

ELECTROHILADO: UNA TECNOLOGÍA PARA OBTENER NANOFIBRAS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO

ELECTROSPINNING: A TECHNOLOGY TO OBTAIN NANOFIBERS IN THE PURIFICATION OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION

Claudia Santacruz Vázquez, Verónica Santacruz Vázquez,
Ana Belen Morales Alvarado*.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química, Maestría en Ingeniería Química, Boulevard 18 Sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria. Puebla, México,

claudia.santacruz@correo.buap.mx; veronica.santacruz@correo.buap.mx; ana.moralesalvarado@viep.com.mx.

Resumen

El electrohilado es una de las técnicas que se utiliza para la fabricación de nanofibras, consiste en aplicar a una mezcla homogénea de un polímero con un solvente una carga de voltaje, se caracteriza por ser sencilla de bajo costo y versátil. Las nanofibras pertenecen a los nanomateriales los cuales en el siglo XXI ha tenido grandes aplicaciones en diferentes campos como son en las ramas: textil, médica, y ambiental, por mencionar algunos. Actualmente se sabe que la contaminación va en aumento y uno de los problemas más sobresalientes es la contaminación del agua, debido a que es considerado uno de los recursos más importantes para la vida. Como consecuencia se trabaja en diferentes alternativas que ayuden a tratar el agua, tanto en la contaminación como en los procesos de purificación para abastecer a la población de este vital líquido. El electrohilado se ha empleado para desalinización, eliminación de metales y filtración de materiales orgánicos en agua, por lo que la fabricación de nanofibras a partir de esta técnica, se considera una alternativa para crear un sistema de purificación de agua y esta sea apta para el consumo humano.

Palabras clave:
Electrohilado; Nanotecnología; Nanofibras; Purificación de agua

Abstract

Electrospinning is one of the techniques used to manufacture nanofibers; it consists of applying a voltage charge to a homogeneous mixture of a polymer with a solvent. It is characterized by being simple, low cost, and versatile. Nanofibers belong to nanomaterials, which in the XXI century have had great applications in different fields such as textile, medical, and environmental, to mention a few. Currently, it is known that pollution is increasing and one of the most outstanding problems is water pollution, because it is considered one of the essential resources for life. Consequently, to supply the population with this vital liquid, work is being done on different alternatives to help treat water, both in terms of contamination and purification processes. Electrospinning has been used for desalination, metal removal, and filtration of organic materials in water, so the manufacture of nanofibers from this technique is considered an alternative to create a water purification system and make it suitable for human consumption.

Keywords:

Electrospinning; Nanotechnology; Nanofibers; Water purification

1. Introducción

La nanotecnología es considerada una rama que estudia la materia a nivel nanométrico, en una escala equivalente a 10^{-9} metros. A partir de ello se han obtenido diferentes materiales los cuales cuentan con propiedades y características que mejoran algunos productos o bien se crean nuevos, con aplicaciones en áreas como son: la medicina, textil, ambiental, por mencionar algunos (Antuez, 2000). Entre los materiales nanotecnológicos se encuentran las nanofibras, materiales ultrafinos con un diámetro inferior a los 500 nanómetros, que son obtenidos por diversas técnicas, entre ellas el proceso de electrohilado. El electrohilado es la técnica más aplicada para la elaboración de nanofibras, la cual consiste en usar un campo eléctrico que se forma dentro de dos placas paralelas. Actualmente el equipo de electrohilado, consiste en una fuente eléctrica de alto voltaje con polaridad positiva o negativa, una bomba de inyección o tubular para llevar la solución desde el émbolo o pipeta a la hilera, y un colector conductor como el aluminio (Fahimirad, 2014). Por otro lado, el agua es de vital importancia para la vida y más aún para el consumo humano cada persona necesita diariamente entre 20 y 50 litros de agua para beber y para la higiene (OMS, 2017). No obstante, el agua también es fuente de contaminación microbiana, misma que transfiere algunas enfermedades infecciosas y que cobran anualmente hasta 3,2 millones de vidas, lo que equivale a un 6% de las defunciones totales en el mundo. En algunos sitios, la carga de morbilidad atribuida a la falta de agua, sa-

neamiento e higiene equivale a 1.8 millones de funciones y la pérdida de más de 75 millones de años de vida sana (FAO, 2014). Siendo evidente la necesidad de buscar opciones que permitan procesos de potabilización y purificación del agua de consumo humano.

