

# Application of nanotechnology to improve the durability of smart textiles in the health sector: A systematic review of the literature.

Merino-Ramirez Praxedes Jeanpierre<sup>1</sup>; Vásquez Espinoza Juan Manuel<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, [U20229987@utp.edu.pe](mailto:U20229987@utp.edu.pe), [C21208@utp.edu.pe](mailto:C21208@utp.edu.pe)

*Abstract– This systematic literature review analyzes the application of nanotechnology to improve the durability of smart textiles in the healthcare sector. A quantitative and descriptive methodology was used based on the PIOC and PRISMA approaches, analyzing 72 scientific articles (2020-2024) extracted from Scopus. The main challenges in the durability of these textiles, the nanotechnological techniques used, the performance indicators and their applications in the medical field were identified. The results demonstrate that the integration of nanomaterials, such as silver nanoparticles, titanium dioxide and zinc oxide, improves resistance to abrasion, UV radiation and chemical agents, in addition to conferring antimicrobial and self-cleaning properties essential for healthcare environments. Additionally, advanced incorporation techniques were explored, such as electrospinning and plasma coating, which optimize the functionality and useful life of textiles. This review provides a solid scientific basis for future research and the development of more durable smart textiles, highlighting the importance of interdisciplinary collaboration and nanotechnology innovation in the healthcare sector.*

*Keywords– Nanotechnology, Smart textiles, Durability, Health Sector.*

# Aplicación de la nanotecnología para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud: Una revisión sistemática de la literatura.

Merino-Ramirez Praxedes Jeanpierre<sup>1</sup> ; Vásquez Espinoza Juan Manuel<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, [U20229987@utp.edu.pe](mailto:U20229987@utp.edu.pe), [C21208@utp.edu.pe](mailto:C21208@utp.edu.pe)

**Resumen**– Esta revisión sistemática de la literatura analiza la aplicación de la nanotecnología para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud. Se empleó una metodología cuantitativa y descriptiva basada en los enfoques PIOC y PRISMA, analizando 72 artículos científicos (2020-2024) extraídos de Scopus. Se identificaron los principales desafíos en la durabilidad de estos textiles, las técnicas nanotecnológicas utilizadas, los indicadores de desempeño y sus aplicaciones en el ámbito médico. Los resultados demuestran que la integración de nanomateriales, como nanopartículas de plata, dióxido de titanio y óxido de zinc, mejora la resistencia a la abrasión, radiación UV y agentes químicos, además de conferir propiedades antimicrobianas y autolimpiables esenciales para entornos sanitarios. Asimismo, se exploraron técnicas avanzadas de incorporación, como electrospinning y recubrimiento por plasma, que optimizan la funcionalidad y vida útil de los textiles. Esta revisión aporta una base científica sólida para futuras investigaciones y el desarrollo de textiles inteligentes más duraderos, resaltando la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la innovación nanotecnológica en el sector salud.

**Palabras clave**– Nanotecnología, Textiles inteligentes, Durabilidad, Sector Salud.

## I. INTRODUCCIÓN

En 1959, Richard Feynman introdujo el concepto de nanotecnología, y en 1974, Norio Taniguchi lo desarrolló en mayor profundidad [1]. La nanotecnología se define como un campo interdisciplinario que manipula materiales a nivel nanométrico (1-100 nm) para modificar y mejorar sus propiedades [2], lo que ha permitido su incorporación en la industria textil para mejorar las propiedades mecánicas, químicas y físicas de fibras y tejidos. Su implementación en textiles destinados al sector salud es especialmente relevante, ya que fortalece el vínculo entre la industria textil y la médica, impulsando el desarrollo de textiles inteligentes con funcionalidades avanzadas [2].

En la actualidad, los principales centros de investigación global colaboran con la industria textil para la fabricación de textiles nanoestructurados, orientados a mejorar la durabilidad y desempeño de estos materiales en aplicaciones sanitarias [1]. Tradicionalmente, los textiles presentaban limitaciones en su durabilidad, pero la nanotecnología ha permitido optimizar los procesos de hilatura, acabado y aplicaciones por el usuario, proporcionar a los tejidos de propiedades como afinidad mejorada, resistencia y efectos antimicrobianos y antiestáticos [3]. Además, la incorporación de nanomateriales incrementa la resistencia a la abrasión y factores ambientales como la radiación UV, productos químicos y humedad [4]. Los recubrimientos y acabados nanoestructurados también permiten

obtener a los textiles capacidades autolimpiables y antiarrugas, esenciales en aplicaciones médicas donde la higiene y la seguridad son prioritarias [5]. A pesar de su potencial, la aplicación de nanotecnología en textiles enfrenta diversos desafíos. Entre ellos, los altos costos de manufactura y la distribución limitan su acceso a sectores de bajos recursos [6]. Además, la variabilidad en las normativas y estándares de calidad en distintos países dificulta su adopción y comercialización [7]. Desde una perspectiva ambiental, la nanotecnología busca fomentar la fabricación de textiles sostenibles, pero su durabilidad sigue siendo un reto, ya que la resistencia promedio de estos productos es de solo 10 ciclos de lavado [2], [3]. Para superar estas barreras, la cooperación internacional es clave para promover la transferencia tecnológica y el desarrollo equitativo de estos materiales [8].

La nanotecnología posee un alto potencial económico y científico, aunque aún no ha alcanzado su máximo desarrollo. Las controversias sobre la composición y estructura química de los nanomateriales reflejan la necesidad de enfoques sostenibles en su aplicación [7]. Además, la escasez de revisiones sistemáticas de la literatura (RSL) sobre nanotextiles en el sector salud impide una apreciación completa de su impacto. Los retos regulatorios, económicos y científicos también limitan su producción a gran escala [8]. No obstante, la nanotecnología está revolucionando la fabricación de textiles inteligentes, ofreciendo soluciones innovadoras que reducen la demanda de tratamientos médicos [8]. Su impacto social es significativo, ya que mejora la calidad de vida de los usuarios a través de aplicaciones terapéuticas, diagnósticos y monitoreo de enfermedades [9]. Desde una perspectiva técnica y científica, la integración de nanomateriales en textiles abre nuevas posibilidades para el desarrollo de productos médicos con mayor durabilidad, funcionalidad y confort [10].

A pesar del creciente interés en la nanotecnología para los textiles inteligentes en el sector salud, no existe una revisión sistemática que aborde su impacto en la durabilidad de estos materiales. Esta RSL organiza los avances clave, identifica vacíos de conocimiento y orienta futuras investigaciones, facilitando el desarrollo de textiles más resistentes. El objetivo es analizar cómo la nanotecnología mejora la durabilidad de estos textiles, abordando desafíos, materiales y evaluaciones en el sector salud.

## II. METODOLOGÍA

Esta investigación implementó una RSL con el objetivo de analizar cómo la nanotecnología ha sido aplicada para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud, un

tema de gran relevancia en el ámbito médico. Como parte inicial de la estrategia de búsqueda se establecieron los componentes del acrónimo PIOC (Población, Intervención, Resultados, Contexto) para la RSL, a partir de los cuales se plantearon sus respectivas Research Question (RQ).

TABLA I

PREGUNTAS CONSTRUIDAS MEDIANTE METODOLOGÍA PIOC

	¿Cómo la nanotecnología puede ser aplicada para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud?	RQ
P	¿Cuáles son los desafíos en cuanto a la durabilidad de los textiles inteligentes que enfrenta el sector salud?	RQ1
I	¿Qué tipos de nanomateriales y técnicas de nanotecnología se han investigado y aplicado para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes?	RQ2
O	¿Con que indicadores se ha logrado medir la durabilidad de los textiles inteligentes desarrollados con nanotecnologías?	RQ3
C	¿En qué áreas específicas del sector salud se han implementado los textiles inteligentes mejorados con nanotecnología?	RQ4

Se determinaron las palabras clave para responder a las controversias y, a continuación, se buscaron términos asociados a cada PIOC para obtener una base de datos confiable. La búsqueda se limitó a artículos científicos de ingeniería de libre acceso en Scopus, publicados entre 2020 y 2024, en español e inglés. Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) y símbolos de truncamiento (\*) y comillas (“”) para optimizar la precisión y cobertura de los resultados.

TABLA II

RESUMEN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA BÚSQUEDA.

