

Nanoestructuración y experimentación de fibras proteicas para superficies textiles y moda sostenible

superficies textiles y moda sostenible Nanostructuring and experimentation of protein fibers for textile surfaces and sustainable fashion

Maitte Valeria Castellanos Perilla¹
Diana Carolina Sánchez Díaz²
Alis Yovana Pataquiva Mateus³
María Alejandra Echeverry Ocampo⁴
Angela Liliana Dotor Robayo⁵
Elizabeth Ramos Kalmar⁶

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.24.5171>

RESUMEN

Con el fin de otorgar un aprovechamiento con valor agregado de la lana virgen proveniente del altiplano cundiboyacense, se desarrollaron dos metodologías para proporcionarle propiedades mejoradas: la primera, se centra en el suavizado de la fibra; la segunda, en una nanoestructuración in situ basada en la adición de luz ultravioleta para promover el crecimiento de nanopartículas de plata (AgNPs) en la superficie de la fibra. Las AgNPs incorporadas en la estructura de la fibra previamente suavizada, proporcionaron un mejoramiento en las propiedades del textil, puesto que retrasaron la actividad microbiana, lo que se demostró mediante los halos de inhibición formados cuando las fibras estuvieron en contacto con *P. aeruginosa* y *S. aureus*.

Palabras Clave: Lana virgen de oveja, AgNPs, suavidad, actividad microbiana, nanotecnología.

ABSTRACT

To provide an added value and a more complete use of the virgin wool from the Cundiboyacense highlands, it was developed in the methodologies for the replacement of the improved properties; the first focuses on the smoothing of the fiber and the second on in situ nanostructuring based on the addition of ultraviolet light to promote the growth of silver nanoparticles (AgNPs) on the surface of the fibers. The incorporated AgNPs in the structure of the previously smoothed fiber allowed a delay the microbial activity, this demonstrated with the halos of inhibition formed when the fibers are in contact with *P. aeruginosa* and *S. aureus*.

Keywords: Natural sheep wool, silver nanoparticles, smoothness, microbial activity, nanotechnology.

1. Ingeniera Química, Facultad de Ciencia e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 #22-61, Bogotá – Colombia, maittev.castellanos@utadeo.edu.co

2. Ingeniera Química, Facultad de Ciencia e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 #22-61, Bogotá – Colombia, dianac.sanchezd@utadeo.edu.co

3. PhD, Facultad de Ciencia e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 #22-61, Bogotá – Colombia, alisy.pataquivam@utadeo.edu.co

4. Diseñadora de Modas, Facultad de Artes y Diseño, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 #22-61, Bogotá – Colombia, mariaa.echeverry@utadeo.edu.co

5. Magister, Facultad de Artes y Diseño, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 # 22-61, Bogotá – Colombia, angelal.dotor@utadeo.edu.co

6. Magister, Facultad de Artes y Diseño, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 #22-61, Bogotá – Colombia, elizabeth.ramosk@utadeo.edu.co

INTRODUCCIÓN

La industria textil satisface una de las necesidades vitales del hombre como es el vestir. En Colombia esta industria se presenta principalmente en las ciudades de Bogotá (53%) y Medellín (38%), con productos en materiales como algodón y poliéster. Dentro de esta industria, se observan diferentes problemas y retos principalmente como: la actualización de procesos tecnológicos, el desarrollo de productos con nuevas características (textiles no arrugables, repelentes a manchas y grasas, antibacteriales, con sensores, entre otros), altos costos de químicos para tratamiento de textiles y altos desperdicios de materia prima [1].

Por otro lado, es ampliamente conocida la naturaleza agreste de la lana cundiboyacense (altiplano localizado en la cordillera oriental de Los Andes en territorio colombiano (Figura 1). Sin embargo, se considera que es un recurso que puede generar productos con gran impacto a nivel social y económico dentro del país, brindando posibilidades de generar nuevos productos con costos menores y diferentes propiedades [2].

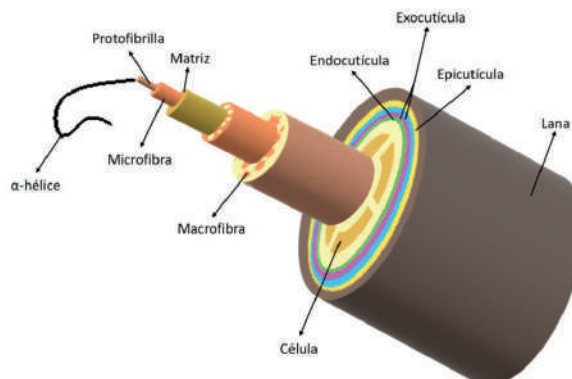
Figura 1. Lana virgen de oveja cundiboyacense



Fuente: Elaboración de los autores

La lana (Figura 2), compuesta principalmente por keratina (con un alto contenido de azufre), es una fibra natural multifuncional para la manufactura especialmente de prendas de vestir [3].

Figura 2. Composición de la fibra de lana



Fuente: Elaboración de los autores

La lana se considera como una fibra de origen animal que posee diferentes características que hacen de la lana una fibra especial y diferente en el mercado textil. Sus principales características son: alta absorción de humedad (hasta un 30%), aislación térmica, fácil limpieza, alto porcentaje de elongación, resistencia a la abrasión, entre otras [3].

La lana es una fibra que no ha sido estudiada de manera extensa, debido a que su utilización dentro de la industria textil ha sido directa; es decir, no presenta ningún tratamiento previo que mejore sus características físicas, químicas o mecánicas, siendo esto reflejado en la escasa información encontrada acerca del suavizado y la nanoestructuración de esta fibra de origen animal.

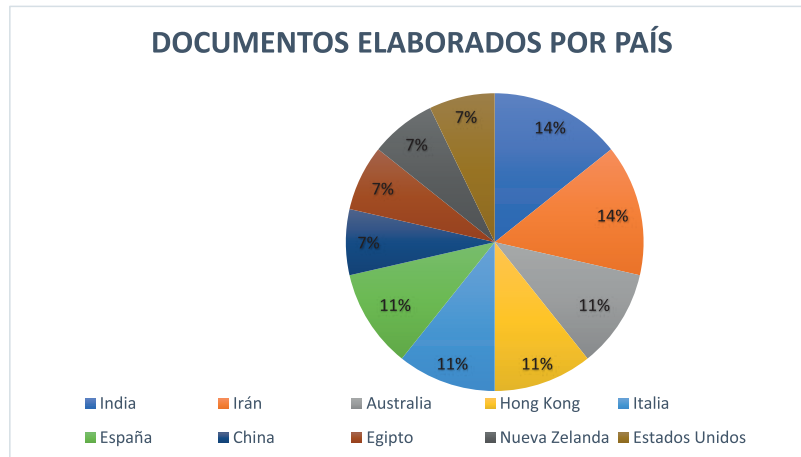
Durante los últimos diez años no se ha reportado (Figura 3) un número importante de documentos relacionados con el tratamiento de lana virgen a nivel mundial (6 documentos en 2015) y ninguno estudia la lana del altiplano cundiboyacense, razón por la cual el estado del arte del suavizado y nanoestructurado de lana virgen, es mínimo. En la Figura 4 se presenta el número de investigaciones (artículos científicos y capítulos de libro) por país que se han elaborado acerca del tratamiento de suavizado y nanoestructuración de lana virgen en el último año y se observa que los países con mayor investigación en el tema son India e Irán.

