casos los microorganismos patógenos pueden crear resistencia a este tipo de desinfección (Gwenzi, Musiyiwa, & Mangori, 2020). Es por ello, que muchas investigaciones han buscado métodos más convenientes para la reducción de microorganismos presentes en agua que reemplacen o mejoren los ya

existentes, además, del uso de membranas en nuevos procesos no solo de purificación de agua y tratamiento de aguas residuales, sino también de eliminar e inhibir microorganismos con mecanismos de bajo costo y alta eficiencia (Hossain et al., 2014).

La técnica de electrospinning procesa una gran variedad de polímeros, integrando otras clases de materiales como cerámicos, NPs y biomoléculas. Su desarrollo se basa en la fabricación de membranas donde integran las propiedades de los compuestos para la formación de nanofibras, generando materiales con: alta resistencia mecánica, selectividad, estabilidad química, porosidad de la membrana, diámetro de fibra, permeabilidad. La concentración y las propiedades físico-químicas de los compuestos, la clase de solvente orgánico utilizado para diluir los polímeros, los compuestos con NPs como: el GO, Ag, TiO₂, entre otros, son factores importantes en el proceso de MF para tratamientos de aguas, dando parte de la solución a las problemáticas ambientales ocasionadas por contaminación de fuentes hídricas (Warsinger et al., 2018).

En consecuencia, al estudio de las propiedades de las NPs de GO como agente biocida en membranas de MF electrohiladas para tratamiento de aguas, se realizó una revisión sistemática como parte de la investigación secundaria, dando respuesta a las preguntas de investigación planteadas, mediante una metodología explícita y rigurosa, a través de los criterios de inclusión por medio de estudios de investigación científica.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de nanopartículas de óxido de grafeno como agente biocida incrustados en membranas de microfiltración electrohiladas para tratamiento de aguas.

2.2. Objetivos Específicos

Describir los posibles materiales compuestos que se pueden utilizar en la aplicación de filtros de agua para la eliminación de microorganismos patógenos

Identificar los tipos de microorganismos se pueden inhibir con nanofibras electrohiladas elaboradas con óxido de grafeno

Determinar cómo influyen los parámetros de electrohilado en las características físico, químicas y mecánicas de las membranas poliméricas para la inhibición de microorganismos

3. Antecedentes

En la actualidad, una serie de estudios muestran grandes avances en la fabricación de fibras continuas a nanoescala, utilizadas en la industria para la fabricación de filtros de alta eficiencia en el tratamiento de aguas. El electrospinning es una técnica para la fabricación de fibras, en procesos como filtración, retención e inhibición de microorganismos presentes en aguas. Esta técnica fue descubierta por William Gilbert en el año 1600, quien observó el primer registro de la atracción electrostática de un fluido (Tucker, Stanger, Staiger, Razzaq, & Hofman, 2012).

Existen nanocompuestos para la elaboración de membranas con aplicaciones ambientales, por medio de la cual se obtienen resultados de alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Se han utilizado membranas poliméricas en la eliminación bacteriana, de igual manera como material antiincrustante (Sundaran, Reshmi, Sagitha, Manaf, & Sujith, 2019). Las nanopartículas de óxido de grafeno (GO), poseen actividades antibacterianas sobre fitopatógenos bacterianos, fúngicos, los cuales pueden llegar a ser multiresistentes (J. Chen et al., 2014).

Otro tipo de nanopartículas, son los nanocompuestos híbridos a base de plata (Ag), siendo un material antibacteriano utilizado para la limpieza del agua, eliminando bacterias como: la *Escherichia coli*, y el *Staphylococcus aureus* (Abdulla et al., 2021).

Los investigadores (J. H. Li, Zhang, Zhang, & Liu, 2019), usaron de membranas con incrustaciones de óxido de grafeno (GO), poliacrilonitrilo (GO/PAN), demostrando la alta eficiencia antibacteriana en la inactivación de bacterias como: la *Escherichia coli* en

un 98.5% y el *Staphylococcus aureus* hasta el 99.6%, quien destruye la actividad fisiológica de las bacterias y ocasiona la muerte celular.

Tu et al. (Tu et al., 2013), demostraron que el uso del óxido de grafeno (GO), como nanomaterial bidimensional, se caracteriza por ser eficiente en la degradación de las membranas celulares internas y externas de la *Escherichia coli*, y reducir su viabilidad a través de la extracción destructiva de fosfolípidos de las bacterias, debido a la interacción entre el óxido de grafeno y las moléculas lipídicas.

Jang et al. (Jang et al., 2020b) realizaron estudios de las membranas de Ag/GO-PAN, utilizados como agentes antibacterianos frente a la *Escherichia coli* (Gram-negativos) y el *Staphylococcus aureus* (Gram-positivos), demostrando las propiedades antiincrustantes útiles para el tratamiento de aguas residuales.

Liu et al. (C. Liu, Shen, Liao, Yeung, & Tjong, 2018), evaluaron la actividad antibacteriana de las membranas electrohiladas con nanocompuestos de PVDF 2% y NPs de Ag-GO frente a las bacterias de la *Escherichia coli* y el *Staphylococcus aureus*, las cuales obtuvieron un resultado positivo frente al ensuciamiento de proteínas y bacterias de las membranas. Se encontró que poseen un excelente rendimiento de filtración antiincrustante de tal manera, que se considera una membrana de alto potencial para aplicaciones de purificación y desinfección de agua.

Las membranas fibrosas de poli (ϵ -caprolactona) rellenas con GO-Ag son nanocompuestos antibacterianos que demostraron eficacia en la reducción bacteriana

de un 99.55% del *Staphylococcus aureus* y 99.46% de la *Escherichia coli* (Pan et al., 2020).

Han et al. (Han et al., 2019a), fabricaron membranas nanofibrosas compuestas de H-PPAN/rGO-g-PAO @ Ag/Ag, utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, los cuales obtuvieron resultados del 100% de eficiencia en la eliminación de la *Escherichia coli* y del 99% contra el *Staphylococcus aureus*.

Otras NPs utilizadas para el tratamiento de eliminación de microorganismos es el uso del cobre, Ahire et al. (Ahire, Neveling, & Dicks, 2018), fabricaron nanofibras de poliacrilonitrilo (PAN) electrohiladas con NPs de cobre (Cu), donde obteniendo membranas filtrantes anti-*Escherichia coli* para tratamiento de aguas, demostrando reducción en el número de bacterias.

Malwal et al. (Malwal & Gopinath, 2017a), analizaron el compuesto de nanofibras de óxido de cobre y óxido de zinc (CuO-ZnO) para estudios de remediación de aguas, obtuvieron nanofibras con aplicaciones en la eliminación de contaminantes biológicos y orgánicos con alta capacidad de adsorción antibacteriana.

Otros nanomateriales como antibióticos de óxido de cobre y curcumina, fueron estudiados por su eficiente desempeño antibacteriano de: la *Escherichia coli*, el *Staphylococcus aureus*, *Shigella dysenteriae* y *Streptococcus pneumoniae* (Malwal & Gopinath, 2017b).

Existen algunos tipos de membranas de filtración el cual se caracterizan por tener algunas propiedades para eliminar o inhibir microorganismos. Las membranas electrohiladas para microfiltración (MF) de alto flujo de agua, se elaboran con diferentes diámetros de fibra, distribuciones de diámetro y espesores de membranas, evaluando el rendimiento de la filtración. El filtro de MF nanofibroso logra mantener una tasa de rechazo muy alta de macropartículas y bacterias, obteniendo excelentes resultados (R. Wang, Liu, Li, Hsiao, & Chu, 2012).

Moslehi et al. (M. Moslehi & Mahdavi, 2020), estudiaron el polímero de poliuretano como material en la elaboración de nanofibras electrohiladas para aplicaciones de MF, obtuvieron como resultado la eficiencia de la membrana en la eliminación de la *E. coli* en un ~ 97-99%, así como micropartículas a través del mecanismo de expulsión en un ~ 95-99%.

4. Marco Teórico

La nanotecnología con el rápido desarrollo que ha tenido durante los últimos años, ha sido de gran utilidad para las diferentes problemáticas ambientales que conllevan al uso de nuevos materiales y técnicas (Mu et al., 2019).

Las problemáticas ambientales, han ocasionado un agotamiento de las reservas tradicionales de combustibles fósiles y un gran impacto negativo ambiental. Por tal motivo, se busca el uso de nuevos materiales y técnicas que sean rentables y respetuosas con el medio ambiente (M. Sun & Li, 2018) (Yanling Liu et al., 2020). Para el tratamiento de aguas se utilizan procesos como: la filtración (separación de sólidos y líquidos a través de mallas o filtros) (Huang et al., 2020), la sedimentación (acción de la gravedad que separa sólidos del agua), y la coagulación (proceso químico que causa aglomeración del líquido) (Gallego-Urrea, Hammes, Cornelis, & Hassellöv, 2016). Estos procesos requieren de sistemas operacionales amplios en el mantenimiento y control de las plantas donde se realiza la potabilización de las aguas y que demandan de un gasto de energía muy alto (Sheikh et al., 2020) (Fahimirad et al., 2021).

El interés por el tratamiento de las aguas es eliminar los componentes no deseados presentes en ella, para esto se utilizan membranas que proporcionan una barrera física para dichos componentes en función de su tamaño, lo que permite el uso de fuentes de aguas no convencionales (Z. Wang et al., 2014).

Existen distintos procesos de desinfección (cloración, ozonización, rayos UV) para el tratamiento de aguas, cuya función principal es la eliminación de los microorganismos patógenos que puedan hallarse en las aguas (Barco-Bonilla, Romero-González, Plaza-Bolaños, Garrido Frenich, & Martínez Vidal, 2010).

La mayor parte de microorganismos presentes en las aguas son aquellos de origen humano o animal, que son los causantes de la propagación de enfermedades como: poliomiелitis, diarrea, hepatitis, shigella, cólera, fiebre tifoidea, meningitis, entre otras (Dwivedi & Shaw, 2021; Xu, 2019). Este tipo de enfermedades se reproducen en el agua por medio de microorganismos tales como: *Staphylococcus aureus* (SARM), *Escherichia coli* (*E. coli*), nematodos, gusanos trematodos, lombrices intestinales y lombrices que comúnmente se denominan helmintos. Estas se encuentran en fuentes hídricas y que, de no ser tratados adecuadamente, puede causar la multiplicación de estos tipos de microorganismos provocando una emergencia sanitaria (Abd Halim et al., 2020) (Guerra et al., 2021).

4.1. Métodos para tratamiento de aguas en la eliminación de microorganismos

Los métodos de desinfección de aguas como: cloración, ozonización, rayos UV son utilizados para la eliminación de bacterias, para comprobar la eficacia en la eliminación de microorganismos se deben analizar parámetros como: sustancias orgánicas, materia orgánica disuelta o particulada, virus, bacterias, parásitos y microorganismos, color, sabor y olor, entre otros (Holloway et al., 2016). La desinfección de aguas puede

tener limitaciones dependiendo del campo y el recurso donde se quiera implementar (Sousi et al., 2020) (Deng et al., 2015) (Araque, 2018).

4.1.1. Desinfección por cloración.

Es un método de desinfección química, donde los sistemas de cloración de agua tienen como resultado final controlar los patógenos microbianos como: *Staphylococcus aureus* (SARM), *Escherichia coli* (*E. coli*) nematodos, gusanos trematodos, lombrices intestinales (Guerra et al., 2021) (Dong, Lin, Li, Wang, & García, 2021). Sin embargo, la formación de subproductos de desinfección química puede ocasionar problemas en la salud humana y en algunos casos los microorganismos patógenos pueden crear resistencia a este tipo de desinfección (Y. Zhang et al., 2020) (Pardhi et al., 2020).

El método de desinfección con cloro es el más común y de bajo costo, rápida, sencilla y de fácil operación (Schijven et al., 2019). El proceso de desinfección consiste en agregar la cantidad de cloro ya sea líquido o granulado según la cantidad sugerida en las respectivas dosificaciones que varían en el volumen de agua a desinfectar, la organización mundial de la salud (OMS) establece una serie de guías para dosificación en la desinfección de aguas. En Colombia, el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS), es quien reglamenta las dosificación necesaria para el tratamiento de aguas, y la secretaria de salud se encarga de regular y controlar las actividades realizadas (Mazhar et al., 2020) (Thakur, Rane, Harris, & Thakur, 2020).

4.1.2. Desinfección por ozonización.

Es un método que permite la eliminación de microorganismos, reduciendo el olor, sabor, turbidez y color al agua (Laflamme et al., 2020).

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno, es un oxidante muy fuerte, se ha comprobado su eficiencia dado que oxida materias orgánicas e inorgánicas, tiene gran poder de oxidación lo que permite la desinfección de aguas; trabaja con un potencial de oxidación de 2.07 voltios. La desinfección se lleva a cabo por medio de un gas azul, tiene poca solubilidad en el agua y es muy fuerte, la cantidad varía dependiendo la calidad y la cantidad de agua a intervenir (Ding et al., 2019) (Qi Shi et al., 2021) Este proceso tiene gran efectividad en la desinfección de aguas pero sus costos de operación son elevados (Nahim-Granados et al., 2020).

4.1.3. Desinfección por rayos ultravioleta.

La desinfección por rayos ultravioleta surgió como una alternativa para la desinfección de aguas(X. Li et al., 2019). Trabaja con una longitud de onda comprendida entre los 200 y los 300 nanómetros, la cual mata las bacterias, sin embargo, la profundidad de radiación puede variar (Lina Patricia Vega and Gustavo A. Peñuela, 2018). Las desventajas de esta técnica, es: primero la limitación de la vida útil de las lámparas, segundo la capacidad de penetración de los rayos ultravioleta que pueden variar dependiendo la lámpara y el estado de ella (Schijven et al., 2019) (Acosta Castellanos Pedro Mauricio, 2015).

4.1.4. Desinfección por técnicas que hacen uso de las nanotecnologías.

La nanotecnología ha tenido numerosos avances en el diseño de tratamiento para la desinfección de aguas. El uso de nanomateriales ha sido de gran utilidad y potencialidad en procesos de desinfección, ya que el avance de la tecnología permite que el tamaño de las partículas se vaya reduciendo cada vez más. La nanotecnología promueve nuevos métodos de desinfección que sean óptimos y vayan de la mano con el medio ambiente (Ibrahim & Klingner, 2020).

Unas de las técnicas más recientes para la filtración de aguas, son el uso de membranas para técnicas como: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Szewczyk & Stachewicz, 2020) (Van der Bruggen, 2018).

La alta porosidad, ajuste-distribución de tamaño de poro/tamaño de poro, de igual manera la gran variedad de materiales disponibles y las propiedades de flexibilidad para diseñar son muy amplias de acuerdo a las necesidades requeridas. Las nanofibras electrohiladas, tienen múltiples aplicaciones las cuales son utilizadas en filtración de agua (W. Zhang et al., 2020), desalinización de agua (Qasim, Darwish, Mhiyo, Darwish, & Hilal, 2018) tratamiento de aguas residuales, procesamiento petroquímico (Barani, Bazgir, Keyvan Hosseini, & Keyvan Hosseini, 2021).

4.2. Técnica de Electrospinning

La técnica de electrospinning es utilizada para la elaboración de nanofibras a escala micrométrica y nanométrica a partir de polímeros (Xushan Wang & Nakane, 2021), que

permiten obtener fibras con morfología y propiedades específicas del proceso que pueden ser ajustables para obtener fibras sólidas o internamente porosas con superficies lisas o rugosas, además, de permitir características para dar aplicabilidad a la membrana, como: la alta porosidad, poros interconectados, alta área superficial, relación superficie/volumen y resistencia/peso. (S. Zhu & Nie, 2020).

Su funcionamiento consiste, en generar finos chorros de solución polimérica, los cuales son expulsados desde un capilar al romper la tensión superficial en la solución polimérica gracias a un potencial eléctrico establecido entre el capilar y el colector (plano o cilíndrico), de modo que el chorro se mueva en dirección del campo eléctrico generado. Las fibras son depositadas al azar en la base colectora (figura 1) (Wen et al., 2021) (Seong, Son, & Park, 2018).

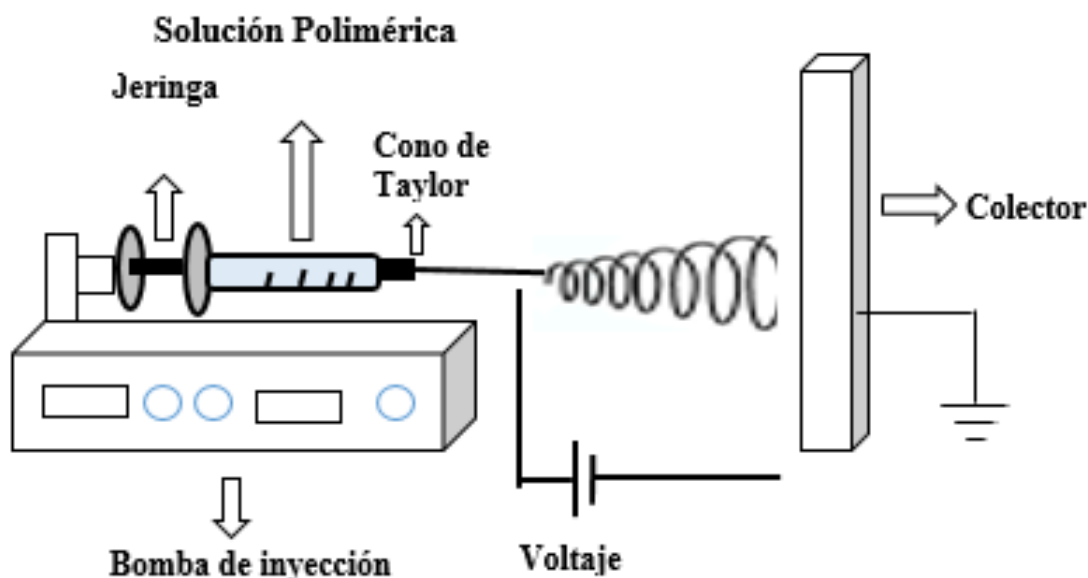


Figura 1. Montaje equipo electrospinning.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

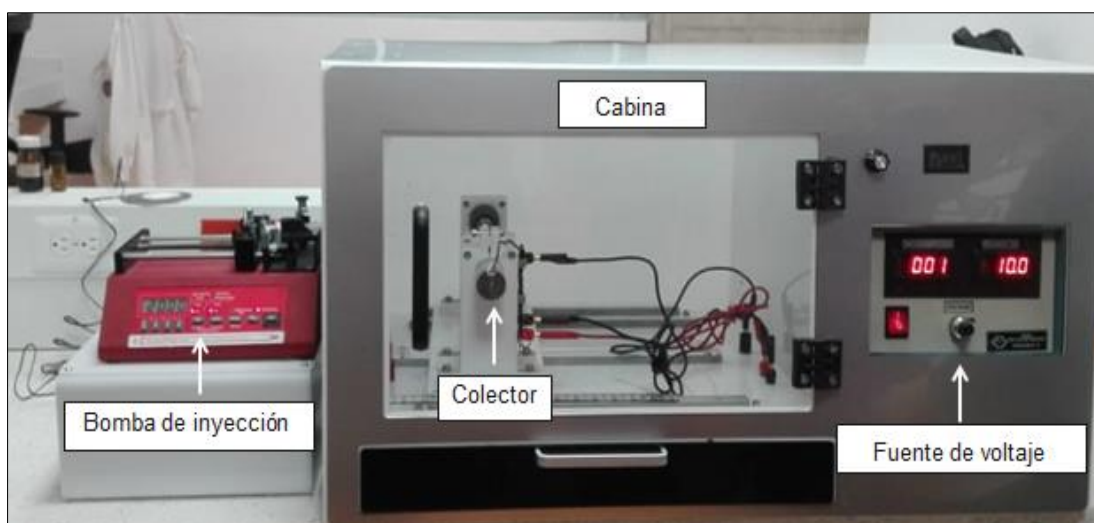


Figura 2. Equipo electrospinning laboratorio química inorgánica, Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

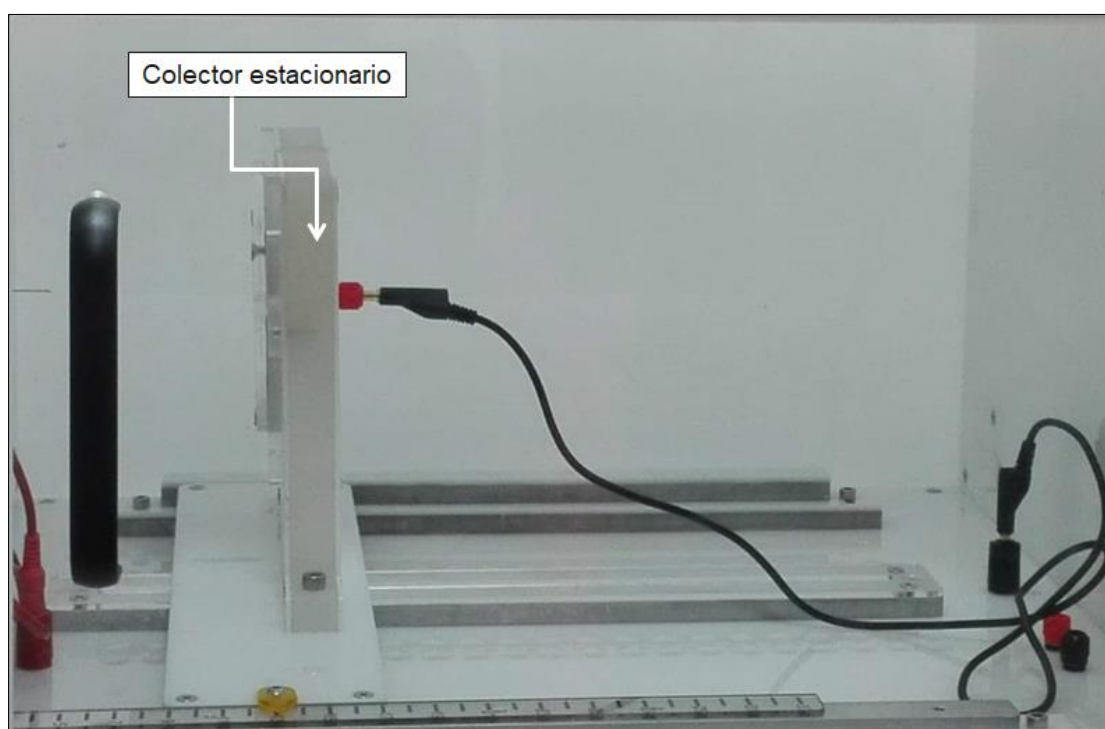


Figura 3. Equipo electrospinning laboratorio colector estacionario.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

Su fácil ensamblaje ha permitido procesar una gran variedad de polímeros (naturales, semisintéticos y sintéticos) (S. Li, Kong, & Ziegler, 2020), integrando en los últimos años, otras clases de materiales como: cerámicos y biomoléculas (Havlíček, Svobodová, Bakalova, & Lederer, 2020); sin embargo, durante el desarrollo del proceso existen una serie de variables que influyen en las características de los elementos obtenidos como la concentración de los compuestos o el solvente, para diluir los polímeros, ya sea porque están ligadas a las características del material base o porque su desempeño está relacionado con otros parámetros dentro del proceso. La mezcla de los polímeros y otros compuestos como los cerámicos, permite un amplio rango en sus aplicaciones (Yao Wu et al., 2019).