Parámetros para la búsqueda de información	
Pregunta de investigación	¿Cómo la nanotecnología puede ser aplicada para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud?
Ecuación General	(TITLE-ABS-KEY("Smart E-textiles" OR "Bifunctional smart textiles" OR "bifunctional textiles" OR "Antibacterial textiles" OR "Functional textiles" OR "UV protection textiles" OR "Antimicrobial textiles" OR "Water and oil repellent textiles" OR "Anti-odor textiles" OR "Wrinkle-resistant textiles" OR "Anti-static textiles" OR "Stretchable electronic textile" OR "Textile sensors" OR "Hydrogel textile" OR "Hydrogel dressing" OR "Technical textiles" OR "Medical textiles" OR "Textiles in healthcare" OR "Hospital textiles" OR "Therapeutic tissues" OR "Monofilament OR "Multimaterial fibers" OR "Biomedical textiles" OR "sensors") AND TITLE-ABS-KEY(carbon OR nanoscale OR nanometer OR biotechnology OR nanotechnology OR nanofibers OR nanofinishing OR nanocomposites OR lamination OR "Textile fibers OR nanomaterials OR nanoparticles OR nanotubes) AND TITLE-ABS-KEY("UV resistance" OR quality OR endurance OR durability OR "Durability Testing" OR "Wear Resistance" OR "Abrasion Resistance" OR "Washing Resistance" OR "Chemical Durability" OR "Mechanical Resistance") AND TITLE-ABS-KEY Medical devices" OR "Textile devices" OR bandages OR "pain relief OR healthcare OR "Health care" OR medical OR clinical OR biomedical OR textile OR "health sector" OR "textile sector" OR "textile industry OR "health industry" OR "Wound dressings" OR "Implantable devices" OR "Hygiene products" OR "Patient monitoring" OR "Protective clothing" OR "Operating rooms" OR

	"tissue regeneration" OR therapies OR monitoring)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar"))
Base de datos	Scopus.
Periodo de selección	2020 – 2024.
Idioma	Inglés. Español.
Tipo de documento	Artículo científico.
Accesibilidad	Open Access.
Criterio de selección	Proceso elaborado por 3 puntos principales, comprendido en 9 etapas (figura 1).

Tras aplicar la ecuación de búsqueda PIOC en Scopus, se obtuvieron 1,333 artículos. Siguiendo la metodología PRISMA [11], se seleccionaron 72 artículos relevantes para la RSL, excluyendo 639 por incoherencia en el título, 108 por falta de acceso libre, 56 por estar en idiomas distintos al inglés o español, 87 por no estar relacionados con el sector salud, 273 por no coincidir con el año especificado, 15 sin identificador digital, 69 que no aplicaban nanotecnología a la durabilidad y 14 sin palabras clave. El proceso de selección se muestra en el flujo PRISMA de la figura 1.

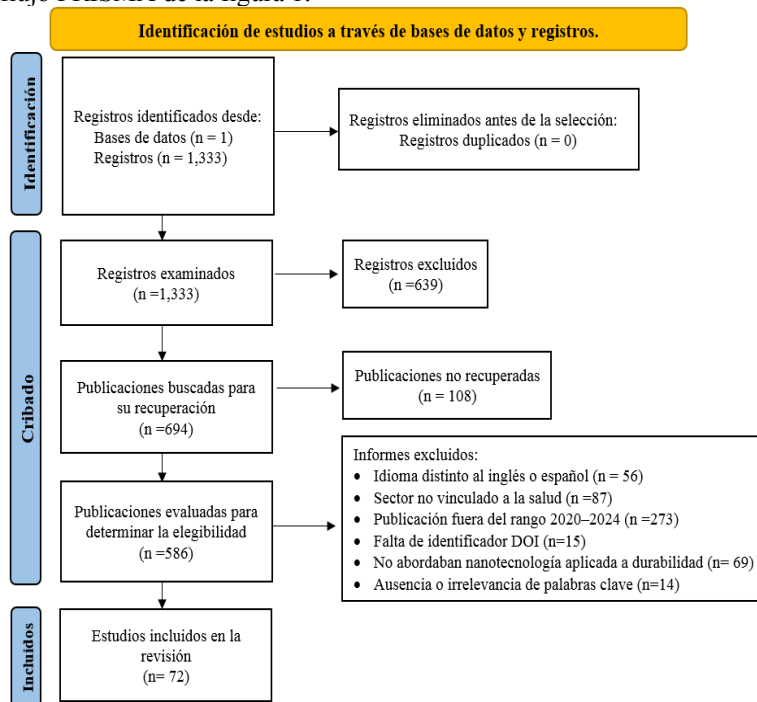


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA.

Nota. Adaptado de <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020>

La figura 1 muestra los resultados derivados del análisis exhaustivo de investigación; se destaca la consulta efectuada en la plataforma científica de datos Scopus, encontrando inicialmente 1,333 artículos. Además, tras aplicar los criterios de selección rigurosos, se identificaron 72 artículos relevantes para la RSL. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para analizar la durabilidad de los textiles inteligentes mediante nanotecnología para el sector salud.

### III. RESULTADOS

#### A. Hallazgos de análisis Bibliométricos

Se analizaron 72 artículos publicados entre 2020 y 2024. El 2023 fue el año con más publicaciones (21 artículos, 29.2%), reflejando un auge en la investigación de este campo. El 2020 también tuvo una alta producción (19 artículos, 26.4%), marcando un fuerte inicio en el estudio de nanotecnología en textiles inteligentes. En 2022 se registraron 16 publicaciones (22.2%), mientras que en el 2021 hubo una ligera disminución con 12 artículos (16.7%). En 2024, hasta la fecha, se han publicado 4 artículos (5.6%).

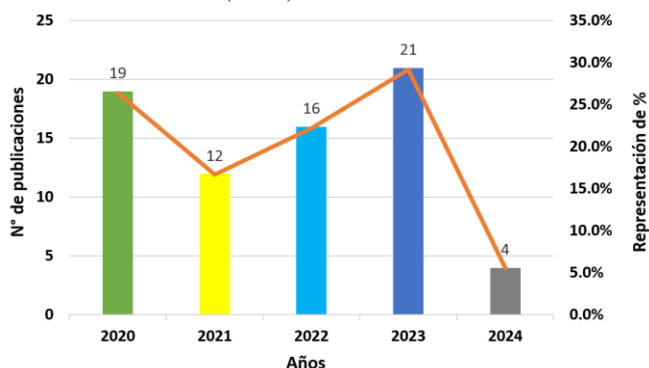


Fig. 2 Artículos realizados por año de publicación

La figura 3 exhibe claramente una distribución de publicaciones por continentes, resaltando una marca predominante en el continente asiático con 44.4% del total de los estudios revisados y el continente europeo sigue de cerca, contribuyendo con un 40.3% de las publicaciones. Por otro lado, el continente americano muestra un 9.7% de las publicaciones y con un 5.6% el continente oceánico investigación a nivel global.

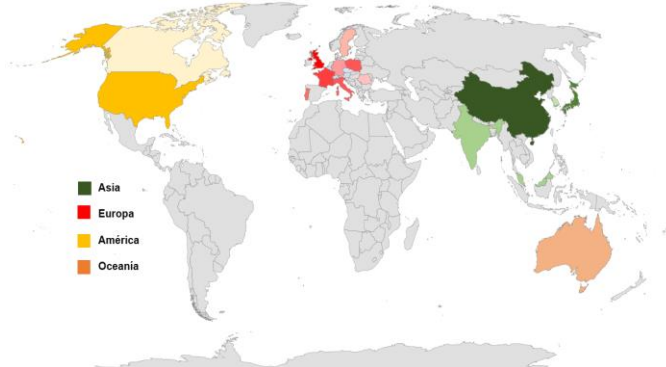


Fig. 3 Publicaciones realizadas por continentes

En la Figura 4, el gráfico circular muestra la preponderancia de China en la investigación sobre nanotecnología para mejorar textiles inteligentes en salud, con un 27.8% de las publicaciones. Le sigue Corea del Sur con 9.7%, Reino Unido (8.3%), Australia, Francia, Italia y EE. UU. (5.6%), mientras que Japón, Canadá, Polonia, (4.2%), países como Alemania, Austria y Suiza (2.8%) y entre otros con un (1.4%).

