



APLICACIONES BIOMÉDICAS, TEXTILES Y ALIMENTARIAS DE NANOESTRUCTURAS ELABORADAS POR ELECTROHILADO

Biomedic, textile and alimentary applications of nanostructures produced by electrospinning

Robles-García Miguel Angel^{1a}, Rodríguez-Félix Francisco², Márquez-Ríos Enrique², Barrera-Rodríguez Arturo^{1c}, Aguilar-Martínez Jacobo^{1b} y Del-Toro-Sánchez Carmen Lizette^{1a*}

¹ Departamento de Ciencias Médicas y de la Vida^a, Departamento de Ciencias Tecnológicas^b, Departamento de Ciencias Básicas^c, Centro Universitario de la Ciénege. Universidad de Guadalajara. Av. Universidad 1115, Ocotlán, Jalisco, México.

² Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N. Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

Se ha implementado el uso de nuevas nanoestructuras y técnicas que permitan producir nanopartículas para su aplicación en diversos sectores con la finalidad de mejorar los procesos e incrementar la productividad. Una de éstas es el método de electrohilado ó electrospinning, teniendo la característica de ser sencillo, de bajo costo y utilizar una gran variedad de materiales, convirtiéndolo en uno de los más utilizados. Las estructuras obtenidas poseen características únicas, entre ellas su gran área de contacto y alta porosidad. Debido a estas propiedades, las nanofibras presentan gran interés para ser aplicadas en diferentes áreas, como son la biomédica, textil y de alimentos obteniendo resultados benéficos.

Palabras clave: electrohilado, nanofibras, biomédica, textil, alimentos

ABSTRACT

The use of novel nanostructures has been implemented in various sectors in order to improve the production processes and increase productivity. One of these is the method of electrospinning having the characteristic of being simple, inexpensive and use a variety of materials that makes it one of the most used. The structures obtained have unique characteristics, including its large contact area and high porosity. Due of these properties, nano-fibers are of great interest to be applied in different areas such as biomedical, textile and food getting beneficial results.

Keywords: electrospinning, nanofibers, biomedical, textile, food

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de nuevas nanoestructuras en diversos sectores como la biotecnología, telecomunicaciones, informática (Moghe y Gupta, 2008), áreas biomédicas, síntesis química, separación (Ohkawa *et al.*, 2009), agricultura e industria de alimentos (Morgalev *et al.*, 2010), ha impulsado el interés de científicos e ingenieros para producir nanoestructuras que optimicen los procesos e incrementen la producción (Moghe y Gupta, 2008). Las nanoestructuras pueden tomar diferentes morfologías por ejemplo nanotubos,

nanoalambres, nanovarillas, esferas, micelas y nanofibras (Moghe y Gupta, 2008; Gutiérrez *et al.*, 2010). Para elaborar estas nanoestructuras ha surgido un método sencillo y de bajo costo conocido como electrohilado ó electrospinning (Moghe y Gupta, 2008).

La técnica de electrohilado es una técnica relativamente nueva para elaborar fibras ultrafinas (Schiffman y Schauer, 2008; Lee, 2009; Mitchell y Davis, 2011). Estas nanofibras son de gran interés debido a las propiedades únicas que poseen, como la gran superficie de contacto (Lee, 2009; Ko *et al.*, 2010) y alta porosidad (Huang *et al.*, 2011), y se pueden elaborar a partir de soluciones poliméricas de diversos materiales biodegradables y no biodegradables incluyendo polímeros, compositos y cerámicas (Sill y von Recum, 2008; Schiffman y Schauer, 2008; Huang *et al.*, 2011). Inicialmente esta técnica fue utilizada para preparar nanofibras poliméricas, y ha sido aplicada con éxito a más de 100 tipos de polímeros naturales y sintéticos (Xie y Xia, 2008). El método de electrohilado permite obtener nanofibras con diámetros que van desde tamaños submicrométricos a escalas nanométricas (Rodríguez *et al.*, 2012; Amna *et al.*, 2013). Esta técnica consiste de una jeringa, una bomba para jeringa, una aguja unida a la jeringa llena con una solución polimérica, una placa colectora conectada a tierra y una fuente de alto voltaje conectada entre el capilar y el colector (Figura 1) (Moghe y Gupta, 2008; Sill y von Recum, 2008; Cavaliere *et al.*, 2010). El alto voltaje aplicado a través de la aguja (alrededor de 20000 voltios) crea una inestabilidad termodinámica en la superficie de la solución generando un electrospray conocido con el nombre de "cono de Taylor" el cual se dirige hacia la placa colectora, en el trayecto el solvente se evapora y la fibra polimérica se deposita en el colector (Son *et al.*, 2006; Moghe y Gupta, 2008; Sill y von Recum, 2008). Generalmente se utilizan solventes volátiles para solubilizar los polímeros (Tabla 1).

Actualmente, la técnica de electrohilado ha sido integrada químicamente con sol-gel para generar compuestos y nanofibras inorgánicas. Se pueden procesar polímeros como polivinil pirrolidona, polivinil alcohol y polióxido de etileno, a partir de soluciones que contienen un precursor sol-gel, seguido de una eliminación selectiva de la fase orgánica vía calcinación en aire (Xie y Xia, 2008).