Sus aplicaciones abarcan múltiples campos como lo son, el medio ambiente, industria automotriz (Amiri, Asghari, Vatanpour, & Rajabi, 2020) el estudio de la liberación controlada de fármacos (Muñoz-Shugulí, Vidal, Cantero-López, & Lopez-Polo, 2021), (Ghosal, Agatemor, Špitálsky, Thomas, & Kny, 2019) los alimentos, industria textil (H. Li & Wang, 2021) la biomedicina como medicina regenerativa (Hamdy Makhoul, Perez, & Guerrero, 2020), la ingeniería de tejidos entre otros (Chakraborty & Biswas, 2020).

El proceso que se utilizó para la obtención de nanofibras electrohiladas fue la técnica de electrospinning coaxial (ver anexo 11.2)

4.2.1. Parámetros de electrohilado.

Existen varios parámetros para el proceso de electrospinning relacionados con las propiedades y características de las fibras, clasificándose en: preparación de la solución polimérica, proceso de la técnica y parámetros ambientales (Al Aani, Mustafa, & Hilal, 2020).

En la preparación de la solución polimérica, se encuentran algunas características como: la concentración de los reactivos precursores que influyen en la dimensión y la morfología de las fibras. La disolución de los polímeros en los solventes interviene en la viscosidad y la tensión superficial de la mezcla (Anis, Hashaikh, & Hilal, 2019).

La conductividad de la solución polimérica influye en la fabricación de las nanofibras, a mayor conductividad mayor capacidad de trasladar cargas eléctricas para que el solvente se evapore y se forme la fibra, esto en comparación con disolventes de bajos puntos isoeléctricos que causa baja conductividad, formando defectos como beads (bulbos o defectos por la presencia de solvente en la fibra) en la membrana (Taghizadeh et al., 2020).

El efecto dieléctrico del disolvente, cumple dos funciones importantes dentro del proceso de electrospinning, el primero busca disolver las moléculas de polímero para formar el chorro con carga eléctrica y el segundo llevar las moléculas de polímero disuelto hasta el colector (Ryu, Chung, & Kwak, 2015).

La viscosidad se encarga de la fibra y su morfología dado que proporciona el tamaño de esta, la relación entre viscosidad o la concentración de fibras que son obtenidas por electrospinning, ha sido estudiada en sistemas como: poliácido láctico-co-glicólico (PLGA), polivinil alcohol (PVA), polimetilmetacrilato (PMMA), poliestireno (PS), gelatina, entre otros. Por otro lado, el peso molecular del polímero proporciona la viscosidad requerida para la formación de las nanofibras, La viscosidad de la solución ha sido estrechamente relacionada a la concentración de la solución. (B. Sun et al., 2014).

El proceso de electrospinning incluye: la velocidad de flujo de la solución polimérica, que determina la velocidad del chorro que emerge con la respectiva solución de la jeringa hacia el colector, si la velocidad del flujo no es constante puede causar la evaporación de la solución (Upadhyaya et al., 2020).

Únicamente cuando se alcanza el voltaje necesario, sucede la formación de fibras, dado que se induce la carga necesaria en la solución con el campo eléctrico para dar inicio al proceso de electrohilado. Experimentalmente la forma de la gota inicial cambia con las condiciones o parámetros (voltaje, viscosidad y velocidad de flujo) (Angel, Guo, Yan, Wang, & Kong, 2020).

La distancia entre la aguja y el colector ha sido investigada como medio para la revisión del diámetro y morfología de la fibra en el proceso de electrohilado, la distancia es requerida para dar a las fibras el tiempo necesario para secarse antes de su llegada al colector, de no ser así a distancias cortas o largas se pueden presentar grumos,

hasta incluso generar gotas del solvente, que no se alcanza a evaporar (Kopp et al., 2020).

los colectores tienen la función de recepción de la fibra, usualmente se manejan láminas de aluminio como colectores, pero también se puede utilizar: barras cuadrículadas o alineadas, mallas de alambre, papel conductor, tela conductora, barras o ruedas rotatorias, entre otros (ver figura) (Liao, Loh, Tian, Wang, & Fane, 2018).

En los parámetros ambientales se encuentra la temperatura, considerando que el aumento de la temperatura, conduce a la creación de fibras de menor tamaño y demostrando que la aparición de pequeños poros circulares en las fibras, se debe al aumento de la humedad. Y la humedad es fundamental en la porosidad de las fibras, en ambientes secos la solución puede evaporarse de manera más rápida, al realizarse el proceso con humedad alta, se puede tener influencia en la morfología de las fibras esencialmente cuando se trabaja con disolventes volátiles. (Esfahani et al., 2019).

4.3. Materiales para la fabricación de membranas electrohiladas

Los materiales utilizados en la elaboración de membranas se clasifican de manera general en dos grupos: materiales orgánicos (poliméricos) e inorgánicos (cerámicos) (Firouzjahi et al., 2020). En la actualidad, las tecnologías de membranas poliméricas predominan en la industria del tratamiento de aguas y la desalinización, ya que su procesamiento es de fácil operación, de bajo costo, eficiente y de bajo consumo

energético, y tiene excelentes propiedades en la separación de contaminantes (Karami et al., 2020) (Buruga et al., 2019) (J. Zhu et al., 2018).

Los termoplásticos, son polímeros que se crean por la adición de estructuras de moléculas largas con enlaces atómicos. Entre moléculas contiguas hay enlaces que pueden variar la temperatura. Al elevar estas y dado que estas fuerzas son débiles, se puede producir un desplazamiento entre capas. La mayoría consisten en cadenas principales muy largas de átomos de carbono enlazados entre sí (Nasir et al., 2021).

Los termoestables o duroplásticos, son polímeros que han adquirido una forma, la cual no puede ser alterada. Su estructura de red molecular, una vez forjada no se ablanda con la temperatura, mantienen una estructura, sin variación hasta que llegan a una temperatura a la que arden (Feng et al., 2021).

4.3.1. Materiales orgánicos.

4.3.1.1. Polímeros.

Los polímeros son macromoléculas que van unidas formando una cadena lineal, mediante enlaces covalentes de dos o más unidades denominadas monómeros (molécula simple de peso molecular bajo), y estas moléculas pueden ser sintéticas o naturales (Bassyouni, Abdel-Aziz, Zoromba, Abdel-Hamid, & Drioli, 2019).

Los polímeros son los materiales más utilizados para la elaboración membranas filtrantes de agua gracias a sus excelentes propiedades químicas y físicas (Warsinger

et al., 2018) (Haisheng Chen, Huang, Liu, Meng, & Ma, 2020), dentro de las propiedades químicas se encuentran los cambios en los enlaces básicos de los materiales, y en las propiedades físicas se encuentran las relaciones intermoleculares, donde las propiedades más significativas son: las mecánicas, las térmicas, las eléctricas y las ópticas (Cui et al., 2020) (Saleh, Parthasarathy, & Irfan, 2019) (Grylewicz & Mozia, 2021).

4.3.1.1.1. Clasificación de los polímeros.

Las diferentes aplicaciones que hacen uso de los polímeros se debe a la diversidad de características y propiedades que estos poseen (Mairinger, Loos, & Hollender, 2021) (L. Sun, Hu, & Freiheit, 2021). Los polímeros más utilizados en la elaboración de membranas de MF son: poliacrilonitrilo (PAN) (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Nataraj, Yang, & Aminabhavi, 2012) (Jalvo, Mathew, & Rosal, 2017) (Jang et al., 2020a) (Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019), fluoruro de polivinilideno (PVDF) (Kim et al., 2014) (Jang, Yun, Jeon, & Byun, 2015), politetrafluoroetileno (PTFE), polietersulfona (PES), polipropileno (PP), Polietileno (PE), polieteretercetona (PEEK), ácido polilactico (PLA) (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) poliuretano (PU), tereftalato de polietileno (PET) (Jalvo et al., 2017), PVA (Y. Liu, Wang, Ma, Hsiao, & Chu, 2013) **(ver tabla 6).**

4.3.1.1.1.1. Polímeros Naturales.

Los polímeros naturales o biopolímeros son aquellos que provienen de la naturaleza y no dependen del ser humano, este tipo de polímeros se dividen en aquellos de bajo nivel de antigenicidad. Algunos polímeros tienen propiedades antimicrobianas dado que están directamente relacionados con el reino vegetal o animal dentro de este grupo encontramos: la celulosa, el almidón, las proteínas, el caucho natural, los ácidos nucleicos, el quitosano, entre otros (N. Li & Yang, 2021).

Al realizar pruebas con polímeros naturales en la elaboración de membranas por medio de electrospinning, presentan ciertas propiedades mecánicas, como la dureza que permite que los polímeros sean rígidos o flexibles (Juncos Bombin, Dunne, & McCarthy, 2020).

4.3.1.1.1.2. Polímeros Sintéticos.

Los polímeros sintéticos son obtenidos en industrias o laboratorios a partir de elementos provenientes de la naturaleza que son químicamente modificados (Samadian, Maleki, Allahyari, & Jaymand, 2020), se diseñan con el objetivo de crear productos funcionales, que hacen parte de un gran número de moléculas pequeñas que son adheridas para formar un elemento, entre ellos encontramos el nylon, el polietileno (PE) y el vinilo entre otros (P. Zhang et al., 2020).

4.3.1.1.1.3. Polímeros Semisintéticos.

Los polímeros semisintéticos son el resultado de la transformación química de un polímero natural, sin alterar sus macromoléculas, como: la nitrocelulosa y el caucho vulcanizado o el vidrio (X.-X. Wang et al., 2021) (Shende & Gupta, 2020).

4.3.2. Materiales inorgánicos.

4.3.2.1. Compuestos cerámicos.

Los materiales cerámicos son polímeros modificados, con materiales metálicos y no metálicos, que se combinan y son resistentes a la corrosión en cualquier ambiente al que sean expuestos, usualmente son duros y estables a grandes temperaturas (Dhanawade, Bhosle, Jagtap, & Sorate, 2020). Polímeros de alto rendimiento, por la dureza al desgaste en materiales como baldosas (X. Yu & Manthiram, 2021), se basan en arcillas, que son creadas a través de silicatos de aluminio, que se consideran como una mejora para diseñar procesos de tratamiento más eficientes (Lyu et al., 2019) (Weschenfelder, Fonseca, & Borges, 2021)

4.3.2.1.1. Óxido de grafeno (GO)

El GO, también llamado oxido grafítico o ácido grafítico es un compuesto de carbono y oxígeno, se compone de una lámina de carbón que se alcanza después del tratamiento de grafito con un oxidante fuerte (Ashfaq, Al-Ghouti, & Zouari, 2020). El GO se asemeja al grafeno, y cuenta con un grupo que tiene oxígeno, dentro de estos encontramos: epóxidos, hidroxilos, carboxilos y carbonilos (Mujmule, Chung, & Kim,

2020). Estos reducen la estabilidad térmica del nanomaterial, pero es de gran importancia en la relación y afinidad con una matriz polimérica particular (Wu & Soucek, 1998).

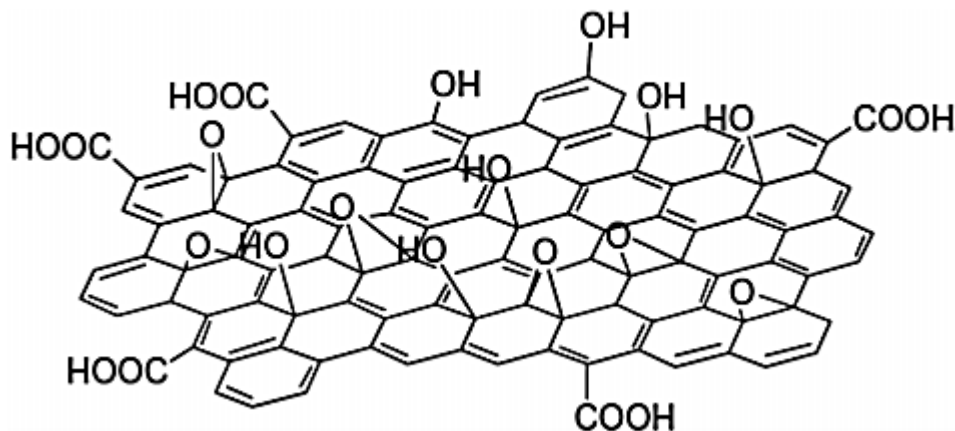


Figura 4. Estructura bidimensional plana del óxido de grafeno.

Fuente: tomado de: "Aplicaciones biomédicas del óxido de grafeno" (García Guirado, 2020)

Las membranas con nanocompuestos de GO, poseen una estructura en láminas y ricas en canales ensamblados por hojas de GO captadores de contaminantes, utilizados para esterilización, desinfección, filtración, separación y descontaminación (Du, Li, Tian, Zhang, & Zuo, 2020) (Lawal, 2019).

El GO tiene gran importancia ya que es reconocido por sus excelentes propiedades mecánicas, su alta resistencia, estabilidad térmica y conductividad, así como a su gran superficie específica (Yilin Wu et al., 2019) (Iqbal, Sakib, Iqbal, & Nuruzzaman, 2020).

La importancia del GO como material antibacteriano es de amplio espectro, dado que su acción genera daños físicos en las bacterias, al tener contacto directo de sus bordes afilados, las membranas bacterianas generan la extracción destructiva de moléculas de lípidos de igual manera se presenta daño químico en la estructura de la bacteria por medio del estrés oxidativo (Ji, Sun, & Qu, 2016) (H. Liu et al., 2020) (Ahmad et al., 2016) (Azizi-Lalabadi, Hashemi, Feng, & Jafari, 2020) (Aghapour Aktij, Taghipour, Rahimpour, Mollahosseini, & Tiraferri, 2020).

El grafeno es utilizado para estabilizar varios nanomateriales, como los metales, óxidos metálicos y polímeros, con alta eficacia antibacteriana debido al efecto sinérgico (labor de dos o más principios que generan un efecto superior de los efectos individuales), las propiedades del grafeno como agente antibacterial ha sido de gran utilidad en la administración de antibióticos y la elaboración de filtros de agua (Melo et al., 2020) (Ogunsona, Muthuraj, Ojogbo, Valerio, & Mekonnen, 2020).

4.4. Microorganismos presentes en aguas

Los microorganismos patógenos son responsables de los dos principales problemas de seguridad alimentaria: infección e intoxicación. Esto se ha convertido en un problema con énfasis cultural debido a la falta de políticas que busquen cubrir el estado de las fuentes hídricas tanto superficiales, subterráneas o nacimientos (Aijuka, Santiago, Girón, Nataro, & Buys, 2018). Los microorganismos presentes en el agua se pueden dividir en tres categorías como: bacterias, virus y protozoos parásitos (Oyedepi et al., 2021).

4.4.1. Bacterias.

La detección y eliminación de bacterias, principalmente aquellas que son resistentes a los antibióticos, son esenciales en el tratamiento de aguas, dado que amenazan la salud pública y los ecosistemas. Las bacterias entéricas se encuentran en el tracto gastrointestinal de los seres vivos y son eliminadas a través de la materia fecal, los coliformes fecales y *E. coli* son indicadores de este tipo de patógenos (S. Zhang et al., 2021).

4.4.1.1. Coliformes fecales.

Las coliformes fecales son un grupo de microorganismos bacterianos que se encuentran presentes en el intestino de los humanos, los animales, el suelo, y las plantas. La presencia de este tipo de microorganismos en el agua significa que posee residuos en descomposición o aguas negras, por lo general, los coliformes se encuentran en la parte superior de las aguas o en el fondo donde se asientan los lodos (Bjorge et al., 2009) . La contaminación de aguas por efectos de la materia fecal se ha convertido en el principal riesgo biológico para fuentes hídricas, dado que el consumo de aguas con riesgo de contaminación puede provocar grandes amenazas en la salud pública, es por esto que se deben tener medidas sanitarias como: manuales de prevención, educación ambiental, entre otros (Sbahi, Ouazzani, Latrach, Hejjaj, & Mandi, 2020).

4.4.1.2. *Escherichia coli* (E- Coli).

La *E. coli* es una bacteria de la familia de las enterobacteriaceae, un tipo de bacteria que habita en el intestino de las personas y animales, la presencia de la bacteria de *E. coli* se halla en las fuentes hídricas debido a las múltiples actividades del ser humano como: la ganadería, la industria, o el consumo de alimentos contaminados con heces fecales, ocasionando cientos de problemas en la salud pública (Śmiałek, Kowalczyk, & Koncicki, 2020) (S. Yang et al., 2020).

La importancia de la eliminación de la bacteria *E. coli*, es de gran interés dado que la no eliminación de esta, causa enfermedades como: fiebre tifoidea, meningoencefalitis, amebiasis, cólera, gastroenteritis, y otro tipo de afecciones, siendo las causas más importantes de morbilidad y mortalidad del ser humano (Z. Wang et al., 2021) (Nzima et al., 2020).

4.4.2. Protozoos parásitos.

Los protozoos pertenecen a un grupo diverso de organismos eucariotas unicelulares. Las contaminaciones y enfermedades producidas por protozoos parasitarios, afectan a las personas en los países en desarrollo, dentro de este grupo encontramos (Plutzer & Karanis, 2016):

4.4.2.1. *Giardia*.

La *Giardia*, también conocida como *duodenalis* o *intestinalis* es un parásito microscópico flagelante, se ubica en el intestino delgado y puede llegar a provocar enfermedades como la lamblisis o la giardiasis (Zahedi et al., 2020).

4.4.2.2. *Cryptosporidium*.

Causantes de enfermedades gastrointestinales, proviene del genero de los protistas y se caracterizan por ser parásitos apicomplexa (parásitos de animales), en su gran mayoría presentan síntomas como diarrea en los humanos, y muchas veces se confunde con el parásito de la malaria y el toxoplasma (Razakandrainibe et al., 2020).

5. Metodología

Para la elaboración de la revisión sistemática se utilizó la herramienta tecnológica Parsifal, que permite realizar el proceso completo en la selección de artículos en revisiones sistemáticas. El software fue utilizado para documentar y realizar un proceso de filtración de cada uno de los artículos seleccionados, este ofrece datos empíricos que dan cumplimiento a un conjunto de criterios necesarios para realizar el respectivo análisis de la revisión. Los datos son tabulados en formularios que recolectan la información necesaria para dar respuesta a las tres preguntas de investigación planteadas en el trabajo. Esta herramienta de trabajo cuenta con una estructura definida en 4 fases: planificación, búsqueda de documentos en las bases de datos, extracción de datos y análisis de datos extraídos. Se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos de investigación registrados en las bases de datos. Las utilizadas fueron: Web of Science, Scopus y Science Direct. Estas bases de datos son un directorio de Revistas de Acceso Directo que contienen artículos de investigación que cubren todas las áreas de la ciencia, la medicina, la tecnología, las ciencias sociales y humanas, permitiendo a los países en desarrollo acceder a una de las colecciones más extensas de literatura donde facilita el acceso al texto completo de artículos, bases de datos y otros recursos científicos.

5.1. Fase 1: Planificación

Dentro de la fase de planificación se encuentra el protocolo PICOC (por sus siglas en inglés: Population, Intervention, Comparison, Outcomes, Context), el cual se utilizó

para definir el ámbito de la revisión, ayudando en el proceso de análisis de los artículos seleccionados para lograr dar respuesta a las tres preguntas de investigación, además, de seleccionar los términos de búsqueda o palabras clave, (ver tabla 1) (Dr. D. García, 2017).

Tabla 1. Protocolo PICOC.

PICOC	Preguntas Realizas	Resultado
Población (P)	¿Quién?	Inhibición de microorganismos presentes en aguas por medio nanofibras electrohiladas.
Intervención (I)	¿Qué?	Nanofibras electrohiladas con NPs de GO.
	¿Cómo?	Por medio de la técnica de electrospinning con membranas electrohiladas para MF de agua.
Comparación (C)	¿Con qué comparar?	Uso del GO como agente biocida incrustados en membranas de MF de agua vs membranas elaboradas con diferentes nanocompuestos para aplicaciones de MF de agua.
Salida (O)	¿Qué se busca conseguir/mejorar?	Propiedades del óxido de grafeno (GO) vs otras NPs, para la inhibición de microorganismos en los procesos de MF.
Contexto (C)	¿En qué tipo de organización y bajo qué circunstancias?	En el proceso de mejoramiento del tratamiento de agua para la eliminación o inhibición de microorganismos, con el uso de nuevos nanomateriales como el GO, agente biocida.

Posterior a la identificación del protocolo PICOC, se plantearon las preguntas de investigación basadas en los tres objetivos establecidos para la revisión sistemática, (ver tabla 2).

Tabla 2. Preguntas de Investigación Planteadas.

Preguntas de investigación
1. ¿Cuáles serían los posibles materiales compuestos que se pueden utilizar en la aplicación de filtros de agua para la eliminación o inhibición de microorganismos patógenos?
2. ¿Qué tipos de microorganismos se pueden inhibir con membranas electrohiladas elaboradas con óxido de grafeno?
3. ¿Cómo influyen los parámetros de electrohilado en las características físico, químicas y mecánicas en las membranas poliméricas obtenidas para la inhibición de microorganismos?

A continuación, se definieron los criterios de inclusión y exclusión, por medio de los cuales se seleccionaron los artículos en las bases de datos, para definir si son aceptados o rechazados. Esto permitió la evaluación de la calidad de la información recolectada, revisando sus características de selección, dando paso a una eliminación de fuentes que no delimitaran el carácter de la investigación, (ver tabla 3).

Tabla 3. Criterios de Inclusión y Criterios de Exclusión.

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Artículos de investigación.	Artículos publicados anteriores al año 2007.
Artículos de revisión.	Artículos que no incluyan aplicaciones ambientales.
Artículos publicados entre los años 2007-2021.	Artículos que no incluyan la técnica de electrohilado.
Libros y capítulos de libros.	Artículos que no incluyan parámetros de electrohilado.
Artículos que incluyeron aplicaciones ambientales.	Artículos que no incluyan filtros de agua elaborados con nanofibras electrohiladas.
Artículos que incluyan la técnica de electrohilado (por su traducción en inglés, electrospinning).	Artículos que no incluyan nanomateriales compuestos con aplicaciones antibacterianas.
Artículos que incluyan parámetros de electrohilado.	Artículos que no incluyan el uso del GO como agente biocida.
Artículos que incluyan filtros o membranas de agua elaborados con nanofibras electrohiladas.	Artículos que no incluyan características físicas, químicas y mecánicas de las membranas electrohiladas.
Artículos que incluyan nanomateriales compuestos usados para el proceso de electrohilado.	Artículos que no incluyan microorganismos presentes en el agua.
Artículos que incluyan el uso del GO como agente antibacteriano o biocida.	
Artículos que incluyan características físicas, químicas y mecánicas de las membranas electrohiladas para la eliminación o inhibición de microorganismos presentes en aguas.	
Artículos que incluyan microorganismos presentes en el agua.	