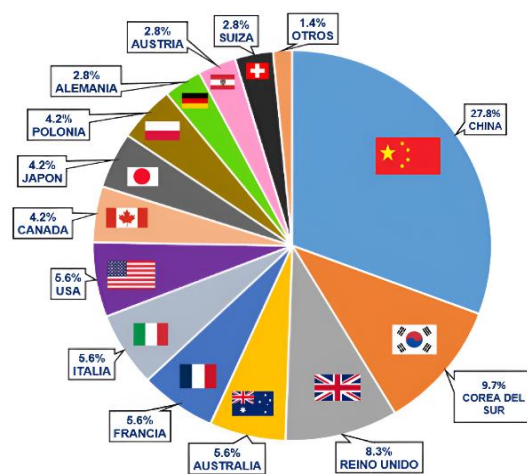


Fig. 4 Publicaciones realizadas por país

La Figura 5 muestra la distribución de investigaciones publicadas en varias revistas científicas. La revista con mayor cantidad de artículos publicados es Sensors con un 18.1% de la muestra total, seguido por Sensors (Switzerland) con un equivalente de 15.3% del total de artículos publicados. Advanced Science destaca con un 8.3%. Además, las revistas como Advanced Materials Interfaces, Micromachines y Sensors and Actuators A: Physical también tiene una notable presencia con 5.6% cada una. También, Biosensors tiene un 4.2% de publicaciones referentes al tema investigado. Asimismo, revistas como ACS Nano, Energies, IEEE Sensors Journal, International Journal of Smart and Nano Materials y SN Applied Sciences han publicado una equivalencia de 2.8% cada una, y entre otras revistas con un 1.4% de publicaciones cada una mencionadas en la figura 5.

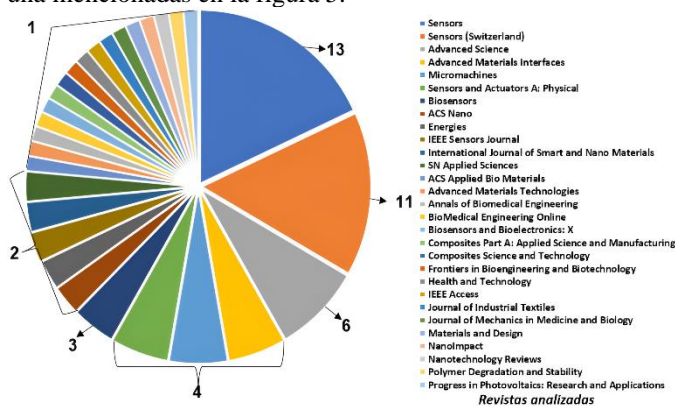


Fig. 5 Investigaciones por revistas de publicación

La figura 6, permite visualizar que autores como Zhu, Kefan y Davies James tienen nodos más prominentes, lo cual sugiere que son autores prolíficos con muchas colaboraciones en la base de datos analizada. Finalmente, autores como Phan, Hoang- Phoung y Do-Thanh Nho se encuentran en posiciones centrales del grafo, lo que indica que pueden actuar como nodos de intermediación, facilitando la conexión entre diferentes subgrupos de la red.



***I: ¿Qué tipos de nanomateriales y técnicas de nanotecnología se han investigado y aplicado para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes?***

Para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes, se han investigado diversos nanomateriales debido a sus propiedades excepcionales, tales como alta conductividad, flexibilidad y resistencia al desgaste. Entre los más destacados se encuentran las nanopartículas de plata, carbono, cobre (NPs Ag, C, Cu), los nanotubos de carbono (NTC), el grafeno (Cx) y sus derivados, como el óxido de Cx y el Cx reducido [13]-[34]. Estos materiales no solo proporcionan una excelente conductividad eléctrica y estabilidad mecánica, sino que también presentan propiedades antimicrobianas y resistencia a la abrasión. En este contexto, los hilos recubiertos de Ag y las NPs Ag integradas en los textiles mediante técnicas como la costura en zigzag y la serigrafía han demostrado mantener la funcionalidad de los materiales tras múltiples lavados, garantizando tanto su flexibilidad como su durabilidad [35], [38],[40], [43]-[47], [49], [52].

Además de los nanomateriales, las técnicas de nanotecnología aplicadas han sido fundamentales para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes. Métodos como la deposición física de vapor y la serigrafía se han utilizado para crear capas electroconductoras finas y flexibles sobre sustratos textiles, lo que mantiene la comodidad y funcionalidad del material [52], [54]-[57]. Asimismo, el recubrimiento con nanotubos de carbono y el uso de tintas conductoras basadas en grafeno han demostrado ser eficaces para mejorar la estabilidad mecánica y eléctrica de los textiles bajo condiciones de uso exigentes [48]. Estas técnicas facilitan una integración profunda y uniforme de los nanomateriales en las fibras textiles, lo que es crucial para garantizar su durabilidad a largo plazo [55], [56], [59], [70]. Por otro lado, los avances en la funcionalización superficial y el recubrimiento de nanomateriales también han jugado un papel importante en la mejora de la durabilidad de los textiles inteligentes.

Técnicas como la nanoencapsulación y los nanorecubrimientos con nanocapas brindan una protección adicional contra el desgaste mecánico y la exposición a elementos externos como el agua y el sudor [12]-[36], [59]-[71]. Por ejemplo, los textiles inteligentes con recubrimientos de polidopamina y NTC han demostrado tener una mayor resistencia a la deformación mecánica, manteniendo al mismo tiempo una alta conductividad. Además, la incorporación de NPs metálicas en matrices poliméricas mejora la resistencia al desgaste y la estabilidad química, lo que contribuye a hacer los textiles más duraderos y funcionales en aplicaciones prácticas [72]-[82]. Estos avances reflejan la innovación y el enfoque intensivo de la investigación en la nanotecnología aplicada a los textiles inteligentes. En la tabla IV se muestran nanomateriales y técnicas de nanotecnología que se han implementado en estos textiles inteligentes.

TABLA IV  
NANOMATERIALES Y TÉCNICAS IMPLEMENTADAS

Nanomateriales	Propiedades	Referencias
NPs vegetales	Antimicrobianas, UV, antioxidante	[26], [27]
NPs metálicas: Ag, C, Cu	Antimicrobianas, conductividad, protección UV	[14], [22], [27], [28],[31]
NTC, nanofibras de polivinil butiral	Alta conductividad, flexibilidad, resistencia al desgaste	[12], [19], [31], [37], [51], [55], [75]
Cx y derivados	Conductividad, resistencia mecánica, gestión de humedad	[33], [57],[58], [66]
Óxidos metálicos	Propiedades antimicrobianas, protección UV	[30], [70]
Negro de carbono	Alta conductividad, propiedades dieléctricas	[15], [53]
Polímeros conductores	Conductividad, estabilidad	[47], [58]
Compuestos de polímeros	Resistencia al desgaste, estabilidad dimensional	[47]
Hilos recubiertos	Conductividad eléctrica, durabilidad mecánica	[16], [34], [35], [41], [56]
Láminas de cobre	conductividad, resistencia eléctrica	[17]
Técnicas de Nanotecnología	Aplicaciones	Referencias
Deposición física de vapor	Aplicar capas conductoras ultrafinas	[16]
Serigrafía	Aplicaciones de tintas conductoras y recubrimientos uniformados	[18],[33]
Almohadillado	Impregnación homogénea de líquidos con nanopartículas	[63], [64],[66]
Electrohilado	Producción de nanofibras integradas con nanomateriales	[19], [37], [54], [55], [75]
Impresión por chorro de tinta	Aplicación precisa de soluciones funcionales	[18], [74]
Sol-Gel	Formación de capas delgadas inorgánicas	[70]
Encapsulación	Protección de moléculas funcionales sensibles	[58]
Recubrimiento con nanocapas	Mejora de la resistencia mecánica y estabilidad química	[61], [89]
Costura en zigzag	Integración de hilos funcionales recubiertos	[28], [35], [52], [66]
Inmersión o agotamiento	Integración superficial o internamente de nanomateriales	[14], [26], [38], [51], [57], [58]

***O: ¿Con que indicadores se ha logrado medir la durabilidad de los textiles inteligentes desarrollados con nanotecnologías?***

La durabilidad de los textiles inteligentes desarrollados con nanotecnología se ha medido utilizando varios indicadores clave que evalúan tanto las propiedades eléctricas como mecánicas de los materiales. Uno de los indicadores más comunes es la resistencia eléctrica, que se emplea para monitorear el rendimiento del textil bajo condiciones de estiramiento, flexión y ciclos de lavado[37]. Este indicador permite evaluar la capacidad del material para mantener su conductividad a pesar de las deformaciones repetitivas, proporcionando información valiosa sobre la integridad de los sensores y su capacidad para funcionar a largo plazo [11], [12], [15], [54]-[63]. Otro indicador relevante es la resistencia a la tracción y al desgarro, que mide la capacidad de los textiles para soportar fuerzas mecánicas continuas. Este factor es crucial

para evaluar la integridad estructural de los textiles bajo condiciones de uso prolongado, especialmente en situaciones de estiramiento y desgaste. Además, la estabilidad de las propiedades funcionales, como la detección de parámetros fisiológicos, después de múltiples ciclos de lavado es esencial para asegurar que los textiles inteligentes mantengan su eficacia con el tiempo [22], [24], [65], [70], [77]. Finalmente, la biocompatibilidad y la resistencia a la degradación química y térmica son indicadores adicionales importantes. La biocompatibilidad es fundamental para garantizar que los textiles no causen irritaciones o reacciones adversas al contacto con la piel [64]. La resistencia a la degradación química y térmica permite verificar que los textiles puedan soportar condiciones ambientales adversas sin perder sus propiedades funcionales [65], [66], [77], [80]. En un análisis más detallado (Figura 8), los indicadores de resistencia eléctrica (31.8%) y resistencia al lavado (29.5%) fueron los más utilizados, seguidos por la resistencia a la tracción y desgarro, la resistencia a la abrasión y la estabilidad de las propiedades funcionales (11.4% cada uno), mientras que la resistencia a la degradación química y la biocompatibilidad representaron un 2.3% cada uno [54]-[81].