Figura 3. Número de documentos por año relacionados con tratamiento de lana virgen



Fuente: Elaboración de los autores

Figura 4. Documentos por país acerca del tratamiento de lana virgen



Fuente: Elaboración de los autores

Por otro lado, la nanotecnología es una herramienta emergente que permite manipular la materia a escala nanométrica (1×10^{-9} m) a partir de diversas rutas de síntesis para la producción de nanopartículas, las cuales pueden ser involucradas en la funcionalización de diversos materiales [5] En este caso, las fibras naturales empleadas en la industria textil vienen ganando aprecio por parte de los consumidores que buscan materiales de origen renovable y que no provengan de los derivados del petróleo [3]. En la Tabla 1 se observan algunas de las nanopartículas que han sido empleadas en textiles y su aplicación dentro de esta industria.

Tabla 1. Nanopartículas (NPs) empleadas en técnicas textiles

FUNCIÓN	NPs	DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	REFERENCIAS
Autolimpieza	TiO ₂ , fluroacrilatos, SiO ₂ *, CNT	Textiles para muebles repelentes de manchas, paraguas, equipaje fácil de limpiar, pantalones autolimpiantes, corbatas, abrigos.	[6, 7, 8, 9, 10, 11]
Antibacterial	Ag, quitosano, SiO ₂ *, TiO ₂ , ZnO	Ropa interior anti-olor, calcetines, plantillas, cascos y otros equipos deportivos, textiles para muebles y sábanas, esponjas de cocina, toallas; Máscaras faciales biocidas, mantas, vestidos para pacientes, guantes quirúrgicos.	[12, 9]
Conductividad	Cu, polipirroles, polianilina	Ropa elegante con función de detección, alfombras aislantes y revestimiento de suelo, trajes con funciones electromagnéticas, filtros anti-chispa.	[13, 9]
Bloqueadores UV	TiO ₂ , ZnO	Ropa deportiva con bloqueo UV, con protección solar integrada, tejido de camisa, agentes de revestimiento, sombrillas.	[9, 14]
Resistencia a la llama	Sb ₂ O ₂ , CNT, boroxosiloxano, montmorillonita	Trajés resistentes a la llama, guantes, alfombras, cortinas, textiles para muebles, cojines de asiento, forros.	[9, 13]
Refuerzo	CNT	Chaquetas y chalecos antibalas.	[9, 13]
Liberación controlada de fármacos activos o fragancias	Montmorillonita, SiO ₂ *	Chaquetas repelentes de insectos, tiendas de campaña; Textiles para muebles, alfombras, cortinas; Apósitos para liberación de fármacos.	[9, 13]
Luminiscencia	Colorantes sensibles a los estímulos	Textiles con efectos de cambio de color.	[9, 13, 7]
Aislamiento térmico	Estructura de Si nanoporosa	Chaquetas de montaña aislantes térmicamente para bajas temperaturas, plantillas de zapatos.	[9, 13, 8]

Fuente: Elaboración de los autores

En cuanto a la nanoestructuración de lana en general, se han empleado diferentes técnicas confiriendo distintas propiedades: (i) Coloración de textiles con nanopigmentos capaces de difundirse en las fibras, o la adición de plata para proporcionar condiciones antimicrobianas y resistencia a las lavadas [15]. (ii) Lanas con efecto “hoja de loto” o fibras nanoestructuradas con películas de dióxido de titanio en su forma cristalina (anatasa) para proporcionar propiedades de auto-limpieza y como fotocatalizador para oxidar los compuestos orgánicos [16-17], (iii) Fibras de lana con ciclodextrinas para atrapar olores durante el desgaste, los cuales son liberados durante el lavado, así como en el encapsulamiento de fragancias en fibras [18] - [20].

Por esta razón, la confección de prendas de vestir a partir de lana del altiplano cundiboyacense podría encontrar nuevos mercados a partir de una mayor suavidad y propiedades antibacteriales, permitiendo la entrada de la fibra en otras aplicaciones destinadas a lanas importadas como lo son lana merina y alpaca, que se distinguen por su textura y suavidad. En términos económicos, la lana nanoestructurada podría revolucionar el diseño y confección de prendas de vestir en los departamentos de tradición de producción de esta, teniendo un valor agregado en la venta de fibras y atuendos.

Finalmente, este proyecto tiene como finalidad desarrollar una metodología para el suavizado de lana virgen de oveja cundiboyacense y la estructuración a nanoescala capaz de conferirle propiedades antibacterianas a la misma. Esta investigación relaciona de forma interdisciplinaria la ciencia y el arte a través de la Ingeniería Química y la Gestión y el Diseño de moda, generando nuevos conocimientos que permitan el desarrollo de nuevas fibras a partir de metodologías amigables con el medio ambiente.

MÉTODO

Para cumplir el objetivo de este trabajo se desarrolló inicialmente una caracterización de la fibra que permitiera reconocer las propiedades originales de la lana. Dentro de las herramientas para llevar a cabo esta caracterización física se encontraron: microscopía electrónica de barrido (SEM, de sus siglas en inglés), la cual permitió una identificación del material a nivel nanométrico presentando como resultado la morfología de la fibra. Por otro lado, para la caracterización química se emplearon herramientas tales como espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR, de sus siglas en inglés) mediante la cual fue factible conocer los grupos funcionales orgánicos que componen el material y espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS, de sus siglas en inglés) que permitió conocer la presencia de elementos químicos en la muestra.

Adicionalmente, se propuso una metodología pionera para llevar a cabo el suavizado de la fibra a partir de diseños experimentales (Apéndice 1) mediante el uso de un producto comercial, cuyo componente activo es dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM) denominado reactivo “Y”. De seguido, se realizó la caracterización física, química y mecánica mencionada anteriormente para la fibra suavizada con el fin de comparar las propiedades antes y después del tratamiento.

