



#### PROMPT

"Crea una macro fotografía de moléculas de plástico muy magnificadas. La imagen debe transmitir la impresión de una vista de microscopio de ultra alta potencia manteniendo al mismo tiempo una calidad visualmente atractiva e ilustrativa. Ultra HD 8k, motor VRAY, arte conceptual, producto, vibrante, renderizado 3D"

*"Create macro photograph of a highly magnified plastic molecules. The image should convey the impression of an ultra-high-powered microscope view while maintaining a visually engaging and illustrative quality. Ultra HD 8k, VRAY engine, conceptual art, product, vibrant, 3D render"*

# USO DE NANORRECUBRIMIENTOS EN TEXTILES PARA INDUMENTARIA DEPORTIVA

Use of Nanocoatings in Textiles for Sportswear

**Angélica Margoth Quiroga Barreto**

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Regional Distrito Capital  
Centro de Manufactura en Textil y Cuero (CMTC)

## RESUMEN

LA INDUSTRIA DE LA INDUMENTARIA DEPORTIVA está experimentando un auge gracias a la creciente conciencia sobre la salud y el bienestar, lo que ha impulsado la demanda de prendas especializadas. Este crecimiento continuo y la inversión en investigación y desarrollo de materiales prometen seguir transformando la forma en que se evalúa el rendimiento deportivo en el futuro y el uso de tecnologías emergentes en el sistema moda. Dentro de las propiedades deseables en la indumentaria deportiva se incluyen la transpirabilidad, elasticidad, resistencia al agua, ligereza, durabilidad, protección UV, compresión y propiedades antibacterianas; Cada una de estas propiedades desempeña un papel crucial en el rendimiento y la comodidad del deportista durante la actividad física. La incorporación de nanotecnología en los tejidos ha despertado un gran interés debido a sus características únicas y beneficios potenciales en comparación con revestimientos tradicionales. En esta investigación, se dan a conocer los avances más recientes en la aplicación de nanorevestimientos en textiles para indumentaria deportiva a partir de nanopartículas de sílice y de titanio para conferir hidrofobicidad y protección UV.

**Palabras clave:** Indumentaria deportiva, Nanorrecubrimientos, Nanopartículas de sílice, Nanopartículas de titanio, Textiles funcionalizados.

## ABSTRACT

*The sports apparel industry is experiencing a boom thanks to the growing awareness of health and well-being, which has driven the demand for specialized garments. This ongoing growth and investment in research and material development promise to continue transforming the way sports performance is assessed in the future, along with the utilization of emerging technologies in the fashion system. Desirable properties in sports apparel include breathability, elasticity, water resistance, lightweightness, durability, UV protection, compression, and antibacterial properties. Each of these properties plays a crucial role in the athlete's performance and comfort during physical activity. The incorporation of nanotechnology into fabrics has sparked significant interest due to its unique characteristics and potential benefits compared to traditional coatings. In this research, the latest advancements in the application of nanocoatings in textiles for sports apparel are unveiled, utilizing silica and titanium nanoparticle-based coatings to impart hydrophobicity and UV protection.*

**Keywords:** Sportswear, Nanocoating, Silica nanoparticles, Titanium nanoparticles, Functional textile.

## INTRODUCCIÓN

La industria de la moda deportiva ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, consolidándose como un sector clave en la economía global. Según estimaciones, la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) para el mercado mundial de ropa deportiva superará el 7% durante el periodo 2022–2027 (Mordor Intelligence, 2022). Este incremento se atribuye a la creciente conciencia sobre la salud y el bienestar, agravada por los efectos de la pandemia de COVID-19, así como al interés en adoptar estilos de vida activos y mejorar la apariencia, incentivando a los consumidores a incorporar actividades físicas en su rutina diaria (Mordor Intelligence, 2022). Este cambio en la dinámica del mercado ha generado una mayor demanda de ropa deportiva. En Colombia, según datos oficiales de ProColombia y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), las exportaciones de ropa deportiva aumentaron en un 22% durante 2021 en comparación con 2019, registrando el mayor incremento dentro de los textiles manufacturados. Estados Unidos, Ecuador y Panamá lideraron las compras de prendas deportivas de origen colombiano (Gonzalez Litman, 2022).

Algunos de los actores principales en el mercado incluyen a Adidas AG, Nike, Inc., Puma SE, Under Armour, Inc., Lululemon Athletica, Columbia Sportswear Company, Anta International Group Holdings Ltd., Li Ning Company Limited, VF Corporation, Amer Sports Corporation, entre otros (Mordor Intelligence, 2022). La constante evolución en la industria deportiva ha transformado significativamente el sector textil. El progreso en la tecnología aplicada al deporte se centra en la optimización del rendimiento, dando lugar a tendencias como la incorporación de nanotecnología en prendas para mejorar la funcionalidad de los textiles (Lafayette Sports, 2020).

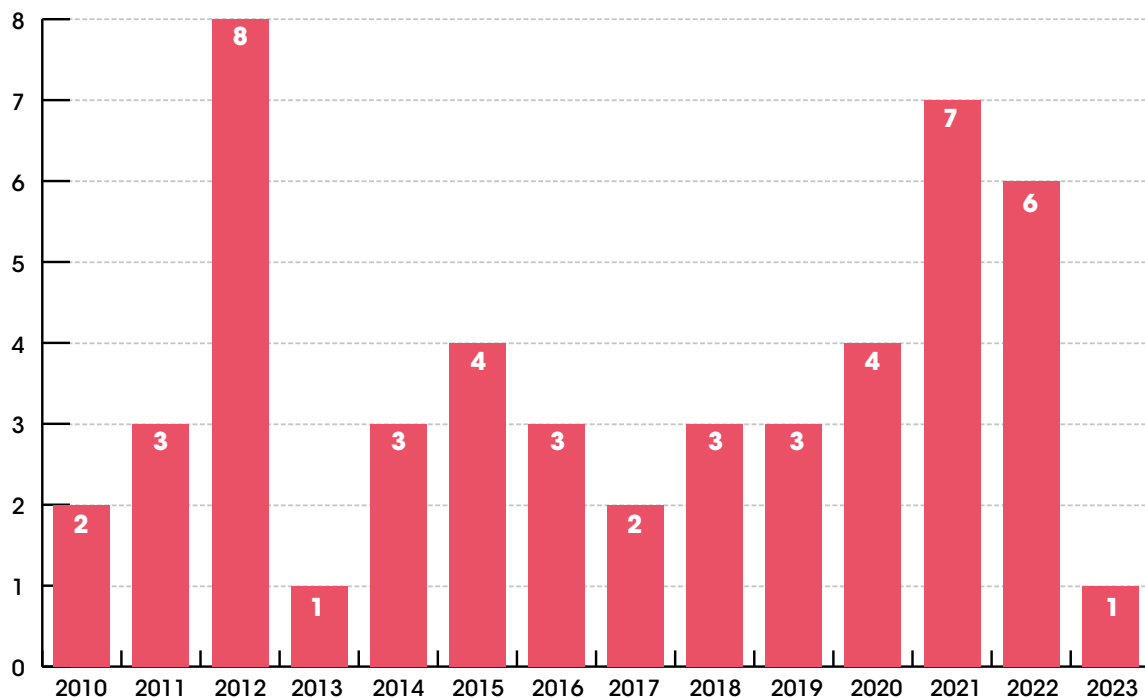
La disponibilidad de prendas deportivas con propiedades mejoradas, como el control de la humedad, la gestión de la temperatura y

otras características que mejoran el rendimiento y previenen molestias y posibles lesiones, ha captado la atención de los consumidores. Se ha observado que estos están dispuestos a pagar más por beneficios adicionales de este tipo (Mordor Intelligence, 2022). Empresas líderes en tecnología para ropa deportiva, como las marcas GORE, Arkema y Polartec, han incurrido en este campo desarrollando textiles que ofrecen alternativas para el bienestar integral del deportista (Lafayette Sports, 2020). Esta investigación presenta avances significativos en la aplicación de nanorrevestimientos para conferir propiedades deseables a textiles deportivos. A través de la recopilación de diversos hallazgos realizados en todo el mundo mediante técnicas bibliométricas, se destaca la importancia de estudios recientes sobre el uso de nanopartículas de sílice y titanio para proporcionar propiedades de repelencia al agua y protección UV en tejidos naturales y sintéticos.