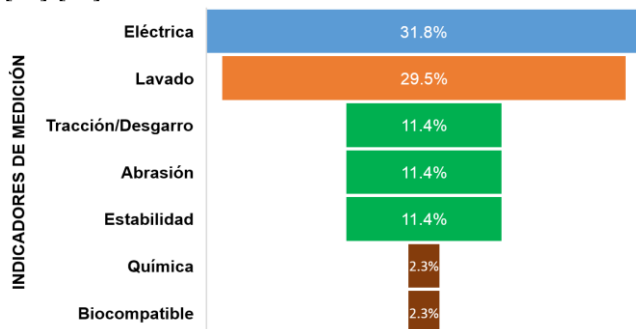


Fig. 8 Indicadores de medición de durabilidad de los textiles

Diversos estudios han demostrado que la integración de nanomateriales en textiles mejora significativamente su durabilidad, funcionalidad y respuesta mecánica. Por ejemplo, sensores textiles con NTC resistieron 60 ciclos de flexión-extensión [12]; hilos de nailon con NPs Ag conservaron conductividad tras 30 lavados [14]. Textiles con negro de carbono alcanzaron 99.44 % de sensibilidad y 96.23 % de precisión [15], y nanomateriales de poliuretano (PU) lograron  $1 \Omega/\square$  y alta flexibilidad [16]. Tinta de Ag mejoró 5.6 veces la fuerza de corte y redujo 4.2 veces la variación de resistencia [18]. Nanofibras de polivinil butiral ofrecieron 97.3 % de porosidad y buena elongación [19], mientras que recubrimientos de C brindaron alta estabilidad eléctrica (34.38), estiramiento del 40 % [20]. Nanoaditivos de C redujeron la resistencia de 100 M $\Omega$  a 100  $\Omega$  [21], y rodillera con NPs de C permitió estimulación eléctrica de hasta 60 mA sin molestias [22]. Se aplicaron en algodón NPs de (*Tridax procumbens*, *Azadirachta*, *Piper betle*, *Acalypha* y *Aloe vera*). *Tridax procumbens* presentó actividad antioxidante (98.17 %), *Aloe vera* con quitosano alcanzó protección UV (62.3 %), *Azadirachta* mostró propiedades hidrofóbicas (ángulo de

contacto de 154.5°) y acción antibacteriana (33.13 mm (*E. coli*) y 35.62 mm (*S. aureus*)) [26]. Además, NPs Ag sintetizadas con extracto de hoja de *Muntingia calabura* sobre algodón, poliéster y nailon redujeron la absorción de agua (-23 %) y mejoraron la densidad textil (+12.3 %) [27]. Electrodo de Ag resistieron 50 lavados, mientras los de Cu solo 10, aunque soportaron 10 000 ciclos de abrasión [28]. También se reportó transporte de humedad del 1145 % [30], sensibilidad estable tras lavado [33], deformación del 1047 % con propiedades antibacterianas [38] y generación de 120 V/20  $\mu$ A con borofeno [43]. Un sensor textil con membrana de nanofibras de celulosa alcanzó un factor de galga de 2050, detección de deformaciones <0.1 %, alta linealidad (>0.998) y durabilidad tras 2000 ciclos al 100 % de elongación [55]. Un textil no tejido con Cx presentó resistencia  $\approx 140 \Omega/\text{sq}$  tras 10 lavados y sensibilidad piezorresistiva en el rango 0-40 Pa [57]. La fibra de PEDOT: PSS encapsulada en PU/Cx, logró sensibilidad térmica de -1.72 %/°C, tiempo de respuesta de 17s, detección de 0.1 °C y resistencia al sudor [58]. Un recubrimiento tricapa SSF (ZrNbMo-Al-N) en algodón con aluminio alcanzó absorción solar  $\alpha = 92.8 \%$ , emisión  $\epsilon = 39.2 \%$  y reducción térmica (3.5 °C) [61]. Textiles con aleación líquida de galio y Cu mostraron solo 3 % de variación tras 1300 ciclos, con alta elasticidad y resistencia al lavado [68]. Un nanorecubrimiento de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) con Ag y propil metilfosfonato sobre algodón brindó protección UV 50+, 100 % de acción antibacteriana (*E. coli*, *S. aureus*) y mejoró resistencia térmica y al fuego [70]. Finalmente, un sensor textil basado en microtubos de C alcanzó una resistencia de aproximadamente 5,5 k $\Omega$  y un ángulo de contacto de 153°, manteniendo un rendimiento estable después de 1000 ciclos de estiramiento al 100 %, tanto en condiciones de agua como de sudor [78].

### C: ¿En qué áreas específicas del sector salud se han implementado los textiles inteligentes mejorados con nanotecnología?

Los textiles inteligentes mejorados con nanotecnología se han implementado de manera destacada en el monitoreo continuo de la salud, una de las aplicaciones más relevantes en el sector. Estos textiles, a menudo integrados con sensores avanzados como los electrodos textiles de plata, permiten la monitorización precisa de parámetros vitales, como el electrocardiograma, la frecuencia cardíaca y la respiración, lo que resulta fundamental para el manejo de enfermedades crónicas como arritmias y enfermedades cardiovasculares. Estos dispositivos proporcionan datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones clínicas y mejorando la gestión de tratamientos [11], [20], [21], [22], [55], [63].

Otra área clave es la rehabilitación y fisioterapia, donde los textiles inteligentes mejorados con nanotecnología se utilizan para monitorear movimientos articulares y evaluar la efectividad de los tratamientos. Los sensores incorporados en estos textiles permiten registrar los movimientos y ofrecer retroalimentación en tiempo real, ayudando tanto a pacientes como a terapeutas a ajustar los programas de rehabilitación de acuerdo con las necesidades individuales [46], [65], [66], [75],

[82]. El control de infecciones es también una de las áreas en las que se han implementado estos textiles. Gracias a sus propiedades microbianas, los textiles inteligentes, como ropa médica y vendajes, incorporan nanomateriales como la plata, conocidos por sus propiedades antibacterianas. Esto mejora la higiene y la seguridad en los entornos clínicos, reduciendo la propagación de infecciones nosocomiales [68], [73], [75], [82]. Además, los dispositivos portátiles de monitoreo, integrados en estos textiles, permiten medir y transmitir datos cruciales sobre la salud del usuario, como temperatura corporal, índices de glucosa y ritmo cardiaco, lo que subraya la versatilidad de esta tecnología en diversas aplicaciones médicas [69], [70], [82]. En la Figura 9, se observa que el área de monitoreo continuo de la salud representa el 48% de la implementación de textiles inteligentes, seguida por la rehabilitación y fisioterapia con un 40%, y el control de infecciones con un 12%.

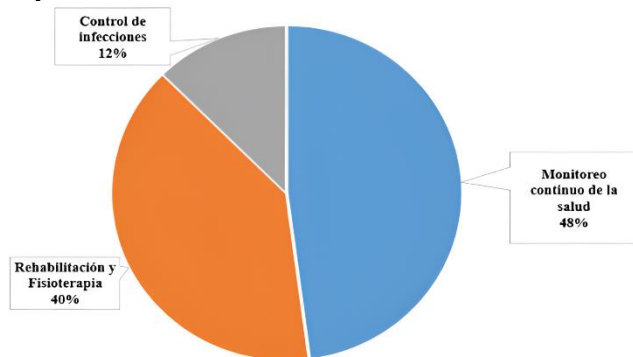


Fig. 9 Áreas donde se han implementado textiles con nanotecnología

#### IV. DISCUSIÓN

La presente RSL evidencia un notable incremento en la investigación sobre nanotecnología aplicada a la durabilidad de textiles inteligentes en el sector salud durante los últimos cinco años (2020–2024). En 2023, las publicaciones crecieron un 29.2% respecto a 2020, superando el incremento del 22% reportado por Ferreira et al. [79] entre 1989 y 2022. Este crecimiento responde al interés generado tras la pandemia [80]–[83], al progreso tecnológico [88] y al mayor acceso a fondos de investigación [89]. Estos factores consolidan la nanotecnología como una herramienta clave para mejorar los textiles inteligentes en el sector salud [90]. A nivel geográfico, Asia y Europa concentran el 44.4% y 40.3% de los estudios, respectivamente. Esta distribución plantea una oportunidad estratégica para América Latina, especialmente para países como Perú, que podrían impulsar la investigación local mediante el aprovechamiento de recursos naturales con potencial nanométrico. China y Corea del Sur lideran el área por sus políticas de innovación y capacidades industriales avanzadas [90]. En cambio, Oceanía solo representa el 9.7% de las publicaciones, lo que indica una necesidad de inversión [84], [90].