5.2. Fase 2: Búsqueda de Documentos en Las Bases de Datos

La selección de los artículos y documentos de investigación, se logró por medio de cadenas de búsqueda avanzada, utilizando las palabras claves del proyecto identificadas en el protocolo PICOC, lo cual, permitió realizar un análisis de la totalidad del documento para identificar las variables a desarrollar. Las cadenas de búsqueda se elaboraron en las tres bases de datos seleccionadas: Scopus, Web of Science y Science Direct, con ayuda de operadores booleanos (ver tabla 4).

Tabla 4. Cadenas de Búsqueda Avanzada Realizada en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.

Bases de Datos	Cadena de Búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY("Electrospinning" AND "graphene oxide") OR ("nanofibers" AND "graphene oxide") AND "water" AND "filters" AND "microorganisms" AND "polymers" AND "composites"
Science Direct	TITLE-ABS- KEY("Electrospinning" AND "graphene oxide") OR ("nanofibers" AND "graphene oxide") AND "water" AND" filters " AND " microorganisms" AND "polymers" AND "composite materials"
Web of Science	(AK= (Electrospinning AND graphene oxide OR nanofibers AND graphene oxide AND "water" AND" filters"AND " microorganisms" AND "polymers" AND "composite materials")) OR (TI=(Electrospinning AND graphene oxide OR nanofibers AND graphene oxide AND "water" AND" filters"AND " microorganisms" AND "polymers" AND "composite materials")) OR (AB=(Electrospinning AND graphene oxide OR nanofibers AND graphene oxide AND "water" AND" filters" AND " microorganisms" AND "polymers" AND "composite materials"))

Por medio de las cadenas de búsqueda avanzada se obtuvieron un total de 906 artículos en las tres bases de datos seleccionadas, los cuales fueron importados al Software Parsifal, para el respectivo estudio de selección, (ver gráfico 1).

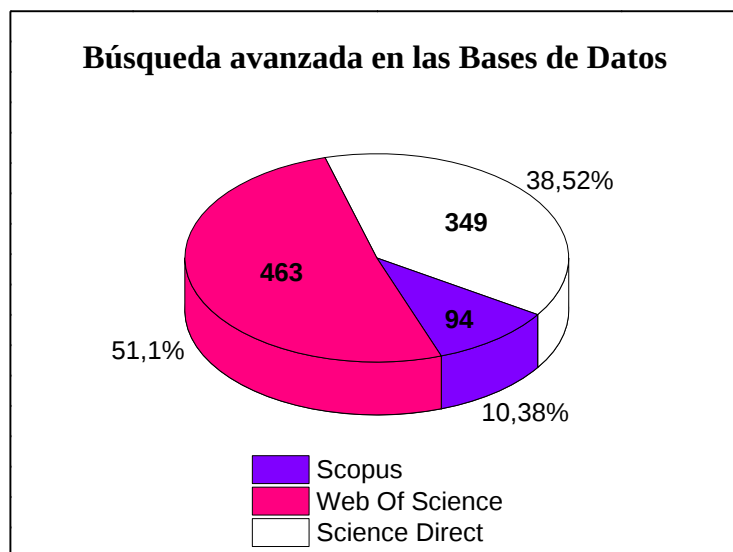


Grafico 1. Resultados Obtenidos en la Importación de Estudios Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct al software Parsifal.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

5.3. Fase 3: Extracción de datos

Para la extracción de datos, se realizó el primer filtro de selección de artículos por medio del uso de los criterios exclusión e inclusión, mencionados anteriormente, (ver tabla 3). A través de estos criterios de selección, se evaluó cada uno de los documentos importados a Parsifal, de tal manera, que se obtuvieron tres grupos de artículos distribuidos en: aceptados, rechazados, duplicados, con un total de 906, de

los cuales 169 fueron duplicados por tal motivo el total de artículos a estudiar fue de 37 artículos. seleccionados, (ver gráficos 2).

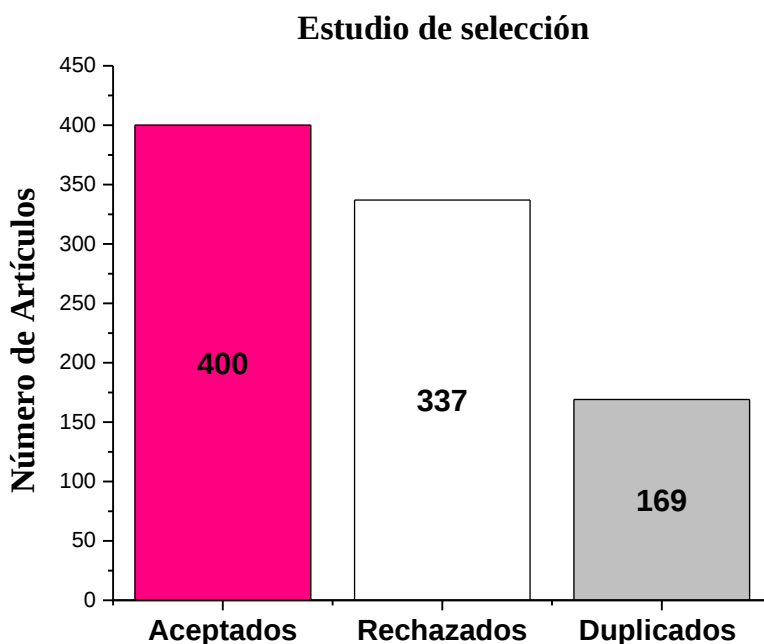


Grafico 2. Documentos Aceptados, Rechazados, Duplicados en las bases de datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

A través de la selección de artículos según los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la primera fase de la metodología se obtienen un total de artículos seleccionados, aceptados rechazados y duplicados en cada una de las bases de datos donde se puede observar que en la base de datos web of Science se encuentran la mayor parte de artículos duplicados por tal motivo se puede observar en la gráfica

número (ver grafica 3), la diferencia entre número de artículos seleccionados con número de artículos aceptados (ver tabla 5).

Tabla 5. Artículos seleccionados, aceptados, duplicados, rechazados obtenidos en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.

Scopus	Cantidad	Web Of Science	Cantidad	Science Direct	Cantidad
Seleccionados	94	Seleccionados	463	Seleccionados	349
Aceptados	61	Aceptados	115	Aceptados	224
Duplicados	3	Duplicados	145	Duplicados	21
Rechazados	30	Rechazados	203	Rechazados	104

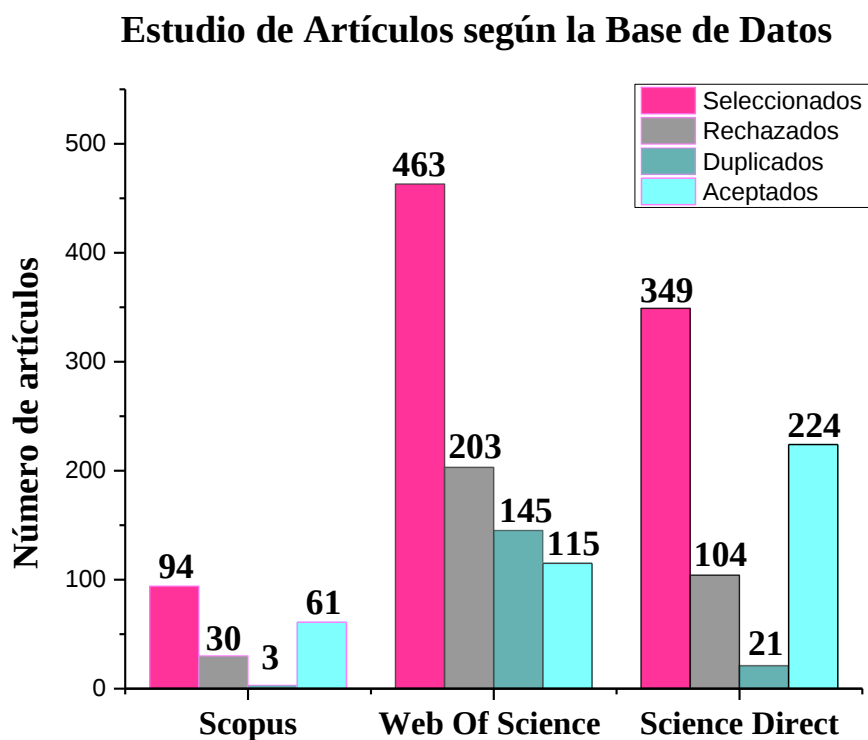


Grafico 3. Artículos seleccionados, aceptados, duplicados, rechazados obtenidos en las Bases de Datos Scopus, Web Of Science y Science Direct.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

Consecutivamente, se realizó el segundo filtro de selección de artículos por medio de la realización de evaluación de calidad de cada uno de los aceptados en la fase 2, donde se establecieron puntajes de evaluación de calidad a través de tres preguntas que se le realizaron, los cuales tienen un puntaje máximo establecido de 9.0 y un puntaje de corte de 5.0, (ver figura 5).

Electrohilado y electropulverización simultáneos: fabricación de una película delgada de nanofibra de carbono / MnO / óxido de grafeno reducido como un ánodo de alto rendimiento para baterías de iones de litio (2018) 3.0				
¿El artículo contiene parámetros de electrohilado para la elaboración de nanofibras con aplicaciones antibacterianas en tratamiento de aguas?	Cumple totalmente	Cumple en alto grado	Cumple aceptablemente	No cumple
¿En el artículo incluye la técnica de electrospinning en la elaboración de nanofibras con propiedades antibacterianas en tratamiento de aguas?	Cumple totalmente	Cumple en alto grado	Cumple aceptablemente	No cumple
¿El artículo incluye materiales nanocompuestos como el óxido de grafeno, polímeros, cerámicos, metales, incrustados en membranas de filtración de aguas para la inhibición de microorganismos patógenos?	Cumple totalmente	Cumple en alto grado	Cumple aceptablemente	No cumple

Figura 5. Preguntas de Calidad Realizadas a Cada uno de los Artículos Aceptados en la Fase 2.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

Finalmente, se realizó el último filtro de los artículos que obtuvieron un puntaje igual o mayor a 5.0, los cuales fueron sometidos a un formulario final de extracción de datos que contiene 9 preguntas con respuestas múltiples, con el fin de realizar el filtro definitivo de los artículos, los cuales suministraron la mayor cantidad de datos posibles, para dar respuesta a las tres preguntas de investigación basadas en los objetivos del trabajo de la revisión sistemática, (ver figuras 6, 7, 8).

¿El artículo incluye la técnica de electrospinning?	☐ No ☐ Parcialmente ☐ Si
¿El artículo incluye el uso nanofibras de filtración para la inhibición o eliminación de microorganismos presentes en aguas?	☐ No ☐ Parcialmente ☐ Si
¿El artículo incluye el uso de alguno de los siguientes polímeros para la eliminación o inhibición de microorganismos presentes en agua?	☐ ácido poliláctico (PLA) ☐ alcohol polivinílico (PVA) ☐ alginato de sodio (P. Natural) ☐ almidón (P. Natural) ☐ celulosa acetato (CA) ☐ celulosa (P. Natural) ☐ ciclodextrina (P. Natural) ☐ cloruro de polivinilo (PVC) ☐ fluoruro de polivinilideno (PVDF) ☐ gelatina (P. Natural) ☐ lignina (P. Natural) ☐ óxido de polietileno (PEO) ☐ poli (acetato de vinilo) (PVAc) ☐ poli (ácido acrílico) (PAA) ☐ poliácritilonitrilo (PAN) ☐ poliamida (PA) ☐ polianilina (PANI) ☐ policaprolactona (PCL) ☐ poli (carbonato de butileno) (PBC) ☐ polidopamina (PDA) ☐ poliestireno (PS) ☐ polieteretercetona(PEEK) ☐ poliétersulfona (PES) ☐ polietileno (PE) ☐ polimida (PI) ☐ poli (L- láctido) (PLLA) ☐ polimetacrilato (PMMA) ☐ Poliolefina (PAO) ☐ polipirrol (PPy) ☐ polipropileno (PP) ☐ polisulfona (PSf) ☐ politetrafluoroetileno (PTFE) ☐ poliuretano (PU) ☐ poli (vinilpirrolidona) (PVP) ☐ poly(ε-caprolactone) ☐ quitosano (P. Natural) ☐ tereftalato de polietileno (PET)

Figura 6. Formulario Extracción de Datos 1.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

¿El artículo incluye algunos de los siguientes parámetros físicos, químicos y mecánicos utilizados en la elaboración de nanofibras electrohiladas ?	☐ Angulo de contacto ☐ Concentración ☐ Conductividad ☐ Diámetro de la fibra ☐ Diámetro de la punta de la aguja ☐ Disolventes ☐ Distancia entre la punta de la aguja y el colector ☐ Estabilidad térmica ☐ Hidrofobicidad ☐ Humedad ☐ Morfología ☐ Parámetros de la solución ☐ Permeabilidad ☐ Peso molecular ☐ Porosidad ☐ Proporción de superficie ☐ Rendimiento antiincrustante ☐ Resistencia mecánica ☐ Resistencia química ☐ Tasa de flujo ☐ Temperatura ☐ Tensión superficial ☐ Viscosidad ☐ Voltaje aplicado ☐ Volumen
¿El artículo incluye la inhibición o eliminación de microorganismos presentes en aguas como son?	☐ Bacillus cereus (B. cereus) ☐ Bacillus subtilis (B. subtilis) ☐ Campylobacter ☐ Candida albicans (C. albicans) ☐ coliformes fecales ☐ coliformes totales ☐ cryptosporidium ☐ E. coli ☐ Fusarium graminearum (F. graminearum) ☐ Fusarium oxysporum (F. oxysporum) ☐ Guardia ☐ Mesofilos ☐ Pseudomonas aeruginosa (P. aeruginosa) ☐ Pseudomonas syringae (P. syringae) ☐ Salmonella ☐ Shigella dysenteriae ☐ Sporomusa ovata (S. ovata) ☐ Staphylococcus aureus (S. aureus) ☐ Streptococcus pneumoniae. ☐ Xanthomonas campestris (X. campestris) ☐ Xanthomonas perforans (X. perforans) ☐ Xanthomonas translucens pv. undulosa
¿El artículo incluye algunos de los siguientes materiales nanocompuestos para la elaboración de filtros de agua con aplicaciones antibacterianas?	☐ cloruro de benciltriethylamonio (BTEAC) ☐ cobre (Cu) ☐ curcumina ☐ dióxido de circonio (ZrO2) ☐ dióxido de manganeso (MnO 2) ☐ dióxido de titanio (TiO2) ☐ fibroína de seda (SF) ☐ grupo amino (NH2) ☐ nanopartículas bimetalicas de hierro-plata (FeAg) ☐ nanopartículas magnéticas ☐ nanotubos de carbono (CNT) ☐ nanotubos de hidroxiapatita (HANT) ☐ oro (Au) ☐ óxido de cobre (CuO) ☐ óxido de grafeno (GO) ☐ óxido de grafeno reducido (rGO) ☐ óxido de magnesio (MgO) ☐ óxido de Zinc (ZnO) ☐ plata (Ag) ☐ semillas de Nigella sativa ☐ sulfuro de zinc (ZnS) ☐ taurina (TA)

Figura 7. Formulario Extracción de Datos 2.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

¿El artículo incluye algunos de los siguientes disolventes para la elaboración de membranas electrohiladas?	☐ Acetato de etilo ☐ Acetona ☐ Acetonitrilo ☐ Ácido acético ☐ Agua ☐ Etanol ☐ N,N-dimethylacetamide (DMAC) ☐ N,N-di-metil-formamida (DMF) ☐ Tetrahidrofurano (THF)
El artículo incluye alguna de las siguientes técnicas para la caracterización de membranas electrohiladas?	☐ Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) ☐ Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) ☐ Microscopía de fuerza atómica (AFM) ☐ Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDX) ☐ Microscopio electrónico de transmisión (TEM) ☐ Rayos X de difracción (XRD) ☐ Técnicas espectroscópicas Raman.
¿El artículo incluye algunos de los siguientes procesos de filtración de agua?	☐ Birreactor de membrana (MBR) ☐ Microfiltración (MF) ☐ Nanofiltración (NF) ☐ Ósmosis directa (FO) ☐ Ósmosis inversa (RO) ☐ Ósmosis retardada por presión (PRO) ☐ Ultrafiltración (UF)

Figura 8. Formulario Extracción de datos 3.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

La cantidad de artículos obtenidos en la última fase de selección, fueron 222 artículos filtrados de un total de 906 artículos importados a Parsifal, los cuales cumplían con todos los requisitos de selección para dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas (ver tabla 6).

Tabla 6. Cantidad de artículos seleccionados en cada uno de los filtros realizados en el software Parsifal.

Filtros de Selección	Cantidad Artículos Inicio	Cantidad Artículos Final
Filtro 1	906	737
Filtro 2	737	400
Filtro 3	400	222

Adicionalmente, se seleccionaron artículos publicados entre los años 2007 al 2021. Este periodo de tiempo fue escogido por la necesidad de adquirir información actualizada de los últimos avances tecnológicos respecto al uso de nuevos materiales y nuevas técnicas en el proceso de MF de agua, (ver grafica 4).

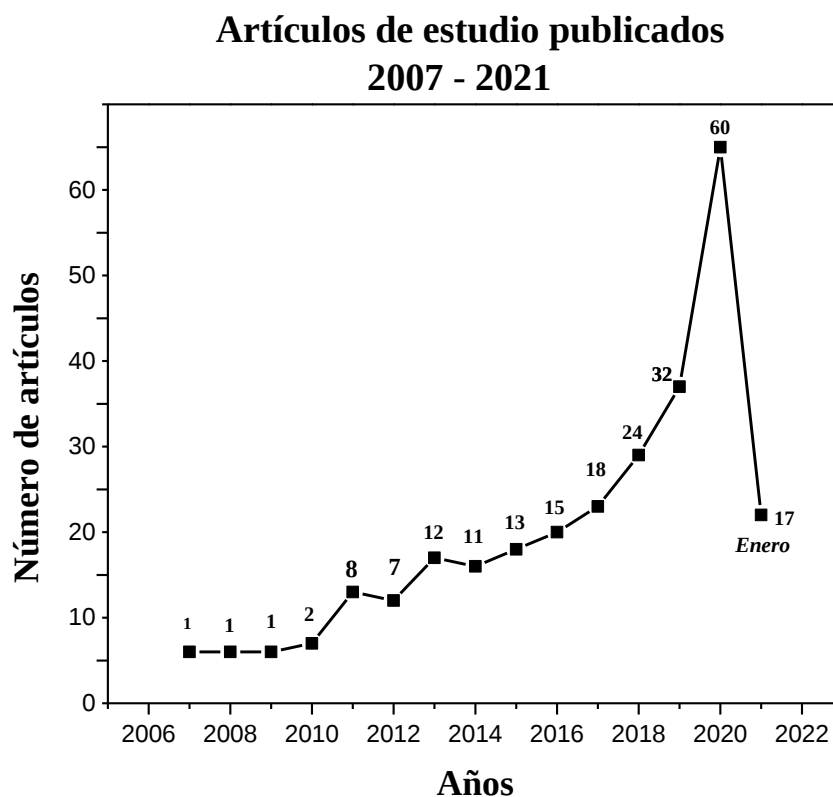


Grafico 4. Resultados Obtenidos en la Importación de artículos publicados entre los años 2007 al 2021.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)

5.4. Fase 4: Análisis de Datos Extraídos de Parsifal

Después de realizada la selección de artículos, se desarrolló la investigación por medio de dos estudios de caso para dar respuesta a las preguntas de investigación, donde se evaluaron las ventajas y desventajas de cada uno de los polímeros, además, de la efectividad de las NPs. Por otra parte, se identificaron los posibles microorganismos presentes en aguas que pueden ser eliminados por medio de estas membranas poliméricas modificadas con las diferentes NPs, así mismo, se hicieron comparaciones de los parámetros de electrohilado y la caracterización física, química y mecánica de las membranas para cada caso de estudio, (ver tabla 7 y anexo 11.2).

Tabla 7. Estudios de caso utilizados para dar respuesta a las preguntas de investigación.

Caso Estudio 1	Membranas de MF de PAN modificadas con NPs de Ag/GO vs membranas de PLA/PAN modificadas con NCC y NCQ.
Caso Estudio 2	Membranas de MF de PVDF modificadas con NPs de GO vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO ₂ .

6. Análisis y Discusión de Resultados

6.1. Materiales Compuestos Utilizados en la Elaboración de Membranas Poliméricas Electrohiladas de MF Para la Eliminación de Microorganismos

Este estudio se realizó a través de la metodología de revisión sistemática, donde, se identificaron los diferentes tipos de materiales que se pueden utilizar en la elaboración de membranas electrohiladas en procesos de MF para aplicaciones en la eliminación de microorganismos presentes en el agua. Para ello, se realizó una comparación a través de dos casos de estudio de membranas poliméricas electrohiladas desnudas o puras (también llamada matriz polimérica que no contienen ninguna incrustación de nanocompuestos), con incrustaciones de GO y otros materiales o nanocompuestos, con el fin de identificar la potencialidad del GO en la eliminación o inhibición de microorganismos presentes en agua. En este sentido, el uso de membranas de microfiltración MF con incrustaciones de nanocompuestos es de gran importancia para mejorar el rendimiento en el sistema de membranas en ingeniería para tratamiento de aguas (Ying Liu et al., 2020). Las membranas de MF, habitualmente pueden eliminar contaminantes con un rango de tamaño de partícula de 0.1 a 10 μm (X. Hu et al., 2015) (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019) (Cassano & Basile, 2013; R. Wang et al., 2012). Es por esto, que a través de un sistema de nanoescala se puede dimensionar qué tipo de microorganismos pueden retener las membranas de MF con un rango de tamaño promedio de poro con el cual se logra identificar que la membrana retiene microorganismos como bacterias (ver

Figura 8) (Greiner & Wendorff, 2007) (Cassano & Basile, 2013). Además, las membranas de MF se caracterizan por tener la capacidad de separación de nanopartículas bajo presiones entre los centibares y bares (ver Figura 8) (Cassano & Basile, 2013).

