

Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial

Production of polymeric nanofibers by *electrospinning* process and its potential use

Alis Pataquiva Mateus

Ingeniera Química de la de Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Biotecnología de la Universidad de Sao Paulo y PhD en Ingeniería Biomédica de la Universidad de Porto
Profesora de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2953-5132>
alisy.pataquivam@utadeo.edu.co

Sebastián Coba Daza

Ingeniero Químico de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Profesor de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-0613-5232>
jorges.cobad@utadeo.edu.co

Fecha de recepción: 14 de noviembre del 2017
Fecha de aceptación: 10 de septiembre del 2018

Sugerencia de citación: Pataquiva Mateus, A. y Coba Daza, S. (2018). Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial. *Mutis* 8(1), en prensa, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1375>

RESUMEN

En este artículo de revisión se presentan las diferentes formas de fabricación de nanofibras de polímeros haciendo énfasis tanto en la técnica de *electrospinning*, la cual es un proceso sencillo, versátil y adecuado para la fabricación de materiales unidimensionales (1D), como en los parámetros que se deben considerar al utilizar este método; además, se señala la importancia de los parámetros de procesamiento (voltaje, distancia y flujo), de solución (concentración, viscosidad y tensión superficial) y ambientales (temperatura y humedad). Finalmente, se mencionan las distintas aplicaciones que involucran nanofibras en campos de acción como energía, ingeniería de tejidos, medio ambiente y alimentos.

Palabras clave: fibras, *electrospinning*, aplicaciones, nanotecnología.

ABSTRACT

This review article presents different ways to synthesize polymer nanowires emphasizing the electrospinning technique, which is a simple, versatile, and suitable process for the production of unidimensional structures (1D), and the parameters that should be considered when using this method; besides, it accents the importance of processing parameters (voltage, distance, and flow), solution parameters (concentration, viscosity, and superficial tension), and environmental parameters (temperature and humidity). Finally, it shows the different applications of nanowires in fields such as energy, tissue engineering, environment, and food.

Keywords: nanofibers, electrospinning, applications, nanotechnology.

INTRODUCCIÓN

El uso creciente de materiales unidimensionales (1D) como nanofibras, nanohojas, nanotubos, nanocables y nanocintas ha aumentado significativamente en los últimos años, debido a sus propiedades y a su gran potencial de aplicabilidad (Alivisatos *et al.*, 1998; Ozin, 1992; Schulz, 2000; Wang, Shen, Yao y Park, 2009; Wernsdorfer y Sessoli, 1999). Las técnicas para la creación de dichos materiales son muy variadas e incluyen la litografía, la vía hidrotérmica, así como la deposición química en fase vapor (Wang, 2000).

Cuando las estructuras pasan de tener un tamaño micrométrico a submicrométrico, sus propiedades cambian (Haider, Haider y Kang, 2015). En la Tabla 1 se muestra como estos cambios se ven reflejados en la aparición de características importantes (Zheng-Ming, Zhang, Kotaki y Ramakrishna, 2003).

Tabla 1. Comparación de propiedades de un material al reducir su tamaño

Tamaño micrométrico	Tamaño submicrométrico
Baja proporción área/volumen	Alta proporción área/volumen
Bajo desempeño de propiedades mecánicas	Alto desempeño de propiedades mecánicas
Baja capacidad de funcionalizar la superficie	Alta capacidad de funcionalizar la superficie

Fuente: elaboración propia

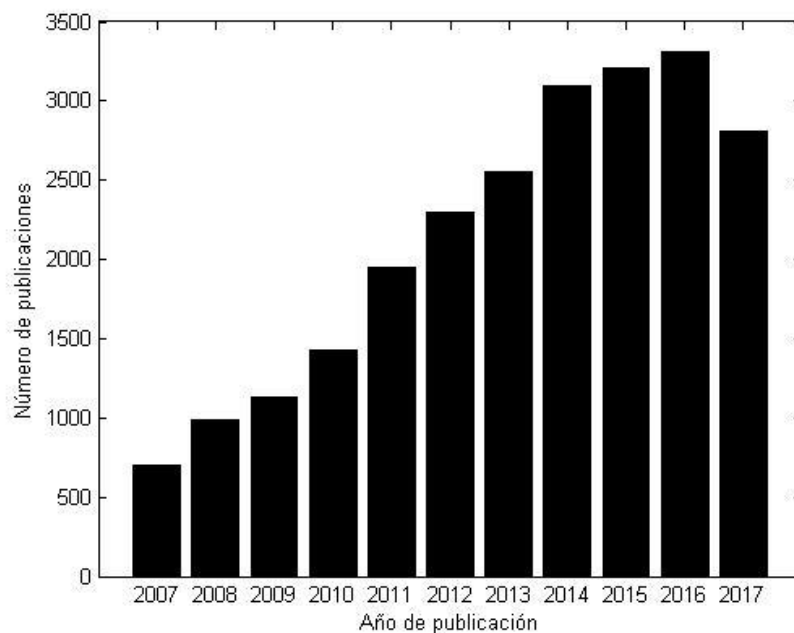
La técnica de *electrospinning*, también llamada electrohilado, hace uso de las fuerzas eléctricas para producir fibras de tamaño micro y nanométrico (Ahn *et al.*, 2006): se realiza una descarga de alto voltaje sobre la solución polimérica, la cual forma un cono llamado cono de Taylor, del cual se desprenden las fibras (Doshi y Reneker, 1995; Taylor, 1969). Diferentes parámetros –como voltaje, caudal, distancia, humedad, concentración del polímero usado, entre otros– influyen en el proceso (Li y Wang, 2013a), por lo que es necesario tener en cuenta cada uno de estos a fin de proporcionar el tamaño de fibra adecuado según los requerimientos.

El aumento de publicaciones¹ acerca de la técnica de *electrospinning* para la producción de nanofibras se debe a la facilidad de esta técnica (Haider *et al.*, 2015), al volumen que puede producir, a su fácil escalabilidad (Da Silva Vaz, Vieira Costa y De Moraes, 2017) y a la aplicabilidad del producto obtenido (Liang, Hsiao y Chu, 2007). En la Figura 1 se muestra el número de publicaciones en la

¹ Por publicaciones se entiende: artículos científicos, documentos de conferencias, revisiones, artículos de prensa, revisión de conferencias, capítulos de libros, erratas, notas, encuestas cortas, editoriales, libros, cartas, artículos de negocios e informes.

base de datos Scopus (2017) que incluyen la palabra *electrospinning* entre 2007 y 2017; se evidencia que esta técnica ha atraído cada vez más la atención de los investigadores.

Figura 1. Número de publicaciones con la palabra *electrospinning*.



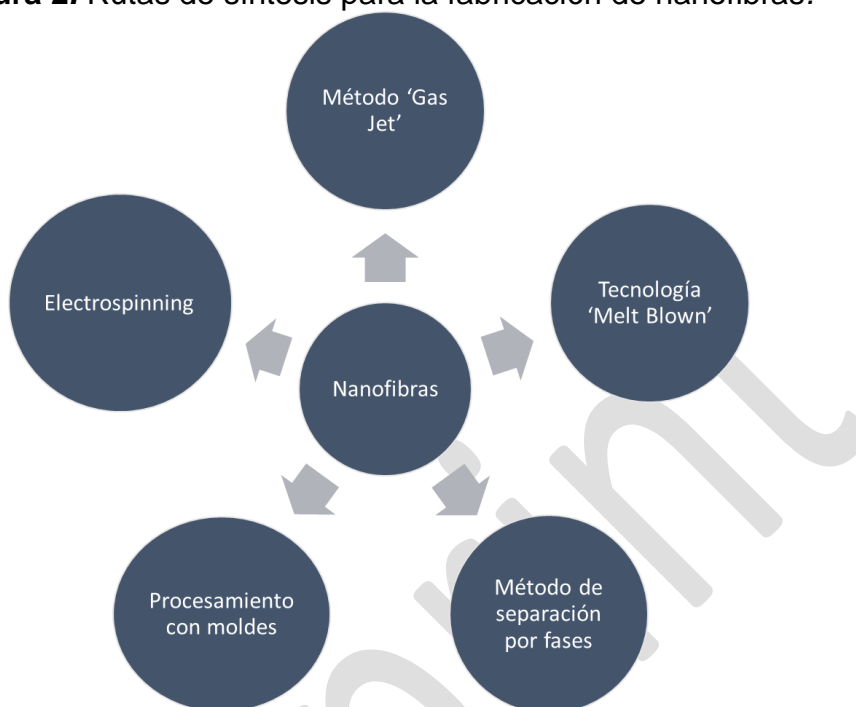
Fuente: Scopus (2017)

En este artículo de revisión se presentan las diferentes rutas de fabricación para la producción de nanofibras, y se profundiza en la técnica de *electrospinning*, haciendo énfasis en el efecto de las variables de operación y en las prometidas aplicaciones de este tipo de material en distintos campos de aplicación.