Nanotecnología

De acuerdo con la Real Academia Española, el término nanotecnología se define como “Tecnología de los materiales y de las estructuras en la que el orden de magnitud se mide en nanómetros, con aplicación a la física, la química y la biología” (RAE, 2020). La Figura 1 presenta la escala característica del tamaño en que se encuentran las nanopartículas. La nanotecnología apunta a soluciones vanguardistas para la remediación de problemas ambientales y muchos otros enfrentados por la humanidad (Martínez-Gutiérrez et al., 2010).

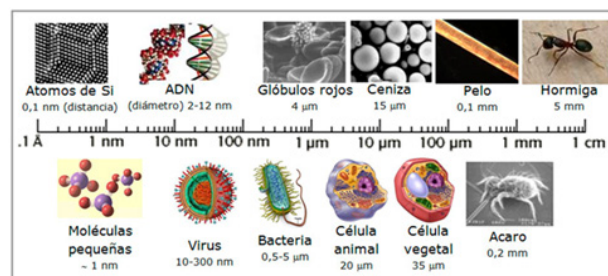


Figura 1. Escala nanométrica (Britto, M., & Castro, R., 2012).

Las nanopartículas se caracterizan por ser altamente reactivas y por poseer una gran área superficial. En la Tabla 1 muestra las principales aplicaciones de la nanotecnología.

Tabla 1. Aplicaciones de la nanotecnología

Textil	Estructuras nanométricas	Hilados, tejidos, indumentarias médicas	Pardo & Milagros (2017)
Productos farmacéuticos	Estructuras nanométricas	Hilados, tejidos, indumentarias médicas	Pardo & Milagros (2017)
Industria alimentaria	Semillas nano-encapsuladas, nano-materiales orgánicos	Agricultura y ganadería	Tapia (2017)
Ambiental	Nanoparticulas	Aplicación en el agua aire y suelo	Alarcón (2012)
Otras aplicacionesN	anoparticulas	Cosmetologías, higiene, electrodomésticos y pinturas	Guerra (2012)

En el campo ambiental, el desarrollo y aplicación de la nanotecnología, de manera general incluyen el uso de las nanopartículas para atrapar contaminantes en el agua, suelo y aire o para mejorar los sensores de emisiones de gases. En la tabla 2 se muestran los métodos de aplicación nanomateriales, aplicables a esos rubros.

Tabla 2. Aplicaciones de la nanotecnología en la rama ambiental

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

¿Pero, qué es Electrohilado?

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

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

Historia del Electrohilado

El primer fenómeno de interacción de líquidos con campos eléctricos y magnéticos fue descrito por William Gilbert en 1628. A mediados de 1900, Geoffrey Ingram Taylor presentó la primera discusión teórica de la interacción de una gota de fluido con el campo eléctrico.

Y no fue hasta principios de 1990 cuando Reneker presentó el término spinning electroestático, desde esa fecha el número de publicaciones y estudios fue aumentando progresivamente, extendiéndose primero desde su impulsor, EEUU, hasta nuevos pioneros como Alemania o Corea (Bhardwarj, 2010).

En la última década se han dedicado más esfuerzos a la investigación y mejora de esta técnica, acuñando el nombre actual, electrospinning. Esta tendencia podría atribuirse al interés actual en las microfibras y nanofibras que se pueden obtener por este proceso.

El electrospinning inicialmente solía producir fibras muy finas de materiales poliméricos para obtener matrices con alta superficie, actualmente el estudio va orientado a la fabricación de estas fibras con multitud de aplicaciones, desde la cosmética, ensayos ópticos, textiles, la investigación médica, entre otras (Travis, 2008).

Componentes de un equipo de Electrospinning.

El montaje para la ejecución de la técnica de electrohilado (Figura 2), consta de un inyector capilar a través del cual es expulsada la solución polimérica; una fuente de alto voltaje que posee dos electrodos los cuales deben conectarse uno en el inyector y otro directamente al plato colector (Li Wan-Ju, 2002) donde se depositarán las fibras posteriores a la evaporación del disolvente.