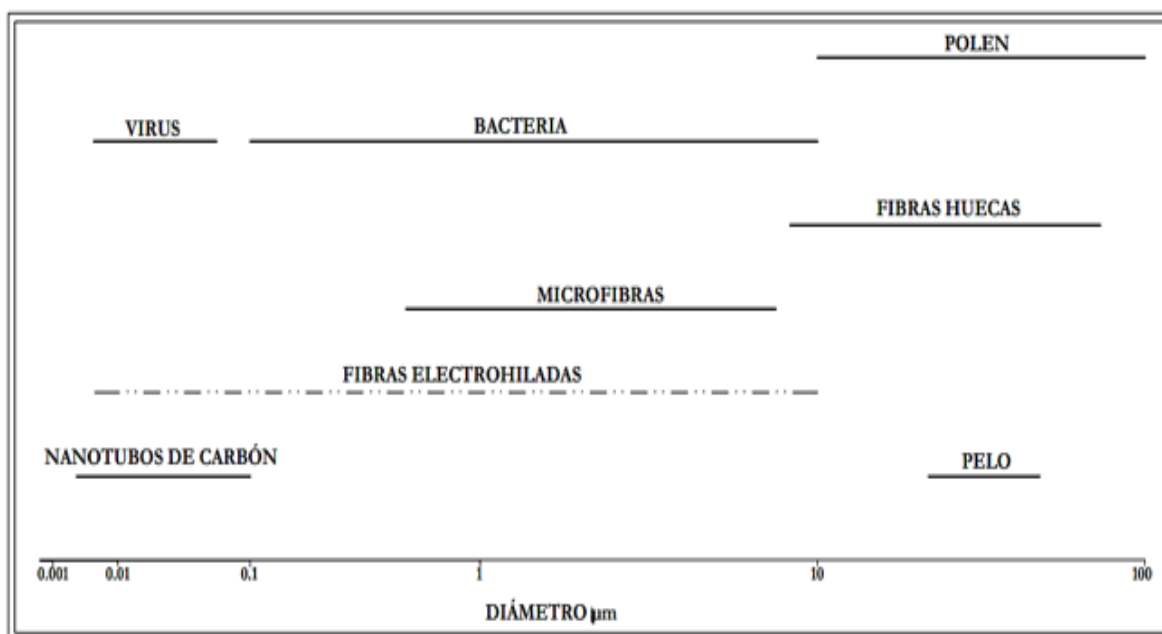


Figura 9. Diámetros de las Fibras Electrohiladas en comparación con microorganismos y Objetos Microscópicos.

Fuente: Tomado y modificado de: "Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers" (Greiner & Wendorff, 2007).

Por otra parte, el uso de polímeros en la elaboración de membranas para el proceso de MF, permiten establecer la forma y la estructura de la membrana aportando propiedades mecánicas, térmicas, de alta resistencia y rendimiento, filtración, entre otros (G. Wang, Yu, Kelkar, & Zhang, 2017). Los polímeros más utilizados en la

elaboración de membranas de MF son: PAN (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Nataraj et al., 2012) (Jalvo et al., 2017) (Jang et al., 2020a) (Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019), PVDF (Kim et al., 2014) (Jang et al., 2015), PTFE, PES, PP, PE, PEEK, PLA (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) PU, PET (Jalvo et al., 2017), PVA (ver tabla 8) (Y. Liu et al., 2013).

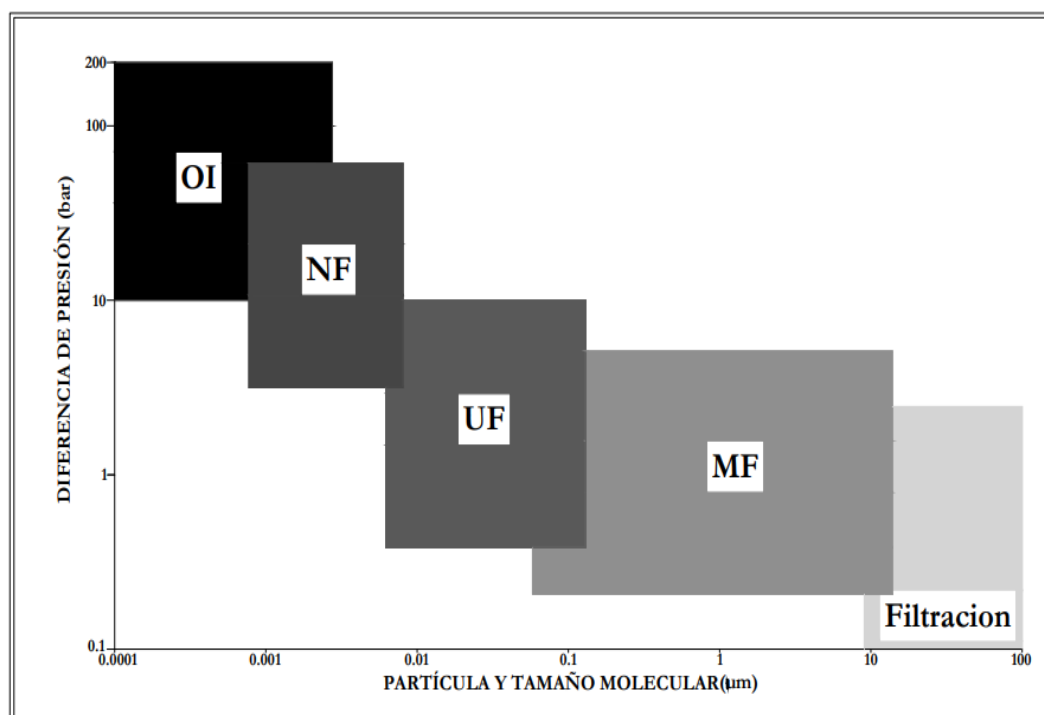


Figura 10. Diferencia de presión (bar) para procesos de filtración con el uso de membranas.

Fuente: Tomado y modificado de: “7 - Integrate different membrane operations and combine membranes with conventional separation techniques in industrial processes” (Cassano & Basile, 2013).

Tabla 8. Principales Polímeros utilizados en el proceso de MF

Polímero	Tipo de Polímero	Referencias
Poliacrilonitrilo (PAN)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Jang et al., 2020a) (Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019) (Shalaby, Hamad, Ibrahim, Mahmoud, & Al-Oufy, 2018).
Polifluoruro de vinilideno (PVDF)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020) (Kim et al., 2014) (Jang et al., 2015) (J.-A. Park et al., 2018) (J. A. Park et al., 2019) (C. Liu et al., 2018).
Politetrafluoroetileno (PTFE)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020)
Polietersulfona (PES)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020)
Polipropileno (PP)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020)
Polietileno (PE)	Sintético	(Ying Liu et al., 2020)
Polieteretercetona (PEEK)	Sintético	(Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020)
Ácido poli-láctico (PLA)	Sintético	(Dubey et al., 2017) (C. Liu, Shen, Yeung, & Tjong, 2017) (Jalvo et al., 2017)

Alcohol (PVA)	polivinílico	Sintético	(Ying Liu et al., 2020) (Y. Liu et al., 2013)
Polimetacrilato (PMMA)		Sintético	(Kim et al., 2014)
Tereftalato polietileno (PET)	de	Sintético	(Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019).
Poliuretano (PU)		Sintético	(Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019).
Policaprolactama (PA-6) poliamida 6		Sintético	(J.-A. Park et al., 2018) (Daels, Radoicic, Radetic, Van Hulle, & De Clerck, 2014) (Daels et al., 2011).

Así mismo, la modificación de las membranas poliméricas a través de incrustaciones de nanocompuestos tiene gran importancia, porque potencializan las propiedades de MF antibacteriana para la eliminación de microorganismos presentes en aguas. Algunos de los principales nanocompuestos se observan en la tabla 9 (Ying Liu et al., 2020).

Tabla 9. Principales Nanocompuestos Utilizados en el Proceso de Microfiltración.

NPs	Propiedades	Referencias
GO	Antibacterial, antiincrustante, hidrofílica, alta área superficial, alta resistencia mecánica.	(Jang et al., 2020a) (Ko, Kim, Lee, Kim, & Chung, 2019) (Jalvo et al., 2017) (Barua & Saha, 2015) (Barua & Saha, 2015) (X. Hu et al., 2015) (Jang et al., 2015) (J.-A. Park et al., 2018) (X. H. Wang et al., 2018) (C. Liu et al., 2018).
Ag	Inhibición de microorganismos como bacterias, esporas, hongos y algas, posee propiedades antiincrustantes.	(Ying Liu et al., 2020) (Jang et al., 2020a) (X. H. Wang et al., 2018) (Shalaby et al., 2018) (C. Liu et al., 2018).
NCC	Alta resistencia a la tracción.	(Jalvo et al., 2017) (X. H. Wang et al., 2018).
NCQ	Minimiza la formación de bioincrustaciones y biopelículas en las membranas.	(Jalvo et al., 2017) (Goetz, Jalvo, Rosal, & Mathew, 2016).
CuO	Alta toxicidad para un amplio espectro de patógenos.	(Bao, Zhang, & Qi, 2011) (Shalaby et al., 2018).
ZnO	Alta toxicidad como agente bactericida.	(Bao et al., 2011) (Barua & Saha, 2015) (Shalaby et al., 2018).
TiO ₂	Bactericida, antiincrustante.	(Bao et al., 2011) (Daels et al., 2014) (Daels, Radoicic, Radetic, De Clerck, & Van Hulle, 2015).

6.2. Caso Estudio 1: Membranas de MF de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas de coaxial PLA /PAN Modificadas con NCC y NCQ.

Jang et al, (Jang et al., 2020a), demostraron, que el uso de NPs de Ag/GO incrustadas en membranas poliméricas electrohiladas de PAN, poseen excelentes propiedades antiincrustantes y antibacterianas, ya que, al realizar de manera efectiva la incorporación de NPs, se modifica la membrana polimérica mejorando sus propiedades de MF como: la resistencia mecánica, alta área superficial, hidrofilia y actividad antibacteriana, para aplicaciones en sistemas de purificación de agua. Las incrustaciones de NPs contribuyen en la inhibición de microorganismos, ya que la membrana polimérica de PAN desnuda, no posee propiedades antibacterianas si no de soporte para las NPs de Ag /GO (Jang et al., 2020a). Las NPs Ag /GO tienen la capacidad de eliminar bacterias como el *E. coli* (Gram-negativos) y *S. aureus* (Gram-positivos) (Jalvo et al., 2017) (Ko et al., 2019). Por otra parte, en el estudio realizado por (Jalvo et al., 2017), demostraron que el uso del biopolímero PLA, el cual es obtenido de la polimerización por apertura de anillo de la lactida o condensación directa de monómeros de ácido láctico, puede ser utilizado en varias aplicaciones para la elaboración de membranas de MF de agua y aire (Jalvo et al., 2017) (Dubey et al., 2017) (Soares, Siqueira, Prabhakaram, & Ramakrishna, 2018). El proceso que se utilizó para la obtención de nanofibras electrohiladas fue la técnica de electrospinning coaxial (ver anexo 11.2), a partir de una solución viscoelástica del biopolímero de PLA (Ibrahim & Klingner, 2020). Las membranas de PLA electrohiladas coaxialmente, fueron incrustadas con nanocristales de celulosa (NCC) y nanocristales de quitosano (NCQ).

Estas NPs ofrecen propiedades físicas, químicas y mecánicas favorables para este tipo de polímero (Jalvo et al., 2017). Los NCC son extraídos de fibras vegetales y madera, poseen propiedades como la alta resistencia a la tracción y alta tasa de absorción de agua (Haizhen Chen et al., 2015). Por otra parte, los NCQ son extraídos de conchas de crustáceos, obtenidas como películas e hidrogeles, con propiedades antimicrobianas (Muzzarelli, 2011) (Schiffman, Blackford, Wegst, & Schauer, 2011). Las membranas compuestas de PLA electrohiladas coaxialmente con incrustaciones de NCC y NCQ, tienen la capacidad de retener por exclusión de tamaño bacterias como el *E. coli* y específicamente por el uso de NCQ se da la inhibición de esta bacteria (Jalvo et al., 2017).

6.2.1. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PAN vs PLA/PAN.

Una de las principales desventajas del uso de los polímeros puros o desnudos de PAN vs PLA/PAN en la fabricación de membranas, es la presencia de bioincrustaciones o ensuciamiento en las membranas, que bloquean los poros de las mismas, y es por esto, que una vez formadas las biopelículas, son muy difíciles de eliminar (Nadell, Drescher, & Foster, 2016). Por tal motivo, la incorporación de agentes biocidas (NPs) en la fabricación de membranas electrohiladas tiene gran relevancia para minimizar la contaminación biológica generada en la membrana (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020). Por otra parte, el biopolímero PLA posee obstáculos en el proceso de filtración bajo presión, principalmente por algunas limitaciones en sus propiedades mecánicas (L. Li, Hashaikeh, & Arafat, 2013). Este tipo de limitaciones se pueden optimizar mediante tratamientos de estiramiento de las fibras y tratamiento de recocido térmico,

que aumentan la orientación molecular y cristalinidad, mejorando las propiedades mecánicas de las membranas (X. Wang, Zhang, Zhu, Hsiao, & Chu, 2008). El polímero PAN es reconocido por su buena estabilidad y propiedades mecánicas, es utilizado considerablemente en la producción de nanofibras de carbono (NFC). Posee excelentes características como la capacidad de hilado y ser un material amigable con el ambiente (Nataraj et al., 2012). Sin embargo, las membranas de PAN son vulnerables al ensuciamiento (causando complejidad en el proceso de diseño y aplicación de las membranas), ocasionado por la retención de bacterias y proteínas durante el proceso de filtración, generado por su alta hidrofobicidad, (ver tabla 10) (Shalaby et al., 2018) (Zhao, Su, Chen, Peng, & Jiang, 2012).

Tabla 10. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PAN vs PLA/PAN.

Polímero	Ventajas	Desventajas
PAN	Posee resistencia mecánica al impacto hidráulico durante el proceso de filtración (Xie, Shu, Hu, Cheng, & Chen, 2020), estabilidad química y térmica, excelente resistencia al moho y corrosión (Han et al., 2019b). Se caracteriza por ser un buen candidato para la elaboración de membranas de filtración para tratamiento de aguas residuales (Qayum et al., 2019).	La superficie de la membrana del PAN desnuda, es vulnerable a la formación de bioincrustaciones o ensuciamiento, lo cual genera el bloqueo de los poros de la membrana. Por tal motivo, es necesario realizar modificaciones en la membrana a través de rellenos de NPs como agentes biocidas (Haisheng Chen, Huang, Liu, et al., 2020).
PLA/PAN	El PLA es una alternativa ecológica a los polímeros sintéticos derivados del petróleo (Hottle, Bilec, & Landis, 2013) (Halley & Dorgan, 2011) (Farah, Anderson, & Langer, 2016). El polímero es compatible con los nanocristales y evita que el PAN se acumule durante el proceso de electrohilado (Tiwari & Venkatraman, 2012).	El PLA desnudo muestra algunas limitaciones para algunas aplicaciones debido a las bajas propiedades mecánicas (L. Li et al., 2013). Además de presentar deficiencias al ser sometida a presiones por caudal en el tratamiento de aguas. Por tal motivo deben superar el obstáculo agregando NPs que modifiquen su estructura y mejore las propiedades mecánicas (Kaur et al., 2014). El PAN puro o desnudo es vulnerable a bioincrustaciones y ensuciamiento de la membrana (Jalvo et al., 2017).

6.2.2. Ventajas y Desventajas del uso de NPs Ag/GO vs NCC y NCQ.

Con el uso de NPs de Ag/GO vs NCC y NCQ, se pueden encontrar algunas ventajas y desventajas con este tipo de nanocompuestos. Estos rellenos de NPs Ag/GO en las membranas poliméricas de MF poseen una gran ventaja para la salud humana, ya que tienen bajo nivel de toxicidad, además, que el uso de esta tecnología es ecológica, económica y de fácil manejo (L. Shi et al., 2016). El GO tiene propiedades que lo caracterizan como un excelente material, gracias a su alta área de superficie, movilidad electrónica, resistencia mecánica excepcional y alta toxicidad para un amplio grupo de agentes patógenos. Es por eso, que es una excelente alternativa para el tratamiento convencional de agua y depuración de aguas, ya que los métodos de desinfección química (cloración, cloraminas y ozono) pueden tener efectos cancerígenos que dañan la salud humana; además, presenta características como su bajo costo de síntesis del GO, la simplicidad de su procedimiento de síntesis y sus efectivas propiedades antibacterianas que hace atractivo su uso para este tipo de aplicaciones (ver tabla 11) (Bao et al., 2011).

Tabla 11. Ventajas y Desventajas del uso de NPs Ag/GO vs NCC y NCQ.

NPs	Ventajas	Desventajas
Ag/GO	Las NPs de Ag/GO poseen resistencia a la corrosión, propiedades antibacterianas, baja toxicidad para el ser humano (J. Zhu et al., 2018) (Lv et al., 2021). Las NPs de Ag/GO poseen propiedades antiincrustantes, evitan la formación de biopelículas en las membranas, eliminan los microorganismos a través de lisis celular evitando la proliferación bacteriana. Este tipo de material biocida es prometedor para la desinfección del agua (Akhavan & Ghaderi, 2010).	Requiere de procesos de optimización amplia mediante ensayo error, para evitar cambios en la estructura original de la membrana. Para mantener las NPs de GO desglomeradas se requiere de un proceso previo de sonicación (técnica de irradiación ultrasónica donde se aplica una energía y separa las láminas del GO por fuerzas electrostáticas. Este procedimiento se realiza antes de hacer la solución polimérica para electrohilar) (Barua & Saha, 2015) (Tran & Kalra, 2013).
NCC Y NCQ	Los NCC tienen propiedades de alta resistencia a la tracción y alta tasa de absorción de agua (Haizhen Chen et al., 2015). Los NCQ forman una película e hidrogel el cual tiene propiedades antimicrobianas (Muzzarelli, 2011) (Schiffman et al., 2011).	La vida útil de este tipo de nanomaterial natural es relativamente corta, ya que se degradan al ser expuestos a la luz, altas temperaturas y presencia de oxígeno (Cornellio, 2016).

Como resultado a esta investigación, gracias al uso de rellenos de NPs en las membranas poliméricas, se obtienen excelentes modificaciones de las membranas desnudas o puras, ya que, tanto las membranas de PAN modificadas con NPs Ag/GO, como las membranas coaxiales de PLA/PAN modificadas con NCC y NCQ, evitaron la formación de la biopelículas que ocasionan bioincrustaciones o ensuciamiento de la membrana, además, impidieron el taponamiento de los poros de las membranas gracias a sus propiedades biocidas. Al evaluar el rendimiento de las membranas de MF

se puede demostrar la eficiencia de remoción de las membranas compuestas de NPs de Ag/GO, en relación con la membrana polimérica pura o desnuda de PAN. Esto sucede de igual manera, con las membranas compuestas de NCC y NCQ, respecto a las membranas poliméricas puras o desnudas de PLA y PAN/PLA, (ver tabla 12 (Jang et al., 2020a) (Jalvo et al., 2017).

Tabla 12. Propiedades de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ

Polímero	NPs	Propiedades de la membrana modificada	Ref.
PAN	Ag/GO	Las membranas modificadas con NPs de Ag/GO presentaron una excelente actividad antiincrustante y antibacteriana en relación con la membrana de PAN desnuda.	(Jang et al., 2020a) (Barua & Saha, 2015) (Chae, Lee, Lee, Kim, & Park, 2015) (M. Hu, Zheng, & Mi, 2016) (Jang et al., 2015).
PLA/PAN	NCC y NCQ	Los NCC y NCQ mejoraron la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de Young (Mohsen Moslehi & Mahdavi, 2019). Las propiedades antiincrustantes y antibacterianas de los NCQ, dieron a la membrana polimérica desnuda de PLA/PAN su aplicabilidad.	(Jalvo et al., 2017) (Klemm et al., 2011) (Q. Shi et al., 2012) (Zhou, Chu, Wu, & Wu, 2011) (Mincea, Negrulescu, & Ostafe, 2012) (Goetz et al., 2016) (Lopez de Dicastillo et al., 2017).

6.3. Microorganismos Que Pueden Ser inhibidos o eliminados Con Membranas Poliméricas Electrohiladas en el Proceso de MF

El uso de rellenos de NPs en las membranas electrohiladas es de gran importancia, ya que determinan el rendimiento y vida útil de la membrana, evitando de esta manera, las bioincrustaciones o ensuciamientos, siendo uno de los principales factores que disminuye la efectividad de la membrana. En este sentido a través de las modificaciones realizadas en la membrana, se logra transformar la superficie del polímero, mitigando la contaminación biológica (Kochkodan & Hilal, 2015). El crecimiento de microorganismos en la en la superficie de la membrana ocasionan la reducción de la vida útil de la membrana, aumento de agentes patógenos, pérdida de permeabilidad y aumento de costos en el mantenimiento (Dasari et al., 2012).

La integración de nanomateriales biocidas incrustados en las membranas poliméricas electrohiladas son una excelente alternativa que evita la adhesión de microorganismos en la superficie de la membrana y es una estrategia para mitigar la contaminación biológica (L. Shi et al., 2016) (Bhoj, Tharmavaram, & Rawtani, 2020). Las NPs de Ag/GO toman un papel de gran importancia en la inhibición y eliminación de microorganismos presentes en aguas, gracias a sus mecanismos antibacterianos a través del estrés oxidativo y transferencia de electrones generada por el GO (Pinto, Gonçalves, & Magalhães, 2013), del tal manera que tienen la capacidad de eliminar o retener bacterias presentes en el agua como: el *S. aureus* (bacteria Gram positiva), la cual esta agrupada en racimos de tamaño entre 0.5 a 1.5 μ m (Alejo, 2011), de igual

manera la bacteria la *E. coli* (bacteria Gram negativa), con tamaño promedio de 0.5 μm de ancho por 2 μm de largo (Jalvo et al., 2017) (Hottle et al., 2013).

Jalvo et al (Jalvo et al., 2017), describen un estudio de membranas compuestas de PA electrohiladas coaxialmente con incrustaciones de NCC y NCQ, donde la hidrólisis ácida producida durante la extracción de nanocristales aumenta la ritmo de grupos desaceitados garantizando una alta actividad antibacteriana. Los NCQ presentan un efecto bacteriostático sobre las bacterias Gram-negativas como la *E. coli*. (Xie et al., 2020) (Benhabiles et al., 2012) y resistencia a la formación de biopelículas (ver tabla 13) (Jalvo et al., 2017) (Hottle et al., 2013).

Tabla 13. Microorganismos que Pueden Inhibir o Eliminar las Membranas de MF de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ.

Microorganismo	Tamaño Promedio	Tipo de Microorganismo		NPs	Referencias
<i>E. coli</i>	0.5 μm de ancho $\times$ 2 μm de largo	Bacteria	Gram-negativa	Ag/GO	(Jalvo et al., 2017) (Hottle et al., 2013).
<i>S. aureus</i>	0.5 a 1.5 μm	Bacteria	Gram-positivas	Ag/GO NCC y NCQ	(Cornellio, 2016).