RUTAS DE FABRICACIÓN

Existen diferentes rutas de síntesis para la fabricación de nanofibras de polímero (ver Figura 2). A continuación, se explican cada una de estas rutas.

Figura 2. Rutas de síntesis para la fabricación de nanofibras.

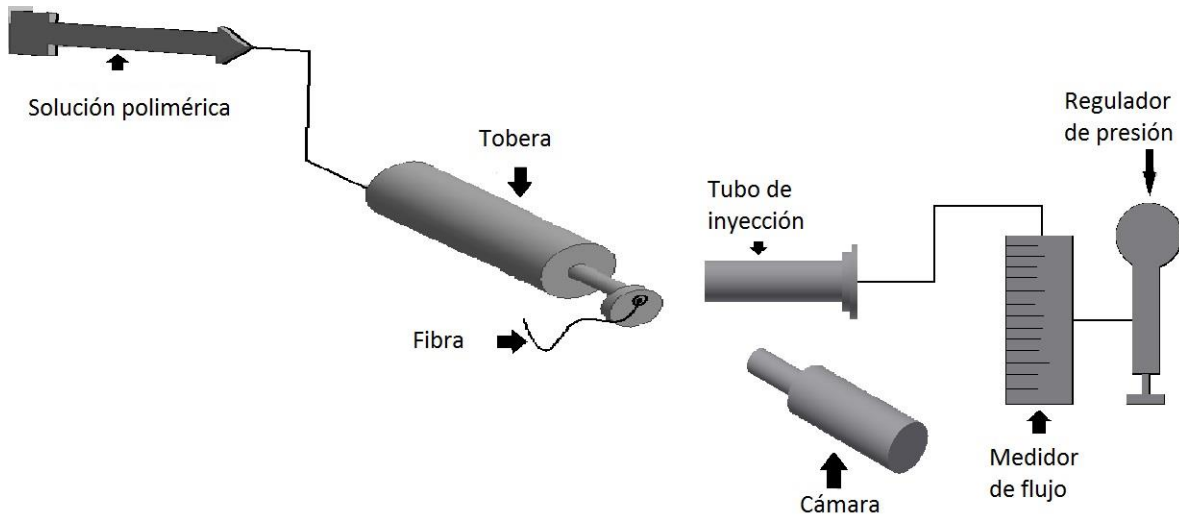


Fuente: elaboración propia

Método *gas jet*

El procesamiento de nanofibras por el método *gas jet* consiste en varios pasos: primero, la solución polimérica se lleva a una tobera y se extrude a flujo constante por medio de una bomba; cuando la solución polimérica llega al final del capilar acoplado a la tobera, se encuentra con un flujo constante de gas (generalmente aire) proveniente de un sistema de expansión de gas; a continuación, el gas evapora el solvente y se genera un hilo, que finalmente se recolecta a unos cuantos centímetros para su posterior uso (Benavides, Jana y Reneker, 2012; Reneker, 2003, 2004; Reneker, Chun y Ertley, 2002) (ver Figura 3). Con esta técnica se obtienen fibras de tamaño micrométrico y nanométrico, los cuales dependen de la capacidad de evaporación del solvente, la velocidad y la presión del gas, entre otros factores (Benavides, Jana y Reneker, 2013).

Figura 3. Esquema de producción de nanofibras con el método *gas jet*.

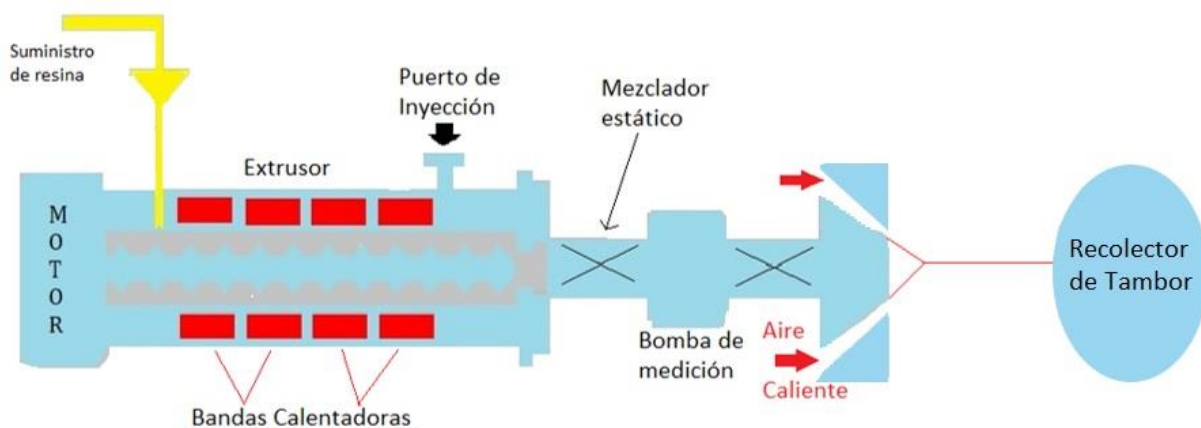


Fuente: elaboración propia

Tecnología *melt blown*

El procesamiento de nanofibras mediante la tecnología *melt blown* consiste en la extrusión de un polímero fundido a través de un orificio: cuando la primera gota de polímero sale por dicho orificio, un flujo de gas caliente (generalmente aire) se suministra a 45 °C por encima y por debajo (ver Figura 4), produciendo así un cono y consecutivamente el hilo, el cual es recolectado en un colector (Ellison, Phatak, Giles, Macosko y Bates, 2007). Esta técnica permite la fabricación de fibras de tamaño nanométrico y, además, es amigable con el medio ambiente (Nayak, 2017).

Figura 4. Esquema de producción de nanofibras con la tecnología melt blown.

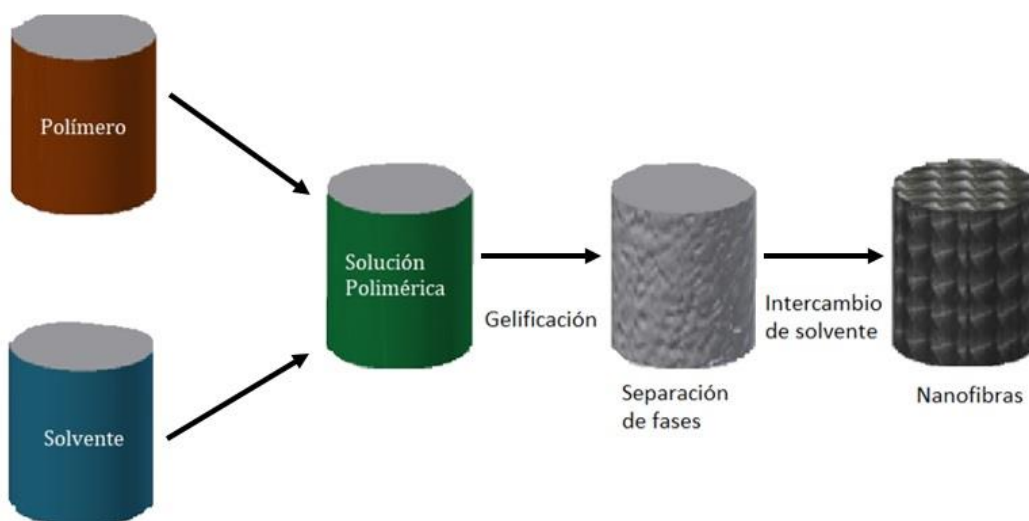


Fuente: elaboración propia

Método de separación por fases

La producción de fibras por el método de separación por fases consiste en proporcionar a la solución polimérica una serie de condiciones termodinámicas no favorables para la estabilidad, como exponerla a otro solvente inmiscible o disminuir la temperatura por debajo de la curva binodal de solubilidad; estas condiciones no favorables hacen que el polímero tome una ruta para establecer su equilibrio con el sistema. Esta ruta resulta en la formación de estructuras nanométricas como las nanofibras, que se obtienen una vez se elimina el solvente (He, Nie y Feng, 2014) (ver Figura 5). Por lo general, esta técnica se emplea en la fabricación de nanofibras naturales con miras a ser aplicadas en la ingeniería de tejidos (Ma y Zhang, 1999).