Por último, para conferir las propiedades antibacterianas se utilizó la nanoestructuración in situ a partir de nitrato de plata (AgNO_3) bajo irradiación de rayos UV. La fibra natural, suavizada y nanoestructurada fueron objeto de caracterización física (morfología, tamaño, superficie, resistencia y elongación de gran importancia en la industria textil) y caracterización química (composición química).

Caracterización de la fibra

Se llevó a cabo la siguiente metodología de caracterización, empleando la lana tal y como fue recibida: proveniente de ovejas criollas del municipio de Cucunubá e hilada por artesanos locales.

Inicialmente se determinó el diámetro de la fibra ($n=20$) mediante micrómetro digital (Digital Mitutoyo MIT500-197-20B); luego, el color fue evaluado por medición directa ($n=10$) por colorimetría (CR-400 Konica Minolta) obteniendo como resultados los parámetros a^* , b^* y L^* para calcular posteriormente c^* Ecuación (1), $^{\circ}HUE$ Ecuación (2) y el índice de color (IC) Ecuación (3), y determinar al final tonalidad y matiz de cada muestra.

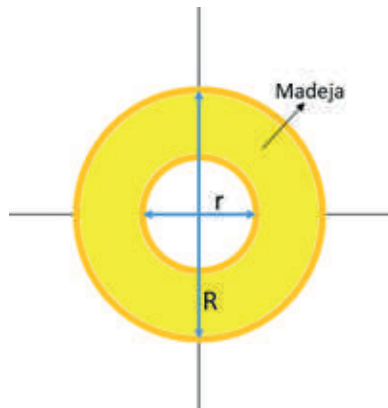
$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$^{\circ}HUE = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

$$IC = \frac{a^* * 100}{L \quad b} \quad (3)$$

En la determinación de la densidad de la fibra, se utilizó el montaje que se aprecia en la Figura 5 basada en la Norma ASTM D 1907, [21] según informa ASTM Standard D1907 (2012), el cual corresponde al método de densidad lineal en sistema directo. Para realizar esta medición se utilizó una madeja de lana, estableciendo el número de vueltas y se midió el diámetro externo (R) e interno (r) de las circunferencias que forman el rollo; así como la masa y el diámetro transversal del hilo.

Figura 5. Montaje para la determinación de densidad de la fibra. Basado en ASTM D 1907 ASTM Standard D1907. [21].
Donde, r es el diámetro interno de la madeja y R es el diámetro externo de la madeja.



Fuente: Elaboración de los autores

A partir de los diámetros interno y externo de la madeja, y el diámetro transversal del hilo (g) que fue determinado mediante un calibrador, se estimó el perímetro del rollo con la Ecuación (4).

$$P = \frac{\pi \times (r + g + R) \times (R - r)}{g} \quad (4)$$

Posteriormente, se estimó la longitud de la madeja como el producto entre el perímetro calculado y el número de vueltas establecido. De esta manera se determinó la densidad lineal por el sistema directo con la Ecuación (5).

$$\rho_{Linear} = \left(\frac{M}{L}\right) \times \left(\frac{A}{B}\right) \quad (5)$$

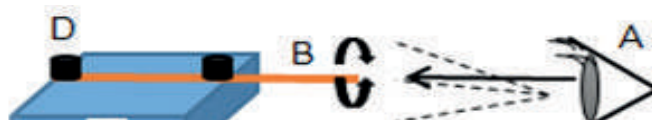
Donde, M: masa de la madeja, L: longitud de la madeja, A/B = 3,225 (factor establecido por la norma según las unidades de M y L).

Con respecto a la finura o espesor de un hilado fue necesario determinar el título de hilo en sistema directo como decitex (dTex), el cual refleja el peso en gramos de 10000 metros de lana seguido del número de cabos que lo conforman [22].

Por otro lado, para la determinación de la humedad seis muestras de fibra fueron llevadas al desecador durante 48 h y empleando un analizador de humedad (modelo HB43-S marca Toledo) se estableció esta propiedad en cada una de las muestras.

Para determinar el comportamiento del secado por torsión de la fibra Norma ASTM D276 ASTM, según lo indica la Standard D 276 [23], se tomaron hilos de la fibra de 20 cm (n=10), los cuales fueron sumergidos en agua destilada y posterior, fueron puestos sobre una placa caliente (Figura 6), fijando los hilos con soportes metálicos y colocando una de las puntas en dirección al observador; este identificó el lado (derecho o izquierdo) al cual gira la fibra durante el secado.

Figura 6. Montaje para la determinación de secado por torsión para la fibra proteica Lana. Basado en ASTM D276 (Standard D 276, 2000). Donde, A: observador; B, muestra de fibra mojada; C, placa de calentamiento; D, soportes [24].



Fuente: Elaboración de los autores

Adicionalmente, se analizó la composición química de la fibra empleando un espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR, Prestige-21, Shimadzu, Japón), con un accesorio ATR universal con diamante y cristal de ZnSe para realizar una medición por fibra en un rango de 600-3600 cm^{-1} a temperatura ambiente.

La morfología de la partícula fue analizada mediante visualización del recubrimiento de la muestra por microscopía electrónica de barrido SEM (JEOL, modelo JSM 6490-LV); teniendo en cuenta que para realizar el procedimiento las fibras fueron sometidas a un recubrimiento con oro (Metalizador Dentom Vacuum Desk IV), con un espesor de aproximadamente 10 nm.

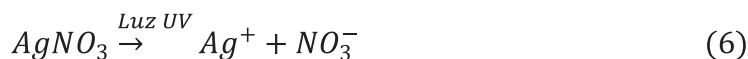
Suavizado de la lana virgen de oveja

Una vez que la lana fue caracterizada física y químicamente, se procedió a realizar el suavizado en una muestra de lana virgen de oveja (n=10). Teniendo en cuenta que en la literatura no se encuentra ningún tipo de metodología destinada a proporcionar suavidad en las fibras de lana virgen, se propuso elaborar una técnica nueva desarrollada a partir del estudio de la composición química que tiene esta fibra, la cual indica la presencia de puentes disulfuro dentro de la misma debido a la proteína principal que la contiene (keratina).

El reactivo seleccionado para realizar el proceso de suavizado de la fibra fue el dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM) presente en un producto capilar comercial, el cual actúa como agente acondicionador y precursor de suavidad en la fibra de lana. Inicialmente, se lavaron las fibras con shampoo comercial sin sal para retirar impurezas presentes en la lana. Después se extendió una capa de aproximadamente 0,5 g de DHM por cada 0,2 g de lana, sobre cada una de las fibras y se frotaron tres veces para asegurar una correcta penetración a lo largo de la misma. Una vez humectadas, las fibras fueron cubiertas con papel aluminio y se colocaron en una plancha de calentamiento a una temperatura de 21°C durante tres horas; y luego fueron secadas mediante el uso de una plancha a 24°C. Luego, las fibras nuevamente fueron cubiertas con papel aluminio y se dejaron en reposo durante tres días. Por último, se lavaron nuevamente con shampoo comercial sin sal y se adicionó un termoprotector para cabello con el fin de prolongar la suavidad; nuevamente se plancharon a 24°C hasta su secado, para lograr un mejor acabado.