A través del uso de NPs de Ag/GO incrustadas en membranas poliméricas de PAN puras o desnudas, se logra obtener una efectividad en la reducción de bacterias como: la *E. coli* del 100% y el *S. aureus* del 87.6 %, logrando una excelente efectividad para la eliminación de microorganismos presentes en aguas (Bao et al., 2011). En este sentido, la membrana Ag/GO-PAN, presentó mayor capacidad antibacteriana con un 30% de aumento en la permeabilidad del agua y eficiencia antiincrustante en relación con la membrana de PAN desnuda, ya que el GO es un material de bajo costo al sintetizarlo, su relativa sencillez en el proceso de fabricación y sus excelentes propiedades antibacterianas, lo hace un nanomaterial apto para el tratamiento de aguas residuales (Jang et al., 2020a). Por otro lado, el uso de NCC y NCQ incrustados en membranas poliméricas coaxiales desnudas de PLA/PAN, demuestran una reducción del 85% de las bacterias de *E. coli* por exclusión de tamaño, con mejores resultados para las membranas coaxiales cargadas con NCQ con un 95% de rechazo de la *E. coli* (Jalvo et al., 2017). Se puede observar, que la efectividad antibacterial es mayor con el uso de NPs de Ag/GO para la reducción de *E. coli*, gracias al uso del GO y la presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno, como: epóxidos, hidroxilos, carbonilos y carboxilos, que se encuentran en su estructura permitiendo promover la interacción y compatibilidad con una matriz polimérica, además, de ser un agente biocida al llevar a las bacterias a un estrés oxidativo, esto en comparación con los NCQ, (ver tabla 14).

Tabla 14. Efectividad de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos.

Polímero	NPs	Microorganismo	Reducción (%)	Tipo de Agua	Referencias
PAN	Ag/GO	<i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i> → 100% <i>S. aureus</i> → 87.6% (Bao et al., 2011).	Agua Residual	(Jang et al., 2020a).
PLA/PAN	CNC y NCQ	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i> → 85% por exclusión de tamaño y un 95% con el uso de NCQ	Agua/sin especificar	(Jalvo et al., 2017).

Los mecanismos utilizados para la actividad antibacteriana ejercida por el GO se caracterizan porque estas NPs poseen bordes afilados, los cuales, ocasionan un daño físico a la membrana bacteriana, de esta manera, se genera la salida de electrones del ADN dañado en las células y evita su reproducción, así mismo, el GO produce la degradación dinámica de las membranas celulares de la *E. coli* y el *S. aureus* al ser incrustado en las membranas celulares que ocasiona un daño celular en lípidos y proteínas, de tal manera que se pierde la viabilidad bacteriana y posible proliferación (L. Shi et al., 2016) (Akhavan & Ghaderi, 2010). En consecuencia, los resultados mostraron un extenso deterioro celular de las bacterias en contacto con la superficie de la membrana. Las bacterias son inhibidas por el estrés oxidativo y el daño o lisis de la

membrana celular generado por Ag/GO (Ko et al., 2019), por tal motivo, este tipo de NPs son eficientes para el tratamiento de aguas residuales (Jang et al., 2020a). Por otra parte, en el caso de los compuestos como los NCC, las membranas mostraron superhidrofilicidad y carga superficial neutra o ligeramente positiva. Las membranas coaxiales que contienen NCQ son menos propensas a colonización de bacterias y están libres de formación de biopelículas después de la exposición a cultivos de *E. coli* (Jalvo et al., 2017). Las membranas poliméricas con incrustaciones de NCC y NCQ, a través del método hidrolítico llevan a la formación de grupos NH^{3+} , interactúan con los residuos cargados negativamente de carbohidratos, lípidos y proteínas ubicados en la superficie celular de las bacterias, lo que explica su papel en el deterioro bacteriano, (ver tabla 15) (Tachaboonyakiat, Sukpaiboon, & Pinyakong, 2014).

Tabla 15. Actividad Antibacteriana de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO Vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos.

Polímero	NPs	Actividad Antimicrobiana	Metodología Microbiológica	Ref.
PAN	Ag/GO	Las NPs poseen la capacidad de interactuar con las bacterias, a través de las cuales, destruyen la membrana, atraviesan el cuerpo de la bacteria y crean daño intracelular (Ko et al., 2019) (C. Liu et al., 2017).	Las cepas bacterianas se cultivaron hasta el pico de absorción que indica aproximadamente 108 unidades formadoras de colonias (UFC). Se inoculó 150 µL de la suspensión bacteriana en 10 mL de caldo nutritivo (NB).	(Jang et al., 2020a)
PLA/PAN	NCC y NCQ	Deterioro bacteriano (Tachaboonyakiat et al., 2014).	Sobre la superficie de las membranas electrohiladas se colocaron 2 mL de cultivos diluidos de <i>E. Coli</i> , que posteriormente se incubaron durante 18 h a 37°C.	(Jalvo et al., 2017).

6.4. Parámetros de Electrohilado de Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag / GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ en la Eliminación de Microorganismos

Los parámetros de electrohilado tienen gran importancia, ya que a través de ellos se pueden obtener las propiedades deseadas para membranas de filtración de agua, dentro de las cuales se encuentran: tamaño y distribución de poro, porosidad, ángulo de contacto, propiedades físicas, químicas y mecánicas, entre otros. De igual manera, se establecen las condiciones de electrohilado, donde se incluyen parámetros del proceso como: voltaje aplicado, flujo del caudal, distancia aguja-colector y parámetros ambientales como: humedad, temperatura; existen otros parámetros como es la viscosidad, la conductividad eléctrica y la tensión superficial de la solución polimérica, los cuales deben optimizarse adecuadamente mediante prueba y error (Barua & Saha, 2015) (Nataraj et al., 2012). De acuerdo a estas características, cada tipo de polímero PAN y PLA, requieren de un tipo de disolvente específico para diluirlos y realizar el proceso de electrohilado; de igual manera, la concentración de NPs establece la capacidad antibacteriana y antiincrustante para la inhibición o eliminación de bacterias, (ver tabla 16).

Tabla 16. Parámetros de la Solución del Polímero.

Polímero	NPs	Conc. Polímero (%w/w)	Conc. NPs (%w/w)	Disolvente	Caudal (ml/h)	Ref.
PAN	Ag/GO	1.0 g	Ag/GO sintetizadas (0.02 g)	DMF (10 ml) Irradiación ultrasónica durante 2 h	0.8	(Jang et al., 2020a).
PLA/PAN	NCC NCQ	y La relación en peso de la concentración polimérica de PLA/PAN fue de 7/10.	5% de CNC y 15% de NCQ.	Cloroformo /DMF (3:2 %v/v)	0.8	(Jalvo et al., 2017).

Las condiciones de procesamiento utilizadas en la técnica de electrospinning se definen a través de parámetros de electrohilado, como son: voltaje, distancia (H) entre la punta de la aguja y el colector, flujo del caudal, entre otros. Estos parámetros son utilizados en las membranas poliméricas de PAN modificadas con NPs de Ag/GO, donde se obtuvieron nanofibras delgadas con un diámetro de 0.544 μm (544nm) y un tamaño de poro de 0.243 μm (243 μm), estos parámetros permiten identificar el tipo de microorganismo que puede retener la membrana polimérica, como es la *E. coli* y el *S.*

aureus, y las aplicaciones para procesos de MF como sistemas de purificación de agua (Jang et al., 2020a) (Cornellio, 2016) (Hottle et al., 2013).

Por otro lado, los parámetros de electrohilado utilizados en las membranas coaxiales de PLA/PAN modificadas con NCC y NCQ, para membranas de PLA puro o desnudo, cuentan con un tamaño promedio de poro de $0.8 \pm 0.1 \mu\text{m}$, mientras que las membranas coaxiales de PAN/PLA con incrustaciones de NCC y NCQ mostraron tamaños de poro más altos de 1.2 a $2.6 \mu\text{m}$, (ver tabla 17) (Jalvo et al., 2017).

Tabla 17. Condiciones de Procesamiento Técnica de Electrospinning.

Polímero	NPs	Efecto del colector	Voltaje (kb)	Distancia (H) entre la punta de la aguja y el colector (cm)	Presión (bar)	Ref.
PAN	Ag/GO	—	15	15	2	(Jang et al., 2020a)
PLA/PAN	NCC y NCQ	Placa colector plana.	20	20	0.2	(Jalvo et al., 2017).

Para las condiciones ambientales del proceso de la técnica de Electrospinning, tanto para las membranas de PAN modificadas con NPs de Ag/GO como las membranas

coaxiales de PLA/PAN modificadas con NCC y NCQ, utilizan temperaturas ambientales para electrohilar y el valor de la humedad relativa no es reportado en los estudios, (ver tabla 18).

Tabla 18. Condiciones Ambientales para el Proceso de la Técnica de Electrospinning.

Polímero	NPs	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Referencias
PAN	Ag/GO	Temperatura ambiente (25°C)	—	(Jang et al., 2020a)
PLA/PAN	NCC y NCQ	Temperatura ambiente (25°C)	—	(Jalvo et al., 2017).

6.5. Características físicas, químicas y mecánicas de las Membranas de PAN Modificadas con NPs de Ag/GO vs Membranas Coaxiales de PLA/PAN Modificadas con NCC y NCQ para la Eliminación de Microorganismos

Para realizar el análisis de las fibras electrohiladas de polímeros modificadas se utilizan técnicas en estado sólido, las cuales determinan características cualitativas y cuantitativas del material. Estas técnicas se describen en la (ver tabla 19 y anexo 11.1).

Tabla 19. Caracterización Física, química, mecánica de las membranas Poliméricas Modificadas.

Membrana Modificada	Técnicas de Caracterización	Tipo de Caracterización	Referencias
PAN con NPs de Ag/GO	SEM (Física)	Diámetro de la fibra y de poro, morfología superficial de la fibra, composición química.	(Jang et al., 2020a)
	Espectroscopías Raman. (Química)	Identificación y caracterización de todos los miembros del carbono. Suministra información estructural y electrónica de los nanocompuestos.	
	Ángulo de contacto (Mecánicas)	Interacción y comportamiento de un material con diversos fluidos.	
	FT-IR (Químicas)	Identifica las frecuencias de las bandas de absorción de los grupos funcionales en la estructura química de los materiales	
	Porómetro de flujo capilar (Física)	Las propiedades de los poros	
	Espectroscopia (UV-vis) (Física)	Identificación y determinación de especies inorgánicas y orgánicas. Optimiza las condiciones de síntesis de partículas Ag y compuestos Ag/GO.	
PLA / PAN con NPs de NCC y NCQ	Microscopia Electrónica de barrido (por sus siglas en inglés SEM, Scanning Electron Microscope).	Morfología de la fibra. Porosidad.	(Jalvo et al., 2017).

(Física)

TEM(Mecánica)	Distribución de NPs incrustadas en las membranas poliméricas.
Microscopia de Fuerza Atómica (por sus siglas en inglés AFM, Atomic Force Microscope). (Física)	Detecta las variaciones en la composición y dureza de las membranas poliméricas. Diámetros de las fibras.
Medidor de ángulo de contacto óptico (Mecánica)	Interacción y comportamiento de un material con diversos fluidos.
Ensayos mecánicos (Mecánica)	Determinación de la resistencia a la tracción, módulo elástico y deformación de las membranas
Microscopía confocal (Física)	Visualización de células y biopelículas

6.6. Caso Estudio 2: Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂

Park et al (J.-A. Park et al., 2018), señalan que el uso de membranas electrohiladas de PVDF con incrustaciones de NPs de GO pueden ser utilizadas para eliminar la tetraciclina TC en el agua. La TC es uno de los antibióticos más utilizados en el mundo para uso humano y veterinario (F. Yu, Ma, & Han, 2014). Este tipo de antibiótico esta

ocasionado un gran impacto negativo en los cuerpos de agua, ya que es vertido directamente a dichas fuentes hídricas a través de la orina y heces humanas y de animales, generando grandes daños ambientales. La TC se encuentra principalmente en aguas residuales (Wei, Ge, Huang, Chen, & Wang, 2011).

La presencia de este antibiótico principalmente en los cuerpos de agua provocar efectos desfavorables ya que la formación de bacterias resistentes a los antibióticos (Haisheng Chen, Huang, Wang, et al., 2020), causan grandes problemas, especialmente en los tratamientos convencionales de aguas residuales ya que poseen dificultades para la eliminación de este tipo de bacterias resistentes (Daghrir & Drogui, 2013). Por tal motivo en búsqueda de nuevas alternativas en tratamientos de aguas, que sean respetuosos con el medio ambiente, se dio a conocer en este estudio de caso el uso de nuevos materiales como el polímero sintético PVDF el cual es uno de los polímeros más utilizados en la elaboración de membranas, gracias a sus excelentes propiedades como son: alta resistencia química, estabilidad térmica, resistencia mecánica y alta hidrofobicidad (M. Zhang, Nguyen, & Ping, 2009). Esta última propiedad no es recomendable para membranas con aplicaciones en tratamientos de aguas, por tal motivo es necesario realizar incrustaciones de rellenos de GO a las membranas poliméricas para evitar bioincrustaciones en la misma, de tal manera que aumenta hidrofilia de la membrana y la actividad antimicrobiana (Zeng et al., 2016). Es por ello, que el GO no solo actúa en la inhibición de bacterias como el *E. coli* y *S. aureus*, sino también consigue, que a través de sus propiedades las membranas

poliméricas logren la absorción de TC evitando la resistencias bacteriana a los antibióticos (J.-A. Park et al., 2018).

Esta actividad antibacteriana en comparación con el estudio realizado por “(Daels et al., 2015)”, demostró que el uso del polímero PA-6 o nailon 6 cumple con las características requeridas en la técnica de electrohilado para la elaboración de membranas con aplicaciones en filtración de agua (Daels et al., 2015) (Bao et al., 2011) (Daels et al., 2011). Las membranas poliméricas de PA-6 fueron modificadas con incrustaciones de NPs de TiO_2 . Este nanocompuesto se caracteriza por ser un recurso disponible, por su baja toxicidad, estabilidad, y es de fácil adquisición gracias su bajo costo. Este tipo de membranas funcionalizadas electrohiladas fueron utilizadas para la inactivación de *S. aureus* por medio de UV, donde se obtuvo como resultado que el uso de este tipo de membranas modificadas con NPs TiO_2 son elocuentemente más altas que con el uso de fotodegradación con UV sola. De igual manera, las nanofibras funcionalizadas con TiO_2 mostraron fotodegradación en la eliminación de ácidos húmicos (materia orgánica disuelta generada por descomposición de materiales vegetales y animales) (Daels et al., 2015). Los ácidos húmicos ayudan a generar ensuciamiento o bioincrustaciones en los procesos de MF (Kimura, Ogyu, Miyoshi, & Watanabe, 2015) (Nguyen & Roddick, 2013).

6.6.1. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PVDF Vs PA-6.

El polímero PVDF es uno de polímeros más utilizados en la técnica de electrohilado, sin embargo, su alta hidrofobicidad, es un gran inconveniente, ya que puede generar

bioincrustaciones en la membrana, esta problemática puede ser solucionada al introducir rellenos de NPs como agente biosida, como el GO (J. A. Park et al., 2019). Por otro lado el biopolímero PA-6, se caracteriza por sus excelentes propiedades en la elaboración de membranas para filtración de agua, ya que presenta alta resistencia mecánica, resistencia a la fatiga, alto poder amortiguador buenas propiedades de deslizamiento, entre otras (ver tabla 20) (Daels et al., 2011).

Tabla 20. Ventajas y Desventajas del uso de los polímeros PVDF Vs PA-6.

Polímero	Ventajas	Desventajas
PVDF	Alta resistencia química, estabilidad térmica, resistencia mecánica (M. Zhang et al., 2009).	La naturaleza hidrófoba del PVDF no es apta para membranas de tratamiento de agua; sin embargo, la hidrofobicidad se puede mejorar realizando incrustaciones de NPs GO (Jang et al., 2015) (C. Liu et al., 2018).
PA-6	Este biopolímero cuenta con buenas propiedades físicas y mecánicas (Razavizadeh & Niazmand, 2020). Se caracteriza por sus aplicaciones en filtración de agua (Daels et al., 2015).	Los biopolímeros pueden ser susceptibles degradación química, térmica, mecánica (Zapata, Pujol, & Coda, 2012).

6.6.2. Ventajas y Desventajas del uso de los NPs GO Vs TiO₂.

Gracias a las excelentes propiedades antibacterianas y antiincrustantes que posee el GO se logra la inhibición de bacterias como *E. coli* y *S. aureus* de igual manera posee la capacidad de adsorción de TC (J.-A. Park et al., 2018). Este antibiótico tiene una estructura química estable y es difícil de biodegradar (K. Wang, Wu, Zhu, Zheng, & Tao, 2020). Por otra parte el TiO₂ tiene propiedades antibacteriana y antiincrustantes las cuales lo hacen eficiente en la eliminación de microorganismos (ver tabla 21) (Daels et al., 2015).

Tabla 21. Ventajas y Desventajas del uso de NPs GO Vs NPs de TiO₂.

NPs	Ventajas	Desventajas
GO	El GO amplía la hidrofilia de la membrana polimérica y la actividad antimicrobiana (Zeng et al., 2016). El (GO) posee propiedades únicas, como son: alta superficie específica, resistencia mecánica (H. Q. Chen et al., 2014).	Para procesos de Optimización requiere ensayos a prueba ensayo error, para evitar perturbar la estructura original de la membrana (Q. Q. Wang et al., 2013) (Tran & Kalra, 2013).
TiO ₂	Las NPs de TiO ₂ poseen baja toxicidad, estabilidad, y bajo costo (Daels et al., 2015). También actúa como agente biocida, antiincrustante y posee propiedades fotocatalíticas (Bao et al., 2011) (Y. Yang et al., 2018) (L. Wang, Ali, Zhang, Mailhot, & Pan, 2020) (Pant et al., 2011) (Salman & Razlan, 2018).	Es necesario el uso de UV para que el nanocompuesto sea más eficiente en la inhibición de microorganismos, generando costos adicionales (Tran & Kalra, 2013).

6.6.3. Ventajas y Desventajas del uso de NPs GO Vs NPs de TiO₂.

Por otro lado, las propiedades que adquieren las membranas de MF (Daels et al., 2011), de PVDF Modificadas con NPs de GO son de gran importancia ya que pueden adsorber antibióticos como el TC, evitando la proliferación de bacterias como *E. coli* y *S. aureus* que pueden llegar a ser resistentes a dicho antibiótico (J.-A. Park et al., 2018). Las Membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO₂ adquieren propiedades DE fotodegradación de *S. aureus* y ácidos húmicos potencializados con el uso de UV. Es por ello que podrían usarse en procesos de filtración de alto flujo para la recuperación de efluentes (ver tabla 22) (Daels et al., 2015).

Tabla 22. Propiedades de las Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂.

Polímero	NPs	Propiedades de la membrana modificada	Ref.
PVDF	GO	Gracias a la funcionalización de NPs de GO en las membranas poliméricas de PVDF, estas adquieren propiedades antibacterianas, antiincrustantes y actúan como adsorbente de TC, favorables para el proceso de MF en tratamiento de aguas residuales.	(J.-A. Park et al., 2018)
PA-6	TiO ₂	Las membranas poliméricas de PA-6 funcionalizadas con TiO ₂ revelaron una actividad de fotodegradación de <i>S. aureus</i> y ácidos húmicos, mejorando la calidad del agua de tal manera que se pueden utilizar en el método de filtración.	(Daels et al., 2015).

6.7. Microorganismos que pueden ser inhibidos o eliminados con membranas poliméricas electrohiladas en el Proceso de MF de PVDF modificadas con NPs de GO Vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO₂

Las incrustaciones de NPs de GO realizadas a la membrana polimérica de PVDF tiene la capacidad de eliminar bacterias como el son *E. coli* y *S. aureus* presentes en aguas, por medio del proceso de MF (J.-A. Park et al., 2018), de igual manera las membranas poliméricas con incrustaciones de TiO₂ tiene la capacidad de eliminar bacterias como *S. aureus* gracias a sus propiedades biocidas, potencializando su actividad antibacteriana con el uso de UV (Daels et al., 2015). Por otra parte, las membranas poliméricas de PVDF/GO pueden adsorber TC y las membranas poliméricas de PA-6/TiO₂ tiene la capacidad de realizar la remoción de materia orgánica disuelta como ácidos húmicos (ver tabla 23).

Tabla 23. Microorganismos que pueden inhibir o eliminar las membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂.

Microorganismo	Tamaño Promedio	Tipo de Microorganismo	NPs	Referencias
<i>E. coli</i>	Diámetro = $1,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$, longitud = $2,2 \pm 0,3 \mu\text{m}$ (S. J. Park, Kim, & Kim, 2010).	Bacteria Gram-negativa	GO	(J.-A. Park et al., 2018).
<i>S. aureus</i>	Diámetro = $0,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ (S. J. Park et al., 2010).	Bacteria Gram-positivas	TiO ₂ GO	(J.-A. Park et al., 2018) (Daels et al., 2015).

Las membranas electrohiladas con incrustaciones del NPs de GO tienen una efectividad biocida del 100% para el *E. coli* y 99% para el *S. aureus* en aguas residuales (Han et al., 2019b). Así mismo tienen la capacidad de eliminación de TC en un 17,92 mg / g para GO (J.-A. Park et al., 2018), mientras que las membranas poliméricas con incrustaciones de TiO₂, muestran una efectividad de (4,5 log₁₀/100 ml después de 6 h) de *S. aureus* en aguas residuales y pueden eliminar de los ácidos húmicos (83% de degradación después de 2 h) (ver tabla 24) (Daels et al., 2015).

Tabla 24. Efectividad de las Membranas de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂ en la Eliminación de Microorganismos.

Polímero	NPs	Microorganismo	Reducción %	Tipo de Agua	Referencias
PVDF	GO	<i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	100% <i>E. coli</i> y 99% <i>S. aureus</i> (Han et al., 2019b).	Agua Residual	(J.-A. Park et al., 2018).
PA-6	TiO ₂	<i>S. aureus</i>	99,99% de <i>S. aureus</i> después de 6 h de exposición a UV.	Agua Residual.	(Daels et al., 2015).

Gracias a las propiedades bactericidas del GO, se puede observar que ocasiona un daño en la membrana citoplasmática de las bacterias *E. coli* y *S. aureus* (J. A. Park et al., 2019). Los efectos bactericidas fotocatalíticos del TiO₂ generaran la esterilización de la bacteria (Daels et al., 2015). En este caso comparativo el GO presenta mayor porcentaje de reducción de bacterias sin necesidad de potencializar sus propiedades con ayuda de UV en relación con el TiO₂ que si potencializa su actividad antibacteriana con UV (ver tabla 25).

Tabla 25. Actividad Antibacteriana de las Membranas de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂ en la Eliminación de Microorganismo.

Polímero	NPs	Actividad Antimicrobiana	Metodología Microbiológica	Ref.
PVDF	GO	Daño de la membrana citoplasmática (J. A. Park et al., 2019). Destruye la membrana, atraviesa el cuerpo de la bacteria y crean daño intracelular (Ko et al., 2019) (C. Liu et al., 2017).	El número de bacterias se enumeró mediante un método de recuento de colonias, posteriormente de la incubación a 37 ° C durante 24 h.	(J.-A. Park et al., 2018)
PA-6	TiO ₂	Los efectos bactericidas fotocatalíticos del TiO ₂ generaran la esterilización de la bacteria (Ademola Bode-Aluko et al., 2021) (Karagoz et al., 2020).	Las células de S. aureus se enumeraron mediante inoculación en un medio de cultivo de agar nutritivo y posteriormente se realizó conteo de colonias	(Daels et al., 2015).