Figura 5. Esquema de producción de nanofibras con el método de separación por fases.

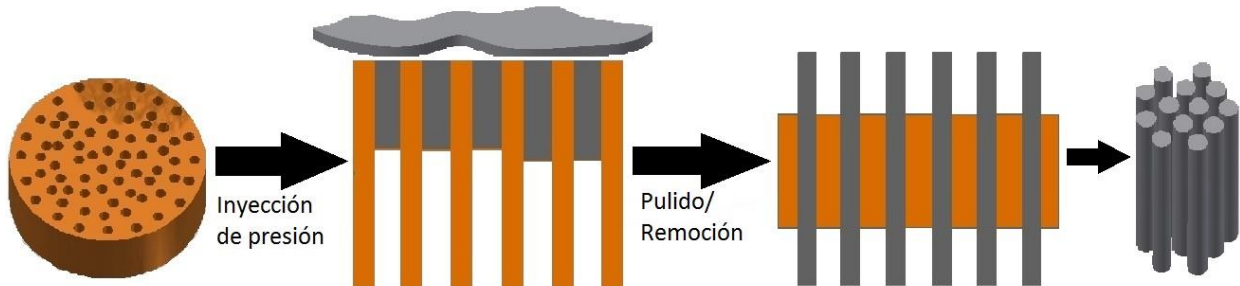


Fuente: elaboración propia

Procesamiento con moldes

El procesamiento con moldes es una técnica efectiva para controlar la morfología en la producción de materiales a escala nanométrica (Emre Kiyak y Cakmak, 2014; Wang y Qi, 2008). Esta técnica proporciona un tamaño adecuado del material que se quiere producir, por cuanto el molde facilita que se rellenen las estructuras con el elemento apropiado; de esta manera, se obtienen diferentes tipos de materiales unidimensionales como nanotubos, nanofibras, nanocintas, entre otros (Al-Kaysi *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2016) (ver Figura 6). Aunque esta ruta de síntesis es atractiva porque permite controlar el tamaño de las estructuras formadas (Naik *et al.*, 2009), es costosa porque los moldes de los precursores usados se obtienen por métodos de morfosíntesis como la litografía (Jiao *et al.*, 2006; Son *et al.*, 2004; Xia *et al.*, 2003); otra desventaja del proceso radica en la dificultad de deshacer el molde para obtener finalmente la estructura (Wang y Qi, 2008).

Figura 6. Esquema de producción de nanofibras con la técnica de procesamiento con moldes.



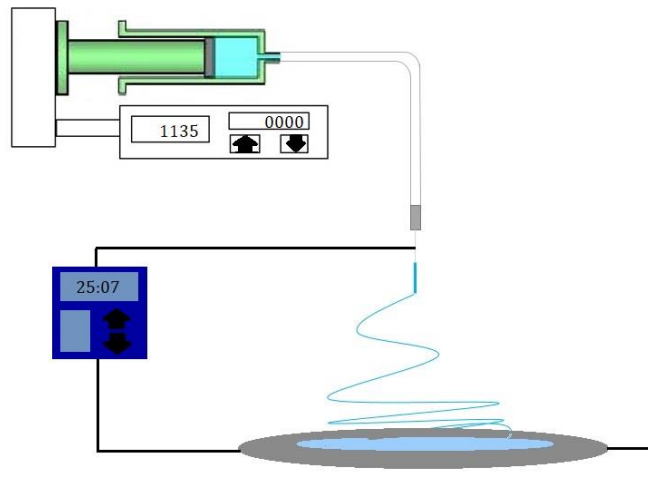
Fuente: elaboración propia

Técnica de *electrospinning*

La técnica de *electrospinning* consiste en la creación de un cono, llamado cono de Taylor, debido a la acción de las fuerzas eléctricas sobre la superficie de un polímero del cual se obtienen las nanofibras y el colector utilizado (Deitzel, 2002; El-Newehy, Al-Deyab, Kenawy, y Abdel-Megeed, 2011; Nirmala, Navamathavan, El-Newehy y Kim, 2011; Pedicini y Farris, 2004; Reneker y Chun, 1996; Yuan, Zhang, Dong y Sheng, 2004) (ver Figura 7). En este proceso se pueden emplear tanto polímeros naturales y sintéticos como mezclas de polímeros y polímeros funcionalizados con diferentes materiales, lo cual permite un amplio rango de diversas aplicaciones (Li y Wang, 2013b).

Las características de las fibras obtenidas mediante *electrospinning* tienen gran potencial en aplicaciones como filtración, prendas protectoras, ingeniería de tejidos, apósitos para heridas, sistemas de liberación controlada de medicamentos, sensores y materiales ópticos, entre otros (Damodar, You y Chou, 2009; Rajesh, Ahuja y Kumar, 2009; Yoo, Kim y Park, 2009; Yang, Both, Yang, Walboomers y Jansen, 2009). El uso de polímeros funcionalizados con nanopartículas o diferentes materiales permiten que la matriz polimérica electrohilada se aplique en distintos ámbitos, por ejemplo: en catálisis, cuando se agregan nanopartículas o nanotubos de TiO_2 , así como en propiedades antimicrobianas y protectoras de rayos UV, cuando se agrega grafeno (Pant *et al.*, 2012).

Figura 7. Esquema de producción de nanofibras con la técnica de electrospinning.



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 2 se comparan las diferentes rutas de síntesis para la producción de nanofibras y se incluyen tanto las ventajas como las desventajas de cada método. A partir de esta información, se deduce que el *electrospinning* es una de las técnicas más atractivas.

Tabla 2. Comparación de las rutas de síntesis para la producción de nanofibras

Proceso	Facilidad de procesamiento	Ventajas	Desventajas	Referencias
Método <i>gas jet</i>	Fácil	Uso de aire como gas impulsor. Posibilidad de usar varios polímeros.	Problemas en el ajuste de la presión y el flujo de gas óptimo.	(Benavides <i>et al.</i> , 2012; Ghosh y Jana, 2015)
Tecnología <i>melt blown</i>	Fácil	Capacidad de manejo de muchos polímeros, así como mezclas de estos. No hay problemas por manejo de solventes.	Proceso apto únicamente para polímeros termoplásticos.	(Bhat y Malkan, 2002)
Método de separación por fases	Fácil	Posibilidad de adaptar propiedades mecánicas.	Bajo rendimiento. Limitado a ciertos polímeros.	(Poole y Owens, 2003)
Procesamiento con moldes	Difícil	Controlabilidad sobre la morfología del material obtenido. Materiales específicos y viables para aplicaciones en el campo biomédico.	Producción costosa por el uso de moldes que se deben fabricar con base en métodos como la litografía.	(Vasita y Katti, 2006)
Técnica de <i>electrospinning</i>	Fácil	Económico. Fibras continuas. Facilidad de funcionalización. Posibilidad de fibras alineadas.	Uso de solventes orgánicos nocivos para la salud y el medio ambiente. Restricción en la controlabilidad.	(Kamiyama, Soeda, Nagajima y Tanaka, 2012; Poole y Owens, 2003)