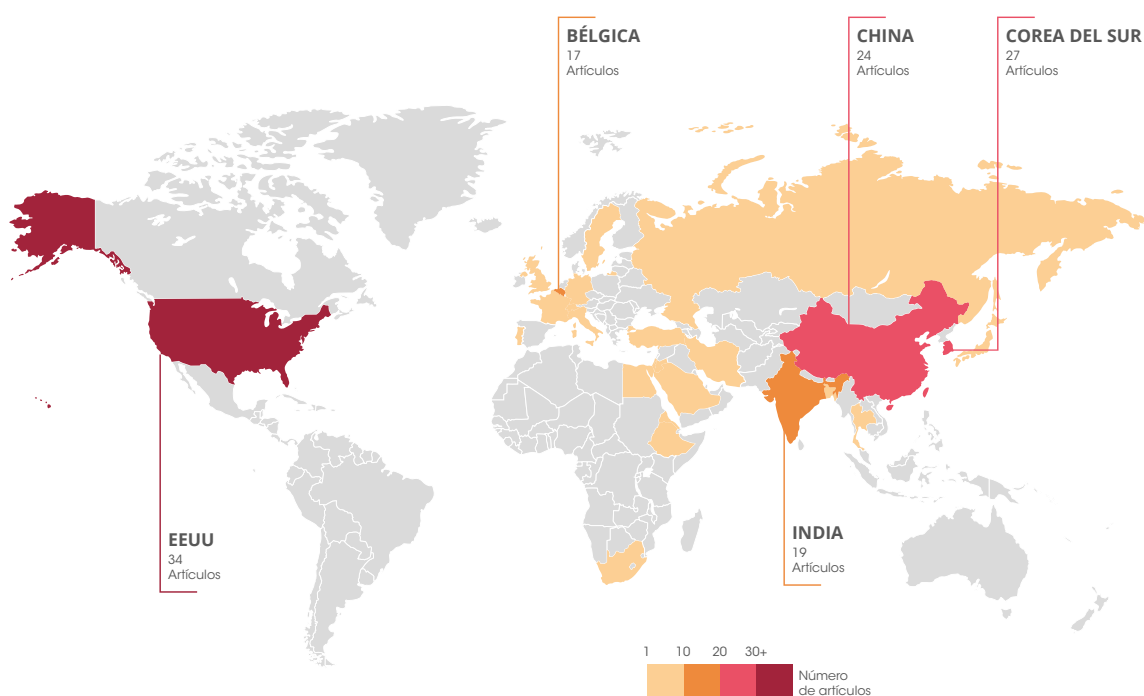
El análisis bibliométrico se hizo mediante el uso de la herramienta Biblioshiny de Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), donde se encontró que se han realizado publicaciones relacionadas en 35 revistas científicas con un promedio de 3,6 artículos por año entre 2010 y 2023. En la Figura 1 se encuentra la producción científica anual que muestra un auge en el año 2012, seguido de un declive hasta el año 2019 y un reciente aumento desde el año 2020, posiblemente causado por los avances científicos referentes a ensayos de medición y tecnologías para la síntesis y aplicación de nanotecnología textil, que permiten generar conocimiento en áreas no exploradas.

En la Figura 2, se observa que los países en que más se realiza producción científica relacionada son: Estados Unidos en primer lugar con 34 artículos, seguido de Corea del Sur con 28, China con 24, India con 19 y Bélgica con 17, y en menor medida Tailandia, Bangladesh, Suiza, Turquía, Arabia Saudita, Egipto y Alemania. En Latinoamérica no se han realizado publicaciones relacionadas que se encuentren en esta base de

**Figura 1.** Producción científica anual de artículos relacionados con la ecuación de búsqueda de la primera fase.



**Figura 2.** Producción científica anual de artículos relacionados con la ecuación de búsqueda de la primera fase.



datos, por lo que es de gran importancia incentivar este tipo de investigaciones en el país para mejorar la competitividad tecnológica y científica en la industria textil y de nanotecnología, así como la divulgación de los hallazgos en revistas reconocidas a nivel internacional.

A partir de la herramienta Tree of Science, se establecen los artículos seminales de los artículos originales de interés (20 publicaciones), los artículos donde se hicieron las primeras aplicaciones del tema (6 publicaciones) y los artículos que sintetizan la información relacionada con los hallazgos más recientes (10 publicaciones).

En la segunda fase, se identificó la necesidad de ampliar la información sobre las aplicaciones de las nanopartículas de sílice y de titanio como componentes principales en la obtención de nanorrecubrimientos. Se realizaron dos búsquedas por separado a partir de una segunda ecuación: ((Silica) AND (Hydrophobic OR durable) AND (textile OR fabric) AND (nanoparticles)) para recubrimientos hidrofóbicos de nanopartículas de sílice, con 272 resultados, y una tercera ecuación: ((Titanium dioxide) AND (textile or fabric) AND (UV protection) AND (nanoparticles)) para recubrimientos con protección de rayos ultravioleta a partir de nanopartículas de titanio con 92 resultados.

De ésta última fase, se seleccionaron únicamente los 20 artículos seminales de cada búsqueda y a partir del contenido, se ahondó sobre la obtención, aplicación y análisis de nanopartículas de sílice y titanio para textiles. Finalmente, las estadísticas se obtuvieron con otro tipo de recursos procedentes de entidades gubernamentales y empresas especializadas en indumentaria deportiva y en la industria textil.

## TEXTILES PARA INDUMENTARIA DEPORTIVA

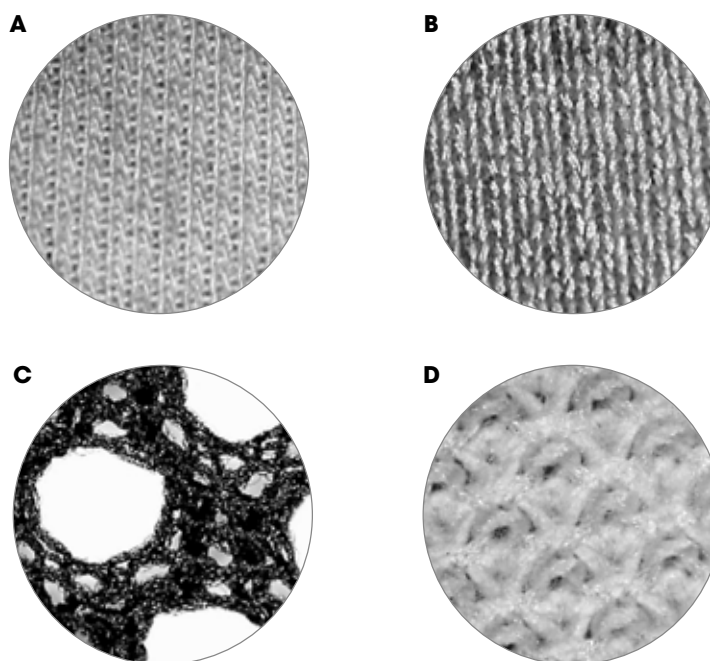
La indumentaria deportiva es la vestimenta, incluido el calzado, que se usa para practicar deporte o ejercicio físico. En general, incluye con-

juntos de chaqueta o sudadera y pantalón largo a juego, pantalones cortos, camisetas o camisas polo, además de prendas especializadas como trajes de baño, trajes húmedos, trajes de esquí y leotardos (Mordor Intelligence, 2022). De acuerdo al tipo de deporte practicado, los materiales necesarios para la indumentaria varían y pueden requerir una o varias propiedades deseables que no siempre son inherentes a los textiles en su estado original. Algunas propiedades deseables son transpirabilidad, elasticidad, flexibilidad, resistencia al agua, ligereza, durabilidad, protección UV, compresión, antibacterial, entre otras.

La transpirabilidad hace referencia a la capacidad de la tela para permitir la circulación del aire y facilitar la evaporación del sudor, manteniendo al deportista fresco y seco durante la actividad física (Ardanuy & Ventura, 2011). En el caso de los deportes de alta intensidad que generan sudoración, es indispensable que la ropa cuente con tecnología de secado rápido y además que tenga propiedades antibacteriales para el control de olores (Aali Mohammadi et al., 2022). La Elasticidad o flexibilidad es la capacidad del textil para estirarse y recuperar su forma original (Morton & Hearle, 2008) brindando libertad de movimiento y comodidad durante el ejercicio. Esta propiedad es crítica para deportes tales como gimnasia, ciclismo y patinaje que exigen el movimiento simultáneo de varios miembros del cuerpo.

En deportes acuáticos o en condiciones húmedas, la indumentaria deportiva puede beneficiarse de una resistencia al agua para evitar la absorción y mantener la ligereza, ya que las prendas livianas minimizan la carga adicional y permiten una mayor agilidad y velocidad en los movimientos (Kumar, 2021). La resistencia al desgaste y a la abrasión es importante para garantizar que la indumentaria pueda soportar el uso intensivo y prolongado durante los entrenamientos (Fung, 2005). Para actividades al aire libre, una buena protección contra los rayos ultravioleta es esen-

**Figura 3.** Muestras textiles de tejidos comúnmente usados en indumentaria deportiva observados a través de microscopía digital. (a) Algodón (b) Elastano (c) Mallatex® (d) Oxford® (Autoría: Elaboración propia).



cial para resguardar la piel del daño causado por el sol (Hassabo et al., 2022).

Algunas prendas deportivas ofrecen compresión, que ayuda a mejorar la circulación sanguínea, reducir la vibración muscular y acelerar la recuperación después del ejercicio (Lin et al., 2012). En textiles deportivos, si bien las fibras sintéticas son más comunes debido a sus propiedades técnicas específicas, también se utilizan algunas fibras naturales en menor medida. Algunas de las fibras sintéticas que pueden encontrarse en textiles deportivos son el poliéster, la poliamida, el elastano y el polipropileno.