*Autor para correspondencia: Del Toro Sánchez Carmen Lizette
Correo electrónico: carmen.deltoro@cuci.udg.mx

Recibido: 25 de noviembre de 2013

Aceptado: 26 de febrero de 2014

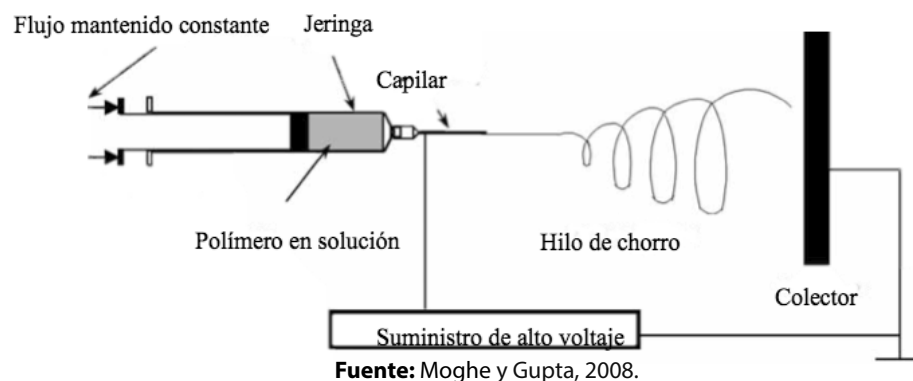


Figura 1. Esquema general de la disposición y procesos de electrohilado convencional.
Figure 1. General schematic of the arrangement and processes of conventional electrospinning.

Tabla 1. Propiedades físicas de los solventes típicamente usados en electrohilado.
Table 1. Physical properties of solvents typically used in electrospinning.

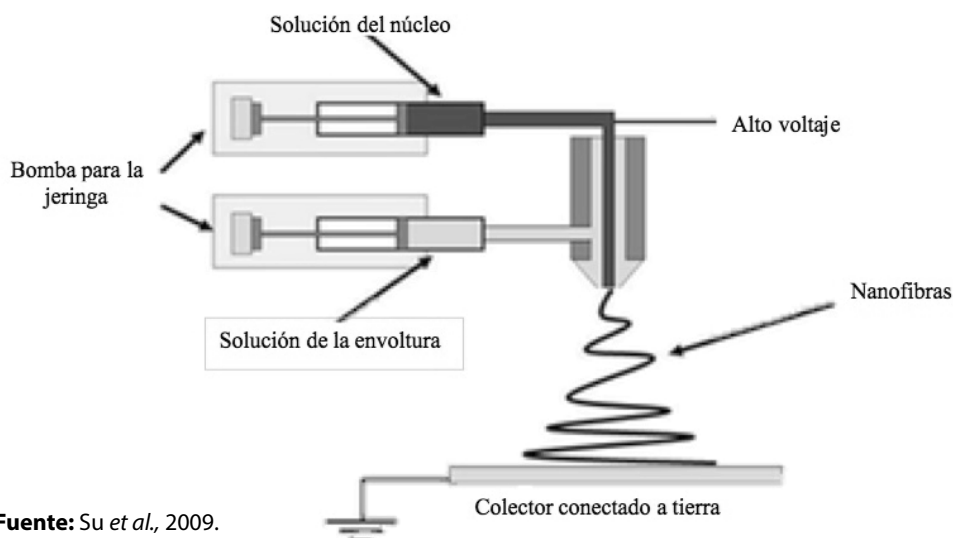
Solvente	Tipo de solvente	Temperatura de ebullición (°C)	Constante dieléctrica	Momento dipolo
Hexano	No polar	69	2,0	0,0
Tolueno	No polar	111	2,4	0,36
Cloroformo	No polar	61	4,8	1,0
Diclorometano	Aprótico polar	40	9,1	1,6
Tetrahidrofurano	Aprótico polar	66	7,5	1,8
Metil éter cetona	Aprótico polar	80	18,5	2,8
Dimetilformamida	Aprótico polar	153	38	3,8
Acetonitrilo	Aprótico polar	82	37	3,9
Ácido Fórmico	Prótico polar	101	58	1,4
Etanol	Prótico polar	79	30	1,69
Ácido acético	Prótico polar	118	6,2	1,74
Agua	Prótico polar	100	80	1,85

Fuente: Mitchell y Davis, 2011.

Se pueden realizar modificaciones a la técnica básica de electrohilado con la finalidad de aumentar la calidad e incrementar la funcionalidad de las nanofibras obtenidas. Una de estas modificaciones permite producir nanoestructuras di-componentes (núcleo/coraza) utilizando electrohilado coaxial, también llamado "electrohilado de dos fluidos". En este proceso de dos líquidos diferentes se suministran de manera independiente a través de un capilar coaxial, estos fluidos se mezclan mediante la inserción de la aguja pequeña (solución del núcleo) en el interior de otra más grande (solución de la coraza para generar nanofibras con una configuración núcleo/coraza (Figura 2). Las partículas resultantes están rodeadas una por la otra o encapsuladas en la matriz de la otra (Moghe y Gupta, 2008). Las nanofibras elaboradas mediante esta técnica tienen una variedad de estructuras secundarias que incluyen fibras de núcleo poroso y nanotubos con uno

ó múltiples canales (Xie y Xia, 2008). Este proceso es similar al del electrohilado convencional y los mismos factores influyen en la calidad de las nanofibras obtenidas mediante ambos procesos (Moghe y Gupta, 2008).

Entre los factores que pueden afectar el proceso de electrohilado se encuentran la viscosidad de la solución, la cual depende del peso molecular del polímero y la concentración de la solución. La conductividad de la solución, la humedad, temperatura, la distancia entre la punta de la aguja y la placa colector, el tipo de colector utilizado (Frey, 2008; Moghe y Gupta, 2008; Mitchell y Davis, 2011; Castro-Enríquez *et al.*, 2012), el solvente que se usa, el voltaje aplicado y la velocidad de flujo de la solución (Castillo-Ortega *et al.*, 2009; Castro-Enríquez *et al.*, 2012). Cuidando todos estos factores, se pueden obtener nanofibras con numerosas ventajas, donde las principales son: 1) obtención de diámetros fibro-



Fuente: Su *et al.*, 2009.