Fuente: elaboración propia

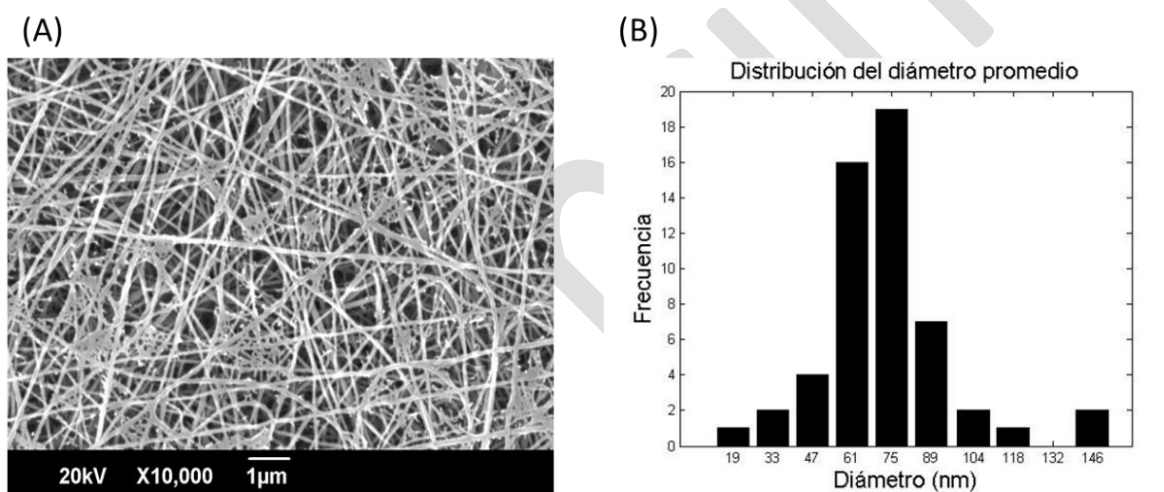
EFFECTOS DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

La producción de nanofibras mediante el método de *electrospinning* está determinada por los parámetros operacionales del proceso, las características de la solución utilizada y los factores ambientales bajo los cuales se produce. A continuación, se profundizará sobre el efecto de cada uno de estos parámetros en la producción de nanofibras.

Parámetros de procesamiento

Voltaje. El voltaje desempeña un rol importante en este proceso, únicamente con un voltaje superior al umbral –o crítico– se genera un cono de Taylor que es expulsado hacia el colector empleado (Li y Wang, 2013a). El uso de altos voltajes facilita la formación de nanofibras de menor diámetro (Yuan *et al.*, 2004) y hace que el producto obtenido tenga forma de telaraña (Pant *et al.*, 2010) (ver Figura 8).

Figura 8. Formación de nanofibras de *nylon* con una configuración tipo telaraña, donde (A) es la micrografía obtenida con voltaje = 29 kV, flujo = 3 mL/h y distancia ajuga-colector = 9 cm, y (B) es la distribución del diámetro promedio de las nanofibras obtenidas.



Fuente: elaboración propia

Caudal. El caudal es otro de los parámetros importantes en esta ruta de síntesis. En la literatura se menciona que un flujo pequeño (entre 0.1 y 1 mL/h) es apropiado porque permite que la solución se polarice y, así, se pueda formar adecuadamente el cono de Taylor (Buchko, Chen, Shen y Martin, 1999). Asimismo, un flujo pequeño permite que el solvente utilizado se evapore y el polímero salga en forma de hilo (Li y Wang, 2013a). En el estudio de Buchko *et al.* (1999), un flujo igual a 0.66 mL/h en la producción de nanofibras de polisulfona (PSF) proporcionó diámetros aún más pequeños que los valores mencionados.

Distancia aguja-colector. Se ha probado que la distancia entre la aguja y el colector influye en el diámetro de la fibra obtenida (Ki *et al.*, 2005). Si la distancia es muy pequeña, la formación de nanofibras se ve afectada debido a que el

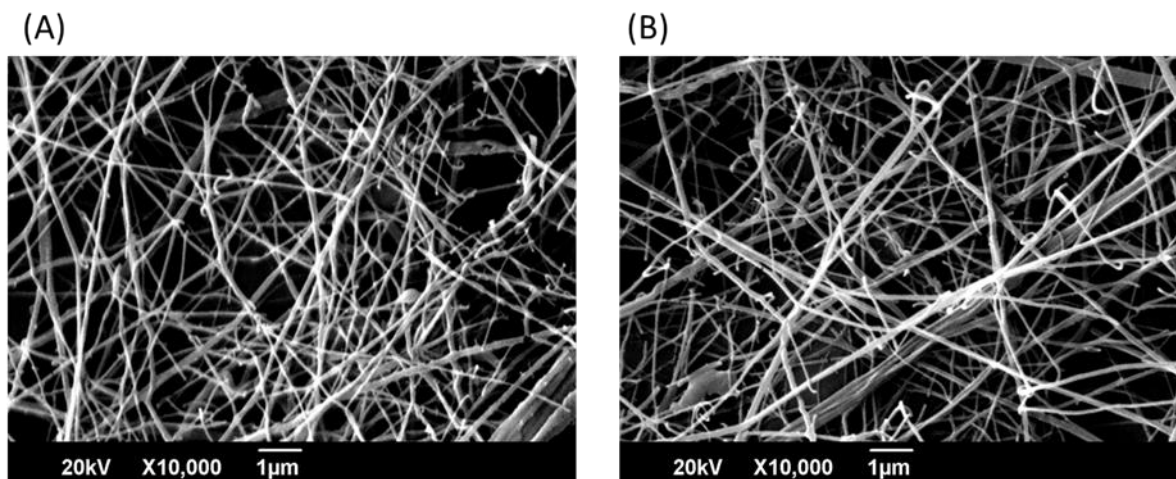
solvente no tiene suficiente tiempo para evaporarse; por el contrario, si la distancia es muy grande, las fibras tienden a formar gotas que afectan su uniformidad (Li y Wang, 2013a). Por esta razón, es importante usar un método de optimización como lo hacen Yuan *et al.* (2004) en su estudio, donde concluyen que los parámetros más importantes en el procesamiento y fabricación de nanofibras son: la distancia aguja-colector, el caudal, el voltaje y la concentración de la solución utilizada.

Colector. Los colectores usados durante el proceso de *electrospinning* son importantes porque son el sustrato donde se depositan las fibras. Las características de los colectores están determinadas por varios factores; sin embargo, se recomienda que sean superficies conductoras (generalmente aluminio) para que la descarga de alto voltaje se realice adecuadamente; además, el colector usado debe desprenderse rápidamente de la fibra una vez esta se ha depositado allí. Los colectores que se utilizan actualmente son: mallas (Wang *et al.*, 2005), cuadrículas (Sundaray *et al.*, 2004), tambores rotatorios o varillas giratorias (Xu, Inai, Kotaki y Ramakrishna, 2004), baños líquidos (Ki *et al.*, 2007), entre otros.

Parámetros de la solución

Concentración y polímero. Este método permite la producción de nanofibras de diferentes polímeros, siempre y cuando estos puedan solubilizarse. En la Figura 9 se comparan nanofibras de *nylon* y PVP obtenidas mediante el proceso de *electrospinning*. La concentración de la solución empleada es de gran importancia: cuando la concentración es muy baja, se obtienen micro o nanopartículas y, si se aumenta un poco la concentración, aparecen nanofibras con gotas, es decir, fibras no uniformes; si la concentración es adecuada, las nanofibras se producen continuamente, pero, si es muy alta, no hay producción de nanofibras (Li y Wang, 2013a).

Figura 9. Micrografía SEM de nanofibras (A) de PVP con voltaje = 27 kV, flujo = 5 mL/h y distancia aguja-colector = 9 cm, y (B) de nylon con voltaje = 29 kV, flujo = 1 mL/h y distancia aguja-colector = 13 cm.



Fuente: elaboración propia

Peso molecular y viscosidad. Es importante conocer el peso molecular del polímero usado, ya que determina indirectamente la viscosidad de la solución debido a las cadenas de los enlaces poliméricos (Li y Wang, 2013a). Por tanto, la viscosidad debe tenerse en cuenta tanto en el bombeo o impulso del polímero como en la formación del cono de Taylor, dado que una viscosidad muy elevada no permite que se genere el cono, ocasiona la expulsión de polímero por la aguja e impide la creación de las fibras. Por otro lado, si la viscosidad es muy baja, no se pueden obtener fibras continuas y uniformes, por lo que es necesario ajustar el valor de la viscosidad (y de la concentración) para conseguir el tamaño y las características morfológicas adecuadas de las fibras (Sukigara, Gandhi, Ayutsede, Micklus y Ko, 2003).