Entre las revistas más relevantes, *Sensors* y *Advanced Science* destacan con el 18.1% y 8.3% de los artículos, respectivamente. Ambas publicaciones son referentes en

tecnologías sensoriales y nanomateriales aplicados a la biomedicina [83], [91], lo que refleja el interés y la calidad científica en este campo. En las redes de colaboración sobresalen autores como Zhue, Kefan, Davies, Montazer M, Simoncic e Ibrahim NA [84], [90]. Estas alianzas facilitan el intercambio de conocimientos y fomentan avances interdisciplinarios. El nodo central de los estudios es "Smart textiles", lo que evidencia la integración de diversas disciplinas [83], [89], [90].

Entre los principales desafíos se encuentra la mejora de la durabilidad de los sensores ante lavados repetidos y condiciones ambientales adversas [94]–[98]. Factores como humedad, desgaste mecánico y cambios térmicos afectan su viabilidad a largo plazo [97]. También se requiere estandarización en los métodos de evaluación para garantizar la comparabilidad entre estudios [99]. Futuras investigaciones deben explorar técnicas como recubrimientos de nanocapas para optimizar la resistencia [100], [101].

Respecto a los nanomateriales, las NPs Ag, NTC, negro de carbono y Cx son los más efectivos para mejorar durabilidad, conductividad eléctrica y resistencia al desgaste [92], [100]. No obstante, persiste la necesidad de uniformar los métodos de prueba [103]. Por ejemplo, sensores con NTC soportaron 60 ciclos de flexión/extensión, duplicando los resultados de otros materiales [12]. Hilos de nailon con Ag conservaron su conductividad tras 30 lavados [14], mientras que textiles con negro de carbono lograron 99.44% de sensibilidad y 96.23% de precisión [15]. En contraste, los electrodos de Ag resistieron solo 50 lavados [28], lo que revela limitaciones en durabilidad. La nanotecnología en textiles inteligentes ha demostrado impacto en monitoreo continuo de salud, rehabilitación y control de infecciones, con una distribución del 48%, 40% y 12% de los estudios, respectivamente [69], [75], [102], [103], [104]. Sensores como los electrodos textiles de Ag permiten registrar parámetros vitales y gestionar enfermedades crónicas [93], [104]. Además, la integración de nanomateriales ha potenciado propiedades antimicrobianas, mejorando la seguridad hospitalaria [100]. Estos avances abren camino hacia soluciones más personalizadas y eficaces, mejorando la calidad de vida de los usuarios [88].

#### V. CONCLUSIONES

Esta RSL ha revelado el notable potencial de la nanotecnología para mejorar la durabilidad de los textiles inteligentes en el sector salud, un área en rápido crecimiento con un enfoque predominante en Asia y Europa. Los avances en la integración de nanomateriales, como nanopartículas de plata y grafeno, han permitido optimizar la funcionalidad y la resistencia de estos textiles, impulsando su aplicabilidad en entornos médicos. Sin embargo, para que estos textiles sean verdaderamente efectivos, es crucial avanzar en el diseño de soluciones que no solo maximicen su durabilidad, sino que también prioricen la biocompatibilidad y el confort del usuario. La innovación en técnicas de recubrimiento y la estructuración de nanomateriales podrían ser la clave para lograr productos más seguros y eficaces, adecuados para el contacto continuo

con la piel. A pesar de los avances alcanzados, el sector aún enfrenta desafíos importantes, como la estandarización de los métodos de evaluación y la mejora de la resistencia ambiental de los materiales. El futuro de los textiles inteligentes dependerá de la capacidad para optimizar estos aspectos y garantizar su rendimiento a largo plazo en aplicaciones médicas, lo que asegurará su integración efectiva y confiable en el cuidado de la salud.