Figura 2. Esquema general de la disposición y procesos de electrohilado co-axial
Figure 2. General schematic of the arrangement and process of co-axial electrospinning.

sos en tamaños nanométricos; 2) la estructura de la fibra y el diámetro pueden ser controlados con precisión por la viscosidad, la fuerza del campo eléctrico y la distancia desde la punta de la aguja hasta el colector; 3) el área superficial específica grande; 4) el grado de orientación de los polímeros producidos por electrohilado es alto, lo cual ayuda a aumentar la resistencia mecánica (Su *et al.*, 2013). Por lo tanto, las nanofibras obtenidas a través de la técnica de electrohilado pueden ser aplicadas en diferentes áreas, entre ellas biomédicas, textiles y alimentos.

Aplicaciones de las nanofibras en el área biomédica

Las nanofibras elaboradas mediante el método de electrohilado permiten su utilización en el área biomédica a través de la adición de nutrientes para tejidos en crecimiento, aumentando con esto las ventajas de su utilización en ingeniería de tejidos (Mitchell y Davis, 2011). Sin embargo, el uso de las nanofibras en la ingeniería de tejidos es necesario considerar aspectos como la selección del material (biodegradable o no biodegradable, pero lo más importante es que el material sea biocompatible), orientación de las fibras, porosidad, modificación de la superficie y el tejido donde se aplicará (Sill y von Recum, 2008).

Para la nanoencapsulación de moléculas bioactivas con aplicaciones médicas se utilizan polímeros biodegradables y no tóxicos (Tabla 2). Entre estos tipos de polímeros encontramos al poli(etileno-co-vinil alcohol) que tiene la característica de ser hidrófilo, siendo ampliamente utilizado en la industria farmacéutica y dispositivos médicos debido a su biocompatibilidad, no toxicidad, buena estabilidad química y térmica (Amna *et al.*, 2013). También se han empleado nanofibras de gelatina en el desarrollo de una matriz artificial extracelular para realizar biosimulaciones en ingeniería de tejidos, apósitos de curaciones y liberación de fármacos (Ko *et al.*, 2010). La seda producida por el gusano *Bombyxmori* ha

sido utilizada para elaborar nanofibras debido a la biocompatibilidad que presenta, además tiene excelentes propiedades intrínsecas; tales como, reacciones inflamatorias mínimas y formas controlables en forma de polvos, películas y fibras (Huang *et al.*, 2011). También se han elaborado nanofibras con matrices extracelulares que contienen cultivos de células madre. Estas estructuras son utilizadas en el tratamiento de lesiones de la médula espinal (Amna *et al.*, 2013). Así mismo, se han elaborado nanofibras de poliuretano que son aplicadas en diferentes tejidos incluyendo el vascular, óseo, neural y tendón/ligamento (Sill y von Recum, 2008).

Por otra parte, es bien sabido que los radicales libres y el estrés oxidativo están relacionados con el cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes, desordenes autoinmunes y desórdenes neurológicos (Hu *et al.*, 2013), por esta razón para atrapar los radicales libres se han elaborado nanopartículas con agentes antioxidantes y de esta manera capturarlos. Así mismo, las nanofibras se han utilizado en el tratamiento de diversas enfermedades, por ejemplo, se pueden usar en el tratamiento del cáncer aplicándolas en dos áreas: 1) el desarrollo de nanoconectores, tales como nanopartículas a las cuales se les pueden agregar fármacos o agentes de formación de imágenes y entonces dirigirlos a los tumores y, 2) elaboración de nanosensores de alto rendimiento para la detección de huellas biológicas de cáncer (Jones, 2007).

Otra aplicación de las nanofibras en el área biomédica consiste en la realización de nanoestructuras que permiten construir bloques de ADN, los cuales pueden ser definidos y controlados; por ejemplo, las nanopartículas de oro y plata han sido utilizadas para monitorear la hibridación del ADN en tiempo real. Tomando en cuenta la versatilidad y potencial de organización de los nanomateriales Tan *et al.* (2011) predijeron que el ADN más allá de sus funciones genéticas desempeñará un papel fundamental en la configuración de los dispositivos ópticos y electrónicos del mañana.

Tabla 2. Algunos polímeros usados en electrohilado para liberación de fármacos y aplicaciones en ingeniería de tejidos.
Table 2. Some polymers used in electrospinning for drug release and tissue engineering applications.

Polímero	Solvente	Diámetro de la fibra	Configuración del inyector	Aplicación (tipo de célula/fármaco)
Poly(ϵ -caprolactona)	Cloroformo y metanol Cloroformo y DMF	2-10 μm ~ 600 nm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (células estomacales de médula de rata)
Colágeno	HFB	180 – 250 nm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (Fibroblastos de la conjuntiva del conejo)
Gelatina	2,2,2-trifluoroetanol	0.29 - 9.10 μm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (no se utiliza)
Fibrinógeno	HFP y Medio esencial mínimo 10X	0.12 - 0.61 μm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (fibroblastos cardiacos neonatales de rata)
Poli (etileno-co-vinil alcohol)	2-propanol y agua	0.2 – 8.0 μm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (células musculares lisas aórticas humanas y fibroblastos dérmicos humanos)
Poli (ácido glicólico) y quitina	HFP	130 – 380 nm	Inyector solo	Ingeniería de tejidos en general (fibroblastos epidérmicos humanos normales)
Poli (L-lactida-co- ϵ -caprolactona)	Acetona	200 – 800 nm	Inyector solo	Ingeniería de tejido vascular (células musculares lisas de las arterias coronarias humanas)
Poli (carbonato de propileno)	Cloroformo	~ 5 μm	Inyector solo	Ingeniería de tejido vascular (células madre mesenquimales de médula ósea de rata)
Poli (L- ácido láctico)	DMF y DCM	~ 313 nm	Inyector solo	Ingeniería de tejido neural (células madre neurales de ratón)
Quitina	HFP	0.163 - 8.77 μm	Inyector solo	Ingeniería de tejido de la piel (queratinocitos humanos normales orales, queratinocitos epidérmicos humanos normales, fibroblastos gingivales humanos normales)
Poli (ϵ -caprolactona) (envoltura) b) Poli (etilenglicol) (núcleo)	a) 2,2,2-trifluoroetanol b) Agua	270 – 380 nm	Coaxial	D.D.S.

