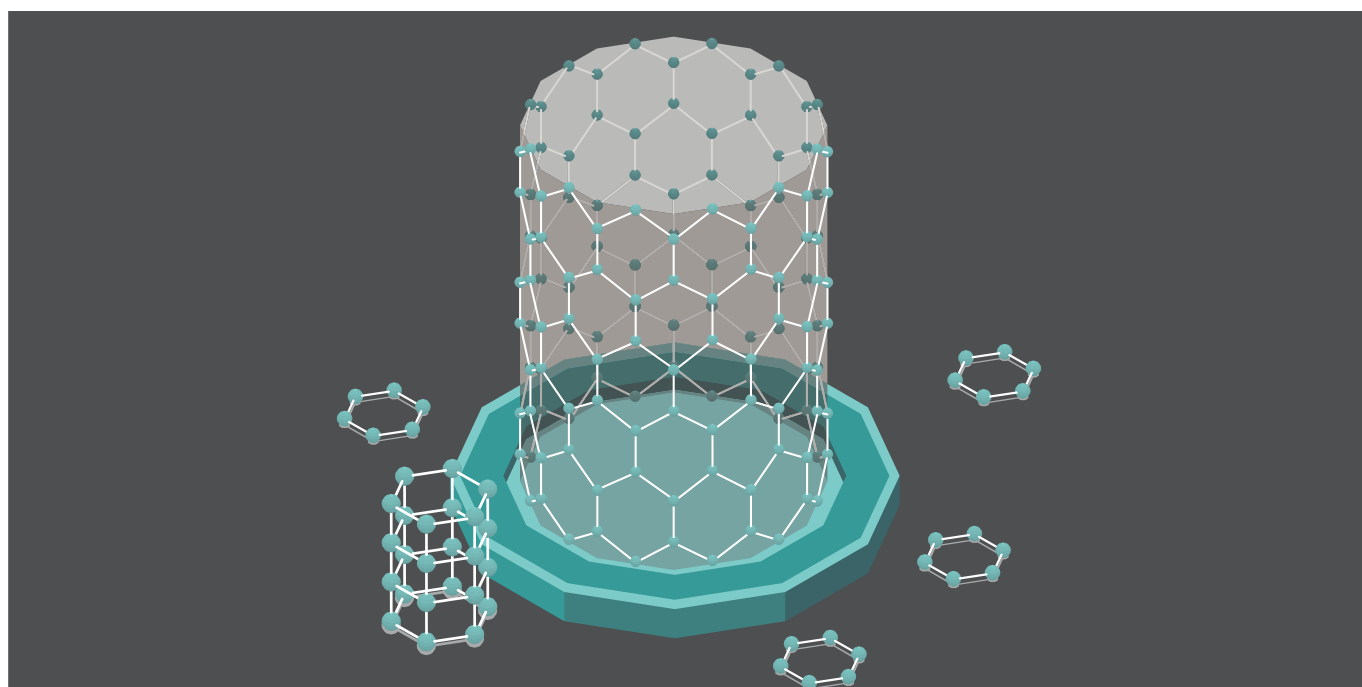


LOS NANOMATERIALES Y SUS APLICACIONES INDUSTRIALES



José Rivas

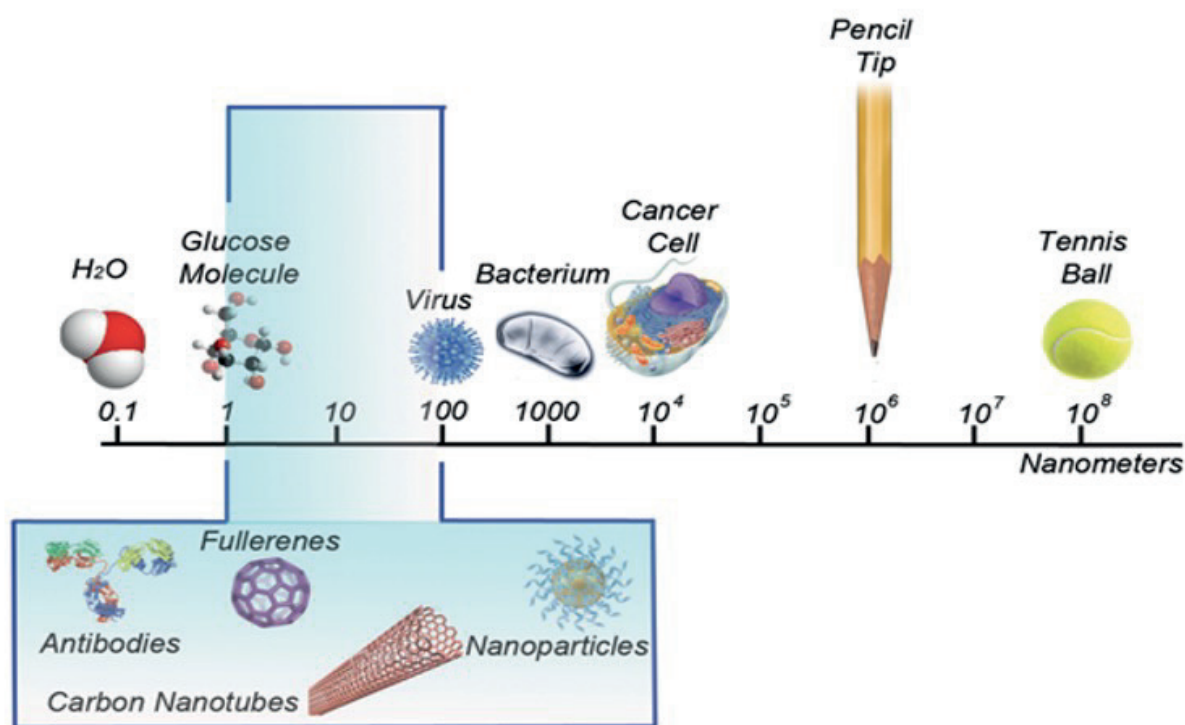
NANOMAG, Grupo de Magnetismo y Nanotecnología
Instituto de Materiales de la Universidade de Santiago (iMATUS)
Departamento de Física Aplicada
Universidade de Santiago de Compostela



La nanotecnología ha generado un gran interés en los últimos años debido al enorme potencial y las aplicaciones que subyacen al nivel de la nanoescala. El campo de actuación incluye, entre otros, la generación de materiales, las telecomunicaciones, la nanoelectrónica, los avances en alimentación e innovadores dispositivos médicos, así como nuevos sistemas de seguridad o de eficiencia energética. Aunque el verdadero impacto está todavía por llegar, los productos que utilizan nanotecnología

representan en la actualidad un mercado mundial que no puede ignorarse.

Según la Iniciativa Nacional de Nanotecnología –programa del gobierno federal de los Estados Unidos para la investigación y el desarrollo de ciencia, ingeniería y tecnología para proyectos a nanoescala–, la definición más generalizada para la nanotecnología es la que la describe como la manipulación de la materia con al menos una de las tres dimensiones espaciales y con un tamaño de entre 1 y 100 nanómetros.



Los nanomateriales van desde una escala de 1 a 100 nanómetros. Los materiales a la nanoescala permiten nuevos efectos y propiedades que no se presentan en el rango de las macro a microdimensiones.

Desde una perspectiva económica, el negocio de la nanotecnología está experimentando un crecimiento muy notorio. Este mercado se valoraba en 15 billones¹ de dólares (USD) en 2010, fue de 49 billones en 2017, según los datos de Statista (2020)². La prestigiosa consultora Boston Consulting Group (Chiah et al., 2019)³ vaticina un tamaño de mercado de 3 trillones de dólares⁴ a nivel mundial en 2030, lo que supondría multiplicar por 40 el volumen de negocio actual.

Entre los indicadores que permiten situar a España en el contexto global de la nanotecnología está el número de patentes. Después de las grandes potencias China y Estados Unidos, se aprecia que en el contexto europeo España tiene un importante número de patentes solo por detrás de países tecnológicamente punteros como Alemania, Francia, Reino Unido, Suiza, Holanda e Italia.