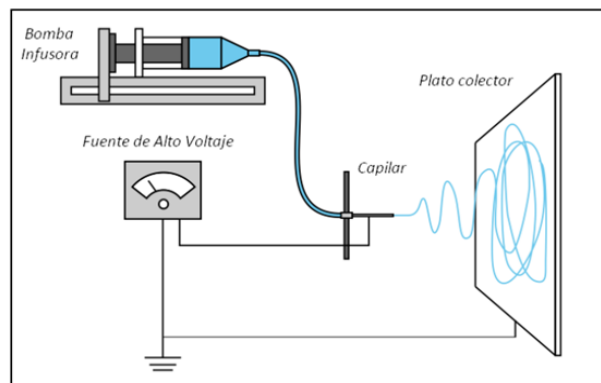


Figura 2: Ensamble del sistema de electrospinning. (Duque-Sánchez et al. 2014)

La técnica puede ser desarrollada de forma horizontal o vertical (Figura 3), el principal inconveniente al trabajar en posición vertical es la posible salida de gotas de solución desde el capilar hacia el plato colector las cuales pueden caer sobre las fibras depositadas haciendo defectuosa la superficie de estas e interrumpiendo el proceso. Para impulsar la solución a través del capilar puede utilizarse una bomba de infusión; si se trabaja de forma horizontal con cono como capilar, la salida de la solución puede estar determinada por la fuerza de gravedad ligada a la viscosidad de la solución.

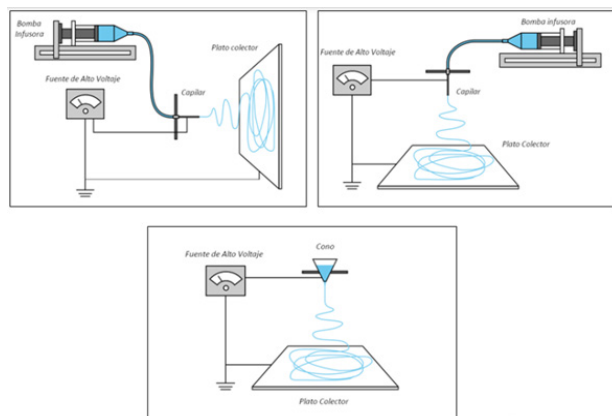


Figura 3. Diversos ensambles de la técnica de Electrospinning (Duque-Sánchez et al. 2014).

El polímero debe estar diluido en el o los disolventes que permitan una dilución completa del mismo (para evitar taponamiento del inyector durante el proceso) pero que a la vez promuevan la obtención de fibras homogéneas. Los polímeros empleados en el proceso de electrospinning son dieléctricos, y en presencia de un campo eléctrico pueden considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente (Dekker, 1959). Estos se mantienen en su lugar por acción de las fuerzas atómicas y moleculares, y solo pueden cambiar su posición ligeramente en respuesta a fuertes campos eléctricos externos, lo que explica por qué ocurre el estiramiento de la solución en el proceso y la forma de las fibras. En ocasiones para incrementar las propiedades dieléctricas de la solución, algunos disolventes con altas constantes dieléctricas son adicionados (Lee KH, 2003), esto favorece la formación de fibras con menos estructuras defectuosas (Son WK, 2004). Una vez que la solución ha ingresado en el inyector y al aplicar el potencial eléctrico, las cargas se acumulan. A medida que la intensidad del campo eléctrico se incrementa, la gota en la punta del inyector se alarga para crear una forma cónica conocida como cono de Taylor. Cuando la fuerza del campo eléctrico supera las fuerzas de

cohesión de la solución, en la mayoría de los casos dominada por la tensión superficial, el chorro de solución polimérica inicia un viaje desde la punta del inyector hasta el plato colector; en su viaje, el chorro de solución polimérica es alargado debido a las interacciones electrostáticas entre las cargas cercanas a segmentos del mismo chorro, mientras tanto, el disolvente se evapora y finalmente, las fibras se solidifican a su llegada al plato colector (Lannutti, 2007). Luego de ser extraídas del plato colector se sugiere mantener las fibras en una atmósfera al vacío para eliminar el disolvente remanente (Ravichandran, 2012). Es importante tener precaución durante la ejecución del proceso ya que algunos disolventes como el cloroformo, dimetilformamida y en general aquellos productos químicos nocivos, pueden emitir vapores perjudiciales para la salud (Li Wan-Ju, 2002). Existen diversas variables que están íntimamente relacionadas con las propiedades y características de las fibras electrohiladas por lo que su control durante la ejecución del proceso es indispensable (Tabla 3).