Nanoestructuración in situ de la lana virgen de oveja con radiación ultravioleta

Para realizar la nanoestructuración con plata sobre las fibras de lana suavizadas, se utilizó la metodología propuesta por Lu y colaboradores (Lu, Meng, Jiang, & Xie, 2014): las fibras de lana fueron sumergidas en una solución de nitrato de plata 10 mM y expuestas durante 5 h a la luz UV generada por un circuito con 16 bombillos LED (3W) en una protoboard, generando la disociación del AgNO₃ que muestra la Ecuación (7). Al finalizar este tiempo, las fibras se colocaron sobre papel aluminio para dejar secar completamente a temperatura ambiente.



Caracterización de lana suave y nanoestructurada

Una vez realizado el proceso de suavizado y nanoestructuración de lana virgen, se llevó a cabo una caracterización física, química y mecánica de las fibras antes y después de los procesos de suavizado y nanoestructuración, siguiendo la metodología presentada en el numeral 2.1.

Pruebas microbiológicas y de lavado de lana suave y nanoestructurada

Para verificar la capacidad antimicrobiana de las fibras, se realizaron pruebas por triplicado con *Staphylococcus aureus* y *Pseudomona aeruginosa*, las cuales son bacterias comúnmente encontradas en la piel. Se empleó medio TSA (Tripticasa Soja Agar) y se observó la presencia/ausencia de microorganismos sobre las muestras.

Por otro lado, para determinar cuántas lavadas resiste la lana suavizada y nanoestructurada sin perder sus propiedades, se realizaron 1, 3, 5 y 10 lavados en una lavadora convencional de ropa doméstica (carga superior sin agitador, 17 kg de capacidad, referencia TurboDrum Diamond Glass marca LG) [24], para caracterizar cada una de las muestras mediante visualización por SEM y verificar la adhesión de las nanopartículas a la fibra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la fibra

Hasta el momento, la lana virgen de oveja cundiboyacense no ha sido objeto de investigación en cuanto a su caracterización física o química, razón por la cual los datos mostrados a continuación son inéditos en la literatura; así como los resultados obtenidos para el proceso de suavizado y nanoestructuración a este tipo de fibra animal proteica.

En la Tabla 2, se observa que el diámetro de la fibra de lana virgen presenta 1,1 mm de más con respecto a la lana suavizada y 1,04 mm de más con respecto a la fibra después de los dos tratamientos (suavizado y nanoestructurado). Estos resultados permitieron establecer que el diámetro disminuye al realizar los diferentes procedimientos sobre la fibra. Este comportamiento puede presentarse debido a la eliminación de impurezas de la muestra sin tratar y el estiramiento de capas que conforman la fibra con el proceso de suavizado. Sin embargo, se observa que el diámetro aumenta 0,06 mm después de realizar la nanoestructuración in situ respecto a la fibra suavizada, lo cual se presenta debido a la agregación del recubrimiento sobre la lana y exposición a la luz ultravioleta.

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la fibra de lana antes y después de realizar el tratamiento de suavizado y nanoestructurado (n=5)*

	Fibra de lana virgen	Fibra de lana suavizada	Fibra de lana suavizada y nanoestructurada
Diámetro (mm)*	1,22 +/- 0,26	0,12 +/- 0,034	0,18 +/- 0,07
Humedad (%)*	16,405 +/- 0,85	19,350 +/- 2,31	16,920 +/- 0,85
Densidad lineal (g/m)	0,0472	0,0614	0,0423
Título dTex (decitex)	73/2	138/2	66/2

Fuente: Elaboración de los autores

En cuanto al contenido de humedad, se observa que la fibra suavizada presenta un porcentaje más alto respecto a las otras dos muestras; esto se debe a que en el proceso de suavizado se abren los poros de la fibra debido a que se rompen enlaces disulfuro presentes en la keratina, haciendo que se retenga una mayor cantidad de agua. No obstante, después de realizar el proceso de nanoestructuración, posiblemente las AgNPs ocupan los lugares de enlaces rotos, lo que ocasiona que se disminuya la cantidad de agua retenida volviendo prácticamente al valor inicial de la fibra natural.

Por otro lado, la densidad lineal es una unidad de masa por unidad de longitud característica de hilos u objetos unidimensionales. De acuerdo a los datos que muestra la Tabla 2, se observa que la lana suavizada es un 30% más gruesa que la lana virgen debido a la apertura de los poros después de realizar el tratamiento, ya que se genera una fibra mucho más esponjosa y dispersa que la muestra inicial. Adicional a esto, se observa que la lana nanoestructurada es un 31% más delgada que la suavizada, ya que en los poros se logran alojar las nanopartículas de plata generando una reducción del grosor de la fibra. De forma similar, teniendo en cuenta que el título dTex indica la finura del hilo, se percibe que la fibra suavizada y nanoestructurada es más fina que la lana virgen, ya que tiene una titulación inferior [22].

Al realizar el secado por torsión de la fibra de lana se observa que las puntas de la lana virgen se dirigen hacia la izquierda, así como las fibras de cáñamo y yute (Tabla 3). De forma contraria, a lo que sucede en las fibras suavizadas y en fibras suavizadas y nanoestructuradas, ya que estas giran hacia la derecha, como el lino y ramio que presentan la misma tendencia (Tabla 3). Conocer el sentido de torsión de una fibra es importante para el diseñador, ya que la apariencia de la superficie desarrollada depende del sentido en el que se dirige la fibra [22].

Tabla 3. Sentido de secado por torsión de diferentes fibras naturales

Fibra natural	Sentido de torsión
Lino	D
Ramio	D
Cáñamo	I
Yute	I

Fuente: Tomado de [26]

(D) sentido de torsión a la derecha, (I) sentido de torsión a la izquierda.

Por otra parte, en cuanto a la determinación del color de la fibra se obtuvo un cambio representativo en la coloración de cada una de las fibras, antes y después del tratamiento de suavizado y nanoestructurado, tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Coordenadas determinadas por el colorímetro (Minolta CR – Konica 400) para la determinación del color de la fibra de lana

Fibra de lana virgen de oveja			Fibra de lana suavizada			Fibra de lana suavizada y nanoestructurada		
a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*
6,49	16,07	93,94	6,92	13,77	93,44	9,76	4,55	72,12

Fuente: Elaboración de los autores

Al realizar los respectivos cálculos con las Ecuaciones (3) – (5) se obtienen los datos condensados en la Tabla 5.