1. Un billón de dólares en EE. UU. = 1.000.000.000 \$

2. Statista. (2020, 5 junio). *Global nanotechnology market value 2010-2020*. <https://www.statista.com/statistics/1073886/global-market-value-nanotechnology/>

3. Chiah, R., Ketels, C., Tan, M., & Vu, T. (2019, 16 septiembre). *Unleashing Innovation in the Middle Billion Economies*. BCG Global. <https://www.bcg.com/publications/2019/unleashing-innovation-middle-billion-economies>

4. Un trillón de dólares en EE. UU. = 1.000.000.000.000 \$

PAÍS	N.º DE PATENTES
China	154.110
EE. UU.	83.700
Alemania	13.856
Francia	8.307
Reino Unido	4.991
Suiza	3.358
Holanda	2.949
Italia	2.372
España	2.200

Fuente: PatentInspiration

La actividad científica de España en el campo de la nanotecnología es relevante a nivel internacional, ya que ocupa el puesto número 12 en cuanto a número de publicaciones indexadas según la base de datos Scopus. Además, según un informe de 2018 de la Fundación Española para

la Ciencia y la Tecnología (Fecyt)⁵, el impacto normalizado medio de los artículos sobre nanotecnología publicados por grupos españoles hasta ese año (1,29) solo era superado por China, Estados Unidos, Reino Unido y Alemania.

PAÍS	N.º DE ARTÍCULOS INDEXADOS
China	534.132
EE. UU.	411.944
India	145.722
Japón	131.967
Alemania	127.467
Corea del Sur	105.523
Francia	87.991
Reino Unido	84.623
Irán	78.421
Rusia	76.325
Italia	62.920
España	53.644

Fuente: Scopus.

5. Documento de trabajo ICONO: Evolución de la nanotecnología en España. (2018, junio). https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/doctrabajoicono_nanotec_2.pdf

En España, A Coruña destaca como la quinta provincia en ratio de patentes sobre nanotecnología por cada 100.000 habitantes (3,57) (Jügens, 2016)⁶, solo por detrás de Barcelona, Madrid, Valencia y Sevilla. Además, según el Informe Ardán (2020)⁷, un 2,13 % de las empresas gallegas posee competencias en nanotecnología y un 7,45 % en materiales avanzados. Este informe destaca también que, ciñéndose al contexto industrial (CNAE 10-33), las empresas gallegas con competencias en nanotecnología y materiales avanzados son un 5,88 % y un 9,80 %, respectivamente.

Un futuro prometedor: los nanomateriales

En los tiempos actuales de crisis y recesión económica global, la convergencia de las tecnociencias asociadas a la nanotecnología, la biotecnología, las tecnologías de la información y las ciencias cognitivas –*Nano-Bio-Info-Cognitive (NBIC)*– es cada vez más evidente. La hibridación del conocimiento y la multidisciplinariedad aparecen como un nuevo modelo de desarrollo social sostenible, basado en la innovación y la creación de soluciones de alto valor añadido

Los nanomateriales ya han dejado de ceñirse a los laboratorios de investigación para ocupar un puesto relevante en el desarrollo industrial relacionado con la producción y procesado de los nuevos materiales de uso cotidiano. Así, estamos asistiendo a la transición hacia una nueva industria con capacidades enormes en el desarrollo de nuevos materiales con prestaciones muchas veces desconocidas. Prácticamente todas las industrias y países que quieren estar a la vanguardia de la ciencia y la tecnología están adaptando, si no lo han hecho ya, las formas tradicionales de innovación a esta nueva visión de la tecnología.

Identificación de sectores de interés y aplicación práctica de los nanomateriales

Las posibilidades de aplicación de los nanomateriales son inmensas y abarcan diversos sectores, ya que los resultados de las investigaciones se traducen en productos y procesos de producción de alto valor añadido. Sobre este enorme ámbito de aplicación relacionado con los nanomateriales, es necesario hacer un ejercicio pormenorizado para identificar aquellos sectores industriales más relevantes y que, al mismo tiempo, tengan una relación, más o menos directa, con las capacidades tecnológicas de nuestro país, su red de industrias y los centros colaboradores.