Abreviaciones: D.D.S.: Sistemas de liberación de fármacos;
 DMF: N,N-Dimetilformamida; DCM: diclorometano; HFP:
 1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propanol
 Fuente: Sill y von Recum, 2008.

Pero no únicamente las nanofibras se han empleado en la ingeniería de tejidos. Ohkawa *et al.* (2009) elaboraron nanofibras de celulosa de algodón incorporándoles ácido acetilsalicílico o nicotina mediante la técnica de electrohilado para evaluar su liberación para una posible administración epidérmica, obteniendo porcentajes de liberación mayores del 60 %. Además de estas sustancias también se han utilizado antibióticos, fármacos anticáncer, agentes promotores del crecimiento óseo (Anghel *et al.*, 2012), proteínas y ADN (Sill y von Recum, 2008).

Las nanofibras cargadas con fármacos dirigidas para actuar en determinado sitio aún se encuentran en estudio, ya que pueden llegar a perder su efectividad, como resultado de la formación de una proteína de corona alrededor de ellas (Harrison, 2013). Dicho autor también sugiere que factores adicionales como la vía de administración y la acumulación en los tejidos probablemente contribuyan a una absorción específica baja y también recomienda realizar estudios *In vitro* con soluciones biológicamente relevantes con propiedades de direccionamiento. Por lo tanto, es muy importante considerar el tamaño, la forma, las propiedades físicas, la densidad y la carga de las nanofibras, ya que todas éstas afectan la manera en la que pueden viajar a través del cuerpo y si atraviesan o no las membranas biológicas (Jones, 2007).

Aplicaciones de las nanofibras en el área textil

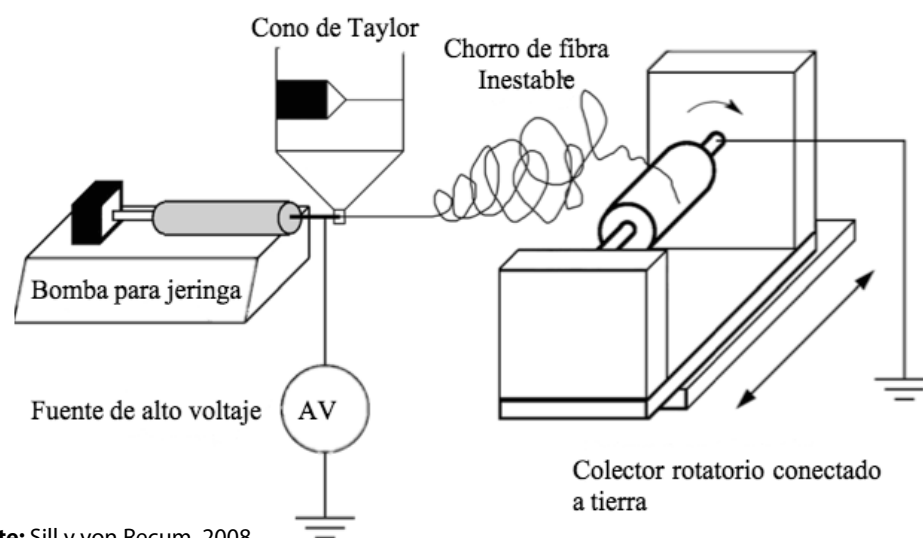
Los textiles pueden proporcionar un sustrato adecuado para el crecimiento de microorganismos, especialmente por la humedad y temperatura apropiada al estar en contacto con el cuerpo humano. Un crecimiento rápido y descontrolado de microorganismos puede provocar la degradación del colorante, el deterioro de las fibras, olores indeseables y el aumento de un riesgo potencial para la salud. Varios factores como la temperatura y humedad adecuada, polvo, manchas de comida y bebida derramada, el sudor, secreciones de las glándulas de la piel y los materiales de acabado de la superficie de los textiles, pueden ser cultivos de enriquecimiento óptimos para un rápido crecimiento de microorganismos. Por esta razón, se han realizado numerosas investigaciones para la modificación antimicrobiana de los textiles (Gao y Cranston, 2008; Dastjerdi y Montazer, 2010). La aplicación de nanofibras inorgánicas y sus nanocompuestos puede ser una buena alternativa, entre las cuales se encuentran materiales nanoestructurados de dióxido de titanio, plata, oro, óxido de zinc, cobre, nanotubos de carbón, arcilla, galio, así como también nanoestructuras inorgánicas cargadas con vehículos orgánicos como ciclodextrinas, micro y nanocápsulas, dendrímeros de nanocompuestos y liposomas cargados (Dastjerdi y Montazer, 2010).

Debido a lo anterior, para satisfacer las necesidades del mercado de nuevos materiales, se han aplicado nuevas tecnologías, entre éstas la aplicación de los nanomateriales en la industria textil, donde estos materiales son utilizados por sus propiedades químicas y físicas para mejorar la calidad de los productos (Su *et al.*, 2013). Por ejemplo, nanofibras de dióxido de titanio (TiO₂) pueden ser utilizadas en la industria

textil, debido a que estas partículas poseen propiedades únicas que pueden ser aplicadas en auto limpieza, agentes antibacterianos y agentes protectores de rayos ultravioleta (UV) (Dastjerdi y Montazer, 2010). Asimismo, se han usado nanofibras de óxido de Zinc (ZnO) como protectores de la radiación UV con la finalidad de crear textiles apropiados que proporcionen protección a la exposición solar (Becheri *et al.*, 2008; Lee, 2009). También se han elaborado nanofibras de poliamida 6 (PA6) con ZnO (Erem *et al.*, 2011) y polipropileno con nanopartículas de ZnO con la finalidad de inhibir el crecimiento bacteriano que ocurre sobre la superficie de los textiles (Erem *et al.*, 2013).