Parámetros de la solución.

a) Concentración de la solución.

La concentración de la solución es uno de los parámetros determinantes del tamaño y la morfología de las fibras electrohiladas. La concentración del polímero en la solución influye tanto la tensión superficial como la viscosidad de esta, este último parámetro está relacionado con el arreglo de las cadenas poliméricas; si las cadenas son menos enredadas, la solución tendrá una viscosidad baja y viceversa. El diámetro de las fibras tiende a aumentar con la viscosidad; si la solución está muy diluida las fibras de polímero se rompen en gotas antes de llegar al plato colector debido al efecto de la tensión superficial, de igual forma si la solución está muy concentrada entonces las fibras no se podrán formar debido a la alta viscosidad, lo que dificulta el paso de la solución a través del capilar (Doshi, 1995).

Tabla 3. Variables que controlar durante el proceso de electrohilado y su efecto en las características de las fibras.

Parámetro		Características que aporta
Concentración de la solución de polímero	↗	Dificulta el paso de la solución a través del capilar.
	↘	Las fibras se rompen en gotas antes de llegar al plato colector.
Tensión superficial	↗	Aparición de defectos (beads) en las fibras.
	↘	Obtención de fibras, lisas, para disminuir la tensión superficial se pueden adicionar solventes con baja tensión como el etanol.
Conductividad de la solución	↗	Mayor transporte de cargas, mayor estiramiento de la solución, fibras más delgadas.
	↘	Menor transporte de cargas, menor estiramiento de la solución, fibras más delgadas.
Voltaje	↗↗	Fibras gruesas, distorsión del chorro, aparición de gotas o defectos.
	↗	Poco impulso para llegada de la solución al plato colector.
Flujo de salida	↘	Las fibras más gruesas, beads con mayores tamaños
	↗	Mayor tiempo para evaporación del solvente, fibras sin defectos
Distancia aguja-colector	↗↗	Las fibras pueden romperse debido a su propio peso. Mayor estiramiento de la solución, obtención, obtenciónn de fibras delgadas.
	↘↘	Aparición de defectos (beads) en las fibras al trabajar con muy altas o muy bajas distancias.
	↘	Poco tiempo para la evaporación del solvente por tanto, las fibras llegan húmedas al plato colector.
Humedad relativa	↗	Aparición de poros en las nanofibras

b) Tensión superficial.

Doshi y Reneker (1994) concluyeron que al reducir la tensión superficial de la solución polimérica podrían obtenerse fibras sin presencia de gotas (Fong, 1999). La tensión superficial reduce el área superficial por unidad de masa, cambiando los chorros (jets) por esferas o gotas. Al aplicar el alto voltaje se busca aumentar la superficie expuesta del polímero que se opone a la formación de defectos (gotas) y favoreciendo la formación de chorros más delgados. En este caso la fuerza viscoelástica es la fuerza de resistencia para la formación de la fibra. El coeficiente de tensión superficial depende del polímero y el disolvente; por lo que sugiere adicionar disolventes como el

etanol, ácido acético entre otros para disminuir la tensión superficial y esto contribuirá a la obtención de fibras lisas (Fong, 1999).

c) Conductividad de la solución.

La conductividad es otra variable que afecta el proceso de formación de fibras. Las soluciones con alta conductividad tendrán mayor capacidad de transportar las cargas de la solución que aquellas con baja conductividad (Bhardwarj, 2010). La adición de sales a la solución incrementa la conductividad y por consiguiente la fuerza eléctrica para el estiramiento del chorro, lo que promueve una reducción en el diámetro de las fibras (Ohkawa, 2004). Se ha encontrado

que con el aumento de la conductividad eléctrica de la solución hay una disminución significativa en el diámetro de las fibras, mientras que cuando la conductividad es baja se observa un alargamiento insuficiente del chorro lo que impide la producción de fibras uniformes (Bhardwarj, 2010).

d) Efecto dieléctrico del disolvente.