◆ Aplicaciones en la salud

Los nanomateriales ofrecen múltiples estrategias de desarrollo en el ámbito de la salud. Además, pueden combinarse con avances en biotecnología en el campo de la nanomedicina, que permiten y permitirán en el futuro la aparición de numerosas aplicaciones de alto impacto para los sistemas sanitarios, reduciendo costes, facilitando la gestión de los pacientes y, sobre todo, mejorando de forma significativa nuestra calidad de vida, en particular la de personas aquejadas de enfermedades complejas.

En estos momentos, el ejemplo más destacado de aplicación de la nanotecnología en el sector salud es el de dos de las vacunas frente a la COVID-19. Tanto la de Pfizer como la de Moderna están construidas sobre plataformas nanotecnológicas que aseguran el encapsulado, transporte y administración del principio activo basado en m-RNA.⁸

6. Jügens, B. & Universidad de Granada. (2016). *Nanotechnology in Spain*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=55999>

7. Informe ARDÁN Galicia 2020 Análisis de la situación económica y competitiva. (2020). <https://www.zfv.es/ardan/informe-economico.html>

8. "Nanomedicine and the COVID-19 vaccines". *Nat. Nanotechnol* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00820-0>.

En el área de diagnóstico, la utilización de los nanomateriales va a posibilitar la identificación precoz de ciertas enfermedades como el cáncer, las patologías del sistema cardiovascular y neurológico y las dolencias infecciosas y metabólicas. El uso de *nanorrays* fabricados con nanomateriales permite el desarrollo de nuevos biosensores para el diagnóstico y seguimiento de ciertas enfermedades, del mismo modo que el uso de nanopartículas como marcadores en ensayos clínicos y como agentes de contraste en pruebas diagnósticas juega un papel esencial en estos desarrollos.

A través del empleo de nanomateriales será posible detectar enfermedades en estadios tempranos, lo que resulta fundamental para lograr una mayor eficacia del tratamiento y abaratar costes para nuestros sistemas de salud.

Respecto al tratamiento de enfermedades, los nanomateriales son una poderosa herramienta que posibilita implantes complejos, nuevos sistemas de terapia celular e ingeniería tisular con el uso de nanoestructuras como puntos de anclaje para la regeneración mediante células madre.

Otra línea de actuación de suma importancia son los bionanomateriales inteligentes combinados con la impresión 3D y moléculas bioactivas que imitan el comportamiento natural de crecimiento de los tejidos. Estas combinaciones de materiales y dispositivos son capaces de producir respuestas celulares específicas a los cambios de temperatura, pH, estimulación eléctrica o nivel energético.

No menos importante es la administración de fármacos mediante nanomateriales que pueden atravesar los conductos vasculares y las membranas celulares, facilitando el control preciso de las dosis suministradas y haciendo posible la liberación continuada y programada desde el propio cuerpo del paciente.

Innovaciones importantes también proceden de la aplicación de la nanoelectrónica al sector de la salud. Las dos vacunas comentadas anteriormente frente a la COVID-19 son un buen ejemplo de estas tecnologías. Los dispositivos de monitorización de parámetros fisiológicos permitirán cambios sustanciales en la gestión de los pacientes dentro y fuera del hospital.

● Aplicaciones en energía y control medioambiental

En el campo energético, los nanomateriales son esenciales para el desarrollo de las energías renovables, especialmente en el ámbito de la solar –a través de nanomateriales sustitutos del silicio– y en la utilización del hidrógeno en las pilas de combustible. También en cuanto al desarrollo de nuevas tecnologías para el almacenamiento y transporte de energía, mediante supercondensadores o soluciones que posibiliten una distribución más eficiente. Varios nanomateriales muestran buenas propiedades como catalizadores, con un enorme potencial de aplicación en la conversión directa de celulosa y la obtención de biocombustibles o de energía a partir del hidrógeno. También se esperan importantes avances en el desarrollo de alternativas energéticas basadas en pilas de combustibles o materiales termoeléctricos.