El poliéster es una fibra sintética duradera y resistente que tiene la capacidad de repeler la humedad, preservar el color y una alta resistencia a la tracción, manteniendo su forma, incluso después de numerosos lavados y uso prolongado. Por su parte, la poliamida es otra fibra sintética resistente, flexible y liviana, lo que la convierte en una opción ideal para prendas que requieren movilidad y comodi-

dad; También tiene buenas propiedades de absorción de humedad y se seca rápidamente, lo que ayuda a mantener al deportista fresco y seco (Mather & Wardman, 2015).

El elastano es una fibra altamente elástica que se utiliza en combinación con otras fibras, como el poliéster o la poliamida, para brindar libertad de movimiento en prendas deportivas ajustadas. El elastano permite que las prendas se estiren y se ajusten al cuerpo sin perder su forma original. En el caso del polipropileno, es una fibra ligera y de secado rápido que se utiliza en prendas de base o de capa intermedia. Tiene excelentes propiedades de gestión de la humedad al alejar el sudor de la piel, lo que ayuda a mantener al deportista seco y cómodo durante el ejercicio; También es resistente al moho y a las bacterias, lo que lo hace ideal para actividades intensas (Mather & Wardman, 2015).

Por otro lado, algunas fibras naturales usadas en textiles deportivos son el algodón, bambú, cáñamo y lana merina. El algodón es

una de las fibras naturales más utilizadas en la industria textil en general, debido a sus ventajas únicas, tales como comodidad, suavidad y transpirabilidad, las cuales han sido aplicadas en diversos campos, como la medicina, el ámbito militar, la confección de prendas y dispositivos electrónicos portátiles. No obstante, no es tan común en textiles deportivos debido a sus propiedades de absorción de humedad y retención de agua, además de algunas desventajas, como una resistencia mecánica relativamente baja, tendencia a arrugarse y ensuciarse fácilmente, alta inflamabilidad y una capacidad limitada para bloquear los rayos UV (D. Chen et al., 2018); Aunque es cómodo y transpirable, tiende a absorber el sudor y retener la humedad, lo que puede resultar incómodo durante actividades deportivas intensas. Sin embargo, al ser un recurso renovable, puede ser una opción más ecológica si se realiza un cultivo sostenible (Shuvo, 2020).

La fibra de bambú se ha vuelto más popular en la industria textil debido a sus características naturales beneficiosas. Es suave, transpirable y tiene propiedades de absorción de humedad similares a las del algodón. Además, el bambú es antibacterial y ayuda a regular la temperatura corporal (F. Wang et al., 2015). Así mismo, los textiles de cáñamo son transpirables y regulan la humedad de manera eficiente, manteniendo al deportista seco y cómodo; Además, son duraderos y resistentes al desgaste y tienen propiedades antibacterianas y desodorizantes, lo que contribuye a reducir los olores asociados con el sudor. También, proporciona protección solar adicional debido a su capacidad de bloqueo de los rayos UV (Vandepitte et al., 2020).

La lana merina tiene propiedades aislantes y de regulación de la temperatura, lo que la hace adecuada para prendas deportivas utilizadas en climas fríos. Es transpirable y ayuda a absorber la humedad, manteniendo al deportista seco y cómodo durante el entrenamiento. También

tiene propiedades antibacterianas naturales que ayudan a reducir los olores (Mather & Wardman, 2015). Aunque las fibras naturales son una opción más sostenible debido a su origen renovable, menor huella de carbono y capacidad de biodegradación, su aplicación en prendas deportivas se encuentra restringida debido a sus propiedades inherentes que no son funcionales para las necesidades de los usuarios. No obstante, es factible conferir nuevas propiedades a estos tejidos mediante la aplicación de recubrimientos y tratamientos adicionales, lo cual posibilita su adaptación a las exigencias del deportista.

En el caso de los textiles de algodón, los recubrimientos de poliuretano son ampliamente utilizados con el fin de conferirles impermeabilidad, aumentar su durabilidad y mejorar su resistencia a la abrasión (Rahman Bhuiyan et al., 2019). Asimismo, los recubrimientos de sílicona son empleados sin generar un impacto notable en la apariencia y flexibilidad de la tela, aunque pueden afectar la transpirabilidad y el color (Khattab et al., 2020). Por otro lado, la cera de parafina se presenta como una alternativa más económica para lograr textiles hidrofóbicos, no obstante, afecta la textura y apariencia al igual que la cera de abejas. En contraste, los recubrimientos acrílicos se caracterizan por ser duraderos y flexibles, y por lo general no alteran la apariencia ni la transpirabilidad del algodón (Fung, 2002). Estos recubrimientos pueden tener un impacto en la biodegradabilidad del textil y convertirse en posibles contaminantes cuando se desechan, afectando tanto las fuentes de agua como los suelos. Por lo tanto, se han generado alternativas que puedan mitigar este riesgo como recubrimientos a base de aceites vegetales y biopolímeros, así como el uso de nanorrecubrimientos (Cheng et al., 2018).

Se han introducido muchos nanomateriales, incluyendo compuestos de sílice, titanio, zinc, plata, nanotubos de carbono y grafeno, en la superficie de las fibras de algodón prístinas para fabricar nuevas telas multifuncionales;

Esto hace posible la aplicación de estos textiles en campos extensos, ya que pueden tener superhidrofobicidad, protección ultravioleta (UV), ignifugación, propiedades antibacterianas, conductividad, propiedades antiarrugas y comportamiento antiestático (D. Chen et al., 2018).

En el siguiente apartado se profundizará sobre el uso de nanotecnología en la industria textil y las ventajas y desventajas de su utilización en tejidos de fibras naturales.

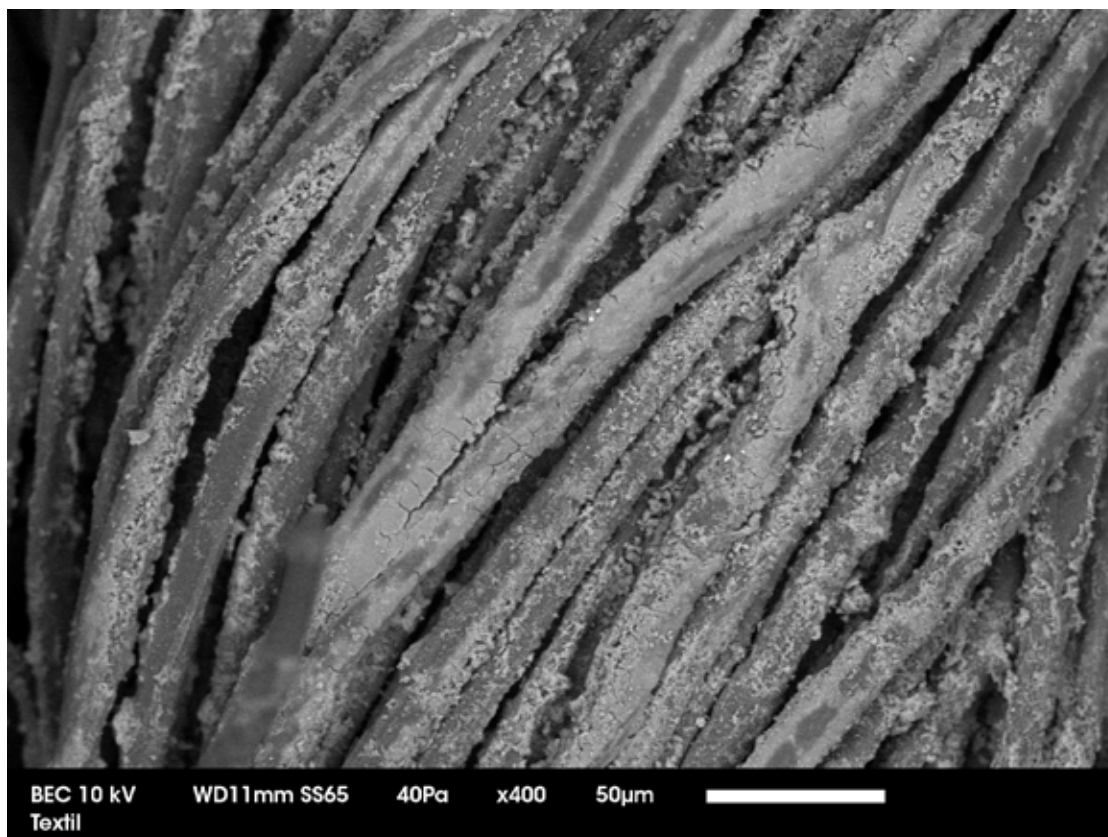
## NANOTECNOLOGÍA EN EL MEJORAMIENTO DE TEXTILES

En los últimos años, se han desarrollado materiales textiles de alto rendimiento mediante la nanotecnología en el acabado textil, y de esta manera, se han impartido nuevas propiedades que han mejorado el valor añadido de los

productos en comparación con el acabado con el agente tradicional (El-Naggar et al., 2016).