#### REFERENCIAS

- [1] H. Saleem and S. J. Zaidi, "Sustainable Use of Nanomaterials in Textiles and Their Environmental Impact," *Materials* 2020, Vol. 13, Page 5134, vol. 13, no. 22, p. 5134, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13225134>
- [2] S. R. Prasad, V. B. Kumbhar, and N. R. Prasad, "Applications of Nanotechnology in Textile: A Review," *ES Food and Agroforestry*, vol. 15, Mar. 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.30919/esfaf1019>.
- [3] M. Riabchykov, A. Alexandrov, R. Trishch, A. Nikulina, and N. Korolyova, "Prospects for the Development of Smart Clothing with the Use of Textile Materials with Magnetic Properties," *Tekstilec*, vol. 65, no. 1, pp. 36–43, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050>.
- [4] M. Liu, G. Lake-Thompson, A. Wescott, S. Beeby, J. Tudor, and K. Yang, "Design and development of a stretchable electronic textile and its application in a knee sleeve targeting wearable pain management," *Sens Actuators A Phys*, vol. 369, p. 115102, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115102>.
- [5] S. Malik, K. Muhammad, and Y. Waheed, "Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry," *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 661, vol. 28, no. 2, p. 661, Jan. 2023, doi: [10.3390/MOLECULES28020661](https://doi.org/10.3390/MOLECULES28020661).
- [6] L. Ma, "Auxiliary Fiber Art Creation Design Based on Conductive Fiber Textile Wireless Structure Sensor," *J Sens*, vol. 2021, no. 1, p. 3573702, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/3573702>.
- [7] B. Younes, "Smart E-textiles: A review of their aspects and applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 53, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/1528083723121549>.
- [8] Y. Liu *et al.*, "Bifunctional Smart Textiles with Simultaneous Motion Monitoring and Thermotherapy for Human Joint Injuries," *Advanced Science*, vol. 11, no. 4, p. 2305312, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/adv.202305312>.
- [9] M. Alizadeh Meghrizi *et al.*, "Multichannel ECG recording from waist using textile sensors," *Biomed Eng Online*, vol. 19, no. 1, pp. 1–18, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00788-x>.
- [10] K. Arquilla, A. K. Webb, and A. P. Anderson, "Textile Electrocardiogram (ECG) Electrodes for Wearable Health Monitoring," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1013, vol. 20, no. 4, p. 1013, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11111109>.
- [11] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *The BMJ*, vol. 372, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>.
- [12] H. S. Cho, J. H. Yang, J. H. Lee, and J. H. Lee, "Evaluation of Joint Motion Sensing Efficiency According to the Implementation Method of SWCNT-Coated Fabric Motion Sensor," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 284, vol. 20, no. 1, p. 284, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20010284>.
- [13] R. Di Giminiani, M. Cardinale, M. Ferrari, and V. Quaresima, "Validation of Fabric-Based Thigh-Wearable EMG Sensors and Oximetry for Monitoring Quadriceps Activity during Strength and Endurance Exercises," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 4664, vol. 20, no. 17, p. 4664, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20174664>.
- [14] V. Gaubert, H. Gidik, N. Bodart, and V. Koncar, "Investigating the Impact of Washing Cycles on Silver-Plated Textile Electrodes: A Complete Study," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1739, vol. 20, no. 6, p. 1739, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20061739>.
- [15] T. Jayarathna, G. D. Gargiulo, and P. P. Breen, "Continuous Vital Monitoring During Sleep and Light Activity Using Carbon-Black Elastomer Sensors," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1583, vol. 20, no. 6, p. 1583, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20061583>.
- [16] E. Korzeniewska, A. Krawczyk, J. Mróz, E. Wyszynska, and R. Zawislak, "Applications of Smart Textiles in Post-Stroke Rehabilitation," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 2370, vol. 20, no. 8, p. 2370, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20082370>.
- [17] T. Koshi, K. I. Nomura, and M. Yoshida, "Electrical Characterization of a Double-Layered Conductive Pattern with Different Crack Configurations for Durable E-Textiles," *Micromachines* 2020, Vol. 11, Page 977, vol. 11, no. 11, p. 977, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/mi11110977>.
- [18] T. Koshi, K. I. Nomura, and M. Yoshida, "Electronic Component Mounting for Durable E-Textiles: Direct Soldering of Components onto Textile-Based Deeply Permeated Conductive Patterns," *Micromachines* 2020, Vol. 11, Page 209, vol. 11, no. 2, p. 209, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020209>.
- [19] Z. J. Krysiak *et al.*, "Nano- And Microfiber PVB Patches as Natural Oil Carriers for Atopic Skin Treatment," *ACS Appl Bio Mater*, vol. 3, no. 11, pp. 7666–7676, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00854>.
- [20] X. Li *et al.*, "Scalable fabrication of carbon materials based silicon rubber for highly stretchable e-textile sensor," *Nanotechnol Rev*, vol. 9, no. 1, pp. 1183–1191, Jan. 2020, doi: [doi.org/10.1515/ntrev-2020-0088](https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0088)
- [21] C. Liu, K. Lafdi, and F. Chinesta, "Durability sensor using low concentration carbon nano additives," *Compos Sci Technol*, vol. 195, p. 108200, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108200>.
- [22] M. Liu *et al.*, "Electronic textiles based wearable electrotherapy for pain relief," *Sens Actuators A Phys*, vol. 303, p. 111701, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111701>.
- [23] J. Luo, A. Mao, and Z. Zeng, "Sensor-Based Smart Clothing for Women's Menopause Transition Monitoring," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1093, vol. 20, no. 4, p. 1093, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20041093>.
- [24] A. Oliveira, D. Dias, E. M. Lopes, M. D. C. Vilas-Boas, and J. P. S. Cunha, "SnapKi—An Inertial Easy-to-Adapt Wearable Textile Device for Movement Quantification of Neurological Patients," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 3875, vol. 20, no. 14, p. 3875, Jul. 2020, doi: [10.3390/S20143875](https://doi.org/10.3390/S20143875).
- [25] A. Satharasinghe, T. Hughes-Riley, and T. Dias, "An investigation of a wash-durable solar energy harvesting textile," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 28, no. 6, pp. 578–592, Jun. 2020, doi: [10.1002/PIP.3229](https://doi.org/10.1002/PIP.3229).
- [26] K. Subramani *et al.*, "Wet chemical preparation of herbal nanocomposites from medicinal plant leaves for enhanced coating on textile fabrics with multifunctional properties," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 4, pp. 1–14, Apr. 2020, doi: [10.1007/S42452-020-2459-Z/FIGURES/12](https://doi.org/10.1007/S42452-020-2459-Z/FIGURES/12).
- [27] A. Syafuddin *et al.*, "Sticky silver nanoparticles and surface coatings of different textile fabrics stabilised by Muntingia calabura leaf extract," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 4, pp. 1–10, Apr. 2020, doi: [10.1007/S42452-020-2534-5/TABLES/1](https://doi.org/10.1007/S42452-020-2534-5/TABLES/1).
- [28] S. Uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, and V. Koncar, "Understanding the Washing Damage to Textile ECG Dry Skin Electrodes, Embroidered and Fabric-Based; set up of Equivalent Laboratory Tests," *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1272, vol. 20, no. 5, p. 1272, Feb. 2020, doi: [10.3390/S20051272](https://doi.org/10.3390/S20051272).
- [29] R. Bengalli *et al.*, "In vitro skin toxicity of CuO and ZnO nanoparticles: Application in the safety assessment of antimicrobial coated textiles," *NanoImpact*, vol. 21, p. 100282, Jan. 2021, doi: [10.1016/J.IMPACT.2020.100282](https://doi.org/10.1016/J.IMPACT.2020.100282).
- [30] X. Guan *et al.*, "Smart Textiles with Janus Wetting and Wicking Properties Fabricated by Graphene Oxide Coatings," *Adv Mater Interfaces*, vol. 8, no. 2, p. 2001427, Jan. 2021, doi: [10.1002/ADMI.202001427](https://doi.org/10.1002/ADMI.202001427).
- [31] Y. Ko, J. S. Kim, C. C. Vu, and J. Kim, "Ultrasensitive Strain Sensor Based on Pre-Generated Crack Networks Using Ag Nanoparticles/Single-Walled Carbon Nanotube (SWCNT) Hybrid Fillers and a Polyester Woven Elastic Band," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 2531, vol. 21, no. 7, p. 2531, Apr. 2021, doi: [10.3390/S21072531](https://doi.org/10.3390/S21072531).
- [32] R. Li *et al.*, "Smart wearable sensors based on triboelectric nanogenerator for personal healthcare monitoring," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 352, Apr. 2021, doi: [10.3390/M12040352/S1](https://doi.org/10.3390/M12040352/S1).
- [33] F. Marra, S. Minutillo, A. Tamburrano, and M. S. Sarto, "Production and characterization of Graphene Nanoplatelet-based ink for smart textile strain sensors via screen printing technique," *Mater Des*, vol. 198, p. 109306, Jan. 2021, doi: [10.1016/J.MATDES.2020.109306](https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.109306).
- [34] J. Mersch, C. A. Gómez Cuaran, A. Vasilev, A. Nocke, C. Cherif, and G. Gerlach, "Stretchable and compliant textile strain sensors," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 22, pp. 25632–25640, Nov. 2021, doi: [10.1109/JSEN.2021.3115973](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3115973).