Además, se han producido nanopartículas de plata (AgNPs) las cuales tienen amplia actividad antibacteriana, antifúngica y antiviral (Becheri *et al.*, 2008; Khoddami *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2013). Estas partículas son incorporadas a los textiles mediante inmersión. Las AgNPs se adhieren a las membranas celulares de las bacterias y tienen la capacidad de reaccionar con compuestos de azufre y fósforo. Esto ocasiona que puedan reaccionar con las proteínas de las membranas bacterianas y en el interior de la célula o con compuestos que contienen fósforo, como el ADN. Consecuentemente se detectan cambios morfológicos en la membrana de la bacteria y posibles daños en el ADN causados por la reacción con las AgNPs. Esto induce efectos adversos en la cadena respiratoria o en procesos de la división celular provocando con ello la muerte celular. Mediante la incorporación de las AgNPs en la industria textil se pueden elaborar textiles con actividad antibacteriana, como en fibras de algodón, las cuales pueden ser usadas en la fabricación de batas quirúrgicas, vendas, uniformes, etc. (Khoddami *et al.*, 2011). Lo anterior debido a que las AgNPs han mostrado excelente actividad antimicrobiana contra bacterias Gram-positivas *Staphylococcus aureus* y Gram-negativas *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, así como actividad antifúngica frente a *Candida albicans* (Khoddami *et al.*, 2011). También se han funcionalizado fibras de lana y polipropileno con AgNPs presentando propiedades antibacterianas contra *S. aureus* y *K. pneumoniae* (Radetić, 2013). Anghel *et al.* (2012) elaboraron nanopartículas de magnetita para inhibir la formación de biopelículas de *C. albicans* en textiles, obteniendo con ello mayor resistencia a la colonización de este hongo.

Otra aplicación de las nanopartículas en esta industria ha sido mediante la elaboración de hilos de nanofibras a través de la técnica de electrohilado (Figura 3), los cuales son incorporados a los tejidos con la finalidad de aumentar su resistencia. Además, se pueden aplicar a diversos materiales para formar materiales multifuncionales, la cual se ha utilizado en la elaboración de ropa de protección (Sill y von Recum, 2008; Su *et al.*, 2013). Por otra parte, se han elaborado nanofibras de poliuretano para ser incorporadas a los tejidos y de esta manera proteger la ropa de la penetración de líquidos (Lee, 2009). Además, se han elaborado nanopartículas de sílice incorporadas con un colorante termocrómico aplicándolas en la industria textil para producir diferentes colores, detectar cambios ambientales y brindar una mayor



Fuente: Sill y von Recum, 2008.

Figura 3. Esquema general de la disposición de electrohilado utilizando un colector rotatorio.
Figure 3. General scheme of the arrangement of electrospinning using a rotating collector.

protección contra los rayos ultravioleta (Ribiero *et al.*, 2013).

Aplicaciones de las nanofibras en alimentos

En la industria alimentaria la aplicación de la nanotecnología tiene un amplio campo de acción. Puede ser utilizada en la mejora de suplementos, envases alimentarios, aumento de la gama de texturas, colorantes y saborizantes, en el aumento de la eficiencia de los filtros para productos en estado líquido, etc. (Cushen *et al.*, 2012). Por tal motivo, el uso de nanopartículas en este sector cubre un gran número de aspectos, entre ellos la seguridad alimentaria. La aplicación de las nanopartículas en los alimentos se enfoca principalmente en optimizar la utilización de los sistemas de dispersión, la liberación de compuestos bioactivos a través de liposomas y micelas, para de esta manera incrementar su biodisponibilidad (Tabla 3). La elaboración de alimentos mediante el uso de técnicas de nanoingeniería como es el caso de electrohilado, permite proteger de la degradación a nutrientes importantes, antioxidantes y otras moléculas bioactivas durante su elaboración y almacenamiento (Kaya y Mallikarjunan, 2012).

Varias vitaminas y sus precursores, tales como los carotenoides, son compuestos insolubles en agua, lo cual dificulta su aplicación y su biodisponibilidad en el organismo. Por lo tanto, al ser incorporados en nanopartículas pueden ser dispersadas en sustancias polares para incrementar su biodisponibilidad en el cuerpo humano. A limonadas y jugos de frutas se les han incorporado estos aditivos con el fin de proporcionar un color atractivo (Shrivastava y Dash, 2012). También se han elaborado surfactantes hechos de poli(láctico-co-glicólico), a los cuales se les incorporó α -tocoferol (vitamina E) y ácido ascórbico (vitamina C) para evaluar la actividad antioxidante (DPPH) mostrando buena actividad (Astete *et al.*, 2011). Otro ejemplo de esto es la en-

Tabla 3. Nanotecnología en la industria alimentaria y afines.
Table 3. Nanotechnology in the food and related industries.

Producto	Aplicación
Bebidas funcionales	Aguas saborizadas y leche fortificada con vitaminas y minerales y otros ingredientes funcionales mediante la aplicación de nanoemulsiones para la incorporación y liberación controlada de sustancias bioactivas.
Alimentos y bebidas personalizadas	Nanoemulsiones que liberan diferentes sabores mediante la activación con calor, frecuencia ultrasónica, pH.
Filtros inteligentes	Nanofibras selectivas que pueden distinguir moléculas en base a su forma y tamaño.
Sensores inteligentes	Empaquetamiento con nanosensores que indican cuando el producto no es seguro para su consumo.