Una característica deseable en los textiles deportivos es su capacidad para proteger al usuario de los dañinos rayos UV. La radiación ultravioleta (UV) puede ocasionar daños y reacciones tanto agudas como crónicas, como el envejecimiento prematuro de la piel y quemaduras solares. La protección de la piel contra la radiación solar es un aspecto cada vez más relevante en el campo del acabado textil, dado que el propio tejido no siempre proporciona una protección adecuada. Para contrarrestar esta situación, se emplea un acabado especial adicional que brinda protección solar mediante el uso de estabilizadores UV (Sundaresan et al., 2012). Se utilizan tanto bloqueadores de UV orgánicos como inorgánicos. Los bloqueadores orgánicos, también conocidos como ab-

**Figura 4.** Tela Oxford funcionalizada con recubrimiento de nanopartículas de sílice en microscopía SEM (Autoría propia).



sorbentes de UV, absorben los rayos ultravioletas, mientras que los bloqueadores inorgánicos como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), dispersan eficientemente tanto UVA como UVB, los principales causantes de cáncer de piel. En comparación con los absorbentes de UV orgánicos, los bloqueadores inorgánicos ahora son preferidos debido a sus propiedades de no toxicidad y estabilidad química bajo radiación UV (Paul et al., 2010).

Las nanopartículas de  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$  son reconocidas por su eficacia en el bloqueo de la luz ultravioleta (UV). Para conferir propiedades como autolimpieza, acción antimicrobiana y protección UV, se depositan nanopelículas de  $\text{TiO}_2$  en superficies resistentes al calor, como vidrio y sílice, a altas temperaturas. Sin embargo, debido a la baja resistencia al calor de los materiales textiles, como el algodón, se han explorado métodos alternativos de baja temperatura para lograr este objetivo (Paul et al., 2010).

Otra característica deseable en textiles deportivos es que sean hidrofóbicos o resistentes al agua y altamente durables. El resguardo ante condiciones climáticas adversas, como lluvia, viento y bajas temperaturas durante el entrenamiento, ha impulsado la evolución de tejidos con propiedades impermeables, pero a su vez, transpirables. Estos textiles han logrado una permeabilidad integral a los vapores de humedad y al aire, al tiempo que restringen completamente la entrada y absorción de líquido. Para alcanzar estos resultados, ha sido esencial el desarrollo de estructuras textiles innovadoras y técnicas de acabado avanzadas. Este tipo de materiales podría ser concebido mediante la implementación de tejidos de alta densidad, aplicaciones poliméricas y laminación de películas que pueden incluir nanorrecubrimientos (Ahmad et al., 2023).

Algunos acabados textiles tradicionales, ampliamente usados para impermeabilizar, involucran resinas, compuestos de ácidos grasos con cloruro de cromo, emulsiones de parafinas y ceras, siliconas y fluorocarbonados (Yur-

dakul et al., 2014). Dentro de sus ventajas se encuentra que protegen los materiales textiles contra el agua y las manchas, son resistentes al lavado y a la limpieza en seco y debido a la formación de una capa de película en la superficie del textil, protegen los colores originales (Yurdakul et al., 2014); Sin embargo, los compuestos fluorocarbonados y con metales pesados, pueden resultar tóxicos para el ser humano y para el medio ambiente, por lo que su uso es cada vez menos frecuente y se buscan alternativas con menor impacto (Sharif et al., 2022). En el caso de las siliconas, resinas, parafinas y ceras, el aspecto de los textiles puede verse modificado, lo que afecta el diseño y confección de las prendas.

Una alternativa para esta aplicación es el uso de nanorrecubrimientos a base de dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) que permiten generar un efecto loto sobre la superficie de las fibras. El efecto loto es un término utilizado para describir la característica de repelencia al agua y autolimpieza observada en algunas superficies naturales y artificiales. Este fenómeno se nombra así debido a la similitud con la forma en que las hojas de loto repelen el agua y mantienen una apariencia limpia, ya que las gotas de agua tienden a formar esferas, debido a la combinación de la tensión superficial y la baja adhesión; Se basa en la micro y nanoestructura de la superficie, lo que permite que las gotas de agua no se adhieran fácilmente, sino que se mantengan en forma de esferas y puedan rodar, arrastrando partículas de suciedad en el proceso (Karthick & Maheshwari, 2008).

Las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  también pueden usarse para otra aplicación deseable en la indumentaria deportiva, referente al desarrollo de acabados para materiales de secado rápido que permitan la transpirabilidad y eliminen eficazmente el sudor en actividades de alto impacto. El rendimiento de secado de un tejido depende de los tipos de fibras, número de hilos y composiciones estructurales; pueden resultar

en diversos niveles de secado al controlar las capacidades de absorción de agua, capilaridad y transferencia de vapor (Nasrin et al., 2023). Por ejemplo, los textiles sintéticos tienen un rendimiento más efectivo en el mantenimiento de la temperatura corporal durante el ejercicio debido a sus propiedades de alta capilaridad.

A continuación, se profundiza en las características de los textiles con protección UV, así como en los que son repelentes al agua y de secado rápido.

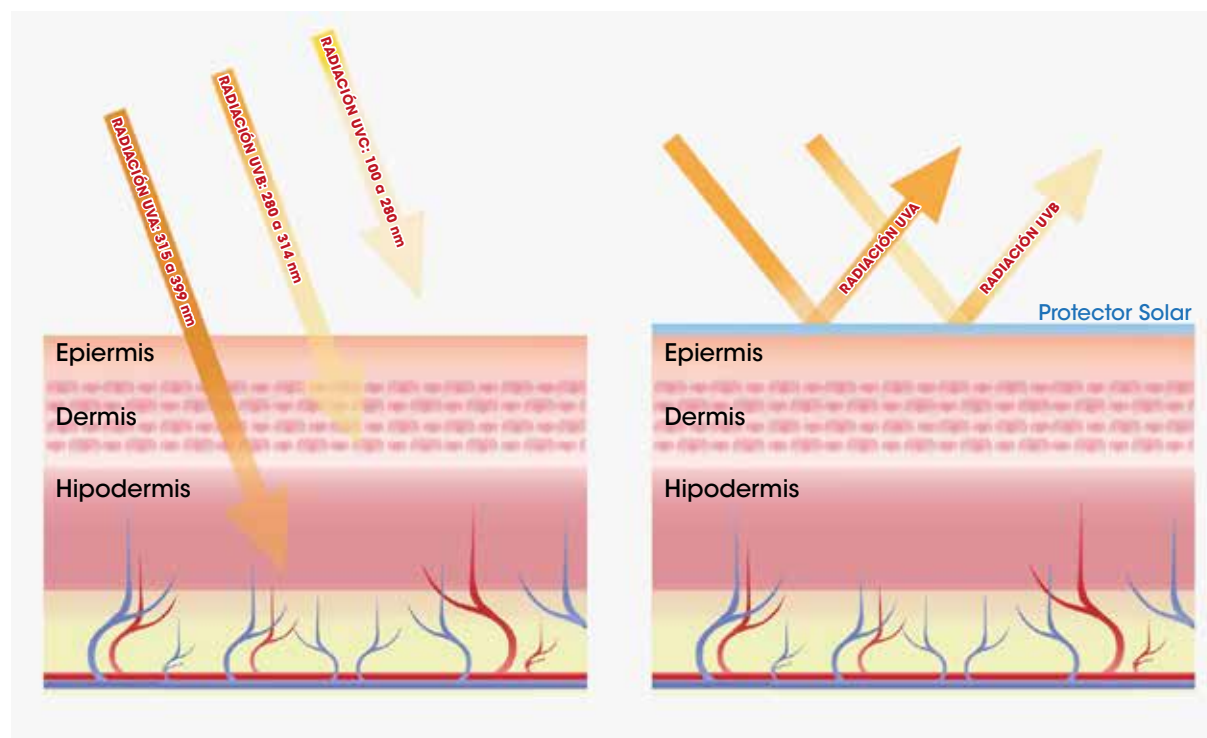
## TEXTILES CON PROTECCIÓN UV

A pesar de que la atmósfera absorbe la mayoría de las radiaciones nocivas emitidas por el sol, el 5% de las radiaciones dañinas llegan a la superficie de la tierra, lo que implica un riesgo para la salud de la piel (D'Orazio et al., 2013). El sol emite tres tipos de radiación UV: UVA, UVB y UVC. El espectro visible es aproximadamente del

rango de 400 a 700 nm de longitud de onda. Los rayos UVB van desde 280 a 320 nm y son la principal preocupación para la protección, pues se cree que son la causa principal de quemaduras solares, bronceado, arrugas, envejecimiento de la piel y cáncer de piel (Kibria et al., 2022).