Parámetros ambientales

Temperatura y humedad. Los parámetros ambientales más importantes a tener en cuenta en la producción de nanofibras de polímero con *electrospinning* son la temperatura y la humedad. Se ha demostrado que, a medida que la temperatura incrementa, el diámetro de las fibras (fibras de poliamida-6) disminuye; el rango de temperatura adecuado para la fabricación de fibras de este polímero va desde 20 °C (ambiente) hasta 60 °C (Mit-uppatham, Nithitanakul y Supaphol, 2004). En cuanto a la humedad, una poca cantidad de vapor de agua en el ambiente hace

que el solvente pueda evaporarse más rápido, lo cual facilita la formación de las fibras; sin embargo, cuando la humedad del ambiente es alta, el diámetro de las nanofibras aumenta porque se neutralizan las cargas sobre la superficie del cono de Taylor, haciendo que las fuerzas eléctricas disminuyan; el rango de humedad adecuado para la fabricación de nanofibras está entre 0% y 50% (Casper, Stephens, Tassi, Chase y Rabolt, 2003).

APLICACIONES

La técnica de *electrospinning* tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria debido a su versatilidad en cuanto a formas y materiales. A continuación, se presentan las aplicaciones que han sido más estudiadas, las cuales van desde la ingeniería de tejidos hasta los alimentos.

Ingeniería de tejidos

Diferentes polímeros naturales y sintéticos electrohilados se han empleado como *scaffolds* (o andamios celulares) en la regeneración de ciertos tejidos especializados, entre los que se encuentran:

- Piel: polímeros empleados como matrices extracelulares (ECM) transitorias para la regeneración cutánea en quemaduras o heridas, protegiendo de infecciones y de pérdida de fluidos (Braghirolli, Steffens y Pranke, 2014; Van der Veen, Boekema, Ulrich y Middelkoop, 2011).
- Nervio: polímeros empleados como uniones entre los puntos terminales de un nervio afectado por un corte o trauma físico, de manera que se pueda realizar reconexión unidireccional y crecimiento orientado de los axones y las células de Schwann (Braghirolli *et al.*, 2014; Masaeli *et al.*, 2013).

- Vasos sanguíneos: polímeros empleados para guiar el contacto y la adhesión de las células hospederas, incrementando la respuesta biológica y la regeneración vascular (Braghirolli *et al.*, 2014; Mrówczyński *et al.*, 2014).
- Cartílago: polímeros empleados como *scaffolds* para el sembrado celular de condrocitos y la regeneración de tejido cartilaginoso, el cual se caracteriza por presentar un comportamiento anisotrópico debido a la orientación y organización de la matriz extracelular.
- Hueso: polímeros empleados como facilitadores de reparación de tejido óseo afectado por traumas o enfermedades, y habitualmente funcionalizados con factores osteogénicos y/o materiales nanoestructurados, como hidroxiapatita, que permiten tener resistencia mecánica y diferenciación celular osteogénica (Braghirolli *et al.*, 2014; Jose *et al.*, 2010; Lee, Rim, Jung y Shin, 2010).
- Columna vertebral: polímeros empleados para guiar la regeneración espontánea de neuronas y axones; sin embargo, los métodos efectivos para su reconstrucción son muy escasos y no han permitido contrarrestar totalmente el déficit permanente funcional y neurológico causado por trauma, degradación o inflamación del tejido, o necrosis celular (Braghirolli *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2013).

Adicionalmente, la técnica de *electrospinning* ha sido empleada en la fabricación de *scaffolds* que, además de mostrar resistencia mecánica y estar diseñados con precisión, permiten actuar de manera local, selectiva y controlada. Si bien se deben considerar muchas variables, como la solubilidad y estabilidad del agente a ser encapsulado, también se debe tener en cuenta la naturaleza y estructura de la fibra, de manera que permita una liberación que evite concentraciones tóxicas que vayan al torrente sanguíneo (Khalf y Madihally, 2017; Kruger, Benck, Singer y Kramer, 2012).

Energía

Entre las tecnologías que producen energía libre de carbono, se encuentran las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés), las cuales han sido la tecnología líder en las últimas décadas. Las SOFC son sistemas de conversión de energía que convierten los combustibles directamente en energía a través de reacciones electroquímicas. Como las celdas de combustible evitan el proceso de combustión que prevalece en las tecnologías convencionales de producción de energía, emiten mucho menos carbono (Pintauro *et al.*, 2007; Tsipis y Kharton, 2008).

Las SOFC tienen una eficiencia muy alta que generalmente aumenta cuando se introduce la cogeneración; su principal ventaja es la flexibilidad en cuanto a

combustible, ya que puede usar hidrógeno o cualquier hidrocarburo. Una SOFC consiste en un ánodo, un cátodo y un electrolito; un combustible y un oxidante se introducen en el ánodo y el cátodo, respectivamente; la reacción electroquímica tiene lugar debido a la diferencia en el potencial químico a través del electrolito sólido, el cual se selecciona de modo que solo permite que los iones de óxido lo atraviesen y bloqueen los electrones; por lo tanto, se utiliza un circuito externo para aprovechar esta concentración de electrones (Pintauro *et al.*, 2007; Tshipis y Kharton, 2008).

Desde hace varios años, el electrohilado se ha utilizado en las SOFC para dar soporte con nanofibras de polímero, brindando continuidad junto con una serie de métodos innovadores como el prensado isostático en frío, la extrusión y la fundición en gel (Aruna, Balaji, Kumar y Prakash, 2017; Orera, Laguna-Bercero y Larrea, 2014). La producción de energía limpia ha sido el principal campo de investigación durante este siglo y probablemente lo seguirá siendo. Se ha evidenciado una creciente preocupación por el medio ambiente, así como una intensa contaminación, en la cual la energía es determinante debido a la generación de gases de efecto invernadero. Por esto, la necesidad de producir energía limpia se ha vuelto más importante que nunca (Aruna *et al.*, 2017).

La técnica de electrohilado es un método eficiente y prometedor en la producción de nanofibras. Si se utiliza adecuadamente, tendrá un gran impacto en cómo se fabrican los electrodos SOFC, en los que actualmente predomina la cerámica en polvo. Dado que se trata de una técnica de producción rentable que proporciona una microestructura muy favorable en términos de porosidad continua y sitios de reacción relativamente más altos que con electrodos en polvo, las nanofibras han mejorado significativamente el rendimiento de las SOFC, duplicando la densidad de potencia y reduciendo su polarización en medio de técnicas de química verde (Aruna *et al.*, 2017).

Medio ambiente

La creciente preocupación por el cambio climático y la contaminación hídrica y atmosférica ha suscitado estudios exhaustivos sobre la posibilidad de descontaminar las fuentes acuíferas por medio de métodos fotocatalíticos, con diferentes catalizadores sostenidos sobre matrices poliméricas electrohiladas (Patil *et al.*, 2017). Yang *et al.* (2013) desarrollaron un compuesto de polipirrol con Ag-TiO₂ y demostraron una capacidad fotocatalítica interesante, que puede utilizarse en el tratamiento de aguas. Otros estudios que usan nanopartículas, nanotubos y nanohojas de TiO₂ o de ZnO en diferentes estados cristalinos, como rutilo o anatasa, aportan a una solución efectiva de la degradación de compuestos orgánicos en el agua (Ganesh, Nair, Raut, Walsh y Ramakrishna, 2012; Lai, Wang, Zhao, Fong y Zhu, 2013; Lang, Wu y Xu, 2012; Meng *et al.*, 2011).