Fuente: Sanguansri y Augustin, 2006.

capsulación del epigallocatequina-3-galato (una importante catequina presente en el té verde) en nanopartículas monodispersas utilizando caseinofosfopeptido y quitosano, con la finalidad de incorporarlas en nanocápsulas a los alimentos y de esta manera ejercer su efecto antioxidante (Hu *et al.*, 2013). Una aplicación más del uso de sustancias antioxidantes a través de la nanoencapsulación es la incorporación de extractos de *Elsholtzia splendens* en la elaboración de alimentos funcio-

nales, el uso de estas nanocápsulas aumenta la solubilidad de los antioxidantes, incrementando sus aplicaciones en este sector (Lee *et al.*, 2010).

Actualmente las nanofibras también se han utilizado en los recubrimientos y películas comestibles en una amplia variedad de alimentos, entre los que encontramos frutas, verduras, carnes, chocolates, dulces, productos de panadería y papas fritas (Mohammed *et al.*, 2009). Se han producido películas comestibles de hidroxipropil metilcelulosa reforzadas con nanopartículas de celulosa microcristalina para ser aplicadas a los alimentos con la finalidad que actúen como barreras de humedad, de lípidos y gases, y para prevenir la migración de los componentes del aroma (Bilbao-Sáinz *et al.*, 2010). Se han elaborado películas que contienen AgNPs incorporadas en una matriz de alginato de sodio para recubrir frutas y verduras, logrando con esto una mayor conservación (Mohammed *et al.*, 2009).

Otra aplicación es la elaboración de materiales de envase que contienen nanopartículas con agentes conservadores, los cuales son liberados cuando los alimentos inician su deterioro, permitiendo con esto un suministro controlado de nutrientes y de otros componentes de los alimentos, aumento de la biodisponibilidad de los compuestos bioactivos y alimentos funcionales ricos en nutrientes (Granda *et al.*, 2009; Shrivastava y Dash, 2012). Así mismo, se han desarrollado nanosensores que permiten detectar microorganismos patógenos y micotoxinas presentes en los alimentos, en cualquier etapa de la producción o incluso en los puntos de venta, cuya finalidad es garantizar la inocuidad alimentaria. Actualmente existen nanosensores para la determinación de *E. coli*, *Salmonella infantis* y *Vibrio parahaemolyticus* (Granda *et al.*, 2009; Shrivastava y Dash, 2012).

La técnica de electrohilado también ha sido aplicada en la elaboración de nanocompuestos preparados con polivinil alcohol para encapsular *Lactobacillus gasseri* con el objetivo de preparar nanocápsulas que protejan las propiedades funcionales de este probiótico. Al lograr la sobrevivencia del probiótico se logran también beneficios en el organismo, como el alivio de la hipercolesterolemia, hipertensión, síntomas posmenopáusicos y anticarcinogénesis. Por otra parte, los probióticos tienen espléndidas eficacias terapéuticas contra diversos trastornos intestinales como la diarrea, la intolerancia a la lactosa y enfermedades inflamatorias del intestino (Amna *et al.*, 2013).

La encapsulación de los nutrientes en nanoesferas aumenta la actividad biológica de suplementos dietéticos (Granda *et al.*, 2009). Las micelas pueden atrapar moléculas nanopolares que comúnmente son insolubles, incrementando la solubilidad y biodisponibilidad de compuestos bioactivos, incluyendo lípidos, antioxidantes, saborizantes y vitaminas (Kaya y Mallikarjunan, 2012). Otra aplicación de las nanoestructuras en la industria alimentaria es el uso en los procesos de gelatinización, modificando con ello el valor nutricional de los alimentos. También se pueden utilizar en las interfaces formadas por aceite-agua o aire-agua, de las cuales depende la estabilidad de las espumas y emulsiones

alimentarias (ANFACO-CECOPECA, 2009), que son usadas en productos como mayonesas y helados (Cushen *et al.*, 2012).

Por otro lado, Ahmadi (2009) incorporó diferentes niveles de nanopartículas de plata en alimentos de pollos. Dicho autor reportó un incremento en peso de los pollos estudiados. En el cultivo de plantas comestibles las nanopartículas también han sido aplicadas en la germinación de semillas con la finalidad de incrementar su producción a través de la biotransformación de nanotubos de carbono y nanopartículas de óxido de zinc y otros metales (Tabla 4) (Rico *et al.*, 2011).

Tabla 4. Nanopartículas utilizadas en cultivos de plantas comestibles.

Table 4. Nanoparticles used in food crops.

Nanopartícula	Planta
Aluminio	Lechuga, maíz, pepino, rábano,
Plata	Lino, pepino, lechuga
Óxido de titanio (TiO ₂)	Espinacas
Óxido de Cerio	Maíz, alfalfa
Óxido de zinc	Soya
Oro	Pepino, lechuga
Silicio	Calabacín
Nanotubos de carbón de pared múltiple	Tomate

Fuente: Rico *et al.*, 2011.

A pesar de las grandes aplicaciones de las nanopartículas en los alimentos, ha sido muy lenta su incorporación en este sector, probablemente está relacionada con la legislación del etiquetado de los productos alimenticios y su impacto en la salud del consumidor. Entre las principales barreras que presenta la incorporación de las nanopartículas en la industria alimentaria es la percepción adversa del consumidor, infraestructura costosa para la producción y baja inversión industrial; asimismo, las patentes producidas pueden ser obstáculo para la comercialización de productos elaborados con nanomateriales (Lee *et al.*, 2013). Además, es difícil identificar los alimentos existentes que las contienen. Los fabricantes han comprendido que la incertidumbre que hay en torno a estas partículas puede asustar a los consumidores. Sin embargo, la aplicación de las nanopartículas en la alimentación podría permitir que disfrutemos de alimentos más saludables, más resistentes y de mayor durabilidad, por lo que en la actualidad se encuentran en desarrollo varias investigaciones en torno a la aplicación de las nanofibras en este sector.