Los rayos UVA van desde 320 a 400 nm. El daño real a la piel humana por la radiación UV es una función de la longitud de onda de la radiación incidente y las longitudes de onda de máximo peligro que, para la piel, son 305-310 nm. Por lo tanto, para ser útiles en la protección de los usuarios contra la radiación solar UV, los textiles deben demostrar efectividad en el rango de 300-320 nm (Sundaresan et al., 2012b). La transmisión de los rayos UV varía con la duración del día, la estación, la latitud y la altitud. Por ejemplo, la transmisión de los rayos UVB aumenta con cada grado de disminución de la latitud. Por lo tanto, factores meteorológicos como la niebla, las nubes

**Figura 5.** Incidencia de rayos UV en la piel con y sin protector solar  
(Autoría: Letrado P.J., 2023, SENNOVA).



y la contaminación tienen un impacto en la disminución de la transmisión de los rayos UV (Kibria et al., 2022).

Los absorbentes UV son compatibles con tintes y estos acabados se pueden aplicar por el método normal de almohadilla-secado-curado entre 30 y 40 g/L según el tipo de fibra y su construcción. Los materiales cerámicos como dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) tienen una capacidad de absorción en la región UV de 280–400 nm y reflejan los rayos visibles e infrarrojos (IR) (Sundaresan et al., 2012b).

Sin embargo, la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  bajo rayos UV, es una de las principales limitaciones para desarrollar su uso en telas o textiles coloreados, ya que puede descomponer moléculas de tinte, lo que provoca decoloración del material coloreado (Jafari-Kiyan et al., 2017). El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se usa ampliamente en procesos fotocatalíticos en lugar de cualquier otro semiconductor, incluyendo óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), dióxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ), dióxido de zirconio ( $\text{ZrO}_2$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ya que es químicamente y térmicamente estable y no tóxico (Kibria et al., 2022). Las propiedades especiales de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , como una mayor estabilidad y antibiosis de amplio espectro duradera y segura, han abierto el camino para nuevas aplicaciones como material multifuncional atractivo (Nyamukamba et al., 2018).

Se han funcionalizado textiles de algodón utilizando nano- $\text{TiO}_2$  como partículas funcionales por muchos enfoques, a través del proceso sol-gel *in situ*, la pulverización catódica, la irradiación ultrasónica *in situ*, la deposición en capa atómica, así como las técnicas de inmersión (D. Chen et al., 2018). Para depositar nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en algodón, se emplea un método de inmersión en el cual se introducen en los espacios intersticiales de las fibras mediante el hinchamiento de la matriz de algodón durante la fase inicial de humectación. Actualmente, se utilizan técnicas

como el sol-gel y la inmersión en caliente para generar películas delgadas y porosas de  $\text{TiO}_2$  en el tejido (Paul et al., 2010). Para la obtención de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , se emplean diversas técnicas, entre las que destacan la termólisis, el método sol-gel, el ultrasónico, el solvotérmico y la técnica hidrotérmica. Estos métodos permiten llevar a cabo reacciones químicas en medios acuosos u órgano-acuosos, como el uso de isopropanol/ $\text{H}_2\text{O}$ . Cada una de estas técnicas ofrece ventajas particulares en términos de control de tamaño de partícula, estructura y propiedades físicas, lo que brinda flexibilidad en la preparación de  $\text{TiO}_2$  NPs para diversos propósitos y aplicaciones (El-Naggar et al., 2016).

En el siguiente apartado se profundizará sobre los métodos de obtención y las características principales de las nanopartículas de dióxido de titanio y dióxido de sílice, así como su uso en otros materiales.

## NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO ( $\text{TiO}_2$ )

Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  se han utilizado para lograr propiedades antibacterianas, autolimpiables, protección UV, retardante de llama, hidrofóbicas o hidrofílicas, degradación de tintes en efluentes textiles y teñido de portadores libres de poliéster. Además, se pueden utilizar como un nano escudriñamiento fotográfico y un nano blanqueo fotográfico de algodón y lana, y como nano catalizador para la reticulación de celulosa con ácidos policarboxílicos (Akhavan Sadr & Montazer, 2014). Adicionalmente, debido a su gran área de superficie específica y alta energía superficial, el  $\text{TiO}_2$  a escala nanométrica tiene una gran afinidad por las telas (Kibria et al., 2022).

El  $\text{TiO}_2$  existe en tres formas: anatasa (que tiene una longitud de onda de 388 nm), rutilo y brookita. La anatasa es metaestable a temperaturas más bajas y tiene una actividad

catalítica excelente en comparación con el rutilo. Cuando el dióxido de titanio es irradiado con luz que tiene una energía mayor que la de sus brechas de banda, se forman pares electrón-hueco en la superficie, provocando reacciones de reducción-oxidación (Isley & Penn, 2006). Como consecuencia, los electrones en el  $\text{TiO}_2$  saltan desde la banda de valencia a la banda de conducción, lo que resulta en la formación de pares de electrones ( $e^-$ ) y huecos eléctricos ( $h^+$ ) en la superficie del fotocatalizador. Los electrones negativos y el oxígeno forman  $\text{O}_2^-$ , mientras que los huecos eléctricos positivos y el agua forman radicales hidroxilo (Kibria et al., 2022). Para la síntesis de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , se han utilizado una amplia variedad de técnicas; Se producen mediante procesos hidrotermales, reacciones asistidas por líquidos iónicos, enfoques biológicos, síntesis sol-gel y técnicas de molienda en bola, entre otras (Lisfi et al., 2017).

El procesamiento sol-gel es uno de los procesos más populares y consiste en la conversión química de sales de titanio o soluciones de sustancias organotitanio en hidróxido de titanio monomérico ( $\text{Ti}(\text{OH})_4$ ), y su posterior policondensación con la formación de partículas coloidales (Mironyuk et al., 2020). El pH de la solución y la tasa a la que se suministra el precursor afectan el tamaño de las partículas. Otro método es la irradiación sonocatalítica que ha demostrado ser una técnica efectiva para la síntesis de  $\text{TiO}_2$  nanocristalino a bajas temperaturas; También ha sido usado para depositar nanopartículas de óxidos metálicos en diferentes fibras textiles (Akhavan Sadr & Montazer, 2014).

El método de síntesis es un proceso químico que utiliza altas temperaturas y altas presiones en un entorno acuoso; se ha estudiado *in situ* utilizando radiación de sincrotrón y difracción de rayos x de dispersión de energía (Rehan et al., 2011). Por otro lado, la molienda es un método físico que busca disminuir el tamaño de

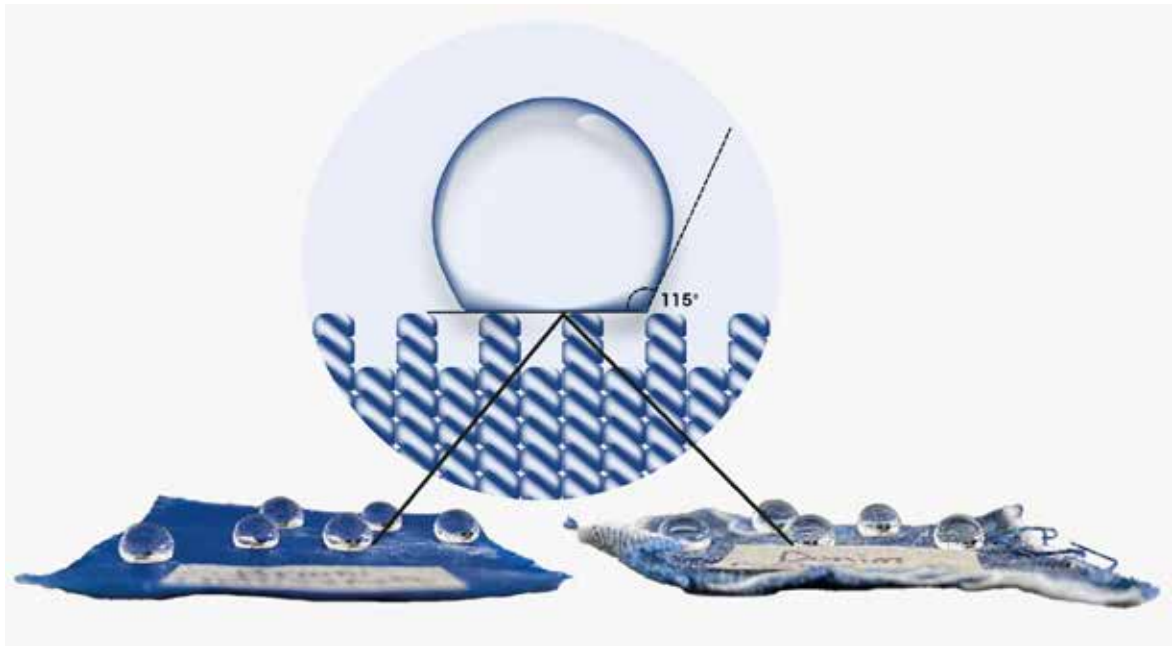
partícula usando bolas de acero; Requiere un equipo especializado y puede presentar una alta dispersión (Carneiro et al., 2014). En caso de que el proceso de síntesis no se realice *in situ*, para funcionalizar textiles, se prepararon películas delgadas que contienen nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  utilizando metodologías de deposición a temperatura relativamente alta, como deposición química de vapor, pulverización, sol-gel y técnicas de inmersión (Ugur et al., 2011).