Además, las nanofibras obtenidas mediante el proceso de *electrospinning* tienen la capacidad de estar en sistemas de filtración de alta eficiencia, los cuales retienen compuestos o elementos como metales pesados (Celebioglu, Yildiz y Uyar, 2017; Faccini *et al.*, 2015). Por ejemplo, los valores de eficiencia obtenidos en fibras electrohiladas de *nylon-6* son del orden de 99.993%; mientras que, en filtros comerciales, esta eficiencia es de aproximadamente 99.97% (Barhate y Ramakrishna, 2007). Estos sistemas pueden emplearse para gases o líquidos; en el caso de aguas residuales obtenidas en plantas de tratamiento, las nanofibras son funcionalizadas con nanopartículas para reducir la actividad microbiana patógena (Lev, Holba, Kalhotka, Mikula y Kimmer, 2012).

Por otro lado, los sistemas de sensores se basan en un circuito electrónico que puede detectar cambios físicos y químicos en su superficie debido a la absorción de un estimulante químico; estos estimulantes modifican las propiedades eléctricas del circuito (sensor) y, de esta forma, se pueden correlacionar los cambios en las mediciones eléctricas con cantidades medibles (Patil *et al.*, 2017). Recientemente, se han evaluado sensores basados en nanofibras de diferentes polímeros, los cuales se emplean en la detección de contaminantes de agua y suelo, como sensores de temperatura y de campo magnético, y en el control de emisiones y alarmas de gas (Kumar, Al-Dossary, Kumar y Umar, 2015).

Alimentos

El desperdicio y la protección de alimentos son problemas tanto económicos como sociales. En el sector de alimentos, las nanofibras tienen una aplicación de alto impacto en el empaque y conservación de estos. Dumitriu, Mitchell, Davis y Vasile (2017) desarrollaron estudios sobre la capacidad antioxidante de nanofibras de poli(α -caprolactona) con vitamina E para usar en empaques alimenticios y demostraron que la gran área superficial de las nanofibras, junto con la adición del agente antioxidante (vitamina E), proporciona al material las características adecuadas para retardar el deterioro de los alimentos por acción enzimática y oxidante.

Otra aplicación interesante de las nanofibras en alimentos es la nanoencapsulación de componentes bioactivos (agentes bioactivos se encuentran dentro de las nanofibras), los cuales son moléculas que proveen beneficios a la salud humana como la prevención de aparición de enfermedades causadas por actividad oxidante, inflamatoria o cancerígena (Wen, Zong, Linhardt, Feng y Wu, 2017). Recientes estudios demuestran que la encapsulación de componentes, como enzimas, proteínas, probióticos, entre otros, es un medio eficiente porque protege a estas moléculas del oxígeno no deseado debido a reacciones de oxidación; además, la encapsulación permite mejorar la estabilidad de las moléculas bioactivas y la capacidad de incrementar la viabilidad de probióticos, los cuales son importantes para fabricar alimentos funcionales. Otra ventaja es la

habilidad de enmascarar olores y sabores para mejorar la aceptación de un producto, así como el control sobre la preservación de los alimentos en la cadena de frío (Fabra, López-Rubio y Lagaron, 2016; Pérez-Masiá, López-Rubio, Fabra y Lagaron, 2014; Wen *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

El proceso de *electrospinning* se caracteriza por ser simple, rentable y versátil para la producción de nanofibras; además, es atractivo porque proporciona fibras funcionales en el rango de micrómetros y nanómetros, lo cual permite tener características como alta relación superficie/volumen, adecuada porosidad y morfologías adaptables. Los parámetros de procesamiento, de solución y ambientales que influyen en la producción de nanofibras son de gran importancia, ya que estos deben responder a los requerimientos de las diferentes aplicaciones en cuanto a la morfología de las nanofibras. El uso de nanofibras en los campos de energía, ingeniería de tejidos, medio ambiente y alimentos tiene un gran potencial para la solución de problemáticas de alto impacto. Por último, persisten retos acerca del uso de fibras electrohiladas, relacionados con el modelamiento bajo diferentes parámetros y las aplicaciones tanto en alimentos como en medicina para la liberación controlada de nutrientes y medicamentos, respectivamente.

REFERENCIAS

- Ahn, Y. C., Park, S. K., Kim, G. T., Hwang, Y. J., Lee, C. G., Shin, H. S. y Lee, J. K. (2006). Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics*, 6(6), 1030-1035. doi: 10.1016/j.cap.2005.07.013
- Al-Kaysi, R. O., Ghaddar, T. H. y Guirado, G. (2009). Fabrication of One-Dimensional Organic Nanostructures Using Anodic Aluminum Oxide Templates. *Journal of Nanomaterials*, 2009, 1-14. doi: 10.1155/2009/436375
- Alivisatos, P., Barbara, P. F., Castleman, A. W., Chang, J., Dixon, D. A., Klein, M. L., ... Thompson, M. E. (1998). From Molecules to Materials: Current Trends and Future Directions. *Advanced Materials*, 10(16), 1297-1336. doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(199811)10:16<1297::AID-ADMA1297>3.0.CO;2-7
- Aruna, S. T., Balaji, L. S., Kumar, S. S. y Prakash, B. S. (2017). Electrospinning in solid oxide fuel cells – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 673-682. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.003
- Barhate, R. S. y Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*, 296(1), 1-8. doi: 10.1016/j.memsci.2007.03.038
- Benavides, R. E., Jana, S. C. y Reneker, D. H. (2012). Nanofibers from Scalable Gas Jet Process. *ACS Macro Letters*, 1(8), 1032-1036. doi: 10.1021/mz300297g
- Benavides, R. E., Jana, S. C. y Reneker, D. H. (2013). Role of Liquid Jet Stretching and Bending Instability in Nanofiber Formation by Gas Jet Method. *Macromolecules*, 46(15), 6081-6090. doi: 10.1021/ma400900s
- Bhat, G. S. y Malkan, S. R. (2002). Extruded continuous filament nonwovens: Advances in scientific aspects. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 572-585. doi: 10.1002/app.2259
- Braghirolli, D. I., Steffens, D. y Pranke, P. (2014). Electrospinning for regenerative medicine: a review of the main topics. *Drug Discovery Today*, 19(6), 743-753. doi: 10.1016/j.drudis.2014.03.024
- Buchko, C. J., Chen, L. C., Shen, Y. y Martin, D. C. (1999). Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films. *Polymer*, 40(26), 7397-7407. doi: 10.1016/S0032-3861(98)00866-0

- Casper, C. L., Stephens, J. S., Tassi, N. G., Chase, D. B. y Rabolt, J. F. (2003). Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers: Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process. *Macromolecules*, 37(2), 573-578. doi: 10.1021/MA0351975
- Celebioglu, A., Yildiz, Z. I. y Uyar, T. (2017). Electrospun crosslinked polycyclodextrin nanofibers: Highly efficient molecular filtration thru host-guest inclusion complexation. *Scientific Reports*, 7. doi: 10.1038/s41598-017-07547-4
- Da Silva Vaz, B., Vieira Costa, J. A. y De Moraes, M. G. (2017). Production of polymeric nanofibers with different conditions of the electrospinning process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(2). doi: 10.1590/s1517-707620170002.0180
- Damodar, R. A., You, S.-J. y Chou, H.-H. (2009). Study the self cleaning, antibacterial and photocatalytic properties of TiO₂ entrapped PVDF membranes. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2-3), 1321-1328. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.139
- Deitzel, J. (2002). Electrospinning of polymer nanofibers with specific surface chemistry. *Polymer*, 43(3), 1025-1029. doi: 10.1016/S0032-3861(01)00594-8
- Doshi, J. y Reneker, D. H. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of Electrostatics*, 35(2-3), 151-160. doi: 10.1016/0304-3886(95)00041-8
- Du, B., Zeng, C., Zhang, W., Quan, D., Ling, E. y Zeng, Y. (2014). A comparative study of gelatin sponge scaffolds and PLGA scaffolds transplanted to completely transected spinal cord of rat. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 102(6), 1715-1725. doi: 10.1002/jbm.a.34835
- Dumitriu, R. P., Mitchell, G. R., Davis, F. J. y Vasile, C. (2017). Functionalized Coatings by Electrospinning for Anti-oxidant Food Packaging. *Procedia Manufacturing*, 12, 59-65. doi: 10.1016/j.promfg.2017.08.008
- El-Newehy, M. H., Al-Deyab, S. S., Kenawy, E.-R. y Abdel-Megeed, A. (2011). Nanospider Technology for the Production of Nylon-6 Nanofibers for Biomedical Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 1-8. doi: 10.1155/2011/626589
- Ellison, C. J., Phatak, A., Giles, D. W., Macosko, C. W. y Bates, F. S. (2007). Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup. *Polymer*, 48(11), 3306-3316. doi: 10.1016/j.polymer.2007.04.005