CONCLUSIONES

El electrohilado es una técnica sencilla y económica que permite utilizar diferentes materiales para elaborar nanofibras con propiedades y características únicas, lo que

permite ser aplicadas en las áreas biomédicas, textil y de alimentos. El uso de las nanofibras en estos sectores trae consigo numerosas ventajas (mejora en los suplementos alimenticios, inocuidad alimentaria, liberación controlada de compuestos bioactivos y fármacos, actividad antimicrobiana, protección contra los rayos ultravioleta, entre otras más), las cuales se convierten en beneficios para el consumidor de los productos que las contienen. Pero también es cierto que falta mucho por hacer en cuestión de normatividad y reglamentación en productos que contienen estas nanofibras y sus aplicaciones.

PERSPECTIVAS

Aún no se tiene una normatividad que regule el uso y aplicación de las nanopartículas (nanofibras) en las áreas biomédicas, textiles y alimentaria, por lo que sería de gran interés poder implementar dicha normatividad y homogenizarla internacionalmente. Por otra parte, para futuras investigaciones resulta interesante determinar los efectos toxicológicos que las nanofibras podrían tener hacia el usuario final asegurando así las aplicaciones que tendrían y con ello realizar una difusión mayor acerca de los beneficios del uso de las nanopartículas para lograr una aceptación de la población.

AGRADECIMIENTOS

A Conacyt por el apoyo al becario del Doctorado en Ciencias M. en C. Miguel Angel Robles García con número de C.V.U. 311260 y por el apoyo otorgado para estancia corta nacional con número 234272.

REFERENCIAS

- Ahmadi, J. (2009). Application of different levels of silver nanoparticles in food on the performance and some blood parameters of broiler chickens. *World Applied Sciences Journal*, 7(1), 24-27.
- Amna, T., Hassan, M. S., Pandeya, D. R., Khil, M. S., & Hwang, I. H. (2013). Classy non-wovens based on animate *L. gasseri*-animate poly (vinyl alcohol): upstream application in food engineering. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(10), 4523-4531.
- ANFACO-CECOPECA. (2009). Nanotecnología en alimentación. Boletín de Vigilancia Tecnológica.
- Anghel, I., Grumezescu, A. M., Andronescu, E., Anghel, A. G., Fica, A., Saviuc, C., Grumezescu V., Vasile B. S., & Chifiriuc, M. C. (2012). Magnetite nanoparticles for functionalized textile dressing to prevent fungal biofilms development. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 1-6.
- Astete, C. E., Dolliver, D., Whaley, M., Khachatryan, L., & Sabliov, C. M. (2011). Antioxidant Poly (lactic-co-glycolic) Acid nanoparticles made with α -tocopherol-ascorbic acid surfactant. *ACS nano*, 5(12), 9313-9325.
- Becheri, A., Dürr, M., Nostro, P. L., & Baglioni, P. (2008). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles: application to textiles as UV-absorbers. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(4), 679-689.
- Bilbao-Sáinz, C., Avena-Bustillos, R. J., Wood, D. F., Williams, T. G., & McHugh, T. H. (2010). Composite edible films based on hydroxypropyl methylcellulose reinforced with microcrystalline cellulose nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), 3753-3760.
- Castillo-Ortega, M., J. Romero, J., Rodríguez, F., Nájera, A. & Herrera, P. (2009). Fibrous membranes of cellulose acetate and poly(vinyl Pyrrolidone) by electrospinning method: preparation and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 116, 1873-1878.
- Castillo-Ortega, M., Najera-Luna, A., Rodríguez-Félix, D., Encinas, J.C., Rodríguez-Félix, F., Romero, J., & Herrera-Franco, P.J. (2011). Preparation, characterization and release of amoxicillin from cellulose acetate and poly(vinyl pyrrolidone) coaxial electrospun fibrous membranes. *Materials Science and Engineering C: Materials for Biological Applications*, 31, 1772-1778
- Castro-Enríquez, D. D., Rodríguez-Félix, F., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Castillo-Ortega, M. M., Rodríguez-Félix, D. E., Armenta-Villegas L., & Ledesma-Osuna, A. I. (2012). Preparation, characterization and release of urea from wheat gluten electrospun membranes. *Materials*, 5(12), 2903-2916.
- Cavaliere, S., Salles, V., Brioude, A., Lalatonne, Y., Motte, L., Monod, P., Cornu D., & Miele, P. (2010). Elaboration and characterization of magnetic nanocomposite fibers by electrospinning. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(8), 2735-2740.
- Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., & Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry—recent developments, risks and regulation. *Trends in Food Science & Technology*, 24(1), 30-46.
- Dastjerdi, R., & Montazer, M. (2010). A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: focus on anti-microbial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 79(1), 5-18.
- Erem, A. D., Ozcan, G., & Skrifvars, M. (2011). Antibacterial activity of PA6/ZnO nanocomposite fibers. *Textile Research Journal*, 81(16), 1638-1646.
- Erem, A. D., Ozcan, G., & Skrifvars, M. (2013). In vitro assessment of antimicrobial polypropylene/zinc oxide nanocomposite fibers. *Textile Research Journal*. doi: 10.1177/0040517513490060
- Frey, M. W. (2008). Electrospinning cellulose and cellulose derivatives. *Polymer Reviews*, 48(2), 378-391.
- Gao, Y., & Cranston, R. (2008). Recent advances in antimicrobial treatments of textiles. *Textile Research Journal*, 78(1), 60-72.
- Granda, V. M., Valdés, G. A. C., García, C. J. A., & Díaz, G. M. E. (2009). Analytical nanotechnology for food analysis. *Microchimica Acta*, 166(1-2), 1-19.
- Gutiérrez W. C. E., Mendoza A. D., Mondragón G. G., Pérez H. R., Fernández G. M. E., Pérez A. M., Gutiérrez W. E. S., Arenas A. J. A., & Ángeles C. C. (2010). Crecimiento controlado de estructuras unidimensionales de plata: síntesis, caracterización y aplicaciones. Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México.
- Harrison, C. (2013). Nanotechnology: Biological proteins knock nanoparticles off target. *Nature Reviews Drug Discovery*, DOI: 10.1038/nrd3983
- Hu, B., Ting, Y., Zeng, X., & Huang, Q. (2013). Bioactive peptides/chitosan nanoparticles enhance cellular antioxidant activity of (–)-Epigallocatechin-3-gallate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(4), 875-881.