Para caracterizar las nanopartículas de titanio, se evalúa la morfología superficial y la forma mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDX), entre otros. La cristalinidad y el tamaño de partícula se determinan a partir de difracción de rayos x (XRD) y las propiedades ópticas mediante un ensayo de espectroscopía infrarroja por transformada de fourier (FTIR) donde se pueden especificar los posibles grupos funcionales presentes en las muestras sintetizadas en el rango entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$  (Irshad et al., 2021). La protección UV se evalúa mediante una prueba de espectrofotometría de reflexión difusa UV-Vis (Ghamarpoor et al., 2023).

## TEXTILES HIDROFÓBICOS

Las superficies superhidrofóbicas han sido objeto de numerosas investigaciones debido a sus propiedades únicas que las hacen altamente adecuadas para aplicaciones de auto-limpieza, anti-biofouling, anticorrosión, anti-escarcha y separación de aceite/agua. Se ha establecido que la combinación de rugosidad a escala micrométrica y nanométrica junto con un material de baja energía superficial puede resultar en ángulos de contacto con el agua superiores a  $150^\circ$ , un bajo ángulo de deslizamiento y el efecto de auto-limpieza (Raeisi et al., 2021a).

La superhidrofobicidad se define por dos criterios: un ángulo de contacto con el agua muy alto y un ángulo de desprendimiento

**Figura 6.** Textiles hidrófobos y medición del ángulo de contacto (Autoría propia).

muy bajo (Lee & Michielsen, 2006). El ángulo de contacto se puede definir como la capacidad de un líquido para mojar la superficie de un sólido y depende de la relación que hay entre las fuerzas cohesivas del líquido y las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido (Kwok & Neumann, 1999).

Para conferir esta propiedad a los textiles, se han utilizado recubrimientos nanotecnológicos que permiten modificar la superficie. Es el caso de (Yu et al., 2019) que usaron nanopartículas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) con siloxano para obtener un recubrimiento en spray capaz de conferir superhidrofobicidad a diferentes superficies como concreto, vidrio, madera, tela de algodón, entre otros, mediante un proceso de aspersión por triplicado y secado a  $120^\circ\text{C}$ , obteniendo ángulos de contacto superiores a  $150^\circ$  en cada material. Por su parte, (Landage et al., 2012) usaron el agente repelente al agua TUBIGUARD® a base de fluorocarbono combinado con nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  sintetizadas por el método Stober, para generar una superficie hidrofóbica en textiles de algodón que disminuyera el con-

sumo del agente comercial sin afectar el desempeño del material funcionalizado.

También se han usado recubrimientos a partir de dos o más tipos de compuestos inorgánicos nanoparticulados, como (Latthe et al., 2014) que usaron  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  para obtener una solución que produce superficies superhidrofóbicas y autolimpiantes en policarbonato; o (Velayi & Norouzbeigi, 2023) que construyeron membranas de malla nanocompuestas a partir de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  con resina epóxica para generar una superficie con propiedades superhidrofóbicas sobresalientes, una resistencia química excepcional, una excelente durabilidad mecánica y efecto anti-hielo. Sin embargo, el uso de nanopartículas de dióxido de sílice no es indispensable, pues se ha logrado obtener las mismas propiedades superhidrofóbicas con compuestos nanoparticulados como óxido de zinc (Patil et al., 2019), dióxido de titanio (Z. Wang et al., 2017), nitrato de plata (Gao et al., 2021), melanina (Xue et al., 2021), óxido de cobre (Ghashghaee et al., 2019), entre otros. Además, tradicionalmente se usan otros

recubrimientos a base de polímeros y biopolímeros como el quitosano (Raeisi et al., 2021b, 2021a), resinas, siliconas (T. Chen et al., 2019) y compuestos fluorados (Miao et al., 2022).

Aun así, las nanopartículas de sílice ofrecen diversas ventajas en sus aplicaciones en textiles, pues además de conferir superhidrofobicidad, también pueden generar superficies oleofóbicas, mejorar la resistencia mecánica, proporcionar protección UV y antimicrobiana, reducir arrugar y pliegue y mejorar la transpirabilidad (Riaz et al., 2019).

## NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SÍLICE (SiO<sub>2</sub>)

Las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> tienen una versatilidad excepcional debido a sus múltiples propiedades al ser incorporadas en textiles; Estas van desde un aumento en la resistencia mecánica (Dong et al., 2010), la obtención de textiles hidrófobos (Anjum et al., 2020), oleóforos e ignífugos, la capacidad para absorber y dispersar la radiación ultravioleta (Attia et al., 2017), una mejora en la conductividad eléctrica (Patel et al., 2015), y actuar como reservorios para la liberación controlada de sustancias activas como fragancias y agentes antimicrobianos (Slavova et al., 2020).

Existen varios métodos de síntesis, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones; El método sol-gel implica la hidrólisis y la policondensación de compuestos de silicio, como el Tetraetil Ortosilicato (TEOS), en solución. Permite un control preciso del tamaño de las partículas y la posibilidad de incorporar aditivos durante la síntesis, además de realizar la funcionalización in-situ del textil (Tabatabaei et al., 2006). En el proceso de precipitación química, se mezclan soluciones de silicio con agentes precipitantes para obtener nanopartículas de sílice; Es un método económico, pero el control del tamaño de las partículas es menos preciso que en el método de sol-gel (Li et al., 2021).

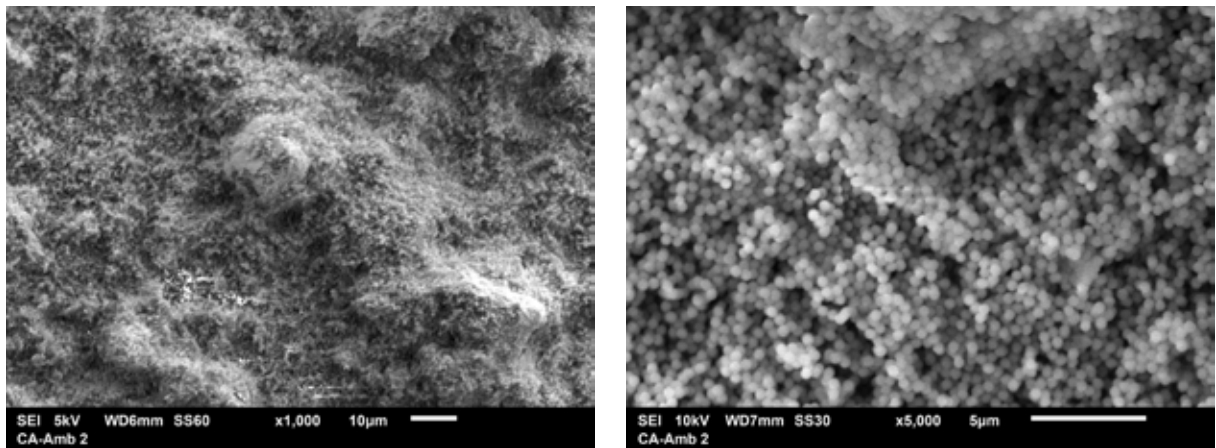
Otro método consiste en crear una emulsión de agua en aceite y posteriormente añadir

reactivos precursores para la formación de sílice; Esto permite la obtención de partículas uniformes y estables. En una primera fase, se disuelve el precursor de sílice, comúnmente TEOS, en un solvente orgánico inmiscible con agua, como el Tolueno o el Hexano; Aparte, se prepara la fase acuosa disolviendo un agente emulsionante en agua. La fase oleosa se agita vigorosamente y se introduce en la fase acuosa; Esto provoca la formación de pequeñas gotas de fase oleosa dispersas en la fase acuosa, creando así una emulsión inversa. Finalmente, la reacción de hidrólisis y condensación del TEOS se inicia mediante la adición de un catalizador alcalino. Esta reacción forma enlaces de sílice y conduce a la creación de nanopartículas de sílice (Kang et al., 2022).

Por otro lado, el método de pirólisis láser consiste en usar un láser de alta energía para calentar precursores de sílice y formar nanopartículas en estado gaseoso. Este método es adecuado para producir partículas muy pequeñas y es útil en aplicaciones de textiles electrónicos. El precursor se disuelve en una mezcla de etanol y agua, para crear una solución homogénea; Ésta se introduce en una cámara de aerosol y un láser de CO<sub>2</sub> o un láser de excímero, se enfoca en las gotas para calentarlas y vaporizarlas, lo que lleva a la formación de especies gaseosas ricas en silicio. En la fase gaseosa, las especies ricas en silicio se nuclean y comienzan a crecer como nanopartículas de sílice; Éstas se transportan hacia una superficie de deposición para su recolección (Swihart, 2003).