- [35] S. Y. Park and J. H. Lee, "Machine Embroidered Sensors for Limb Joint Movement-Monitoring Smart Clothing," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 949, vol. 21, no. 3, p. 949, Feb. 2021, doi: 10.3390/S21030949.
- [36] G. Oatley, T. Choudhury, and P. Buckman, "Smart Textiles for Improved Quality of Life and Cognitive Assessment," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 8008, vol. 21, no. 23, p. 8008, Nov. 2021, doi: 10.3390/S21238008.
- [37] M. Rdest, D. Janas, P. Dolez, and H.-J. Chung, "Carbon Nanotube Wearable Sensors for Health Diagnostics," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 5847, vol. 21, no. 17, p. 5847, Aug. 2021, doi: 10.3390/S21175847.
- [38] Z. Yang *et al.*, "Highly Stretchable, Adhesive, Biocompatible, and Antibacterial Hydrogel Dressings for Wound Healing," *Advanced Science*, vol. 8, no. 8, p. 2003627, Apr. 2021, doi: 10.1002/ADVS.202003627.
- [39] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, and V. Koncar, "E-Textile Systems Reliability Assessment—A Miniaturized Accelerometer Used to Investigate Damage during Their Washing," *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 605, vol. 21, no. 2, p. 605, Jan. 2021, doi: 10.3390/S21020605.
- [40] J. U. N. Zhong *et al.*, "INTEGRATED DESIGN OF PHYSIOLOGICAL MULTI-PARAMETER SENSORS ON A SMART GARMENT BY ULTRA-ELASTIC E-TEXTILE," *J. Mech. Med. Biol.*, vol. 21, no. 9, p. 2140037, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219519421400376>.
- [41] M. Alizadeh-Meghrizi *et al.*, "A Mass-Produced Washable Smart Garment with Embedded Textile EMG Electrodes for Control of Myoelectric Prostheses: A Pilot Study," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 666, Jan. 2022, doi: 10.3390/S22020666/S1.
- [42] N. Carbonaro *et al.*, "Exploiting Resistive Matrix Technology to Build a Stretchable Sensorised Sock for Gait Analysis in Daily Life," *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 1761, vol. 22, no. 5, p. 1761, Feb. 2022, doi: 10.3390/S22051761.
- [43] S. W. Chen *et al.*, "A Facile, Fabric Compatible, and Flexible Borophene Nanocomposites for Self-Powered Smart Assistive and Wound Healing Applications," *Advanced Science*, vol. 9, no. 22, p. 2201507, Aug. 2022, doi: 10.1002/ADVS.202201507.
- [44] M. Choi, C. C. Vu, and J. Kim, "Effects of Fe Staple-Fiber Spun-Yarns and Correlation Models on Textile Pressure Sensors," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3152, May 2022, doi: 10.3390/S22093152/S1.
- [45] Y. Heo, J. Kim, C. Cha, K. Shin, J. Roh, and J. Jo, "Wearable E-Textile and CNT Sensor Wireless Measurement System for Real-Time Penile Erection Monitoring," *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 231, vol. 22, no. 1, p. 231, Dec. 2021, doi: 10.3390/S22010231.
- [46] M. Hirman, J. Navratil, M. Radouchova, J. Stulik, and R. Soukup, "Influence of Sweat on Joint and Sensor Reliability of E-Textiles," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 506, vol. 15, no. 2, p. 506, Jan. 2022, doi: 10.3390/EN15020506.
- [47] I. Z. Hossain, A. Khan, and G. Hossain, "A Piezoelectric Smart Textile for Energy Harvesting and Wearable Self-Powered Sensors," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 15, p. 5541, Aug. 2022, doi: 10.3390/EN15155541/S1.
- [48] A. Khan, M. Winder, and G. Hossain, "Modified graphene-based nanocomposite material for smart textile biosensor to detect lactate from human sweat," *Biosens Bioelectron X*, vol. 10, p. 100103, May 2022, doi: 10.1016/J.BIOSX.2021.100103.
- [49] N. A. Lahmann, U. Müller-Werdan, S. Kuntz, J. Klinghöfer-Noe, F. Jaenicke, and S. Strube-Lahmann, "Conception and evaluation of a washable multimodal smart textile," *Health Technol (Berl)*, vol. 12, no. 1, pp. 69–81, Jan. 2022, doi: 10.1007/S12553-021-00619-6/TABLES/4.
- [50] P. Lugoda *et al.*, "Classifying Gait Alterations Using an Instrumented Smart Sock and Deep Learning," *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 23, pp. 23232–23242, Dec. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3216459.
- [51] Y. Tang *et al.*, "Colorful Conductive Threads for Wearable Electronics: Transparent Cu–Ag Nanonets," *Advanced Science*, vol. 9, no. 24, p. 2201111, Aug. 2022, doi: 10.1002/ADVS.202201111.
- [52] S. Tedesco *et al.*, "Design of a Multi-Sensors Wearable Platform for Remote Monitoring of Knee Rehabilitation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 98309–98328, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3204969.
- [53] H. Wang, Y. Yue, W. Zou, Y. Pan, and X. Guo, "The stretchable carbon black-based strain fiber with a remarkable linearity in a wide sensing range," *Int J Smart Nano Mater*, vol. 13, no. 3, pp. 529–541, Jul. 2022, doi: 10.1080/19475411.2022.2107112.
- [54] Q. Xu, W. Liu, and B. Yi, "Comparative Study of Traditional Single-Needle Electrospinning and Novel Spiral-Vane Electrospinning: Influence on the Properties of Poly(caprolactone)/Gelatin Nanofiber Membranes," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 10, p. 847800, Mar. 2022, doi: 10.3389/FBIOE.2022.847800/BIBTEX.
- [55] T. Yan, Y. Wu, J. Tang, and Z. Pan, "Flexible strain sensors fabricated using aligned carbon nanofiber membranes with cross-stacked structure for extensive applications," *Int J Smart Nano Mater*, vol. 13, no. 3, pp. 432–446, Jul. 2022, doi: 10.1080/19475411.2022.2091059.
- [56] M. Zhang, N. Guo, Q. Gao, H. Li, and Z. Wang, "Design, Characterization, and Performance of Woven Fabric Electrodes for Electrocardiogram Signal Monitoring," *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 5472, vol. 22, no. 15, p. 5472, Jul. 2022, doi: 10.3390/S22155472.
- [57] M. R. Ahmed, W. Mirihanage, P. Potluri, and A. Fernando, "Isophorone-Based Quaternary Compound Modified Graphene for Machine Washable Nonwoven Piezoresistive Sensors," *Adv Mater Interfaces*, vol. 10, no. 6, p. 2202020, Feb. 2023, doi: 10.1002/ADMI.202202020.
- [58] W. Fan *et al.*, "An Antisweat Interference and Highly Sensitive Temperature Sensor Based on Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-Poly(styrenesulfonate) Fiber Coated with Polyurethane/Graphene for Real-Time Monitoring of Body Temperature," *ACS Nano*, vol. 17, no. 21, pp. 21073–21082, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c04246>.
- [59] J. Flodin, P. Wallenius, L. Guo, N. K. Persson, and P. Ackermann, "Wearable Neuromuscular Electrical Stimulation on Quadriceps Muscle Can Increase Venous Flow," *Ann Biomed Eng*, vol. 51, no. 12, pp. 2873–2882, Dec. 2023, doi: 10.1007/S10439-023-03349-0/TABLES/4.
- [60] V. Galli, C. Ahmadizadeh, R. Kunz, and C. Menon, "Textile-Based Body Capacitive Sensing for Knee Angle Monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 24, p. 9657, Dec. 2023, doi: 10.3390/S23249657/S1.
- [61] C. Y. He *et al.*, "Efficient Warming Textile Enhanced by a High-Entropy Spectrally Selective Nanofilm with High Solar Absorption," *Advanced Science*, vol. 10, no. 3, p. 2204817, Jan. 2023, doi: 10.1002/ADVS.202204817.
- [62] B. F. Ilescu, V. N. Mancasi, I. D. Ilie, I. Mancasi, B. Costachescu, and D. I. Rotariu, "Design Principle and Proofing of a New Smart Textile Material That Acts as a Sensor for Immobility in Severe Bed-Confined Patients," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2573, vol. 23, no. 5, p. 2573, Feb. 2023, doi: 10.3390/S23052573.
- [63] M. R. Islam, S. Afroj, and N. Karim, "Scalable Production of 2D Material Heterostructure Textiles for High-Performance Wearable Supercapacitors," *ACS Nano*, vol. 17, no. 18, pp. 18481–18493, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c0618>.
- [64] K. Le, H. Narayana, A. Servati, S. Soltanian, P. Servati, and F. Ko, "Influence of yarn geometry on electrical properties of silver-coated nylon filaments for e-textiles: a fundamental study," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 53, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/15280837231202044>.
- [65] M. Nan *et al.*, "Wearable Localized Surface Plasmon Resonance-Based Biosensor with Highly Sensitive and Direct Detection of Cortisol in Human Sweat," *Biosensors (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 184, Feb. 2023, doi: 10.3390/BIOS13020184/S1.
- [66] O. Ozturk, A. Golparvar, G. Acar, S. Guler, and M. K. Yapici, "Single-arm diagnostic electrocardiography with printed graphene on wearable textiles," *Sens Actuators A Phys*, vol. 349, p. 114058, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.SNA.2022.114058.
- [67] P. T. Phan *et al.*, "Fabrication, nonlinear modeling, and control of woven hydraulic artificial muscles for wearable applications," *Sens Actuators A Phys*, vol. 360, p. 114555, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.SNA.2023.114555.
- [68] B. Ping, Z. Zhang, Q. Liu, M. Li, Q. Yang, and R. Guo, "Liquid Metal Fibers with a Knitted Structure for Wearable Electronics," *Biosensors (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 715, Jul. 2023, doi: 10.3390/BIOS13070715/S1.
- [69] X. Qi *et al.*, "Versatile Liquid Metal/Alginate Composite Fibers with Enhanced Flame Retardancy and Triboelectric Performance for Smart Wearable Textiles," *Advanced Science*, vol. 10, no. 29, p. 2303406, Oct. 2023, doi: 10.1002/ADVS.202303406.
- [70] M. M. Rashid *et al.*, "In situ tailoring of Ag-doped-TiO<sub>2</sub>/TPMP/cotton nanocomposite with UV-protective, self-sterilizing and flame-retardant performance for advanced technical textiles," *Polym Degrad Stab*, vol. 216, p. 110504, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110504>.