- Emre Kiyak, Y. y Cakmak, E. (2014). Nanofiber Production Methods. *Electronic Journal of Textile Technologies / Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(3), 49-60. Recuperado de http://teknolojikarastirmalar.com/pdf/tr/04_2014_8_3_1169_1945.pdf
- Fabra, M. J., López-Rubio, A. y Lagaron, J. M. (2016). Use of the electrohydrodynamic process to develop active/bioactive bilayer films for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 55, 11-18. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.10.026
- Faccini, M., Borja, G., Boerrigter, M., Morillo Martín, D., Martínez Crespiera, S., Vázquez-Campos, S., ... Amantia, D. (2015). Electrospun Carbon Nanofiber Membranes for Filtration of Nanoparticles from Water. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-9. doi: 10.1155/2015/247471
- Ganesh, V. A., Nair, A. S., Raut, H. K., Walsh, T. M. y Ramakrishna, S. (2012). Photocatalytic superhydrophilic TiO₂ coating on glass by electrospinning. *RSC Advances*, 2(5), 2067-2072. doi: 10.1039/c2ra00921h
- Ghosh, M. y Jana, S. C. (2015). Bi-component inorganic oxide nanofibers from gas jet fiber spinning process. *RSC Advances*, 5(127), 105313-105318. doi: 10.1039/C5RA20963C
- Haider, A., Haider, S. y Kang, I.-K. (2015). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*. doi: 10.1016/j.arabjc.2015.11.015
- He, C., Nie, W. y Feng, W. (2014). Engineering of biomimetic nanofibrous matrices for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(45), 7828-7848. doi: 10.1039/C4TB01464B
- Jiao, S., Xu, L., Jiang, K. y Xu, D. (2006). Well-Defined Non-spherical Copper Sulfide Mesocages with Single-Crystalline Shells by Shape-Controlled Cu₂O Crystal Templating. *Advanced Materials*, 18(9), 1174-1177. doi: 10.1002/adma.200502386
- Jose, M. V., Thomas, V., Xu, Y., Bellis, S., Nyairo, E. y Dean, D. (2010). Aligned Bioactive Multi-Component Nanofibrous Nanocomposite Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Macromolecular Bioscience*, 10(4), 433-444. doi: 10.1002/mabi.200900287
- Kamiyama, M., Soeda, T., Nagajima, S. y Tanaka, K. (2012). Development and application of high-strength polyester nanofibers. *Polymer Journal*, 44(10), 987-994. doi: 10.1038/pj.2012.63

- Khalf, A. y Madihally, S. V. (2017). Recent advances in multi-axial *electrospinning* for drug delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 112, 1-17. doi: 10.1016/j.ejpb.2016.11.010
- Ki, C. S., Baek, D. H., Gang, K. D., Lee, K. H., Um, I. C. y Park, Y. H. (2005). Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution. *Polymer*, 46(14), 5094-5102. doi: 10.1016/j.polymer.2005.04.040
- Ki, C. S., Kim, J. W., Hyun, J. H., Lee, K. H., Hattori, M., Rah, D. K. y Park, Y. H. (2007). Electrospun three-dimensional silk fibroin nanofibrous scaffold. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(6), 3922-3928. doi: 10.1002/app.26914
- Kruger, B., Benck, U., Singer, T. y Kramer, B. K. (2012). Drug-induced impairment of renal function. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 137(38), 1873-1877. doi: 10.1055/s-0032-1305312
- Kumar, R., Al-Dossary, O., Kumar, G. y Umar, A. (2015). Zinc Oxide Nanostructures for NO₂ Gas-Sensor Applications: A Review. *Nano-Micro Letters*, 7(2), 97-120. doi: 10.1007/s40820-014-0023-3
- Lai, C., Wang, X., Zhao, Y., Fong, H. y Zhu, Z. (2013). Effects of humidity on the ultraviolet nanosensors of aligned electrospun ZnO nanofibers. *RSC Advances*, 3(18), 6640-6645. doi: 10.1039/c3ra23420g
- Lang, L., Wu, D. y Xu, Z. (2012). Controllable Fabrication of TiO₂ 1D-Nano/Micro Structures: Solid, Hollow, and Tube-in-Tube Fibers by Electrospinning and the Photocatalytic Performance. *Chemistry - A European Journal*, 18(34), 10661-10668. doi: 10.1002/chem.201200378
- Lee, J. H., Rim, N. G., Jung, H. S. y Shin, H. (2010). Control of Osteogenic Differentiation and Mineralization of Human Mesenchymal Stem Cells on Composite Nanofibers Containing Poly[lactic-co-(glycolic acid)] and Hydroxyapatite. *Macromolecular Bioscience*, 10(2), 173-182. doi: 10.1002/mabi.200900169
- Lev, J., Holba, M., Kalhotka, L., Mikula, P. y Kimmer, D. (2012). Improvements in the Structure of Electrospun Polyurethane Nanofibrous Materials Used for Bacterial Removal from Wastewater. *International Journal of Theoretical and Applied Nanotechnology*, 1(1), 16-20. doi: 10.11159/ijtan.2012.003
- Li, Z. y Wang, C. (2013a). Effects of Working Parameters on Electrospinning. En *One-Dimensional nanostructures* (pp. 15-28). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-36427-3_2

- Li, Z. y Wang, C. (2013b). Introduction of Electrospinning. En *One-Dimensional nanostructures* (pp. 1-13). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-36427-3_1
- Liang, D., Hsiao, B. S. y Chu, B. (2007). Functional electrospun nanofibrous scaffolds for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 59(14), 1392-1412.
doi: 10.1016/j.addr.2007.04.021
- Liang, L., Kang, X., Sang, Y. y Liu, H. (2016). One-Dimensional Ferroelectric Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Science*, 3(7). doi: 10.1002/advs.201500358
- Liu, J., Chen, Q., Zhang, Z., Zheng, Y., Sun, X., Cao, X., ... Jiang, P. (2013). Fibrin scaffolds containing ectomesenchymal stem cells enhance behavioral and histological improvement in a rat model of spinal cord injury. *Cells Tissues Organs*, 198(1), 35-46. doi: 10.1159/000351665
- Ma, P. X. y Zhang, R. (1999). Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix. *Journal of Biomedical Materials Research*, 46(1), 60-72. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10357136>
- Masaeli, E., Morshed, M., Nasr-Esfahani, M. H., Sadri, S., Hilderink, J., Van Apeldoorn, A., ... Moroni, L. (2013). Fabrication, Characterization and Cellular Compatibility of Poly(Hydroxy Alkanoate) Composite Nanofibrous Scaffolds for Nerve Tissue Engineering. *PLOS ONE*, 8(2). doi: 10.1371/journal.pone.0057157
- Meng, X., Shin, D.-W., Yu, S. M., Jung, J. H., Kim, H. I., Lee, H. M., ... Yoo, J.-B. (2011). Growth of hierarchical TiO₂ nanostructures on anatase nanofibers and their application in photocatalytic activity. *CrystEngComm*, 13(8), 3021-3029. doi: 10.1039/c0ce00765j
- Mit-uppatham, C., Nithitanakul, M. y Supaphol, P. (2004). Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205(17), 2327-2338. doi: 10.1002/macp.200400225
- Mrówczyński, W., Mugnai, D., De Valence, S., Tille, J. C., Khabiri, E., Cikirikcioglu, M., ... Walpoth, B. H. (2014). Porcine carotid artery replacement with biodegradable electrospun poly-ε-caprolactone vascular prosthesis. *Journal of Vascular Surgery*, 59(1), 210-219. doi: 10.1016/J.JVS.2013.03.004