Básicamente el disolvente cumple dos roles importantes dentro del proceso de electrospinning: en primer lugar disolver las moléculas de polímero para formar el chorro con carga eléctrica y en segundo lugar llevar las moléculas de polímero disueltas hasta el colector (Sencadas, 2012), es por ello que las propiedades del disolvente cumplen un rol fundamental dentro del proceso; la constante dieléctrica por ejemplo tiene gran influencia en el proceso de electrospinning, generalmente una solución con buenas propiedades dieléctricas reduce la formación de gotas y el diámetro de las fibras resultantes (Doshi, 1995). Las constantes dieléctricas de los disolventes más utilizados en electrospinning se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Constante dieléctrica de algunos disolventes

Disolvente	Constante dieléctrica
Cloroformo	4.8
Acetona	20.7
Etanol	24.55
Dimetilformamida	38.3
Agua	79

Parámetros del proceso.

a) Voltaje.

Dentro de las variables de proceso o también denominada externas se presenta el voltaje. El voltaje es uno de los parámetros más importantes dentro del proceso de electrospinning, algunos autores (Li Wan-Ju, 2002) afirman que aplicar voltajes altos hace que el fluido se transporte con mayor rapidez y con ello se obtiene fibras con mayores diámetros en el colector Li Wan-Ju (2002), afirma que un incremento en la aplicación del voltaje decrece el diámetro de las nanofibras (Sencadas, 2012) y aumenta la probabilidad de obtener fibras con defectos (gotas) (Doshi, 1995), establece que en la mayoría de los casos un voltaje alto permite un mayor estiramiento de la solución debido a la presencia de mayor fuerza de coulomb en el chorro y un fuerte campo eléctrico, todos estos factores promueven una reducción en el diámetro de las fibras. La influencia del voltaje depende además de las propiedades viscoelásticas de la solución polimérica, por ello es importante analizar el comportamiento para cada polímero con su respectivo disolvente.

b) Flujo de salida.

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

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

Las propiedades de la solución y la variación de la distancia entre el inyector y el plato colector tienen efectos en la morfología y diámetro de las fibras. Al trabajar con una distancia muy grande las fibras electrohiladas podrían romperse de-

bido a su propio peso, especialmente si las fibras son de diámetro pequeño, mientras que una mínima distancia es requerida para dar a las fibras el tiempo suficiente para que el disolvente se evapore antes de alcanzar el plato colector. Con distancias muy grandes o demasiado pequeñas se ha observado la aparición de gotas o fibras húmedas y por consecuencia fibras aplanadas o con forma de cintas. La mayoría de los autores coinciden que entre mayor distancia entre el inyector y el plato colector se presente en el equipo, la fibra tendrá mayor tiempo de vuelo lo que promoverá un mayor estiramiento y deshidratación antes de depositarse en el plato colector.

De acuerdo con los antecedentes presentados el desarrollo de materiales novedosos empleando la técnica del electrohilado para la purificación de agua, usando nanofibras de PVA considerando una opción para el desarrollo de nuevos materiales nanométricos.

Purificación de agua con nanofibras electrohiladas.

La filtración es un proceso de purificación físico, que consiste básicamente en eliminar los sólidos de los líquidos. Dentro de los procesos de filtración se encuentra la filtración por membrana y esta consta de diferentes técnicas en las cuales la transferencia de materia se produce bajo el efecto de un gradiente de presión, se trata de la Microfiltración, de la Ultrafiltración, de la Nanofiltración y de la Osmosis Inversa (Guizard, 1999).

La ósmosis inversa tiene el potencial de proporcionar la mayor pureza del agua; sin embargo, la membrana de nanofiltración ha sido explotada como una nueva técnica en estos días para la purificación del agua (Tlili & Alkanhal, 2019).

En el arduo trabajo de mejorar y crear materiales más eficientes para la desinfección de aguas residuales tratadas es el uso de nanopartículas metálicas por su efecto bacte-

ricida (Noriega-Treviño, 2012) las cuales se ha adicionado a las nanofibras electrohiladas para que sean capaces de eliminar bacterias y virus.

Las bacterias o grupos de bacterias indicadoras de contaminación fecal son utilizadas para valorar la calidad sanitaria de alimentos, aguas destinadas al consumo humano, actividades agrícolas e industriales, así como para verificar la calidad del agua potable y la eficiencia en su tratamiento. Aunque no existe un indicador universal, y dentro del rango de los indicadores se encuentra el grupo de bacterias coliformes (*E. coli*, colifagos, *Bifidobacterium* sp., *Clostridium perfringens*) y el grupo de estreptococos fecales (*S. faecalis*, *S. faecium*, *S. durans*, *S. Boris* y *S. equinus*) (Bitton, 2005), mismos que se emplean para determinar la calidad microbiológica del agua.