- Huang, J., Liu, L., & Yao, J. (2011). Electrospinning of *Bombyx mori* silk fibroin nanofiber mats reinforced by cellulose nanowhiskers. *Fibers and Polymers*, 12(8), 1002-1006.
- Jones D. (2007). Cancer nanotechnology: Small, but heading for the big time. *Nature Reviews Drug Discovery*, 6, 174-175.
- Kaya, C. H., & Mallikarjunan, K. (2012). Better Nutrients and Therapeutics Delivery in Food Through Nanotechnology. *Food Engineering Reviews*, 4, 114-123.
- Khoddami, A., Shokohi, S. S., Morshed, M., & Abedi, D. (2011). Simultaneous application of silver nanoparticles with different crease resistant finishes. *Fibers and Polymers*, 12(5), 635-641.
- Ko, J. H., Yin, H., An, J., Chung, D. J., Kim, J. H., & Lee, S. B. (2010). Characterization of cross-linked gelatin nanofibers through electrospinning. *Macromolecular Research*, 18(2), 137-143.
- Lee, C. J., Lee, S., Jhon, M. S., & Shin, J. (2013). Factors influencing nanotechnology commercialization: an empirical analysis of nanotechnology firms in South Korea. *Journal of Nanoparticle Research*, 15(2), 1-17.
- Lee, J. S., Kim, G. H., & Lee, H. G. (2010). Characteristics and antioxidant activity of *Elsholtzia splendens* extract-loaded nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), 3316-3321.
- Lee, S. (2009). Developing UV-protective textiles based on electrospun zinc oxide nanocomposite fibers. *Fibers and Polymers*, 10(3), 295-301.
- Mitchell, G. R., & Davis, F. (2011). Electrospinning and tissue engineering. In *Advances on Modeling in Tissue Engineering*. P.R. Fernandes and P.J. Bártolo (eds.), pp. 111-136. Springer Netherlands.
- Moghe, A. K., & Gupta, B. S. (2008). Co-axial electrospinning for nanofiber structures: Preparation and applications. *Polymer Reviews*, 48(2), 353-377.
- Mohammed Fayaz, A., Balaji, K., Girilal, M., Kalaichelvan, P. T., & Venkatesan, R. (2009). Mycobased synthesis of silver nanoparticles and their incorporation into sodium alginate films for vegetable and fruit preservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14), 6246-6252.
- Morgalev, Y. N., Khoch, N. S., Morgaleva, T. G., Gulik, E. S., Borilo, G. A., Bulatova, U. A., Morgalev S.Y., & Ponyavina, E. V. (2010). Biotesting nanomaterials: Transmissibility of nanoparticles into a food chain. *Nanotechnologies in Russia*, 5(11-12), 851-856.
- Ohkawa, K., Hayashi, S., Nishida, A., Yamamoto, H., & Ducreux, J. (2009). Preparation of pure cellulose nanofiber via electrospinning. *Textile Research Journal*, 79(15), 1396-1401.
- Radetić, M. (2013). Functionalization of textile materials with silver nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 48(1), 95-107.
- Ribeiro, L. S., Pinto, T., Monteiro, A., Soares, O. S. G. P., Pereira, C., Freire, C., & Pereira, M. F. R. (2013). Silica nanoparticles functionalized with a thermochromic dye for textile applications. *Journal of Materials Science*, 48, 5085-5092.
- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485-3498.
- Rodríguez K., Gatenholm P., & Renneckar S. (2012). Electrospinning cellulosic nanofibers for biomedical applications: structure and in vitro biocompatibility. *Cellulose*, 19, 1583-1598
- Sanguansri, P., & Augustin, M. A. (2006). Nanoscale materials development—a food industry perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 547-556.
- Schiffman J. D., & Schauer C.L. (2008). A review: Electrospinning of biopolymer nanofibers and their applications. *Polymers Reviews*, 48(2), 317-35.2-
- Shewan, H. M., & Stokes, J. R. (2013). Review of techniques to manufacture micro-hydrogel particles for the food industry and their applications. *Journal of Food Engineering*, 119, 781-992.
- Shrivastava, S., & Dash, D. (2012). Nanotechnology in food sector and agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 82(1), 29-35.
- Sill, T. J., & von Recum, H. A. (2008). Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 29(13), 1989-2006. |
- Son, W. K., Youk, J. H., & Park, W. H. (2006). Antimicrobial cellulose acetate nanofibers containing silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 65(4), 430-434.
- Su, C. I., Lai, T. C., Lu, C. H., Liu, Y. S., & Wu, S. P. (2013). Yarn formation of nanofibers prepared using electrospinning. *Fibers and Polymers*, 14(4), 542-549.
- Su, Y., Li, X., Wang, H., He, C., & Mo, X. (2009). Fabrication and characterization of biodegradable nanofibrous mats by mix and coaxial electrospinning. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(11), 2285-2294.
- Tang, B., Kaur, J., Sun, L., & Wang, X. (2013). Multifunctionalization of cotton through in situ green synthesis of silver nanoparticles. *Cellulose*, 20(6), 3053-3065.
- Tan, S. J., Campolongo, M. J., Luo, D., & Cheng, W. (2011). Building plasmonic nanostructures with DNA. *Nature Nanotechnology*, 6(5), 268-276.
- Xie, J., & Xia, Y. (2008). Electrospinning: An Enabling Technique for Nanostructured Materials. *Material Matters: 3-D Nano and Micro Structures*, 3(1), 19-22.