- [71] V. Ravichandran *et al.*, "iTex Gloves: Design and In-Home Evaluation of an E-Textile Glove System for Tele-Assessment of Parkinson's Disease," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2877, vol. 23, no. 6, p. 2877, Mar. 2023, doi: 10.3390/S23062877.
- [72] P. Veske, F. Bossuyt, F. Thielemans, and J. Vanfleteren, "Measuring the Flex Life of Conductive Yarns in Narrow Fabric," *Micromachines* 2023, Vol. 14, Page 781, vol. 14, no. 4, p. 781, Mar. 2023, doi: 10.3390/M14040781.
- [73] X. Wang, X. Liu, X. Ge, and D. W. Schubert, "Superior sensitive, high-tensile flexible fabric film strain sensor," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 172, p. 107610, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2023.107610.
- [74] Y. F. Wang, A. Yoshida, Y. Takeda, T. Sekine, D. Kumaki, and S. Tokito, "Printed Directional Bending Sensor with High Sensitivity and Low Hysteresis for Human Motion Detection and Soft Robotic Perception," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5041, Jun. 2023, doi: 10.3390/S23115041/S1.
- [75] X. Yu *et al.*, "Flexible Strain Sensor Enabled by Carbon Nanotubes-Decorated Electrospun TPU Membrane for Human Motion Monitoring," *Adv Mater Interfaces*, vol. 10, no. 11, p. 2202292, Apr. 2023, doi: 10.1002/ADMI.202202292.
- [76] K. Zhu *et al.*, "A Smart, Textile-Driven, Soft Exosuit for Spinal Assistance," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 8329, vol. 23, no. 19, p. 8329, Oct. 2023, doi: 10.3390/S23198329.
- [77] M. Kim, D. J. Joe, I. Doh, and Y. H. Cho, "Piezoelectric Nanocomposite-Based Multifunctional Wearable Bioelectronics for Mental Stress Analysis Utilizing Physiological Signals," *Adv Mater Technol*, vol. 9, no. 5, p. 2301610, Mar. 2024, doi: 10.1002/ADMT.202301610.
- [78] K. Seo, S. M. Jeong, H. S. Seo, J. Yang, S. Ju, and T. Lim, "Superhydrophobic and Highly Elastic Strain-Sensing Fiber Embedded with Carbon Nanotubes and Aerogels Based on the Dipping and Drying Method," *Adv Mater Interfaces*, vol. 11, no. 10, p. 2300820, Apr. 2024, doi: 10.1002/ADMI.202300820.
- [79] D. Ferreira, A. C. Baptista, I. Sajovic, M. Kert, and B. B. Podgornik, "Smart Textiles: A Review and Bibliometric Mapping," *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 10489, vol. 13, no. 18, p. 10489, Sep. 2023, doi: 10.3390/AP131810489.
- [80] H. Halepoto, T. Gong, and H. Memon, "A Bibliometric Analysis of Antibacterial Textiles," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 11424, vol. 14, no. 18, p. 11424, Sep. 2022, doi: 10.3390/SU141811424.
- [81] S. Ayan, K. Aranci-Ciftci, F. Ciftci, and C. B. Ustundag, "Nanotechnology and COVID-19: Prevention, diagnosis, vaccine, and treatment strategies," *Front Mater*, vol. 9, p. 1059184, Jan. 2023, doi: 10.3389/FMATS.2022.1059184/XML/NLM.
- [82] U. S. Meda, V. G. Soundarya, H. Madhu, and N. Bhat, "Nano-engineered textiles: Development and applications," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 296, p. 116636, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.MSEB.2023.116636.
- [83] J. S. Meena, S. Bin Choi, S. B. Jung, and J. W. Kim, "Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions," *Mater Today Bio*, vol. 19, p. 100565, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.MTBIO.2023.100565.
- [84] H. L. O. Júnior, R. M. Neves, F. M. Monticeli, and L. Dall Agnol, "Smart Fabric Textiles: Recent Advances and Challenges," *Textiles* 2022, Vol. 2, Pages 582-605, vol. 2, no. 4, pp. 582-605, Nov. 2022, doi: 10.3390/TEXTILES2040034.
- [85] M. L. Álvarez-Láinez, H. V. Martínez-Tejada, and F. J. Isaza, "Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones," *Editorial Universidad de Antioquia*, Oct. 2019.
- [86] P. Sharma, D. Singh, S. Pant, and V. Dave, "Nanotechnology Based Advanced Medical Textiles and Biotextiles for Healthcare," *Nanotechnology Based Advanced Medical Textiles and Biotextiles for Healthcare*, pp. 1-314, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1201/9781003331612.
- [87] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, and V. Koncar, "Smart E-Textile Systems: A Review for Healthcare Applications," *Electronics* 2022, Vol. 11, Page 99, vol. 11, no. 1, p. 99, Dec. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS11010099.
- [88] A. Akter, M. M. H. Apu, Y. R. Veeranki, T. N. Baroud, and H. F. Posada-Quintero, "Recent Studies on Smart Textile-Based Wearable Sweat Sensors for Medical Monitoring: A Systematic Review," *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2024, Vol. 13, Page 40, vol. 13, no. 4, p. 40, Jul. 2024, doi: 10.3390/JSAN13040040.
- [89] O. N. Aguda and A. Lateef, "Recent advances in functionalization of nanotextiles: A strategy to combat harmful microorganisms and emerging pathogens in the 21st century," *Heliyon*, vol. 8, no. 6, p. e09761, Jun. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09761.
- [90] Z. Deng, L. Guo, X. Chen, and W. Wu, "Smart Wearable Systems for Health Monitoring," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2479, vol. 23, no. 5, p. 2479, Feb. 2023, doi: 10.3390/S23052479.
- [91] Q. Xu, Y. Yu, and X. Yu, "Analysis of the Technological Convergence in Smart Textiles," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 13451, vol. 14, no. 20, p. 13451, Oct. 2022, doi: 10.3390/SU142013451.
- [92] J. I. Shuvo *et al.*, "Smart Textiles Testing: A Roadmap to Standardized Test Methods for Safety and Quality-Control," *Textiles for Functional Applications*, Mar. 2021, doi: 10.5772/INTECHOPEN.96500.
- [93] M. Syduzzaman, A. Hassan, H. R. Anik, M. Akter, and M. R. Islam, "Nanotechnology for High-Performance Textiles: A Promising Frontier for Innovation," *ChemNanoMat*, vol. 9, no. 9, p. e202300205, Sep. 2023, doi: 10.1002/CNMA.202300205.
- [94] B. C. Nelson, C. Minelli, S. H. Doak, and M. Roeslein, "Emerging Standards and Analytical Science for Nanoenabled Medical Products," *Annual Review of Analytical Chemistry*, vol. 13, no. Volume 13, 2020, pp. 431-452, Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-091619-102216.
- [95] J. Barman *et al.*, "The role of nanotechnology based wearable electronic textiles in biomedical and healthcare applications," *Mater Today Commun*, vol. 32, p. 104055, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2022.104055.
- [96] J. Furchi *et al.*, "A roadmap towards safe and sustainable by design nanotechnology: Implementation for nano-silver-based antimicrobial textile coatings production by ASINA project," *Comput Struct Biotechnol J*, no. 25, pp. 127-142, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.06.013.
- [97] A. H. Zydan, A. M. Fouda, and S. Shaarawy, "Multifunctional Textile Using Chitosan, Clay, and Metal Oxide Nanoparticles," *Egypt J Chem*, vol. 67, no. 13, pp. 121-140, Dec. 2024, doi: 10.21608/EJCHEM.2024.258376.9084.
- [98] M. R. Khan, H. G. Kim, J. S. Park, J. W. Shin, C. T. Nguyen, and H. B. R. Lee, "Tunable Color Coating of E-Textiles by Atomic Layer Deposition of Multilayer TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Films," *Langmuir*, vol. 36, no. 11, pp. 2794-2801, Mar. 2020, doi: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03988.
- [99] K. M. Fuentes, M. Gómez, H. Rebolledo, J. M. Figueroa, P. Zamora, and L. Naranjo-Briceño, "Nanomaterials in the future biotextile industry: A new cosmivision to obtain smart biotextiles," *Frontiers in Nanotechnology*, vol. 4, p. 1056498, Dec. 2022, doi: 10.3389/FNANO.2022.1056498/BIBTEX.
- [100] A. Ivanoska-Dacicj *et al.*, "Advanced and Smart Textiles during and after the COVID-19 Pandemic: Issues, Challenges, and Innovations," *Healthcare* 2023, Vol. 11, Page 1115, vol. 11, no. 8, p. 1115, Apr. 2023, doi: 10.3390/HEALTHCARE11081115.
- [101] M. T. Hossain, M. A. Shahid, M. G. M. Limon, I. Hossain, and N. Mahmud, "Techniques, applications, and challenges in textiles for a sustainable future," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 10, no. 1, p. 100230, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JOITMC.2024.100230.
- [102] C. M. Vidhya, Y. Maithani, and J. P. Singh, "Recent Advances and Challenges in Textile Electrodes for Wearable Biopotential Signal Monitoring: A Comprehensive Review," *Biosensors* 2023, Vol. 13, Page 679, vol. 13, no. 7, p. 679, Jun. 2023, doi: 10.3390/BIOS13070679.
- [103] K. Vojnits *et al.*, "Advancing Antimicrobial Textiles: A Comprehensive Study on Combating ESKAPE Pathogens and Ensuring User Safety," *Materials* 2024, Vol. 17, Page 383, vol. 17, no. 2, p. 383, Jan. 2024, doi: 10.3390/MA17020383.
- [104] S. M. de Souza, G. R. Silva, D. L. Fabrino, and I. J. B. Santos, "The impact of nanotechnology in health: A review of recent studies and products," *Revista Contexto & Saude*, vol. 23, no. 47, p. e12394, Sep. 2023, doi: 10.21527/2176-7114.2023.47.12394.