- Naik, N., Caves, J., Kumar, V., Chaikof, E. y Allen, M. G. (2009). A template-based fabrication technique for spatially-designed polymer micro/nanofiber composites. *Digest of Technical Papers. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems, 2009*, 1869-1872. doi: 10.1109/SENSOR.2009.5285711
- Nayak, R. (2017). *Polypropylene nanofibers. Melt electrospinning versus meltblowing*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-61458-8
- Nirmala, R., Navamathavan, R., El-Newehy, M. H. y Kim, H. Y. (2011). Preparation and electrical characterization of polyamide-6/chitosan composite nanofibers via electrospinning. *Materials Letters*, 65(3), 493-496. doi: 10.1016/j.matlet.2010.10.066
- Orera, V. M., Laguna-Bercero, M. A. y Larrea, A. (2014). Fabrication Methods and Performance in Fuel Cell and Steam Electrolysis Operation Modes of Small Tubular Solid Oxide Fuel Cells: A Review. *Frontiers in Energy Research*, 2(22). doi: 10.3389/fenrg.2014.00022
- Ozin, G. A. (1992). Nanochemistry: Synthesis in diminishing dimensions. *Advanced Materials*, 4(10), 612-649. doi: 10.1002/adma.19920041003
- Pant, H. R., Bajgai, M. P., Yi, C., Nirmala, R., Nam, K. T., Baek, W. y Kim, H. Y. (2010). Effect of successive electrospinning and the strength of hydrogen bond on the morphology of electrospun nylon-6 nanofibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 370(1-3), 87-94. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.08.051
- Pant, H. R., Park, C. H., Tijing, L. D., Amarjargal, A., Lee, D.-H. y Kim, C. S. (2012). Bimodal fiber diameter distributed graphene oxide/nylon-6 composite nanofibrous mats via electrospinning. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 407, 121-125. doi: 10.1016/j.colsurfa.2012.05.018
- Patil, J. V., Mali, S. S., Kamble, A. S., Hong, C. K., Kim, J. H. y Patil, P. S. (2017). Electrospinning: A versatile technique for making of 1D growth of nanostructured nanofibers and its applications: An experimental approach. *Applied Surface Science*, 423, 641-674. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.06.116
- Pedicini, A. y Farris, R. J. (2004). Thermally induced color change in electrospun fiber mats. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(5), 752-757.

doi: 10.1002/polb.10711

- Pérez-Masiá, R., López-Rubio, A., Fabra, M. J. y Lagaron, J. M. (2014). Use of electrohydrodynamic processing to develop nanostructured materials for the preservation of the cold chain. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 415-423. doi: 10.1016/j.ifset.2014.10.010
- Pintauro, P., Mather, P., Arnoult, O., Choi, J., Wycisk, R. y Lee, K. M. (2007). Composite Membranes for Hydrogen/Air PEM Fuel Cells. *ECS Transactions*, 11(1), 79-87. doi: 10.1149/1.2780917
- Poole, C. P. y Owens, F. J. (2003). *Introduction to nanotechnology*. John Wiley & Sons.
- Rajesh, Ahuja, T. y Kumar, D. (2009). Recent progress in the development of nano-structured conducting polymers/nanocomposites for sensor applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 136(1), 275-286. doi: 10.1016/J.SNB.2008.09.014
- Reneker, D. H. (2003). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <https://www.google.ch/patents/US6520425>
- Reneker, D. H. (2004). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <http://www.google.ch/patents/US6695992>
- Reneker, D. H. y Chun, I. (1996). Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. *Nanotechnology*, 7(3).
- Reneker, D. H., Chun, I. y Ertley, D. (2002). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <https://www.google.ch/patents/US6382526>
- Schulz, W. (2000). Nanotechnology: The next big thing. *Chemical and Engineering News*, 78(18), 41-47. doi: 10.1021/cen-v078n018.p041
- Scopus. (2017). *Journal title list*. Recuperado de <https://www.scopus.com>
- Son, D. H., Hughes, S. M., Yin, Y. y Alivisatos, A. Paul (2004). Cation Exchange Reactions in Ionic Nanocrystals. *Science*, 306(5698), 1009-1012. doi: 10.1126/science.1103755
- Sukigara, S., Gandhi, M., Ayutsede, J., Micklus, M. y Ko, F. (2003). Regeneration of *Bombyx mori* silk by electrospinning—part 1: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 44(19), 5721-5727. doi: 10.1016/S0032-3861(03)00532-9

- Sundaray, B., Subramanian, V., Natarajan, T. S., Xiang, R.-Z., Chang, C.-C. y Fann, W.-S. (2004). Electrospinning of continuous aligned polymer fibers. *Applied Physics Letters*, 84(7), 1222-1224. doi: 10.1063/1.1647685
- Taylor, G. (1969). Electrically Driven Jets. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 313(1515), 453-475. doi: 10.1098/rspa.1969.0205
- Tsipis, E. V. y Kharton, V. V. (2008). Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 12(11), 1367-1391. doi: 10.1007/s10008-008-0611-6
- Van der Veen, V. C., Boekema, B. K. H. L., Ulrich, M. M. W. y Middelkoop, E. (2011). New dermal substitutes. *Wound Repair and Regeneration*, 19(s1), s59-s65. doi: 10.1111/j.1524-475X.2011.00713.x
- Vasita, R. y Katti, D. S. (2006). Nanofibers and their applications in tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine*, 1(1), 15-30. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17722259>
- Wang, G., Shen, X., Yao, J. y Park, J. (2009). Graphene nanosheets for enhanced lithium storage in lithium ion batteries. *Carbon*, 47(8), 2049-2053. doi: 10.1016/j.carbon.2009.03.053
- Wang, H. y Qi, L. (2008). Controlled Synthesis of Ag₂S, Ag₂Se, and Ag Nanofibers by Using a General Sacrificial Template and Their Application in Electronic Device Fabrication. *Advanced Functional Materials*, 18(8), 1249-1256. doi: 10.1002/adfm.200700953
- Wang, X., Um, I. C., Fang, D., Okamoto, A., Hsiao, B. S. y Chu, B. (2005). Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments. *Polymer*, 46(13), 4853-4867. doi: 10.1016/j.polymer.2005.03.058
- Wang, Z. L. (2000). Characterizing the Structure and Properties of Individual Wire-Like Nanoentities. *Advanced Materials*, 12(17), 1295-1298. doi: 10.1002/1521-4095(200009)12:17<1295::AID-ADMA1295>3.0.CO;2-B
- Wen, P., Zong, M.-H., Linhardt, R. J., Feng, K. y Wu, H. (2017). Electrospinning: A novel nano-encapsulation approach for bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 70, 56-68. doi: 10.1016/j.tifs.2017.10.009
- Wernsdorfer, W. y Sessoli, R. (1999). Quantum phase interference and parity effects in magnetic molecular clusters. *Science*, 284(5411), 133-135. doi: 10.1126/science.284.5411.133

- Xia, Y., Yang, P., Sun, Y., Wu, Y., Mayers, B., Gates, B., ... Yan, H. (2003). One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. *Advanced Materials*, 15(5), 353-389. doi: 10.1002/adma.200390087
- Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M. y Ramakrishna, S. (2004). Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 25(5), 877-886. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14609676>
- Yang, F., Both, S. K., Yang, X., Walboomers, X. F. y Jansen, J. A. (2009). Development of an electrospun nano-apatite/PCL composite membrane for GTR/GBR application. *Acta Biomaterialia*, 5(9), 3295-3304. doi: 10.1016/J.ACTBIO.2009.05.023
- Yang, Y., Wen, J., Wei, J., Xiong, R., Shi, J. y Pan, C. (2013). Polypyrrole-Decorated Ag-TiO₂ Nanofibers Exhibiting Enhanced Photocatalytic Activity under Visible-Light Illumination. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(13), 6201-6207. doi: 10.1021/am401167y
- Yoo, H. S., Kim, T. G. y Park, T. G. (2009). Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61(12), 1033-1042. doi: 10.1016/J.ADDR.2009.07.007
- Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C. y Sheng, J. (2004). Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polymer International*, 53(11), 1704-1710. doi: 10.1002/pi.1538
- Zheng-Ming, H., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M. y Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223-2253. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7