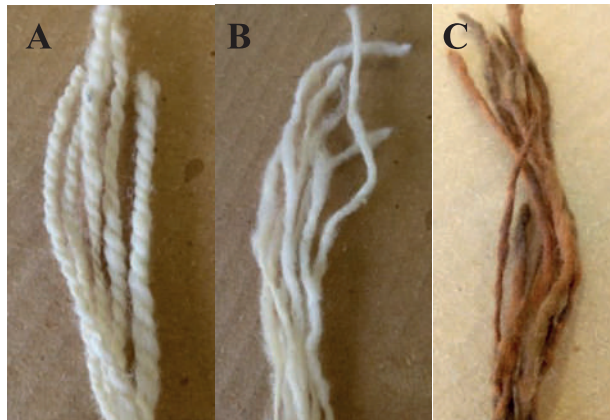
Tabla 5. Resultados obtenidos para la determinación del color de la fibra de lana

Fibra de lana virgen de oveja			Fibra de lana suavizada			Fibra de lana suavizada y nanoestructurada		
c*	°HUE	IC	c*	°HUE	IC	c*	°HUE	IC
17,40	68,22	0,43	15,41	63,32	0,54	10,77	24,99	2,97
Tonalidad	Opaca		Tonalidad	Opaca		Tonalidad	Opaca	
Matiz	Amarillo Claro		Matiz	Blanca		Matiz	Café Medio	

Fuente: Elaboración de los autores

De esta manera, se puede observar entonces que la lana suavizada presenta un color más claro respecto a la lana virgen de oveja sin tratamiento, esto es un efecto del proceso de lavado que se tiene en cuenta para la realización de la metodología de suavizado, ya que se eliminaron las impurezas que generaban un color amarillento sobre la muestra sin tratamiento. Sin embargo, para la lana nanoestructurada el color cambia radicalmente (Figura 7), ya que presenta un matiz oscuro debido a la presencia de plata dentro de la estructura de la fibra luego de la nanoestructuración in situ, provocado por la actividad fotocatalítica de la plata.

Figura 7. Fibra de (A) lana de oveja sin tratamiento, (B) lana de oveja suavizada y (C) lana de oveja suavizada y nanoestructurada con plata

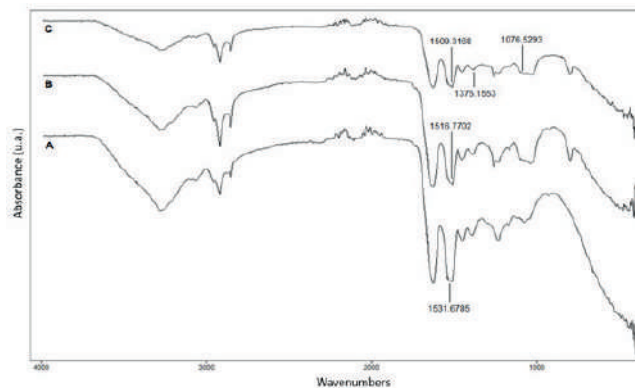


Fuente: Elaboración de los autores

Composición química de la fibra

En la Figura 8 se observan los diferentes espectros realizados a de cada una de las fibras analizadas: lana virgen de oveja, lana suavizada y lana nanoestructurada.

Figura 8. Análisis de espectroscopia infrarroja (FTIR) de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada.



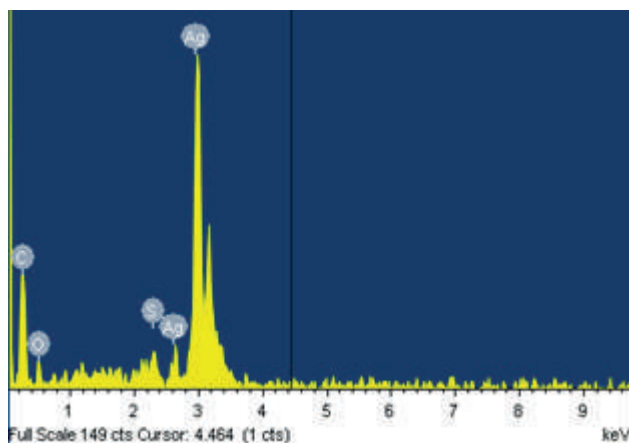
Fuente: Elaboración de los autores

A partir de la Figura 8, se observa la presencia de una banda en 1500 cm^{-1} , haciendo referencia a la estructura peptídica de la amida I y amida II, las cuales son las responsables de la capacidad de estiramiento de las fibras, debido a esto, la lana suavizada tiene unas propiedades mecánicas superiores a las de la lana virgen de oveja y lana nanoestructurada, reflejada en una intensidad menor en este pico respecto a las otras dos [27].

La lana virgen de oveja nanoestructurada (B), presenta una intensidad de banda en 1038 y 1380 cm^{-1} , la cual indica la unión C=N; los grupos amina que componen la fibra son precursores de la reducción de los iones de Ag, ya que el átomo de nitrógeno disminuye su potencial. Por lo tanto, la formación de AgNPs presentes en las fibras están fuertemente ligadas a la cantidad de aminas de la lana [25].

Para corroborar la presencia de plata en la lana suavizada se realizó un análisis micro elemental usando espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS). En la Figura 9, se muestra un pico altamente definido que demuestra la existencia de AgNPs en la superficie de la fibra

Figura 9. Composición semicuantitativa por EDS de fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas.



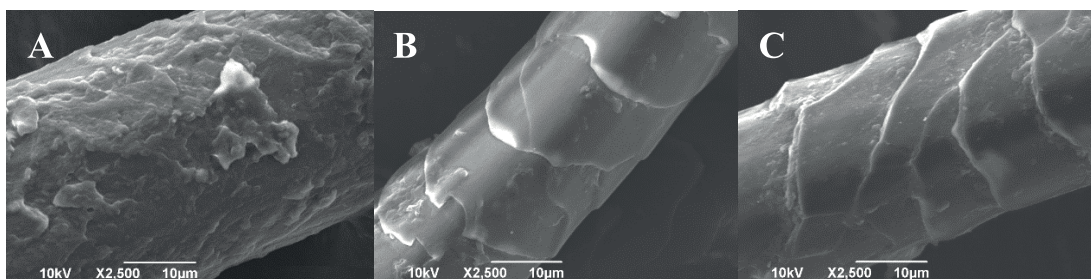
Fuente: Elaboración de los autores

Morfología de la fibra

A continuación, se presentan los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) obtenidos para la fibra de lana Cundiboyacense, antes y después del respectivo tratamiento.