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

Los filtros compuestos por membranas de nanofibras electrohiladas que contienen un agente antibacteriano pueden ser una solución prometedora para la filtración eficaz de microorganismos, no solo en el agua sino en el aire, específicamente en instalaciones cerradas como hospitales u otros lugares que son más propensos a las infecciones bacterianas (Chaudhary, Gupta, Mathur, 2014). En la Tabla 5 se enlistan los trabajos previamente realizados sobre el tratamiento de agua usando nanofibras, óxidos y sales metálicas con efecto bactericida resaltando que se incorporan con éxito en nanofibras cuyo resultado muestran una alta actividad antimicrobiana y estabilidad en el agua.

Tabla 5. Investigaciones previas sobre nanofibras y agua

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

Conclusiones.

Debido a las circunstancias ambientales actuales es importante innovar técnicas, las cuales sean viables económicamente y con la posibilidad de que sean comercializadas y aprovechando que existe un auge en la aplicación de la técnica de electrohilado a la par de la nanotecnología, en diferentes campos, se observa la oportunidad de aplicarlo como medio de filtración para agua.

Actualmente en el continente europeo, existe la comercialización de filtros hecho a partir de nanofibras, los cuales tiene como aplicación el uso general para tratamiento de agua a nivel industrial, sin embargo, se siguen realizando investigaciones para ampliar su eficiencia y comercialización a gran escala, lo que implicaría poner al alcance de un mayor número de personas agua purificada para su consumo.

A pesar de que aún queda un camino largo para los investigadores, los trabajos realizados a la fecha han obtenido resultados favorables para la eliminación de bacterias que son consideradas dañinas para consumo humano, argumentando que se requiere ahondar más en el tema para identificar los estándares de concentración, la eficiencia, el tiempo del efecto bactericida, costos finales, entre otras variables que involucran el proceso y posterior a esto tener más aplicaciones de la técnica a nivel ambiental, incluyendo aire y suelo.

Agradecimientos.

Las autoras extienden su agradecimiento al programa de posgrados de CONACYT, así como a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el apoyo en el uso de recursos virtuales para la presente investigación.

Referencias.

Amariei, G., Morales Santiago, J., Boltes Espinola, K., Letón García, P., Rosal García, R., Rodríguez Fernández-Alba, A., & Martínez Bueno, M. J. (2016). Membranas electrohiladas de doble acción para tratamiento de agua (Patent No. ES 2663129A1). 2663129. uri: <http://hdl.handle.net>

Aussawasathien, D., Teerawattananon, C., & Vongachariya, A. (2008). Separation of micron to sub-micron particles from water: Electrospun nylon-6 nanofibrous membranes as pre-filters. *Journal of Membrane Science*, 315(1-2), 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.01.049/10835/6906>

Antúnez García, J., Maytorena Córdova, J. A., Petranovskii, V., & Raymond Herrera, O. (2000). Preguntas y Respuestas Sobre El mundo Nano. Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM, 1-83.

Bitton Gabriel, 2005, Patógenos y parásitos en aguas residuales doméstica, Microbiología de aguas residuales, tercera edición, 107-151, enero 2005.

Britto, M., & Casrtro, R. (2012). Nanobiotechnology : towards a new scientific and technological gateway. *QuimicaViva*, 171-183.

Bhardwarj, C. K. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 325-347.

Calcina Mamani Raque y Vigo Rivera Juan Eduardo, Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para el consumo humano, Juliaca, septiembre 2020.

Chaudhary Anisha, Gupta Ashish, Mathur B. Rakesh, Dhakate R. Sanjay, (2014), Effective antimicrobial filter from electrospun polyacrylonitrile-silver composite nanofibers membrane for conducive environment, *Advanced Materials Letters*, 5 (10) 562-568.

Dekker, A. J. (1959). *Electrical Engineering Materials*. United States of America: Prentice Hall.

Doshi, R. D. (1995). *Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers*. *Electrostatics*, 151-160.

Duque Sánchez Lina Marcela, Rodríguez Leonardo, López Marcos, (Noviembre 2012). Electrospinning: La era de las nanofibras, *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14, (1).

FAO. (07 de mayo de 2014). El agua: el recurso más básico y a la vez el más indispensable. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/231226>.

Fahimirad, S., Ajalloueiian, F., Ghorbanpour, M., 2019. Synthesis and therapeutic potential of silver nanomaterials derived from plant extracts. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 168, 260-278 Jan 30.