6.8. Parámetros de electrohilado de membranas de MF de PVDF modificadas con NPs de GO Vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO₂ en la eliminación de microorganismos

La concentración tanto de las NPs de GO y TiO₂ como de los polímeros PVDF y PA-6 polímero, influye directamente en las propiedades de la membrana de MF, en relación con la estructura morfológica de las membranas (tamaño de poro, la superficie

de área, entre otros), lo cual es relevante para la eliminación o inhibición de microorganismos presentes en aguas (ver tabla 26).

Tabla 26. Parámetros de la Solución del Polímero.

Polímero	NPs	Conc. Polímero wt%	Conc. NP wt%	Disolvente	caudal ml / h	Ref.
PVDF	GO	16 % en peso	0-1,5%	(DMF) y Acetona v: v = 6: 4	0,2	(J.-A. Park et al., 2018)
PA-6	TiO ₂	16 % en peso	0,07% en peso	Ácido fórmico al 98 % en peso y ácido acético al 99,8 % en peso	1	(Daels et al., 2015).

Los parámetros en la técnica de electrospinning, tales como, el voltaje, la distancia aguja-colector y el caudal del polímero son de gran importancia ya que al también son relevantes en la morfología de las membranas obtenidas. Las membranas poliméricas modificadas con NPs de TiO₂ tienen tamaños de poro pequeños entre 0,2 y 0,4 μm y una gran proporción de superficie a volumen, así mismo que tienen una estructura de poros abiertos interrelacionados y de baja densidad, lo que hace que esta membrana no tejida sea adecuada para múltiples aplicaciones de filtración (ver tabla 27) (Daels et al., 2015).

Tabla 27. Condiciones de Procesamiento Técnica de Electrospinning.

Polímero	NPs	Efecto del colector	Voltaje (kv)	Distancia (H) entre el colector y la punta de la aguja (cm)	Presión (bar)	Ref.
PVDF	GO	Cilindro giratorio	25	15	0,91	(J.-A. Park et al., 2018)
PA-6	TiO ₂	—	25	10	—	(Daels et al., 2015).

Por otra parte, las condiciones ambientales utilizadas en procesamiento de la técnica de electrospinning es definido por, la temperatura que es utilizada en la cabina de electrohilado, de igual manera que la humedad relativa generada. En el caso de los dos tipos de membranas estudiadas, se utiliza una temperatura ambiente para el procesamiento de las membranas (ver tabla 28).

Tabla 28. Condiciones Ambientales del Procesamiento Técnica de Electrospinning.

Polímero	NPs	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Referencias
PVDF	GO	Temperatura Ambiente	—	(J.-A. Park et al., 2018)
PA-6	TiO ₂	Temperatura Ambiente	—	(Daels et al., 2015).

6.9. Características físicas, químicas y mecánicas de las Membranas de MF de PVDF Modificadas con NPs de GO Vs Membranas de PA-6 Modificadas con NPs de TiO₂ en la Eliminación de Microorganismos

La caracterización de las membranas poliméricas electrohiladas se realiza a través de equipos de investigación en donde se define las propiedades físico-químicas y biológicas, térmicas, mecánicas e incluso dilucidar la efectividad de las aplicaciones de las de las membranas obtenidas (ver la tabla 29 y anexo 11.1).

Tabla 29. Caracterización Física, química, mecánica de las membranas Poliméricas Modificadas.

Membrana Modificada	Caracterización	Tipo de Caracterización	Referencias
PVDF con NPs de GO	Microscopia Electrónica de barrido (por sus siglas en ingles SEM, Scanning Electron Microscope). (Física)	Morfología Diámetro de la fibra	(J.-A. Park et al., 2018)
	Microscopia de Fuerza Atómica (por sus siglas en inglés AFM, Atomic Force Microscope). (Física)	Rugosidad de la superficie	
	Calorimetría Diferencial de Barrido	Propiedades térmicas	
	Análisis Termogravimétrico (Física)		
	Angulo de contacto (Mecánica)	Ángulo de contacto	
	Porómetro de flujo capilar (Física)	Las propiedades de los poros	
	Máquina de prueba universal (Mecánica)	Pruebas de tracción	
	Sistema de filtración sin salida (Mecánica)	Filtración de partículas	
PA-6 con NPs de	Sistema de filtración sin salida (Mecánica)	Filtración de bacteria <i>S. aureus</i>	(Daels et al.,

TiO ₂	Espectrofotómetro UV-Vis (Física)	Fotodegradación de los ácidos húmicos	2015).
	Pruebas de contacto de fotodegradación	Ácidos húmicos	

7. Impacto Social Y Humanístico Del Proyecto

Este trabajo investigativo en la modalidad de revisión sistemática, tiene un impacto positivo en la comunidad científica de diversas disciplinas que realicen trabajos en la tecnología de nuevos materiales como agentes biocidas y la elaboración de nanomembranas electrohiladas por medio de la técnica de electrospinning para tratamiento microbiológico de aguas. Actualmente, la contaminación hídrica conlleva a utilizar nanomateriales con características innovadoras que tienen potencialidad por su composición química, de complementar y llegar en un futuro a sustituir tratamientos de aguas convencionales. Esta tecnología ayudaría a evitar a mediano plazo la muerte de ecosistemas acuáticos y poder generar avances científicos en el cuidado de los recursos naturales.

8. Conclusiones

Con la revisión sistemática se logró identificar los posibles nanocompuestos para la elaboración de membranas poliméricas modificadas con incrustaciones de NPs en el proceso de MF para la eliminación o inhibición de microorganismo presentes en aguas. Los polímeros más utilizados fueron: PAN, PVDF, PTFE, PES, PP, PE, PEEK, PLA, PVA, PMMA, PET, PU, PA-6, los cuales poseen propiedades de: resistencia mecánica al impacto hidráulico, estabilidad química, estabilidad térmica, resistencia al moho y corrosión, entre otras; de tal manera, que los convierten en excelentes candidatos en aplicaciones de filtros para tratamientos de aguas.

Por otra parte, el uso de incrustaciones de NPs como agentes antibacterianos y antiincrustantes en las membranas poliméricas, tienen gran importancia en la potencialización de las propiedades de las membranas poliméricas puras o desnudas, para la inactivación o inhibición durante la proliferación de microorganismos presentes en aguas. Además, la presencia de bioincrustaciones en las membranas evitan que los poros de las mismas sean obstruidos causando el deterioro de la membrana y aumento de costos en su mantenimiento.

Algunas NPs principales más utilizados en tratamiento de aguas como agentes biocidas son: GO, Ag, NCC, NCQ, CuO, ZnO y TiO₂. Este tipo de NPs tienen la capacidad de eliminar microorganismos como las bacterias de la *E. coli* y el *S. aureus*, principalmente.

Este trabajo investigativo se desarrolló con la finalidad de evaluar la efectividad del GO como agente biocida a partir de dos estudios de caso, donde se evaluó la efectividad de GO como agente antibacterial en comparación con otras. Se pudo concluir que el GO tiene excelentes propiedades antibacterianas y antiincrustantes, ya que tiene la capacidad de eliminar microorganismos como la *E. coli* y *S. aureus* con un alto porcentaje de reducción en comparación con otras NPs. Esto se puede evidenciar por medio de la comparación de los dos casos de estudio evaluados de membranas poliméricas desnudas o puras, (matriz polimérica), las cuales fueron modificadas con NPs: caso 1, membranas de microfiltración (MF) de PAN modificadas con NPs de Ag/GO vs membranas de PLA/PAN modificadas con nanocristales de celulosa (NCC) y nanocristales de quitina (NCQ). Como resultado a este estudio, las NPs de Ag/GO vs NCC y NCQ tuvieron una excelente actividad antibacteriana y antiincrustante con una efectividad en la eliminación de microorganismos con las NPs de Ag/GO y una tasa de reducción del 100% para la *E. coli* y un 87.6 % para el *S. aureus*, en comparación con los NCQ y NCC, la efectividad en la eliminación bacteriana con los dos nanocristales fue de un 85% para la *E. coli* por exclusión de tamaño y un 95% con el uso de NCQ. Para el estudio del caso 2, las membranas de MF de PVDF modificadas con NPs de GO vs membranas de PA-6 modificadas con NPs de TiO₂, la respuesta fue una tasa de reducción de bacterias con el uso de las NPs de GO en un 100% para la *E. coli* y un 99% para el *S. aureus* y con las NPs de TiO₂ fue de un 99.99% para el *S. aureus* después de 6 h de exposición a rayos UV. Otra propiedad de gran importancia que posee el GO es que tiene la capacidad de eliminar el antibiótico TC presente principalmente en aguas residuales ya que la presencia de este antibiótico en los

cuerpos de agua, provocar efectos desfavorables ya que permite la formación de bacterias resistentes a los antibióticos. Esta efectividad que posee el GO se debe a que los mecanismos utilizados para la actividad antibacteriana ejercida por el GO se caracterizan porque estas NPs poseen bordes afilados, los cuales, ocasionan un daño físico a la membrana bacteriana, de esta manera, se genera la salida de electrones del ADN dañado en las células y evita su reproducción, así mismo, el GO produce la degradación dinámica de las membranas celulares.

9. Recomendaciones

El empleo de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas abre a las puertas a la creación de nuevos diseños en la desinfección de las aguas, por lo que se sugiere:

1. Se implemente el uso continuo de nuevas técnicas de desinfección de aguas como puede ser la nanotecnología.
2. Fortalecer el campo investigativo en torno al empleo de nuevas estrategias de tratamiento de aguas que no generen tanto impacto al medio ambiente.
3. Ampliar el campo de implementación de la técnica de electrospinning con el fin de favorecer y hacer más sencillo el proceso de desinfección de aguas.

Referencias Bibliográficas

Acosta Castellanos Pedro Mauricio, C. C. (2015). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 105-112.

Alejo, J. C. (2011). *EVALUACIÓN DE RIESGOS DE STAPHYLOCOCCUS AUREUS ENTEROTOXIGÉNICO EN ALIMENTOS PREPARADOS NO*. BOGOTA: Instituto Nacional de Salud.

Araque, I. D. (2018). Diagnóstico y propuesta de fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales, sector tierra negra. *L'esprit Ingénieux*, 132-140.

Becerra, D. A., & Acuña, L. J. (2021). *Montaje Electrospinning*. Tunja: Propia.

Cornellio, V. C. (2016). *Astaxantina integrada en Nanowhiskas de Quitina: estudio de la degradacion termica*. Morelia Mochoacán: privada.

Dr. D. García, F. (2017). *Mapping sistemáticos de literatura. Caso práctico de planificación usando Parsifal*. Mexico: Instituto de ciencias basicas.

Lina Patricia Vega and Gustavo A. Peñuela, P. (2018). High Frequency Sonochemical Degradation of Benzophenone-3 in Water. *Journal of Environmental Engineering*.

Abd Halim, N. S., Wirzal, M. D. H., Hizam, S. M., Bilad, M. R., Nordin, N. A. H. M., Sambudi, N. S., . . . Yusoff, A. R. M. (2020). Recent Development on Electrospun Nanofiber Membrane for Produced Water Treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104613. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104613>

Abdulla, N. K., Siddiqui, S. I., Fatima, B., Sultana, R., Tara, N., Hashmi, A. A., . . . Chaudhry, S. A. (2021). Silver based hybrid nanocomposite: A novel antibacterial material for water cleansing. *Journal of Cleaner Production*, 284. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124746

Acosta, H. A., Villada, H. S., & Prieto, P. A. (2006). Envejecimiento de almidones termoplásticos agrios de yuca y nativos de papa por microscopía de fuerza atómica. *Información tecnológica*, 17(3), 71-78.

Ademola Bode-Aluko, C., Pereao, O., Kyaw, H. H., Al-Naamani, L., Al-Abri, M. Z., Tay Zar Myint, M., . . . Dobretsov, S. (2021). Photocatalytic and antifouling properties of electrospun TiO₂ polyacrylonitrile composite nanofibers under visible light. *Materials Science and Engineering: B*, 264, 114913. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114913>

Aghapour Aktij, S., Taghipour, A., Rahimpour, A., Mollahosseini, A., & Tiraferri, A. (2020). A critical review on ultrasonic-assisted fouling control and cleaning of fouled membranes. *Ultrasonics*, 108, 106228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106228>

Ahire, J. J., Neveling, D. P., & Dicks, L. M. T. (2018). Polyacrylonitrile (PAN) nanofibres spun with copper nanoparticles: an anti-Escherichia coli membrane for water treatment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(16), 7171-7181. doi:10.1007/s00253-018-9051-0

Ahmad, A., qureshi, A. S., Li, L., Bao, J., Jia, X., Xu, Y., & Guo, X. (2016). Antibacterial activity of graphene supported FeAg bimetallic nanocomposites. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 143, 490-498. doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.03.065

Aijuka, M., Santiago, A. E., Girón, J. A., Nataro, J. P., & Buys, E. M. (2018). Enteroaggregative Escherichia coli is the predominant diarrheagenic E. coli pathotype among irrigation water and food sources in South Africa. *International Journal of Food Microbiology*, 278, 44-51. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.018

Akhavan, O., & Ghaderi, E. (2010). Toxicity of Graphene and Graphene Oxide Nanowalls Against Bacteria. *Acs Nano*, 4(10), 5731-5736. doi:10.1021/nn101390x

Al Aani, S., Mustafa, T. N., & Hilal, N. (2020). Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering: A comprehensive statistical review over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101241. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101241

ALDANA, A. S., SANDOVAL, E. R., & QUINTERO, A. F. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Dyna*, 72(146), 45-53.

Alejo, J., Cortes, M, Correa, D, Cebeiro, K Herrera, J. (2011). *EVALUACIÓN DE RIESGOS DE STAPHYLOCOCCUS AUREUS ENTEROTOXIGÉNICO EN ALIMENTOS PREPARADOS NO*. BOGOTÁ: Instituto Nacional de Salud.

Amiri, S., Asghari, A., Vatanpour, V., & Rajabi, M. (2020). Fabrication and characterization of a novel polyvinyl alcohol-graphene oxide-sodium alginate nanocomposite hydrogel blended PES nanofiltration membrane for improved water purification. *Separation and Purification Technology*, 250, 117216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117216>

Angel, N., Guo, L., Yan, F., Wang, H., & Kong, L. (2020). Effect of processing parameters on the electrospinning of cellulose acetate studied by response surface methodology. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100015>

Anis, S. F., Hashaikh, R., & Hilal, N. (2019). Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100941. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100941>

Arenas, G. N., & Cañas, L. A. (2007). Procedimiento para medir ángulos de contacto en sólidos particulados finos. *Scientia et technica*, 1(36).

Ashfaq, M. Y., Al-Ghouti, M. A., & Zouari, N. (2020). Functionalization of reverse osmosis membrane with graphene oxide to reduce both membrane scaling and biofouling. *Carbon*, 166, 374-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.05.017>

Azizi-Lalabadi, M., Hashemi, H., Feng, J., & Jafari, S. M. (2020). Carbon nanomaterials against pathogens; the antimicrobial activity of carbon nanotubes, graphene/graphene oxide, fullerenes, and their nanocomposites. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102250>

Bao, Q., Zhang, D., & Qi, P. (2011). Synthesis and characterization of silver nanoparticle and graphene oxide nanosheet composites as a bactericidal agent for water disinfection. *Journal of Colloid and Interface Science*, 360(2), 463-470. doi:[10.1016/j.jcis.2011.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.05.009)

Barani, M., Bazgir, S., Keyvan Hosseini, M., & Keyvan Hosseini, P. (2021). Eco-facile application of electrospun nanofibers to the oil-water emulsion separation via coalescing filtration in pilot- scale and beyond. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 342-357. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.015>

Barco-Bonilla, N., Romero-González, R., Plaza-Bolaños, P., Garrido Frenich, A., & Martínez Vidal, J. L. (2010). Analysis and study of the distribution of polar and non-polar

pesticides in wastewater effluents from modern and conventional treatments. *Journal of Chromatography A*, 1217(50), 7817-7825.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.011>

Barua, B., & Saha, M. C. (2015). Investigation on jet stability, fiber diameter, and tensile properties of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous yarns. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(18). doi:10.1002/app.41918

Bassyouni, M., Abdel-Aziz, M. H., Zoromba, M. S., Abdel-Hamid, S. M. S., & Drioli, E. (2019). A review of polymeric nanocomposite membranes for water purification. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 73, 19-46.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.01.045>

Becerra, D. A. T., & Acuña, L. J. S. (2021). *Montaje Electrospinning*. Retrieved from Tunja:

Benhabiles, M. S., Salah, R., Lounici, H., Drouiche, N., Goosen, M. F. A., & Mameri, N. (2012). Antibacterial activity of chitin, chitosan and its oligomers prepared from shrimp shell waste. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 48-56.
doi:10.1016/j.foodhyd.2012.02.013

Bhoj, Y., Tharmavaram, M., & Rawtani, D. (2020). A comprehensive approach to antifouling strategies in desalination, marine environment, and wastewater treatment. *Chemical Physics Impact*, 100008. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chphi.2020.100008>

Bjorge, D., Daels, N., De Vrieze, S., Dejangs, P., Van Camp, T., Audenaert, W., . . .
 Van Hulle, S. W. H. (2009). Performance assessment of electrospun nanofibers for filter
 applications. *Desalination*, 249(3), 942-948.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.064>

Buruga, K., Song, H., Shang, J., Bolan, N., Jagannathan, T. K., & Kim, K.-H. (2019).
 A review on functional polymer-clay based nanocomposite membranes for treatment of
 water. *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120584.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.067>

Cassano, A., & Basile, A. (2013). 7 - Integrating different membrane operations and
 combining membranes with conventional separation techniques in industrial processes.
 In A. Basile (Ed.), *Handbook of Membrane Reactors* (Vol. 2, pp. 296-343): Woodhead
 Publishing.

Cornellio, V. C. (2016). *Astaxantina integrada en Nanowhiskas de Quitina: estudio de
 la degradacion termica*. Morelia Mochoacán: privada.

Cui, J., Li, F., Wang, Y., Zhang, Q., Ma, W., & Huang, C. (2020). Electrospun
 nanofiber membranes for wastewater treatment applications. *Separation and
 Purification Technology*, 250, 117116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117116>

Chae, H. R., Lee, J., Lee, C. H., Kim, I. C., & Park, P. K. (2015). Graphene oxide-
 embedded thin-film composite reverse osmosis membrane with high flux, anti-

biofouling, and chlorine resistance. *Journal of Membrane Science*, 483, 128-135.
doi:10.1016/j.memsci.2015.02.045

Chakraborty, S., & Biswas, M. C. (2020). 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer. *Composite Structures*, 248, 112562.
doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112562

Chen, H., Huang, M., Liu, Y., Meng, L., & Ma, M. (2020). Functionalized electrospun nanofiber membranes for water treatment: A review. *Science of The Total Environment*, 739, 139944. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139944

Chen, H., Huang, M., Wang, Z., Gao, P., Cai, T., Song, J., . . . Meng, L. (2020). Enhancing rejection performance of tetracycline resistance genes by a TiO₂/AgNPs-modified nanofiber forward osmosis membrane. *Chemical Engineering Journal*, 382, 123052. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123052

Chen, H., Ni, J., Chen, J., Xue, W., Wang, J., Na, H., & Zhu, J. (2015). Activation of corn cellulose with alcohols to improve its dissolvability in fabricating ultrafine fibers via electrospinning. *Carbohydrate Polymers*, 123, 174-179.
doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.023

Chen, H. Q., Gao, D., Wang, B., Zhao, R. F., Guan, M., Zheng, L. N., . . . Feng, W. Y. (2014). Graphene oxide as an anaerobic membrane scaffold for the enhancement of B.

adolescentis proliferation and antagonistic effects against pathogens E-coli and S-aureus. *Nanotechnology*, 25(16). doi:10.1088/0957-4484/25/16/165101

Chen, J., Peng, H., Wang, X., Shao, F., Yuan, Z., & Han, H. (2014). Graphene oxide exhibits broad-spectrum antimicrobial activity against bacterial phytopathogens and fungal conidia by intertwining and membrane perturbation. *Nanoscale*, 6(3), 1879-1889. doi:10.1039/c3nr04941h

Daels, N., De Vrieze, S., Sampers, I., Decostere, B., Westbroek, P., Dumoulin, A., . . . Van Hulle, S. W. H. (2011). Potential of a functionalised nanofibre microfiltration membrane as an antibacterial water filter. *Desalination*, 275(1-3), 285-290. doi:10.1016/j.desal.2011.03.012

Daels, N., Radoicic, M., Radetic, M., De Clerck, K., & Van Hulle, S. W. H. (2015). Electrospun nanofibre membranes functionalised with TiO_2 nanoparticles: Evaluation of humic acid and bacterial removal from polluted water. *Separation and Purification Technology*, 149, 488-494. doi:10.1016/j.seppur.2015.06.016

Daels, N., Radoicic, M., Radetic, M., Van Hulle, S. W. H., & De Clerck, K. (2014). Functionalisation of electrospun polymer nanofibre membranes with TiO_2 nanoparticles in view of dissolved organic matter photodegradation. *Separation and Purification Technology*, 133, 282-290. doi:10.1016/j.seppur.2014.06.040

Daghrir, R., & Drogui, P. (2013). Tetracycline antibiotics in the environment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 11(3), 209-227. doi:10.1007/s10311-013-0404-8

Dasari, A., Quirós, J., Herrero, B., Boltes, K., García-Calvo, E., & Rosal, R. (2012). Antifouling membranes prepared by electrospinning polylactic acid containing biocidal nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 405-406, 134-140. doi:https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.060

Deng, D., Aouad, W., Braff, W. A., Schlumpberger, S., Suss, M. E., & Bazant, M. Z. (2015). Water purification by shock electrodialysis: Deionization, filtration, separation, and disinfection. *Desalination*, 357, 77-83. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.011

Dhanawade, A., Bhosle, R., Jagtap, R., & Sorate, K. A. (2020). Comparative study of lead zirconate titanate ceramic and carbon fiber reinforced polymer composite surfaces machined by abrasive water jet. *Materials Today: Proceedings*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.918

Ding, W., Jin, W., Cao, S., Zhou, X., Wang, C., Jiang, Q., . . . Wang, Q. (2019). Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water. *Water Research*, 160, 339-349. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.014

Dong, F., Lin, Q., Li, C., Wang, L., & García, A. (2021). UV/chlorination process of algal-laden water: Algal inactivation and disinfection byproducts attenuation. *Separation*

and *Purification Technology*, 257, 117896.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117896>

Dr. D. García, F. (2017). *Mapping sistemáticos de literatura. Caso práctico de planificación usando Parsifal*. Mexico: Instituto de ciencias basicas.