En la Figura 10, se observa que la fibra de lana sin tratamiento (A) tiene una estructura con escamas definidas lo cual brinda la estructura áspera convencional de la lana virgen. Respecto a la fibra con el tratamiento de suavizado (B) se observa que las escamas características se encuentran extendidas y lisas, lo que hace que la lana sea más suave respecto a la muestra inicial. Finalmente, en el resultado de la lana suavizada y nanoestructurada (C) se observa la presencia de un recubrimiento con nanopartículas sobre la fibra que envuelve las escamas alargadas de la lana previamente suavizada.

Figura 10. Micrografías de fibra de lana virgen de oveja a diferentes condiciones: (A) Lana sin tratamiento, (B) Lana después del proceso de suavizado, (C) Lana suavizada y nanoestructurada.



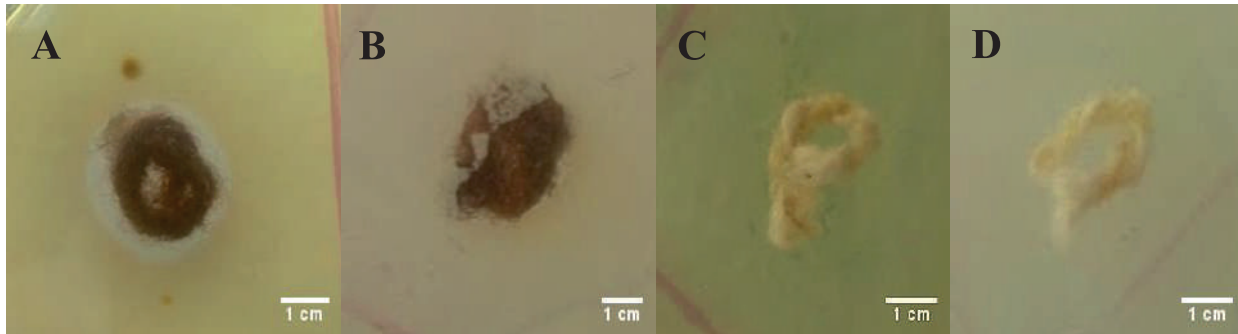
Fuente: Elaboración de los autores

Pruebas microbiológicas y de lavado de la lana suave y nanoestructurada

La actividad antibacteriana de las fibras suavizadas y nanoestructuradas con plata se comprobó con dos bacterias comúnmente encontradas en la piel, *P. aeruginosa* y *S. aureus*, siendo estas Gram-negativa y Gram-positiva, respectivamente.

En la Figura 11, se presentan los resultados de la exposición aproximadamente durante 30 h de las respectivas muestras; tiempo escogido teniendo en cuenta que la *S. aureus* crece en 24 horas.

Figura 11. Efecto antibacterial de las fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas en (A) *Pseudomonas aeruginosa* y (B) *Staphylococcus aureus*, y el efecto antibacterial de las fibras de lana virgen de oveja en (C) *Pseudomonas aeruginosa* y (D) *Staphylococcus aureus*

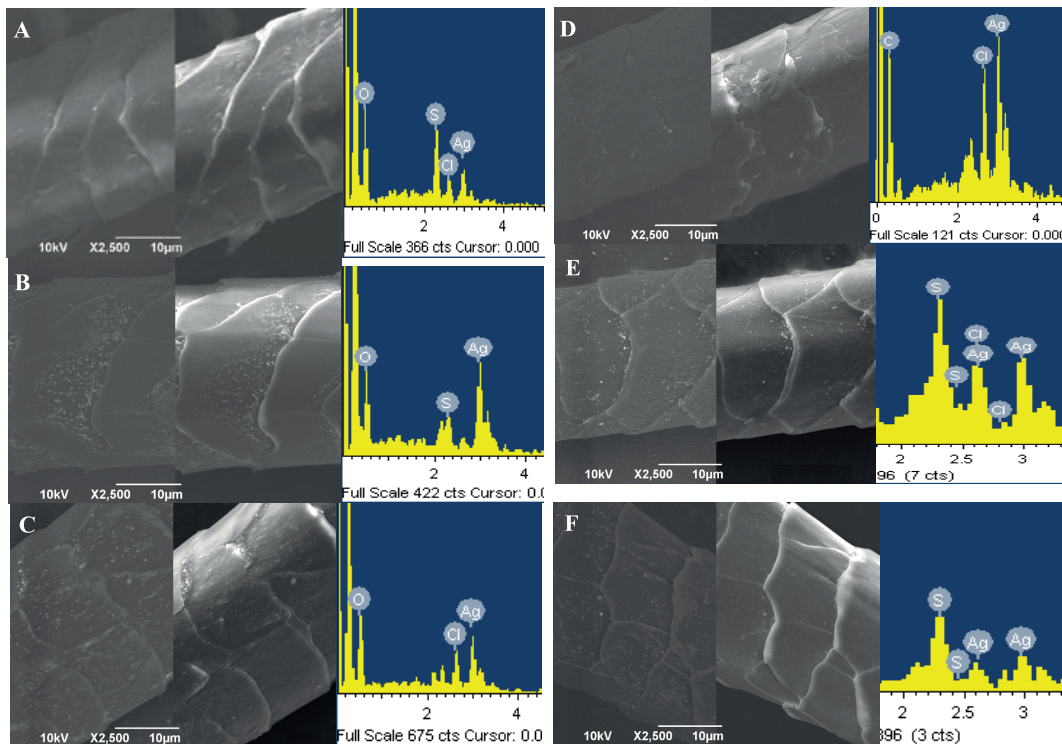


Fuente: Elaboración de los autores

Al tenerse en cuenta estos resultados, en la parte C y D de la Figura 11 no se observa ninguna muestra de inhibición sobre el crecimiento de las bacterias utilizadas, ya que estas fibras no se encuentran con ningún tipo de tratamiento de nanoestructuración. Por otro lado, en la parte B se observa que el anillo de inhibición no se encuentra muy definido por lo que se dibujó una circunferencia de color rojo, posiblemente porque la visualización de las muestras se realizó en un tiempo posterior al adecuado, ya que el *S. aureus* empieza a crecer a partir de 24 h y al ser expuesto a mayor tiempo ya no se puede observar claramente el anillo de inhibición. Sin embargo, en la parte A si se presenta el anillo de inhibición del perfil de crecimiento de la bacteria utilizada alrededor de la muestra; este anillo presenta una distancia desde el centro de la muestra aproximadamente de 30 mm, lo que permite establecer que la lana tratada con AgNPs efectivamente tiene propiedades que retrasan la actividad microbiana. En la investigación realizada por Lu y colaboradores, en la cual nanoestructuran fibras provenientes del gusano de seda con nanopartículas de plata donde obtienen un halo de inhibición de 18,4 mm transcurridas 5h cuando la seda está en contacto con *S. aureus* [25].