Los métodos de caracterización y de impregnación textil son iguales a los mencionados para las nanopartículas de dióxido de titanio; Esta son químicamente inertes, lo que les permite mantener su integridad estructural, son resistentes al calor y tienen una alta área superficial. También, al ser de un tamaño tan reducido, su distribución en las fibras textiles es uniforme sin afectar significativamente su flexibilidad, suavidad o apariencia (Mehmood et al., 2017).

**Figura 7.** Caracterización morfológica de nanopartículas de sílice por microscopía SEM (Autoría propia).



## CONCLUSIONES

La industria de la moda en el deporte está experimentando un auge debido a la creciente conciencia sobre la salud y el bienestar, y la tecnología está desempeñando un papel crucial en la mejora de las propiedades de los textiles deportivos. La elección de materiales y recubrimientos adecuados es esencial para satisfacer las demandas de los consumidores y minimizar el impacto ambiental.

El uso de nanotecnología textil ha abierto nuevas posibilidades para la creación de prendas deportivas funcionales y de alto rendimiento. La protección contra los dañinos rayos UV, la resistencia al agua y la transpirabilidad son caracterís-

ticas clave que se pueden lograr mediante nanorevestimientos con nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Estos nanomateriales permiten desarrollar textiles sin comprometer la comodidad o la estética de las prendas, y también ofrece ventajas en términos de seguridad y sostenibilidad al reducir la necesidad de compuestos químicos nocivos.

En conjunto, estos avances en la aplicación de nanotecnología en textiles deportivos brindan a los atletas y entusiastas del deporte prendas de alto rendimiento que satisfacen sus necesidades y mejoran su experiencia, lo que podría revolucionar la forma en que se optimizan los procesos de producción y uso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aali Mohammadi, R., Shirazi, M., Moaref, R., Jamalpour, S., Tamsilian, Y., & Kiasat, A. (2022). Protective smart textiles for sportswear. In *Protective Textiles from Natural Resources* (pp. 317–345). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90477-3.00025-0>
- Ahmad, F., Akhtar, K. S., Anam, W., Mushtaq, B., Rash-eed, A., Ahmad, S., Azam, F., & Nawab, Y. (2023). Recent Developments in Materials and Manufacturing Techniques Used for Sports Textiles. *International Journal of Polymer Science*, 2023, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2023/2021622>
- Akhavan Sadr, F., & Montazer, M. (2014). *In situ* sono-synthesis of nano TiO<sub>2</sub> on cotton fabric. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(2), 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.09.018>
- Anjum, A. S., Ali, M., Sun, K. C., Riaz, R., & Jeong, S. H. (2020). Self-assembled nanomanipulation of silica nanoparticles enable mechanochemically robust super hydrophobic and oleophilic textile. *Journal of Colloid and Interface Science*, 563, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.056>
- Ardanuy, M., & Ventura, H. (2011). Soluciones textiles innovadoras para el diseño de nuevos productos. *Revista de Química e Industria Têxtil*, 204, 42–50.
- Attia, N. F., Moussa, M., Sheta, A. M. F., Taha, R., & Gamal, H. (2017). Synthesis of effective multifunctional textile based on silica nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 106, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.02.006>
- Carneiro, J. O., Azevedo, S., Fernandes, F., Freitas, E., Pereira, M., Tavares, C. J., Lanceros-Méndez, S., & Teixeira, V. (2014). Synthesis of iron-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles by ball-milling process: the influence of process parameters on the structural, optical, magnetic, and photocatalytic properties. *Journal of Materials Science*, 49(21), 7476–7488. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8453-3>
- Chen, D., Mai, Z., Liu, X., Ye, D., Zhang, H., Yin, X., Zhou, Y., Liu, M., & Xu, W. (2018). UV-blocking, superhydrophobic and robust cotton fabrics fabricated using polyvinylsilsesquioxane and nano-TiO<sub>2</sub>. *Cellulose*, 25(6), 3635–3647. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1790-7>
- Chen, T., Hong, J., Peng, C., Chen, G., Yuan, C., Xu, Y., Zeng, B., & Dai, L. (2019). Superhydrophobic and flame retardant cotton modified with DOPO and fluorine-silicon-containing crosslinked polymer. *Carbohydrate Polymers*, 208, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.023>
- Cheng, Q.-Y., Liu, M.-C., Li, Y.-D., Zhu, J., Du, A.-K., & Zeng, J.-B. (2018). Biobased super-hydrophobic coating on cotton fabric fabricated by spray-coating for efficient oil/water separation. *Polymer Testing*, 66, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.005>
- Dong, Z., Manimala, J., & Sun, C. T. (2010). Mechanical behavior of silica nanoparticle-impregnated kevlar fabrics. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 5(4), 529–548. <https://doi.org/10.2140/jomms.2010.5.529>
- D’Orazio, J., Jarrett, S., Amaro-Ortiz, A., & Scott, T. (2013). UV Radiation and the Skin. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(6), 12222–12248. <https://doi.org/10.3390/ijms140612222>
- El-Naggar, M. E., Shaheen, Th. I., Zaghloul, S., El-Rafie, M. H., & Hebeish, A. (2016). Antibacterial Activities and UV Protection of the *in Situ* Synthesized Titanium Oxide Nanoparticles on Cotton Fabrics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(10), 2661–2668. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04315>
- Fung, W. (2002). *Coated and Laminated Textiles* (1st ed.). Woodhead Publishing.
- Fung, W. (2005). Coated and laminated textiles in sportswear. In *Textiles in Sport* (pp. 134–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845690885.2.134>
- Gao, Y.-N., Wang, Y., Yue, T.-N., Weng, Y.-X., & Wang, M. (2021). Multifunctional cotton non-woven fabrics coated with silver nanoparticles and polymers for antibacterial, superhydrophobic and high performance microwave shielding. *Journal of Colloid and Interface Science*, 582, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.037>
- Ghamarpour, R., Fallah, A., & Jamshidi, M. (2023). Investigating the use of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles on the amount of protection against UV irradiation. *Scientific Reports*, 13(1), 9793. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37057-5>
- Ghashghae, M., Fallah, M., & Rabiee, A. (2019). Superhydrophobic nanocomposite coatings of poly(methyl methacrylate) and stearic acid grafted CuO nanoparticles with photocatalytic activity. *Progress in Organic Coatings*, 136, 105270. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105270>
- Gonzalez Litman, T. (2022, February 9). Las exportaciones colombianas de ropa deportiva en 2021 superan las de la prepanemia. *Fashion Network*.
- Hassabo, A., Elmorsy, H., Gamal, N., Sediek, A., Saad, F., Hegazy, B., & Othman, H. (2022). Applications of Nanotechnology in the Creation of Smart Sportswear for Enhanced Sports Performance: Efficiency and Comfort. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/jtcps.2022.181608.1147>
- Irshad, M. A., Nawaz, R., Rehman, M. Z. ur, Adrees, M., Rizwan, M., Ali, S., Ahmad, S., & Tasleem, S. (2021). Synthesis, characterization and ad-