Fong, C. I. (1999). Beaded Nanofibers Formed During Electrospinning. *Polymer*, 4585-4592.

González Silva Jaime Andrés, Puebla, 2016. Caracterización de las propiedades morfológicas y térmicas de fibras de aceite de oliva encapsulado obtenidas por electrospinning empleando como agente encapsulante alcohol polivinílico PVA.4

Guizard, C. (1999). TECNICAS MEMBRANARIAS de FILTRACION de LIQUIDOS Micro-filtracion – Ultrafiltracion – Nanofiltracion – Osmosis inversa. Módulo de Enseñanza En Fenómenos Interfaciales, 56.

Lannutti, R. D. (2007). Electrospinning for Tissue Engineering Scaffolds. *Materials Science and Engineering*, 504-509.

Lee KH, K. H. (2003). Characterization of Nano-Structured Poly(E-Caprolactone) Nonwoven Mats Via Electrospinning . En *Polymer* (págs. 44, 1287).

Li Wan-Ju, C. T. (2002). Electrospun Nanofibrous Structure a Novel Scaffold for Tissue

López, G. D., Mancini, S., & Gervasio, S. G. (2018). Nanotecnología Aplicada a la Mitigación de Metales Pesados en Colas de Minería. Congreso Argentino de Ingeniería, 12-21. Madene, J. M. (2006). Flavour encapsulation and controlled release a review. *Food Science and Technology*, 1-21.

Marelize, B., & Thomas Eugene, C. (2017). The potential of nanofibers and nanobiocides in water purification. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.3109/10408410903397332>

Martínez-Gutiérrez, F. O.-G. (2010). Synthesis, characterization and evaluation of antimicrobial and cytotoxic effect of silver and titanium nanoparticles. s. *Nanomedicine: Nanotechnology*, 6(5), 681-688.

Noriega-Treviño, M. E., Quintero González, C. C., & Guajardo Pacheco, J. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 87-100.

Ohkawa, K. H. (2004). Biodegradation of Electrospun Poly-(-caprolactone) Non-woven Fabrics by Pure-Cultured Soil Filamentous Fungi. *Polymers and Environment*, 211-218.

Organización Mundial de la Salud, 2017, Servicios de aguas para la salud, <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/water>.

Ravichandran, N. C. (2012). Biomimetic Surface Modification of Titanium Surfaces for Early Cell Capture by Advanced Electrospinning.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española. (s.f.). Diccionario de la lengua española, 23.ª ed.,. Obtenido de <https://dle.rae.es>

Sánchez, M., Elpidio, J., Jasso, C., Eugenia, M., Eugenia, M., & Cristina, N. C. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III, 87–100.

- Sandoval Acuña, L. J., & Torres Becerra, D. A. (2021). Nanopartículas de óxido de grafeno como agente biocida incrustados en membranas de microfiltración electrohiladas para tratamiento de aguas: una revisión sistemática [universidad santo tomás TUNJA]. <https://emea.mitsubishielectric.com/ar/products-solutions/factory-automation/index.html>
- Sencadas, C. D. (2012). Determination of the Parameters Affecting Electrospun Chitosan Fiber Size Distribution and Morphology. *Carbohydrate Polymers*, 1295-1301.
- Son WK, Y. J. (2004). The Effects of Solution Properties and Polyelectrolyte on Electrospinning of Ultrafine Poly(Ethylene Oxide) Fibers. En *Polymer* (págs. 45, 2959).
- Subbiah Thandavamoorthy, Bhat GS, Tock RW, Parameswaran S., Ramkumar SS, (2005). Electrohilado de nanofibras. *Wiley Natural Sciences*, vol. 96, No, 2, 557-569.
- Taheran, M., Kumar, P., Naghdi, M., Brar, S. K., Knystautas, E. J., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2019). Development of an advanced multifunctional portable water purifier. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0054-6>
- Tlili, I., & Alkanhal, T. A. (2019). Nanotechnology for water purification: Electrospun nanofibrous membrane in water and wastewater treatment. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 9(3), 232-247. <https://doi.org/10.2166/wrd.2019.057>
- Travis, H. A. (2008). Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 1989-2006.
- Zong, K. K. (2002). Structure and Process Relationship of Electrospun Bioabsorbable Nanofiber Membranes. *Polymer*, 4403-4412.