Finalmente, las pruebas de lavado se realizaron con el fin de establecer la adherencia de las nanopartículas de plata sobre la superficie de la fibra de lana y se visualizaron las diferentes muestras por SEM (Figura 12) para rectificar su permanencia. Aquí se observa como a medida que se aumentan los ciclos de lavado la cantidad de recubrimiento de plata presente en estas va disminuyendo. Sin embargo, después de diez ciclos de lavado (F) se comprueba que aún permanecen AgNPs. Posteriormente a la visualización, se decidió realizar EDS (Figura 12) para verificar la presencia de plata sobre las fibras lavadas, obteniendo como resultado que en todas las muestras después de los diferentes ciclos de lavado, en efecto, permanece el compuesto adherido a la lana.

Figura 12. Micrografías donde se observa en la imagen a la izquierda BSE (Back Scattering Electron) y en el centro SE (Secondary Electrons) y en la derecha EDS (A) lana suavizada y nanoestructurada sin lavado, (B) lana suavizada y nanoestructurada con 1 lavado, (C) lana suavizada y nanoestructurada con 3 lavados, (D) lana suavizada y nanoestructurada con 5 lavados, (E) lana suavizada y nanoestructurada con 7 lavados y (F) lana suavizada y nanoestructurada con 10 lavados.



Fuente: Elaboración de los autores

A partir de esto, se establece que el proceso de nanoestructuración de la fibra fue eficiente ya que después de los lavados se comprobó la adhesión de AgNPs sobre la fibra por medio de enlaces químicos, lo que permite que a través del lavado aún permanezcan presentes sobre la superficie, generando mayor duración de las propiedades mejoradas y menor migración al ambiente.

Aplicación industrial

Al asumir que la pérdida de arraigo cultural es consecuencia de la baja demanda de oportunidades económicas hacia la producción de lana actualmente, es factible proponer una serie de oportunidades para la lana en sí misma como fibra natural y ancestral que amplíe las opciones de trabajo para comunidades vinculadas al tejido, y que a su vez promueva la memoria, identidad cultural frente al tejido y el tejido como un patrimonio [27].

A partir del siglo XVIII los zapateros tenían como única preocupación los factores externos del pie. Comenzando el siglo XX empezó formalmente el estudio de los movimientos humanos individuales como la secuencia que preparó Eadweard Muybridge en 1901, New York, la cual constaba de 196 placas que registraron 4.700 tomas individuales del movimiento humano, logrando hacer una investigación en conjunto con el fisiólogo Marey, cuyo modelo hasta la actualidad ha servido como ejemplo para muchos diseñadores y empresas especializadas en diferentes tipos de calzado [28].

El análisis de la fibra de lana virgen de oveja como fibra rústica ancestral y la cadena productiva artesanal llevó a realizar ensayos desde la fibra para dar características funcionales con valor agregado textil que a su vez es transferido a la superficie diseñada y elaborada en tejido plano, proponiendo como posible usuario personas de diferentes edades, con pie diabético etapa 1, el cual provoca malformaciones físicas en el pie y es por esto que su cuidado es de vital importancia para prevenir alteraciones y lesión en las extremidades inferiores del cuerpo humano [28].

La lana está constituida por una arquitectura naturalmente cálida, confortable, flexible y generosa que posiblemente brinde bienestar a las personas con pie diabético en la etapa 1, generando una buena transpiración al pie, gracias a las características fisiológicas de la construcción, la superficie textil de lana y minimizando el impacto cutáneo o posibles heridas posteriores al uso de calzado por contacto de ambas superficies. Por lo que se plantea que los pacientes con pie diabético deben permanecer siempre calzados, con los pies a una temperatura media, usar medias, el calzado debe ser hecho a la medida, con separación de dedos, en una material suave y liviano, plantilla antibacterial y suela de alta densidad para prevenir las laceraciones de planta [28].

Bajo este esquema de guía básica para estadios tempranos y preventivo se realizó una intersección entre la química y el diseño de indumentaria, dando lugar a una fibra de lana suave con propiedades antibacteriales, las cuales son beneficiosas para las personas con pie diabético tipo 1, generando una experiencia de uso que acompañe a los usuarios, otorgándole características ideales para el pie como lo son la temperatura, antibacterialidad, diseño ergonómico hecho sobre medida y bueno un factor principal, un producto pensado en la sostenibilidad, el diseño y la funcionalidad, los cuales van directamente relacionados a generar una experiencia de diseño para un objeto funcional. En este caso la fibra de la oveja que entreteje el saber ancestral del pastoreo de ovinos, la artesanía y el diseño para generar bienestar al cimiento corporal de la humanidad los pies [28].

CONCLUSIONES

Se establecieron las propiedades físicas y químicas de la lana cundiboyacense encontrando características aprovechables para una investigación detallada y un mejoramiento de la misma para su aplicación en diferentes campos, ya que las fibras suavizadas y nanoestructuradas tienen un potencial significativo a la hora de desarrollar textiles que requieran un bajo crecimiento bacteriano y una textura confortable.

Se estableció una metodología de suavizado especializada en fibras de lana virgen de oveja cundiboyacense teniendo presente que esta reduce el efecto en el daño ambiental y aumenta la rentabilidad, proporcionando una alternativa para la disposición de esta fibra dando un valor agregado.

La luz ultravioleta (UV) es una alternativa eficiente que beneficia el crecimiento de las nanopartículas de plata sobre la superficie de la fibra, otorgando propiedades antimicrobianas al material.

La metodología de suavizado y nanoestructuración realizada a las fibras de lana virgen de oveja mejora las propiedades físicas de densidad lineal y finura, haciendo que disminuyan un 10% la masa por unidad de longitud y el título dTex (66/2) en comparación con el hilo en estado natural 0,0472 g/m y 73/2, respectivamente.

La lana de oveja proveniente del altiplano cundiboyacense tiene una fuerte compatibilidad con el método de nanoestructuración y las nanopartículas de plata, ya que se observa una gran adherencia de éstas a la superficie de la fibra después de realizar 10 de ciclos de lavado. La lana de oveja suavizada y nanoestructurada presenta características adecuadas para suplir la necesidad de personas con diabetes tipo 1 respecto a la comodidad e higiene en el uso de zapatos especializados, proporcionando la posibilidad de habilitar nuevos mercados para la fibra y cambiar el uso de cuero y cuerina en este tipo de calzado.