- vanced sustainable applications of titanium dioxide nanoparticles: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111978. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111978>
- Isley, S. L., & Penn, R. L. (2006). Relative Brookite and Anatase Content in Sol-Gel-Synthesized Titanium Dioxide Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(31), 15134–15139. <https://doi.org/10.1021/jp061417f>
- Jafari-Kiyan, A., Karimi, L., & Davodiroknabadi, A. (2017). Producing colored cotton fabrics with functional properties by combining silver nanoparticles with nano titanium dioxide. *Cellulose*, 24(7), 3083–3094. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1308-8>
- Kang, H., Lee, J., O'Keefe, T., Tuga, B., Hogan Jr., C. J., & Haynes, C. L. (2022). Effect of (3-aminopropyl)triethoxysilane on dissolution of silica nanoparticles synthesized via reverse micro emulsion. *Nanoscale*, 14(25), 9021–9030. <https://doi.org/10.1039/D2NR01190E>
- Karthick, B., & Maheshwari, R. (2008). Lotus-inspired nanotechnology applications. *Resonance*, 13(12), 1141–1145. <https://doi.org/10.1007/s12045-008-0113-y>
- Khattab, T. A., Mohamed, A. L., & Hassabo, A. G. (2020). Development of durable superhydrophobic cotton fabrics coated with silicone/stearic acid using different cross-linkers. *Materials Chemistry and Physics*, 249, 122981. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122981>
- Kibria, G., Repon, Md. R., Hossain, Md. F., Islam, T., Jalil, M. A., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022). UV-blocking cotton fabric design for comfortable summer wears: factors, durability and nanomaterials. *Cellulose*, 29(14), 7555–7585. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04710-7>
- Kumar, B. (2021). *Textiles for Functional Applications* (B. Kumar, Ed.). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91596>
- Kwok, D. Y., & Neumann, A. W. (1999). Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 81(3), 167–249. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00087-6)
- Lafayette Sports. (2020). *Textiles de alto desempeño y su constante evolución*. <https://www.Lafayettesports.Com.Co/Noticias/Confeccion-Deportiva/Textiles-de-Alto-Desempeno-2/>
- Landage, S. M., Kulkarni, S. G., & Ubarhande, D. P. (2012). Synthesis and application of Silica Nanoparticles on Cotton to impart Superhydrophobicity. *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT), 1(5), 1–7.
- Latthe, S., Liu, S., Terashima, C., Nakata, K., & Fujishima, A. (2014). Transparent, Adherent, and Photocatalytic SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Coatings on Polycarbonate for Self-Cleaning Applications. *Coatings*, 4(3), 497–507. <https://doi.org/10.3390/coatings4030497>
- Lee, H. J., & Michielsens, S. (2006). Lotus effect: Superhydrophobicity. *Journal of the Textile Institute*, 97(5), 455–462. <https://doi.org/10.1533/joti.2006.0271>
- Li, H., Chen, X., Shen, D., Wu, F., Pleixats, R., & Pan, J. (2021). Functionalized silica nanoparticles: classification, synthetic approaches and recent advances in adsorption applications. *Nanoscale*, 13(38), 15998–16016. <https://doi.org/10.1039/D1NR04048K>
- Lin, Y., Choi, K., Zhang, M., Li, Y., Luximon, A., Yao, L., & Hu, J. (2012). An optimized design of compression sportswear fabric using numerical simulation and the response surface method. *Textile Research Journal*, 82(2), 108–116. <https://doi.org/10.1177/0040517511424531>
- Lisfi, A., Cook, L., & Lan, Y. (2017). Titanium Dioxide Nanoparticles Characterizations, *Properties and Syntheses* (I. Nova Science Publishers, Ed.).
- Mather, R. R., & Wardman, R. H. (2015). *The chemistry of textile fibres* (The royal society of chemistry, Ed.; 2nd ed.). Thomas Graham House.
- Mehmood, A., Ghafar, H., Yaqoob, S., Gohar, U. F., & Ahmad, B. (2017). Mesoporous Silica Nanoparticles: A Review. *Journal of Developing Drugs*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2329-6631.1000174>
- Miao, X., Mao, K., Yan, Y., Pei, Y., Sailor, M. J., & Wu, L. (2022). Fabrication and performance of a superhydrophobic fluorine-modified porous silicon based on photocatalytic hydrosilylation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 330, 111561. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111561>
- Mironyuk, I. F., Soltys, L. M., Tatarchuk, T. R., & Savka, Kh. O. (2020). Methods of Titanium Dioxide Synthesis (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(3), 462–477. <https://doi.org/10.15330/pccs.21.3.462-477>
- Mordor Intelligence. (2022). *Mercado de ropa deportiva: crecimiento, tendencias y pronósticos* (2023 – 2028).
- Morton, W. E., & Hearle, J. W. (2008). *Physical properties of textile fibres* (Woodhead Publishing Limited, Ed.; 4th ed.).
- Nasrin, S., Mandal, S., Islam, MD. M., Petrova, A., Agnew, R. J., & Boorady, L. M. (2023). Factors Affecting the Sweat-Drying Performance of Active Sportswear—A Review. *Textiles*, 3(3), 319–338. <https://doi.org/10.3390/textiles3030022>
- Nyamukamba, P., Okoh, O., Mungondori, H., Taziwa, R., & Zinya, S. (2018). Synthetic Methods for Titanium Dioxide Nanoparticles: A Review. In *Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75425>
- Patel, B. H., Chaudhari, S. B., Mandot, A. A., & Panchal, C. (2015). Silica particles can improve electrical conductivity of polyester and cotton. *Textile Asia*, 46(3), 39–41.
- Patil, G. D., Patil, A. H., Jadhav, S. A., Patil, C. R., & Patil, P. S. (2019). A new method to prepare superhydrophobic

- cotton fabrics by post-coating surface modification of ZnO nanoparticles. *Materials Letters*, 255, 126562. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126562>
- Paul, R., Bautista, L., De la Varga, M., Botet, J. M., Casals, E., Puentes, V., & Marsal, F. (2010). Nano-cotton Fabrics with High Ultraviolet Protection. *Textile Research Journal*, 80(5), 454–462. <https://doi.org/10.1177/0040517509342316>
- Raeisi, M., Kazerouni, Y., Mohammadi, A., Hashemi, M., Hejazi, I., Seyfi, J., Khonakdar, H. A., & Davachi, S. M. (2021). Superhydrophobic cotton fabrics coated by chitosan and titanium dioxide nanoparticles with enhanced antibacterial and UV-protecting properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 171, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.220>
- Rahman Bhuiyan, M. A., Wang, L., Shaid, A., Shanks, R. A., & Ding, J. (2019). Polyurethane-aerogel incorporated coating on cotton fabric for chemical protection. *Progress in Organic Coatings*, 131, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.041>
- Rehan, M., Lai, X., & Kale, G. M. (2011). Hydrothermal synthesis of titanium dioxide nanoparticles studied employing *in situ* energy dispersive x-ray diffraction. *CrystEngComm*, 13(11), 3725. <https://doi.org/10.1039/c0ce00781a>
- Riaz, S., Ashraf, M., Hussain, T., & Hussain, M. T. (2019). Modification of silica nanoparticles to develop highly durable superhydrophobic and antibacterial cotton fabrics. *Cellulose*, 26(8), 5159–5175. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02440-x>
- Sharif, R., Mohsin, M., Ramzan, N., Ahmad, S. W., & Qutab, H. G. (2022). Synthesis and Application of Fluorine-free Environment-friendly Stearic Acid-based Oil and Water Repellent for Cotton Fabric. *Journal of Natural Fibers*, 19(5), 1632–1647. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1787918>
- Shuvo, I. I. (2020). Fibre attributes and mapping the cultivar influence of different industrial cellulosic crops (cotton, hemp, flax, and canola) on textile properties. *Bioresources and Bioprocessing*, 7(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00339-1>
- Slavova, T. G., Radulova, G. M., Kralchevsky, P. A., & Danov, K. D. (2020). Encapsulation of fragrances and oils by core-shell structures from silica nanoparticles, surfactant and polymer: Effect of particle size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 606, 125558. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125558>
- Sundaresan, K., Sivakumar, A., Vigneswaran, C., & Ramachandran, T. (2012). Influence of nano titanium dioxide finish, prepared by sol-gel technique, on the ultraviolet protection, antimicrobial, and self-cleaning characteristics of cotton fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 41(3), 259–277. <https://doi.org/10.1177/1528083711414962>
- Swihart, M. T. (2003). Vapor-phase synthesis of nanoparticles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(1), 127–133. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(03)00007-4)
- Tabatabaei, S., Shukohfar, A., Aghababazadeh, R., & Mirhabibi, A. (2006). Experimental study of the synthesis and characterisation of silica nanoparticles via the sol-gel method. *Journal of Physics: Conference Series*, 26, 371–374. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/26/1/090>
- Ugur, S. S., Saruřık, M., & Aktas, A. H. (2011). Nano-TiO<sub>2</sub> based multilayer film deposition on cotton fabrics for UV-protection. *Fibers and Polymers*, 12(2), 190–196. <https://doi.org/10.1007/s12221-011-0190-5>
- Vandepitte, K., Vasilé, S., Vermeire, S., Vanderhoeven, M., Van der Borgh, W., Latré, J., De Raeve, A., & Troch, V. (2020). Hemp (*Cannabis sativa* L.) for high-value textile applications: The effective long fiber yield and quality of different hemp varieties, processed using industrial flax equipment. *Industrial Crops and Products*, 158, 112969. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112969>
- Velayi, E., & Norouzebeigi, R. (2023). Fabrication of epoxy/SiO<sub>2</sub>/ZnO superhydrophobic nanocomposite mesh membranes for oil-water separation: Correlating oil flux to fabrication parameters via Box-Behnken design. *Applied Surface Science*, 611, 155594. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155594>
- Wang, F., Shao, J., Keer, L. M., Li, L., & Zhang, J. (2015). The effect of elementary fibre variability on bamboo fibre strength. *Materials & Design*, 75, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.019>
- Wang, Z., Chen, X., Gong, Y., Zhang, B., & Li, H. (2017). Superhydrophobic nanocoatings prepared by a novel vacuum cold spray process. *Surface and Coatings Technology*, 325, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.044>
- Xue, C.-H., Li, H.-G., Guo, X.-J., Ding, Y.-R., Liu, B.-Y., An, Q.-F., & Zhou, Y. (2021). Superhydrophobic anti-icing coatings with self-deicing property using melanin nanoparticles from cuttlefish juice. *Chemical Engineering Journal*, 424, 130553. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130553>
- Yu, X., Liu, X., Shi, X., Zhang, Z., Wang, H., & Feng, L. (2019). SiO<sub>2</sub> nanoparticle-based superhydrophobic spray and multi-functional surfaces by a facile and scalable method. *Ceramics International*, 45(12), 15741–15744. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.014>
- Yurdakul, B., Ozcelik, E., & Sakin, S. (2014, April 2). *Development of Water Repellant Fabrics For Sportswear Combining with Chemical And Membrane*. XIII International Izmir Textile and Apparel Symposium.