Du, J., Li, N., Tian, Y., Zhang, J., & Zuo, W. (2020). Preparation of PVDF membrane blended with graphene oxide-zinc sulfide (GO-ZnS) nanocomposite for improving the anti-fouling property. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 400, 112694. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112694>

Dubey, S. P., Thakur, V. K., Krishnaswamy, S., Abhyankar, H. A., Marchante, V., & Brighton, J. L. (2017). Progress in environmental-friendly polymer nanocomposite material from PLA: Synthesis, processing and applications. *Vacuum*, 146, 655-663. doi:[10.1016/j.vacuum.2017.07.009](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.009)

Dwivedi, M., & Shaw, A. (2021). Implication of cation-proton antiporters (CPA) in human health and diseases causing microorganisms. *Biochimie*, 182, 85-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2021.01.004>

Esfahani, M. R., Aktij, S. A., Dabaghian, Z., Firouzjaei, M. D., Rahimpour, A., Eke, J., . . . Koutahzadeh, N. (2019). Nanocomposite membranes for water separation and purification: Fabrication, modification, and applications. *Separation and Purification Technology*, 213, 465-499. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.050>

Fahimirad, S., Fahimirad, Z., & Sillanpää, M. (2021). Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers. *Science of The Total Environment*, 751, 141673. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141673>

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392. doi:[10.1016/j.addr.2016.06.012](https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012)

Feng, W., Zhang, Y.-s., Shao, Y.-w., Huang, T., Zhang, N., Yang, J.-h., . . . Wang, Y. (2021). Coaxial electrospun membranes with thermal energy storage and shape memory functions for simultaneous thermal/moisture management in personal cooling textiles. *European Polymer Journal*, 145, 110245. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110245>

Firouzjaei, M. D., Seyedpour, S. F., Aktij, S. A., Giagnorio, M., Bazrafshan, N., Mollahosseini, A., . . . Rahimpour, A. (2020). Recent advances in functionalized polymer membranes for biofouling control and mitigation in forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, 596, 117604. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117604>

Gallego-Urrea, J. A., Hammes, J., Cornelis, G., & Hassellöv, M. (2016). Coagulation and sedimentation of gold nanoparticles and illite in model natural waters: Influence of initial particle concentration. *NanoImpact*, 3-4, 67-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.impact.2016.10.004>

García Guirado, C. (2020). Aplicaciones biomédicas del óxido de grafeno.

Ghosal, K., Agatemor, C., Špitálsky, Z., Thomas, S., & Kny, E. (2019). Electrospinning tissue engineering and wound dressing scaffolds from polymer-titanium dioxide nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 358, 1262-1278. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.117>

Goetz, L. A., Jalvo, B., Rosal, R., & Mathew, A. P. (2016). Superhydrophilic anti-fouling electrospun cellulose acetate membranes coated with chitin nanocrystals for water filtration. *Journal of Membrane Science*, 510, 238-248. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.069>

Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2007). Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibres. *Angewandte Chemie-International Edition*, 46(30), 5670-5703. doi:[10.1002/anie.200604646](https://doi.org/10.1002/anie.200604646)

Grylewicz, A., & Mozia, S. (2021). Polymeric mixed-matrix membranes modified with halloysite nanotubes for water and wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 256, 117827. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117827>

Guerra, C., Ringuedé, A., Azocar, M. I., Walter, M., Galarce, C., Bedioui, F., . . . Sancy, M. (2021). Corrosion Analysis of AISI 430 Stainless Steel in the presence of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Corrosion Science*, 109204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109204>

Gwenzi, W., Musiyiwa, K., & Mangori, L. (2020). Sources, behaviour and health risks of antimicrobial resistance genes in wastewaters: A hotspot reservoir. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1). doi:10.1016/j.jece.2018.02.028

Halley, P. J., & Dorgan, J. R. (2011). Next-generation biopolymers: Advanced functionality and improved sustainability. *MRS Bulletin*, 36(9), 687-691. doi:10.1557/mrs.2011.180

Hamdy Makhoul, A. S., Perez, A., & Guerrero, E. (2020). Chapter 13 - Recent trends in smart polymeric coatings in biomedicine and drug delivery applications. In A. S. H. Makhoul & N. Y. Abu-Thabit (Eds.), *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications* (pp. 359-381): Elsevier.

Han, N., Wang, W., Lv, X., Zhang, W., Yang, C., Wang, M., . . . Zhang, X. (2019a). Highly Efficient Purification of Multicomponent Wastewater by Electrospinning Kidney-Bean-Skin-like Porous H-PPAN/rGO-g-PAO@Ag+/Ag Composite Nanofibrous Membranes. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(50), 46920-46929. doi:10.1021/acsami.9b16889

Han, N., Wang, W. J., Lv, X. S., Zhang, W. X., Yang, C., Wang, M. L., . . . Zhang, X. (2019b). Highly Efficient Purification of Multicomponent Wastewater by Electrospinning Kidney-Bean-Skin-like Porous H-PPAN/rGO-g-PAO@Ag+/Ag Composite Nanofibrous Membranes. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 11(50), 46920-46929. doi:10.1021/acsami.9b16889

Havlíček, K., Svobodová, L., Bakalova, T., & Lederer, T. (2020). Influence of electrospinning methods on characteristics of polyvinyl butyral and polyurethane nanofibres essential for biological applications. *Materials & Design*, 194, 108898. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108898>

Holloway, R. W., Miller-Robbie, L., Patel, M., Stokes, J. R., Munakata-Marr, J., Dadakis, J., & Cath, T. Y. (2016). Life-cycle assessment of two potable water reuse technologies: MF/RO/UV–AOP treatment and hybrid osmotic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 507, 165-178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.01.045>

Hossain, F., Perales-Perez, O. J., Hwang, S., & Román, F. (2014). Antimicrobial nanomaterials as water disinfectant: Applications, limitations and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 466-467, 1047-1059. doi:[10.1016/j.scitotenv.2013.08.009](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.009)

Hottle, T. A., Bilec, M. M., & Landis, A. E. (2013). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 98(9), 1898-1907. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.016>

Hu, M., Zheng, S. X., & Mi, B. X. (2016). Organic Fouling of Graphene Oxide Membranes and Its Implications for Membrane Fouling Control in Engineered Osmosis. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 685-693. doi:[10.1021/acs.est.5b03916](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03916)

Hu, X., Yu, Y., Zhou, J., Wang, Y., Liang, J., Zhang, X., . . . Song, L. (2015). The improved oil/water separation performance of graphene oxide modified Al₂O₃ microfiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 476, 200-204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.043>

Huang, M.-Y., Chen, Y., Yan, X., Guo, X.-J., Dong, L., & Lang, W.-Z. (2020). Two-dimensional Montmorillonite membranes with efficient water filtration. *Journal of Membrane Science*, 614, 118540. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118540>

Ibrahim, H. M., & Klingner, A. (2020). A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. *Polymer Testing*, 90, 106647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106647>

Iqbal, A. K. M. A., Sakib, N., Iqbal, A. K. M. P., & Nuruzzaman, D. M. (2020). Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications. *Materialia*, 12, 100815. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100815>

Jalvo, B., Mathew, A. P., & Rosal, R. (2017). Coaxial poly(lactic acid) electrospun composite membranes incorporating cellulose and chitin nanocrystals. *Journal of Membrane Science*, 544, 261-271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.033>

Jang, W., Yun, J., Jeon, K., & Byun, H. (2015). PVdF/graphene oxide hybrid membranes via electrospinning for water treatment applications. *Rsc Advances*, 5(58), 46711-46717. doi:10.1039/c5ra04439a

Jang, W., Yun, J., Park, Y., Park, I. K., Byun, H., & Lee, C. H. (2020a). Polyacrylonitrile Nanofiber Membrane Modified with Ag/GO Composite for Water Purification System. *Polymers*, 12(11). doi:10.3390/polym12112441

Jang, W., Yun, J., Park, Y., Park, I. K., Byun, H., & Lee, C. H. (2020b). Polyacrylonitrile nanofiber membrane modified with ag/go composite for water purification system. *Polymers*, 12(11), 1-12. doi:10.3390/polym12112441

Ji, H., Sun, H., & Qu, X. (2016). Antibacterial applications of graphene-based nanomaterials: Recent achievements and challenges. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 105, 176-189. doi:https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.009

Juncos Bombin, A. D., Dunne, N. J., & McCarthy, H. O. (2020). Electrospinning of natural polymers for the production of nanofibres for wound healing applications. *Materials Science and Engineering: C*, 114, 110994. doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110994

Karagoz, S., Kiremitler, N. B., Sakir, M., Salem, S., Onses, M. S., Sahmetlioglu, E., . . . Yilmaz, E. (2020). Synthesis of Ag and TiO₂ modified polycaprolactone electrospun nanofibers (PCL/TiO₂-Ag NFs) as a multifunctional material for SERS, photocatalysis and antibacterial applications. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188, 109856. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109856

Karami, P., Khorshidi, B., McGregor, M., Peichel, J. T., Soares, J. B. P., & Sadrzadeh, M. (2020). Thermally stable thin film composite polymeric membranes for water treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119447. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119447>

Kaur, S., Sundarrajan, S., Rana, D., Sridhar, R., Gopal, R., Matsuura, T., & Ramakrishna, S. (2014). Review: The characterization of electrospun nanofibrous liquid filtration membranes. *Journal of Materials Science*, 49(18), 6143-6159. doi:[10.1007/s10853-014-8308-y](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8308-y)

Kim, H.-C., Choi, B. G., Noh, J., Song, K. G., Lee, S.-h., & Maeng, S. K. (2014). Electrospun nanofibrous PVDF–PMMA MF membrane in laboratory and pilot-scale study treating wastewater from Seoul Zoo. *Desalination*, 346, 107-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.005>

Kimura, K., Ogyu, R., Miyoshi, T., & Watanabe, Y. (2015). Transition of major components in irreversible fouling of MBRs treating municipal wastewater. *Separation and Purification Technology*, 142, 326-331. doi:[10.1016/j.seppur.2014.12.030](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.12.030)

Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie - International Edition*, 50(24), 5438-5466. doi:[10.1002/anie.201001273](https://doi.org/10.1002/anie.201001273)

Ko, K., Kim, M. J., Lee, J. Y., Kim, W., & Chung, H. (2019). Effects of graphene oxides and silver-graphene oxides on aquatic microbial activity. *Science of The Total Environment*, 651, 1087-1095. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.124

Kochkodan, V., & Hilal, N. (2015). A comprehensive review on surface modified polymer membranes for biofouling mitigation. *Desalination*, 356, 187-207. doi:10.1016/j.desal.2014.09.015

Kopp, A., Smeets, R., Gosau, M., Kröger, N., Fuest, S., Köpf, M., . . . Burg, S. (2020). Effect of process parameters on additive-free electrospinning of regenerated silk fibroin nonwovens. *Bioactive Materials*, 5(2), 241-252. doi:https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.01.010

Laflamme, O., Sérodes, J.-B., Simard, S., Legay, C., Dorea, C., & Rodriguez, M. J. (2020). Occurrence and fate of ozonation disinfection by-products in two Canadian drinking water systems. *Chemosphere*, 260, 127660. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127660

Lawal, A. T. (2019). Graphene-based nano composites and their applications. A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111384. doi:https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111384

Li, H., & Wang, M. (2021). 18 - Electrospinning and nanofibrous structures for biomedical applications. In A. Osaka & R. Narayan (Eds.), *Bioceramics* (pp. 401-436): Elsevier.

Li, J. H., Zhang, H., Zhang, W., & Liu, W. (2019). Nanofiber membrane of graphene oxide/polyacrylonitrile with highly efficient antibacterial activity. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 30(17), 1620-1635. doi:10.1080/09205063.2019.1652793

Li, L., Hashaikh, R., & Arafat, H. A. (2013). Development of eco-efficient micro-porous membranes via electrospinning and annealing of poly (lactic acid). *Journal of Membrane Science*, 436, 57-67. doi:https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.02.037

Li, N., & Yang, H. (2021). Construction of natural polymeric imprinted materials and their applications in water treatment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123643. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123643

Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D. Y., Brunet, L., Liga, M. V., Li, D., & Alvarez, P. J. J. (2008). Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Research*, 42(18), 4591-4602. doi:10.1016/j.watres.2008.08.015

Li, S., Kong, L., & Ziegler, G. R. (2020). Electrospinning of octenylsuccinylated starch-pullulan nanofibers from aqueous dispersions. *Carbohydrate Polymers*, 116933. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116933

Li, X., Cai, M., Wang, L., Niu, F., Yang, D., & Zhang, G. (2019). Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Science of The Total Environment*, 659, 1415-1427. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.344>

Liao, Y., Loh, C.-H., Tian, M., Wang, R., & Fane, A. G. (2018). Progress in electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment: Fabrication, modification and applications. *Progress in Polymer Science*, 77, 69-94. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.10.003>

Liu, C., Shen, J., Liao, C. Z., Yeung, K. W. K., & Tjong, S. C. (2018). Novel electrospun polyvinylidene fluoride-graphene oxide-silver nanocomposite membranes with protein and bacterial antifouling characteristics. *Express Polymer Letters*, 12(4), 365-382. doi:10.3144/expresspolymlett.2018.31

Liu, C., Shen, J., Yeung, K. W. K., & Tjong, S. C. (2017). Development and Antibacterial Performance of Novel Polylactic Acid-Graphene Oxide-Silver Nanoparticle Hybrid Nanocomposite Mats Prepared By Electrospinning. *Acs Biomaterials Science & Engineering*, 3(3), 471-486. doi:10.1021/acsbiomaterials.6b00766

Liu, H., Liu, X., Zhao, F., Liu, Y., Liu, L., Wang, L., . . . Huang, P. (2020). Preparation of a hydrophilic and antibacterial dual function ultrafiltration membrane with quaternized graphene oxide as a modifier. *Journal of Colloid and Interface Science*, 562, 182-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.017>

Liu, Y., Cheng, P., Guo, Q., Liu, N., Wan, Y., Zhong, W., . . . Wang, D. (2020). Ag nanoparticles decorated PVA-co-PE nanofibrous microfiltration membrane with antifouling surface for efficient sterilization. *Composites Communications*, 21, 100379. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100379>

Liu, Y., Wang, R., Ma, H., Hsiao, B. S., & Chu, B. (2013). High-flux microfiltration filters based on electrospun polyvinylalcohol nanofibrous membranes. *Polymer*, 54(2), 548-556. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.11.064>

Liu, Y., Zhu, J., Zheng, J., Gao, X., Tian, M., Wang, X., . . . Van der Bruggen, B. (2020). Porous organic polymer embedded thin-film nanocomposite membranes for enhanced nanofiltration performance. *Journal of Membrane Science*, 602, 117982. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117982>

Lopez de Dicastillo, C., Garrido, L., Alvarado, N., Romero, J., Palma, J. L., & Galotto, M. J. (2017). Improvement of polylactide properties through cellulose nanocrystals embedded in poly (vinyl alcohol) electrospun nanofibers. *Nanomaterials*, 7(5), 106.

Lv, H., Cui, S., Yang, Q., Song, X., Wang, D., Hu, J., . . . Liu, Y. (2021). AgNPs-incorporated nanofiber mats: Relationship between AgNPs size/content, silver release, cytotoxicity, and antibacterial activity. *Materials Science and Engineering: C*, 118, 111331. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111331>

Lyu, J.-Y., Chen, S., He, W., Zhang, X.-X., Tang, D.-y., Liu, P.-J., & Yan, Q.-L. (2019). Fabrication of high-performance graphene oxide doped PVDF/CuO/Al nanocomposites via electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, 368, 129-137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.170>

Mairinger, T., Loos, M., & Hollender, J. (2021). Characterization of water-soluble synthetic polymeric substances in wastewater using LC-HRMS/MS. *Water Research*, 190, 116745. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116745>

Malwal, D., & Gopinath, P. (2017a). Efficient adsorption and antibacterial properties of electrospun CuO-ZnO composite nanofibers for water remediation. *J Hazard Mater*, 321, 611-621. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.09.050

Malwal, D., & Gopinath, P. (2017b). Efficient adsorption and antibacterial properties of electrospun CuO-ZnO composite nanofibers for water remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 611-621. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.09.050

Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M., & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología química*, 31(2), 180-190.

Mazhar, M. A., Khan, N. A., Ahmed, S., Khan, A. H., Hussain, A., Rahisuddin, . . . Vambol, V. (2020). Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water – A

review. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123159.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123159>

Melo, S. F., Neves, S. C., Pereira, A. T., Borges, I., Granja, P. L., Magalhães, F. D., & Gonçalves, I. C. (2020). Incorporation of graphene oxide into poly(ϵ -caprolactone) 3D printed fibrous scaffolds improves their antimicrobial properties. *Materials Science and Engineering: C*, 109, 110537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110537>

Merchante Ortí, R. (2016). *Análisis y optimización de parámetros de proceso para la obtención de fibras poliméricas tipo core-shell mediante electrospinning coaxial*. Universitat Politècnica de València.

Mincea, M., Negulescu, A., & Ostafe, V. (2012). Preparation, modification, and applications of chitin nanowhiskers: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 30(3), 225-242.

Moslehi, M., & Mahdavi, H. (2019). Controlled pore size nanofibrous microfiltration membrane via multi-step interfacial polymerization: Preparation and characterization. *Separation and Purification Technology*, 223, 96-106.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.041>

Moslehi, M., & Mahdavi, H. (2020). Preparation and Characterization of Electrospun Polyurethane Nanofibrous Microfiltration Membrane. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(10), 2691-2701. doi:10.1007/s10924-020-01801-z

Mu, Y., Zhu, K., Luan, J., Zhang, S., Zhang, C., Na, R., . . . Wang, G. (2019). Fabrication of hybrid ultrafiltration membranes with improved water separation properties by incorporating environmentally friendly taurine modified hydroxyapatite nanotubes. *Journal of Membrane Science*, 577, 274-284. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.01.043>

Mujmule, R. B., Chung, W.-J., & Kim, H. (2020). Chemical fixation of carbon dioxide catalyzed via hydroxyl and carboxyl-rich glucose carbonaceous material as a heterogeneous catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 395, 125164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125164>

Muñoz-Shugulí, C., Vidal, C. P., Cantero-López, P., & Lopez-Polo, J. (2021). Encapsulation of plant extract compounds using cyclodextrin inclusion complexes, liposomes, electrospinning and their combinations for food purposes. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 177-186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.020>

Muzzarelli, R. A. A. (2011). Biomedical exploitation of chitin and chitosan via mechano-chemical disassembly, electrospinning, dissolution in imidazolium ionic liquids, and supercritical drying. *Marine Drugs*, 9(9), 1510-1533. doi:[10.3390/md9091510](https://doi.org/10.3390/md9091510)

Nadell, C. D., Drescher, K., & Foster, K. R. (2016). Spatial structure, cooperation and competition in biofilms. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 589-600. doi:[10.1038/nrmicro.2016.84](https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.84)

Nahim-Granados, S., Rivas-Ibáñez, G., Antonio Sánchez Pérez, J., Oller, I., Malato, S., & Polo-López, M. I. (2020). Synthetic fresh-cut wastewater disinfection and decontamination by ozonation at pilot scale. *Water Research*, 170, 115304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115304>

Nasir, A. M., Awang, N., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., A. Rahman, M., . . . Mat Yajid, M. A. (2021). Recent progress on fabrication and application of electrospun nanofibrous photocatalytic membranes for wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101878. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101878>

Nataraj, S. K., Yang, K. S., & Aminabhavi, T. M. (2012). Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. *Progress in Polymer Science*, 37(3), 487-513. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001>

Nguyen, S. T., & Roddick, F. A. (2013). Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration. *Separation and Purification Technology*, 103, 313-320. doi:[10.1016/j.seppur.2012.10.011](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.011)

Nzima, B., Adegoke, A. A., Ofon, U. A., Al-Dahmoshi, H. O. M., Saki, M., Ndubuisi-Nnaji, U. U., & Inyang, C. U. (2020). Resistotyping and extended-spectrum beta-lactamase genes among *Escherichia coli* from wastewater treatment plants and

recipient surface water for reuse in South Africa. *New Microbes and New Infections*, 38, 100803. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nmni.2020.100803>

Ogunsona, E. O., Muthuraj, R., Ojogbo, E., Valerio, O., & Mekonnen, T. H. (2020). Engineered nanomaterials for antimicrobial applications: A review. *Applied Materials Today*, 18, 100473. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100473>

Oyedeji, A. B., Green, E., Adebisi, J. A., Ogundele, O. M., Gbashi, S., Adefisoye, M. A., . . . Adebo, O. A. (2021). Metabolomic approaches for the determination of metabolites from pathogenic microorganisms: A review. *Food Research International*, 140, 110042. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110042>

Pan, N., Wei, Y., Zuo, M., Li, R., Ren, X., & Huang, T.-S. (2020). Antibacterial poly (ϵ -caprolactone) fibrous membranes filled with reduced graphene oxide-silver. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603, 125186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125186>

Pant, H. R., Pandeya, D. R., Nam, K. T., Baek, W.-i., Hong, S. T., & Kim, H. Y. (2011). Photocatalytic and antibacterial properties of a TiO₂/nylon-6 electrospun nanocomposite mat containing silver nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1), 465-471. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.062>

Paradela, L. S., & Sánchez-Gálvez, V. (1991). Comportamiento a tracción de cementos reforzados con fibras de vidrio. *Informes de la construcción*, 43(413), 77-89.

Pardhi, D. M., Şen Karaman, D., Timonen, J., Wu, W., Zhang, Q., Satija, S., . . . Rosenholm, J. M. (2020). Anti-bacterial activity of inorganic nanomaterials and their antimicrobial peptide conjugates against resistant and non-resistant pathogens. *International Journal of Pharmaceutics*, 586, 119531. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119531>

Park, J.-A., Nam, A., Kim, J.-H., Yun, S.-T., Choi, J.-W., & Lee, S.-H. (2018). Blend-electrospun graphene oxide/Poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membranes with high flux, tetracycline removal and anti-fouling properties. *Chemosphere*, 207, 347-356. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.096>

Park, J. A., Cho, K. Y., Han, C. H., Nam, A., Kim, J. H., Lee, S. H., & Choi, J. W. (2019). Quaternized Amphiphilic Block Copolymers/Graphene Oxide and a Poly(vinyl alcohol) Coating Layer on Graphene Oxide/Poly(vinylidene fluoride) Electrospun Nanofibers for Superhydrophilic and Antibacterial Properties. *Scientific Reports*, 9. doi:[10.1038/s41598-018-36479-w](https://doi.org/10.1038/s41598-018-36479-w)

Park, S. J., Kim, S. B., & Kim, K. W. (2010). Analysis of bacterial cell properties and transport in porous media. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 45(6), 682-691. doi:[10.1080/10934521003648867](https://doi.org/10.1080/10934521003648867)

Penagos, J. I. C. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3), 133-146.