Nomenclatura

a* rango de color entre verde y rojo
 b* rango de color entre azul y amarillo
 c* croma
 g diámetro transversal de la fibra, mm
 °HUE Matiz
 IC índice de color
 L* luminosidad
 L longitud de la madeja, m
 M masa de la madeja, g
 P perímetro del rollo, cm
 R diámetro externo de la madeja, cm
 r diámetro interno de la madeja, cm

Agradecimientos

La presente investigación fue realizada gracias a la Universidad Jorge Tadeo Lozano, al Laboratorio de Nanobioingeniería y al proyecto titulado "Nanoestructuración y experimentación de fibras proteicas para superficies textiles y moda sostenible" (CC12101533) y la colaboración del Profesor del Dr. Miguel Ángel Rodríguez Araujo.

APÉNDICES

Elección de reactivo

Al comparar los datos recolectados en la Tabla A1, se observa como el producto que contiene DHM es 95% más económico y se necesita un 34% menos de cantidad en gramos que el producto con carboximetilcisteína; es por esto que se seleccionó el reactivo "Y" como reactivo suavizante.

Tabla A1. Reactivos utilizados experimentalmente.

PRODUCTO	REACTIVO DE INTERÉS	MASA DE LANA (g)	MASA DE REACTIVO (g)	COSTO EN PESOS (1 mL)
Solución de carboximetilcisteína.	Carboximetilcisteína.	1	5,01	450
Hidromasaje capilar.	Dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM).	1	3,30	19,81

Fuente: Elaboración de los autores

REFERENCIAS

- [1] D. López, Tendencias tecnológicas ciclo de vida de producto, Industria fibra textil Confección. CIDETEXCO. 2011.
- [2] M. Rodríguez y Y. Lana, una puesta de Colombia en el mundo de la moda. Obtenido del periódico EL ESPECTADOR: <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/lana-una-apuesta-de-colombia-elmundo-de-moda-articulo-534234>, 2014.
- [3] J.W.S. Hearle, Physical properties of wool. Wool: science and technology. Nafeie, N. 2002.
- [4] Elsevier B. V. Scopus. Obtenido de: <https://www.scopus.com>, 2017.
- [5] J.F. Mongillo, Nanotechnology 101, 2007.
- [6] S. Gowri, L. Almeida, T. Amorim, N. Carneiro, P. António y E.M. Fátima Polymer nanocomposites for multifunctional finishing of textiles – a review. Text Res J, 80, 1290-1306. 2010.
- [7] I. Holme, Finishing chemicals provide technical textiles enhancements. Journal for Asia on Textile & Apparel, October issue, 2009.
- [8] M.R. Linford, D.S. Soane, D.A. Offord y W. Were Jr, Durable finishes for textiles, US Patent 6,872,424 (to Nano TexLLC, USA) 2005.
- [9] B. Siegfried, Functions, nanoparticles and commercial applications. Semester Thesis in the frame of the “Nanosafe-Textiles” project TVS Textilverband Schweiz and EPA. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*78337/-/1=1, 2007.
- [10] D.S. Soane y D.A. Offord, Modified textiles and other materials and methods for their preparation. US patent 6,379,753 B1 (to Nano-Tex, LLC, USA), 2002.
- [11] C-H. Xue, S-T. Jia, J. Zhang y J-Z. Ma, Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: and overview. Sci Technol Adv Mater, 11, 1-15. 2010a.
- [12] R. Dastjerdi y M. Montazer, A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. Coll Surf B: Biointerfaces, 79, 5-18, 2010.
- [13] M.L. Gulrajani, The use of nanotechnology in the finishing of technical textiles. Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles, 280. 2013.
- [14] C-H. Xue, T-L. Wang, J. Zhang, S-T. Jia y L-Q. Tian, (. Growth of ZnO nanorod forest and characterization of ZnO-coated nylon fibers. Mater Lett, 64(3), 327-330. 2010b.
- [15] D. Li y G. Sun ‘Coloration of textiles with self-dispersible carbon black nanoparticles’ Dyes and Pigments 72 144–149, 2007.

- [16] A. Bozzi, T. Yuranova, I. Guanaquillo, D. Laub y J. Kiwi 'Self-cleaning of modified cotton textiles by TiO₂ at low temperatures under daylight irradiation' *J Photochem Photobiology A: Chem* 2005a 174 156–164.
- [17] A. Bozzi, T. Yuranova y J. Kiwi 'Self-cleaning of wool-polyamide and polyester textiles by TiO₂-rutile modification under daylight irradiation at ambient temperature' *J Photochem Photobiology A: Chem* 2005b, 172 27–34.
- [18] JY. Hu, Y. Li, YF. Chang, KW. Yeung y CW. Yuen 'Transport properties of fabrics treated with nano-wool fibrous materials', *Coll Surfaces A: Physiochem Eng Aspects* 300 136–139, 2007.
- [19] W. Xu, J. Fang, W. Cui y J. Huang 'Modification of polyurethane by superfine protein powder' *Poly Eng Sci* 2006 46(5) 617–622.
- [20] W. Xu, X. Wang, WB. Li, X. Peng, X. Liu y X. Wang 'Characterization of superfine wool powder/poly(propylene) blend film' *Macromol Mater Eng*, 2007, 292(5) 674–680.
- [21] ASTM Standard D1907. Linear Density of Yarn (Yarn Number) by the Skein Method 1, (August), 1–9. <https://doi.org/10.1520/D1907>, 2012.
- [22] J. Giraldo Manual Técnico Textil (Edición Especial N° 4). Medellín, Colombia. Microdenier S.A., Polynylon, Grupo Gomelast & Lycra. Retrieved from <http://www.microdenier.com.co/manualtecnico.pdf>, 2015.
- [23] ASTM Standard D 276. Standard Test Methods for Identification of Fibers in Textiles, Vol. 7, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2000.
- [24] M. Díaz y C. Limas. Fibras de yanchama colorada (*Brosimum utile*) retardantes a la llama producidas a partir de nanoestructuración con hidróxido de magnesio. Tesis Ingeniería Química. Universidad Jorge Tadeo Lozano. 2016.
- [25] Z. Lu, M. Meng, Y. Jiang y J. Xie, UV-assisted in situ synthesis of silver nanoparticles on silk fibers for antibacterial applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 447, 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.064>, 2014.
- [26] SENA-Centro Nacional Textil. Control de calidad de análisis cuantitativo de fibras textiles. 2009. <https://controldecalidad.wordpress.com/>.
- [27] T. Vu, Y. Xue, T. Vuong, M. Erbe, C. Bennet, B. Palazzo y X. Hu, Comparative study of ultrasonication-induced and naturally self-assembled silk fibroin-wool keratin hydrogel biomaterials. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1–15, <https://doi.org/10.3390/ijms17091497>, 2016.
- [28] A. Dotor y K. Ramos, La lana: fibra ancestral como propuesta para superficie textil sostenible de calzado. Bogotá, Colombia: Revista Kepes. 2016.