Pinto, A. M., Gonçalves, I. C., & Magalhães, F. D. (2013). Graphene-based materials biocompatibility: A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 111, 188-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.05.022>

Plutzer, J., & Karanis, P. (2016). Neglected waterborne parasitic protozoa and their detection in water. *Water Research*, 101, 318-332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.085>

Qasim, M., Darwish, N. N., Mhiyo, S., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2018). The use of ultrasound to mitigate membrane fouling in desalination and water treatment. *Desalination*, 443, 143-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.007>

Qayum, A., Wei, J., Li, Q. N., Chen, D. R., Jiao, X. L., & Xia, Y. G. (2019). Efficient decontamination of multi-component wastewater by hydrophilic electrospun PAN/AgBr/Ag fibrous membrane. *Chemical Engineering Journal*, 361, 1255-1263. doi:[10.1016/j.cej.2018.12.161](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.161)

Razakandrainibe, R., Kubina, S., Costa, D., Robinson, G., La Carbona, S., Aubert, D., . . . Chalmers, R. M. (2020). Evaluation of a modified method for the detection of *Cryptosporidium* oocysts on spinach leaves. *Food and Waterborne Parasitology*, 21, e00097. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fawpar.2020.e00097>

Razavizadeh, B. M., & Niazmand, R. (2020). Characterization of polyamide-6/propolis blended electrospun fibers. *Heliyon*, 6(8), e04784. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04784>

Ryu, S.-Y., Chung, J. W., & Kwak, S.-Y. (2015). Dependence of photocatalytic and antimicrobial activity of electrospun polymeric nanofiber composites on the positioning of Ag–TiO₂ nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 117, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.05.014>

Saleh, T. A., Parthasarathy, P., & Irfan, M. (2019). Advanced functional polymer nanocomposites and their use in water ultra-purification. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 24, e00067. doi:<https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00067>

Salman, K. D., & Razlan, Z. M. (2018). *Polyamide Nanofibers Reinforced Titanium Nanoparticles Composites for hydrophobic surfaces*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Samadian, H., Maleki, H., Allahyari, Z., & Jaymand, M. (2020). Natural polymers-based light-induced hydrogels: Promising biomaterials for biomedical applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 420, 213432. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213432>

Sánchez, L. D., Rodríguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: la era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 14(1), 10-27.

Sbahi, S., Ouazzani, N., Latrach, L., Hejjaj, A., & Mandi, L. (2020). Predicting the concentration of total coliforms in treated rural domestic wastewater by multi-soil-layering (MSL) technology using artificial neural networks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204, 111118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111118>

Schiffman, J. D., Blackford, A. C., Wegst, U. G. K., & Schauer, C. L. (2011). Carbon black immobilized in electrospun chitosan membranes. *Carbohydrate Polymers*, 84(4), 1252-1257. doi:[10.1016/j.carbpol.2011.01.013](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.013)

Schijven, J., Teunis, P., Suylen, T., Ketelaars, H., Hornstra, L., & Rutjes, S. (2019). QMRA of adenovirus in drinking water at a drinking water treatment plant using UV and chlorine dioxide disinfection. *Water Research*, 158, 34-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.090>

Seong, D. B., Son, Y.-R., & Park, S.-J. (2018). A study of reduced graphene oxide/leaf-shaped TiO₂ nanofibers for enhanced photocatalytic performance via electrospinning. *Journal of Solid State Chemistry*, 266, 196-204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.06.003>

Shalaby, T., Hamad, H., Ibrahim, E., Mahmoud, O., & Al-Oufy, A. (2018). Electrospun nanofibers hybrid composites membranes for highly efficient antibacterial activity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 354-364. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.016>

Sheikh, M., Pazirofteh, M., Dehghani, M., Asghari, M., Rezakazemi, M., Valderrama, C., & Cortina, J.-L. (2020). Application of ZnO nanostructures in ceramic and polymeric membranes for water and wastewater technologies: A review. *Chemical Engineering Journal*, 391, 123475. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123475>

Shende, P., & Gupta, H. (2020). Formulation and comparative characterization of nanoparticles of curcumin using natural, synthetic and semi-synthetic polymers for wound healing. *Life Sciences*, 253, 117588. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.117588>

Shi, L., Chen, J., Teng, L., Wang, L., Zhu, G., Liu, S., . . . Ren, L. (2016). The Antibacterial Applications of Graphene and Its Derivatives. *Small*, 12(31), 4165-4184. doi:<https://doi.org/10.1002/sml.201601841>

Shi, Q., Chen, Z., Liu, H., Lu, Y., Li, K., Shi, Y., . . . Hu, H.-Y. (2021). Efficient synergistic disinfection by ozone, ultraviolet irradiation and chlorine in secondary effluents. *Science of The Total Environment*, 758, 143641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143641>

Shi, Q., Zhou, C., Yue, Y., Guo, W., Wu, Y., & Wu, Q. (2012). Mechanical properties and in vitro degradation of electrospun bio-nanocomposite mats from PLA and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 301-308. doi:[10.1016/j.carbpol.2012.05.042](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.042)

Śmiałek, M., Kowalczyk, J., & Koncicki, A. (2020). Influence of vaccination of broiler chickens against *Escherichia coli* with live attenuated vaccine on general properties of *E. coli* population, IBV vaccination efficiency, and production parameters—a field experiment. *Poultry Science*, 99(11), 5452-5460. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.08.039>

Soares, R. M. D., Siqueira, N. M., Prabhakaram, M. P., & Ramakrishna, S. (2018). Electrospinning and electrospray of bio-based and natural polymers for biomaterials development. *Materials Science and Engineering: C*, 92, 969-982. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.004>

Sousi, M., Liu, G., Salinas-Rodriguez, S. G., Chen, L., Dusseldorp, J., Wessels, P., . . . van der Meer, W. (2020). Multi-parametric assessment of biological stability of drinking water produced from groundwater: Reverse osmosis vs. conventional treatment. *Water Research*, 186, 116317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116317>

Sun, B., Long, Y. Z., Zhang, H. D., Li, M. M., Duvail, J. L., Jiang, X. Y., & Yin, H. L. (2014). Advances in three-dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning. *Progress in Polymer Science*, 39(5), 862-890. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.06.002>

Sun, L., Hu, S. J., & Freiheit, T. (2021). Feature-based quality classification for ultrasonic welding of carbon fiber reinforced polymer through Bayesian regularized

neural network. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 335-347.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.016>

Sun, M., & Li, J. (2018). Graphene oxide membranes: Functional structures, preparation and environmental applications. *Nano Today*, 20, 121-137.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.04.007>

Sundaran, S. P., Reshmi, C. R., Sagitha, P., Manaf, O., & Sujith, A. (2019). Multifunctional graphene oxide loaded nanofibrous membrane for removal of dyes and coliform from water. *Journal of Environmental Management*, 240, 494-503.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.105>

Szewczyk, P. K., & Stachewicz, U. (2020). The impact of relative humidity on electrospun polymer fibers: From structural changes to fiber morphology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 286, 102315.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102315>

Tachaboonyakiat, W., Sukpaiboon, E., & Pinyakong, O. (2014). Development of an antibacterial chitin betainate wound dressing. *Polymer Journal*, 46(8), 505-510.
doi:[10.1038/pj.2014.47](https://doi.org/10.1038/pj.2014.47)

Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Jouyandeh, M., Yazdi, M. K., Zarrintaj, P., Saeb, M. R., . . . Gupta, V. K. (2020). Conductive polymers in water treatment: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 312, 113447. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113447>

Thakur, R., Rane, A. V., Harris, G., & Thakur, S. (2020). Chapter 14 - Government initiatives and policies for water conservation and wastewater treatment in South Africa and indigenous knowledge. In P. Singh, Y. Milshina, K. Tian, D. Gusain, & J. P. Bassin (Eds.), *Water Conservation and Wastewater Treatment in BRICS Nations* (pp. 285-293): Elsevier.

Tiwari, S. K., & Venkatraman, S. S. (2012). Importance of viscosity parameters in electrospinning: Of monolithic and core-shell fibers. *Materials Science and Engineering C*, 32(5), 1037-1042. doi:10.1016/j.msec.2012.02.019

Tran, C., & Kalra, V. (2013). Fabrication of porous carbon nanofibers with adjustable pore sizes as electrodes for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 235, 289-296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.080>

Tu, Y., Lv, M., Xiu, P., Huynh, T., Zhang, M., Castelli, M., . . . Zhou, R. (2013). Destructive extraction of phospholipids from Escherichia coli membranes by graphene nanosheets. *Nature Nanotechnology*, 8(8), 594-601. doi:10.1038/nnano.2013.125

Tucker, N., Stanger, J. J., Staiger, M. P., Razzaq, H., & Hofman, K. (2012). The History of the Science and Technology of Electrospinning from 1600 to 1995. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7, 63-73.

Upadhyaya, L., Oliveira, B., Pereira, V. J., Barreto Crespo, M. T., Crespo, J. G., Quemener, D., & Semsarilar, M. (2020). Nanocomposite membranes from nano-

particles prepared by polymerization induced self-assembly and their biocidal activity. *Separation and Purification Technology*, 251, 117375. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117375>

Van der Bruggen, B. (2018). Chapter 2 - Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, and forward osmosis. In P. Luis (Ed.), *Fundamental Modelling of Membrane Systems* (pp. 25-70): Elsevier.

Wang, G., Yu, D., Kelkar, A. D., & Zhang, L. (2017). Electrospun nanofiber: Emerging reinforcing filler in polymer matrix composite materials. *Progress in Polymer Science*, 75, 73-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.08.002>

Wang, K., Wu, J., Zhu, M., Zheng, Y.-Z., & Tao, X. (2020). Highly effective pH-universal removal of tetracycline hydrochloride antibiotics by UiO-66-(COOH)₂/GO metal–organic framework composites. *Journal of Solid State Chemistry*, 284, 121200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121200>

Wang, L., Ali, J., Zhang, C., Mailhot, G., & Pan, G. (2020). Simultaneously enhanced photocatalytic and antibacterial activities of TiO₂/Ag composite nanofibers for wastewater purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 102104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.057>

Wang, Q. Q., Du, Y. Z., Feng, Q., Huang, F. L., Lu, K. Y., Liu, J. Y., & Wei, Q. F. (2013). Nanostructures and Surface Nanomechanical Properties of

Polyacrylonitrile/Graphene Oxide Composite Nanofibers by Electrospinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(2), 1152-1157. doi:10.1002/app.38273

Wang, R., Liu, Y., Li, B., Hsiao, B. S., & Chu, B. (2012). Electrospun nanofibrous membranes for high flux microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 392-393, 167-174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.019>

Wang, X.-X., Yu, G.-F., Zhang, J., Yu, M., Ramakrishna, S., & Long, Y.-Z. (2021). Conductive polymer ultrafine fibers via electrospinning: Preparation, physical properties and applications. *Progress in Materials Science*, 115, 100704. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100704>

Wang, X., & Nakane, K. (2021). Formation and morphological variation of electrospun cellulose acetate nanofibers via dual-bath immersion electrospinning. *Materials Letters*, 284, 128968. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128968>

Wang, X., Zhang, K., Zhu, M., Hsiao, B. S., & Chu, B. (2008). Enhanced mechanical performance of self-bundled electrospun fiber yarns via post-treatments. *Macromolecular Rapid Communications*, 29(10), 826-831. doi:10.1002/marc.200700873

Wang, X. H., Han, Q. S., Yu, N., Wang, T., Wang, C., & Yang, R. (2018). GO-AgCl/Ag nanocomposites with enhanced visible light-driven catalytic properties for antibacterial and biofilm-disrupting applications. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 162, 296-305. doi:10.1016/j.colsurfb.2017.11.060

Wang, Z., Ma, J., Tang, C. Y., Kimura, K., Wang, Q., & Han, X. (2014). Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*, 468, 276-307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.060>

Wang, Z., Zou, W., Liu, L., Wang, M., Li, F., & Shen, W. (2021). Characterization and bacteriostatic effects of β -cyclodextrin/quercetin inclusion compound nanofilms prepared by electrospinning. *Food Chemistry*, 338, 127980. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127980>

Warsinger, D. M., Chakraborty, S., Tow, E. W., Plumlee, M. H., Bellona, C., Loutatidou, S., . . . Lienhard, J. H. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004>

Wei, R., Ge, F., Huang, S., Chen, M., & Wang, R. (2011). Occurrence of veterinary antibiotics in animal wastewater and surface water around farms in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 82(10), 1408-1414. doi:[10.1016/j.chemosphere.2010.11.067](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.11.067)

Wen, Y., Kok, M. D. R., Tafoya, J. P. V., Sobrido, A. B. J., Bell, E., Gostick, J. T., . . . Jervis, R. (2021). Electrospinning as a route to advanced carbon fibre materials for selected low-temperature electrochemical devices: A review. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 492-529. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.014>

Weschenfelder, S. E., Fonseca, M. J. C., & Borges, C. P. (2021). Treatment of produced water from polymer flooding in oil production by ceramic membranes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 108021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108021>

Wu, S., & Soucek, M. D. (1998). Kinetic modelling of crosslinking reactions for cycloaliphatic epoxides with hydroxyl- and carboxyl-functionalized acrylic copolymers: 1. pH and temperature effects. *Polymer*, 39(23), 5747-5759. doi:[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00077-9)

Wu, Y., He, G., Wu, X., Yuan, Q., Gong, X., Zhen, D., & Sun, B. (2019). Confinement of functionalized graphene oxide in sulfonated poly (ether ether ketone) nanofibers by coaxial electrospinning for polymer electrolyte membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(14), 7494-7504. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.281>

Wu, Y., Li, C., Meng, M., Lv, P., Liu, X., & Yan, Y. (2019). Fabrication and evaluation of GO/TiO₂-based molecularly imprinted nanocomposite membranes by developing a reformative filtering strategy: Application to selective adsorption and separation membrane. *Separation and Purification Technology*, 212, 245-254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.042>

Xie, L., Shu, Y., Hu, Y., Cheng, J., & Chen, Y. (2020). SWNTs-PAN/TPU/PANI composite electrospun nanofiber membrane for point-of-use efficient electrochemical

disinfection: New strategy of CNT disinfection. *Chemosphere*, 251, 126286. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126286>

Xu, J. (2019). Reverse microbial etiology: A research field for predicting and preventing emerging infectious diseases caused by an unknown microorganism. *Journal of Biosafety and Biosecurity*, 1(1), 19-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbb.2018.12.005>

Yang, S., Deng, W., Liu, S., Yu, X., Mustafa, G. R., Chen, S., . . . Zou, L. (2020). Presence of heavy metal resistance genes in Escherichia coli and Salmonella isolates and analysis of resistance gene structure in E. coli E308. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 21, 420-426. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jgar.2020.01.009>

Yang, Y., Zhang, Z., He, Y., Wang, Z., Zhao, Y., & Sun, L. (2018). Fabrication of Ag@TiO₂ electrospinning nanofibrous felts as SERS substrate for direct and sensitive bacterial detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 273, 600-609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.05.129>

Yu, F., Ma, J., & Han, S. (2014). Adsorption of tetracycline from aqueous solutions onto multi-walled carbon nanotubes with different oxygen contents. *Scientific Reports*, 4. doi:[10.1038/srep05326](https://doi.org/10.1038/srep05326)

Yu, X., & Manthiram, A. (2021). A review of composite polymer-ceramic electrolytes for lithium batteries. *Energy Storage Materials*, 34, 282-300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.10.006>

Zahedi, A., Ryan, U., Rawlings, V., Greay, T., Hancock, S., Bruce, M., & Jacobson, C. (2020). Cryptosporidium and Giardia in dam water on sheep farms – An important source of transmission? *Veterinary Parasitology*, 288, 109281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2020.109281>

Zapata, D., Pujol, R., & Coda, F. (2012). Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad de medio ambiente. *Técnica industrial*, 297, 76-80.

Zeng, Z., Yu, D., He, Z., Liu, J., Xiao, F. X., Zhang, Y., . . . Tan, T. T. Y. (2016). Graphene Oxide Quantum Dots Covalently Functionalized PVDF Membrane with Significantly-Enhanced Bactericidal and Antibiofouling Performances. *Scientific Reports*, 6. doi:[10.1038/srep20142](https://doi.org/10.1038/srep20142)

Zhang, M., Nguyen, Q. T., & Ping, Z. (2009). Hydrophilic modification of poly(vinylidene fluoride) microporous membrane. *Journal of Membrane Science*, 327(1), 78-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.11.020>

Zhang, P., Fang, C., Rajabzadeh, S., Liu, W., Jia, Y., Shen, Q., . . . Matsuyama, H. (2020). Effect of polymer molecular weight on structure and performance of PVDF hollow fiber membranes prepared via TIPS process with co-extrusion of solvent using

triple orifice spinneret. *Journal of Membrane Science*, 118854.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118854>

Zhang, S., Tang, X., Zheng, H., Wang, D., Xie, Z., Ding, W., & Zheng, X. (2021). Combination of bacitracin-based flocculant and surface enhanced Raman scattering labels for flocculation, identification and sterilization of multiple bacteria in water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124389.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124389>

Zhang, W., He, Z., Han, Y., Jiang, Q., Zhan, C., Zhang, K., . . . Zhang, R. (2020). Structural design and environmental applications of electrospun nanofibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106009.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106009>

Zhang, Y., Wang, H., Li, Y., Wang, B., Huang, J., Deng, S., . . . Wang, Y. (2020). Removal of micropollutants by an electrochemically driven UV/chlorine process for decentralized water treatment. *Water Research*, 183, 116115.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116115>

Zhao, X., Su, Y., Chen, W., Peng, J., & Jiang, Z. (2012). Grafting perfluoroalkyl groups onto polyacrylonitrile membrane surface for improved fouling release property. *Journal of Membrane Science*, 415-416, 824-834. doi:10.1016/j.memsci.2012.05.075

Zhou, C., Chu, R., Wu, R., & Wu, Q. (2011). Electrospun polyethylene oxide/cellulose nanocrystal composite nanofibrous mats with homogeneous and heterogeneous microstructures. *Biomacromolecules*, 12(7), 2617-2625. doi:10.1021/bm200401p

Zhu, J., Hou, J., Zhang, Y., Tian, M., He, T., Liu, J., & Chen, V. (2018). Polymeric antimicrobial membranes enabled by nanomaterials for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 550, 173-197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.071>

Zhu, S., & Nie, L. (2020). Progress in fabrication of one-dimensional catalytic materials by electrospinning technology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.09.016>

10. Anexos

10.1. Técnicas de caracterización

Tabla 30. Técnicas de caracterización.

Técnica de Caracterización	Descripción	Referencia
Microscopia Electrónica de barrido (por sus siglas en inglés SEM, Scanning Electron Microscope).	Técnica que permite obtener imágenes utilizadas para investigación de materiales, usualmente se utilizan por su alta resolución y gran capacidad de análisis de características morfológicas y químicas.	(Penagos, 2013).
Microscopia de Fuerza Atómica (por sus siglas en inglés AFM, Atomic Force Microscope).	Técnica que permite adquirir imágenes, que ya han sido usada en estudios de superficies. Esta técnica permite construir imágenes de las superficies registradas, en el contacto con el material a analizar.	(Acosta, Villada, & Prieto, 2006).
Propiedades térmicas	Los instrumentos térmicos tienen como referencia registrar la diferencia entre el cambio de entalpía (magnitud termodinámica de un cuerpo físico, es semejante a la suma de la energía interna más el volumen por la presión), que puede pasar entre la muestra y un material inerte cuando los dos se calientan.	(ALDANA, SANDOVAL, & QUINTERO, 2005).
Calorimetría Diferencial de Barrido		
Análisis Termogravimétrico	Técnica por medio de la cual las propiedades de una muestra son monitoreadas en relación al tiempo y la temperatura en un ambiente específico.	(Manals-Cutiño, Penedo-Medina, & Giralt-Ortega, 2011).

Ángulo de contacto	Propiedad de la superficie de los sólidos, la cual mide la preferencia a la hidrofobicidad como parámetro, en el análisis de los mecanismos entre las fases sólidas y líquidas que ocurren en diferentes operaciones.	(Arenas & Cañas, 2007).
Ensayos mecánicos	Establecen la resistencia a la tracción, al módulo elástico y deformación de las membranas.	(Paradela & Sánchez-Gálvez, 1991)

10.2. Técnica de electrospinning coaxial

La técnica de electrospinning coaxial es el desarrollo en la modificación del proceso convencional. Esta técnica permite electrohilar varios polímeros simultáneamente sin combinar las soluciones durante la inyección, la solución A se encuentra recubriendo la solución B, formando una estructura de fibra con un núcleo y una corteza. Estas fibras también pueden ser huecas dando su aplicación en el transporte de biomoléculas para liberación de fármacos controlados (Sánchez, Rodríguez, & López, 2013).

En la figura 9, se puede observar el proceso del electrospinning coaxial que consiste en una boquilla pequeña dentro de una de mayor tamaño, que permite la formación núcleo y corteza (core/shell) (Merchante Ortí, 2016).

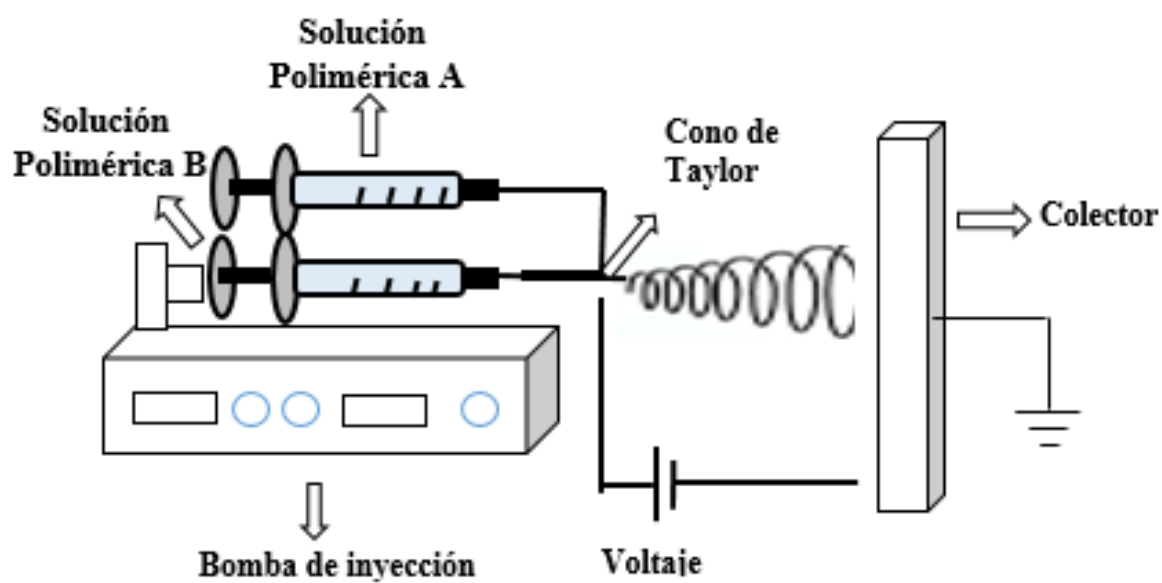


Figura 11. Montaje equipo electrospinning coaxial.

Fuente: Torres & Sandoval (Becerra & Acuña, 2021)