En el campo del medio ambiente, los nanomateriales se aplican principalmente al desarrollo de nuevos materiales de limpieza y degradación de contaminantes peligrosos, como es el caso de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (*PFAS*, por sus siglas en inglés), un grupo de agentes químicos que incluye *PFOA*, *PFOS*, *GenX* y muchos otros. Estos contaminantes pueden encontrarse en el agua potable; en las aguas residuales; en los alimentos procedentes

de cultivos o aguas contaminadas con estos agentes; en envases procesados con equipos que utilizaron *PFAS*; en productos comerciales como el teflón; y en ceras, pinturas, productos de limpieza y espumas para combatir incendios. Aparte de estos contaminantes persistentes, los nanomateriales también tienen gran relevancia para la eliminación de metales pesados, toxinas, antibióticos y pesticidas.

Para aplicaciones medioambientales también es posible diseñar dispositivos con base en nanomateriales que posibilitan la detección de variables físicas, químicas o biológicas y su transducción a magnitudes eléctricas. Otra tecnología posible son los elementos descontaminadores, especialmente para aguas residuales y suelos. Además de su elevada sensibilidad y precisión, los nanodispositivos en desarrollo facilitan el proceso de medida y en ocasiones evitan el tratamiento previo en complejos y costosos procesos de laboratorio. Un área en gran desarrollo son los nuevos métodos de desalinización de agua del mar.

● Aplicaciones en las tecnologías de la información y electrónica

Con el descubrimiento del transistor en un cristal de germanio por los físicos Bardeen, Brattain y Shockley de Bell Laboratories en los Estados Unidos en 1947, se inauguró una nueva era mundial para la ciencia y tecnología. Este dispositivo abrió las puertas de la electrónica de estado sólido con un alto grado de integración, consolidando las tecnologías de la información y las comunicaciones como las preferidas por la sociedad.

La presencia de la electrónica de estado sólido marcó una forma diferente, hasta ese momento desconocida, de desarrollar sistemas electrónicos. Pronto empezaron a aparecer materiales y dispositivos cada vez más potentes que, además, eran sumamente pequeños y tenían una gran autonomía. La

integración ha sido una prioridad basada en la búsqueda de lo pequeño. Los científicos y tecnólogos han encontrado propiedades en los nanomateriales y han comenzado a desarrollar nuevos chips que han cambiado por completo los procesos de fabricación de circuitos integrados.

La nanoelectrónica permite hoy el almacenamiento de datos a una escala nunca alcanzada, el procesamiento de datos a velocidades cada vez más elevadas o el desarrollo de sucesivas generaciones de comunicaciones móviles.

A través del desarrollo de la electrónica más allá de los *CMOS* –donde las nuevas tecnologías de los nanomateriales, dispositivos y arquitecturas se desarrollan en *CMOS* o en complementariedad con *CMOS*–, se contempla a medio y largo plazo el desarrollo de circuitos integrados (procesadores, memorias, visualizadores, sensores y actuadores) con mayor capacidad de cálculo y almacenamiento de la información que la tecnología actual y con la posibilidad de integración con otras áreas del conocimiento, por ejemplo, para aplicaciones en el campo de la nanomedicina, en una escala sin precedentes.

● Aplicaciones en el sector agroalimentario

Los nanomateriales que se aplican en el sector alimentario son, en muchos casos, similares a los de la salud, facilitando la encapsulación y liberación controlada de ingredientes alimentarios o nutrientes, así como el avance en la seguridad alimentaria a través del control de las enfermedades transmisibles por los alimentos. En este contexto, los nanomateriales ofrecen un gran potencial a la hora de introducir sensores en los procesos de producción de alimentos capaces de verificar su estado óptimo y las cualidades organolépticas. Otro importante campo de trabajo es el desarrollo de embalajes

activos e inteligentes que alarguen la vida útil de la comida y que permitan saber si está contaminada o en mal estado.

En cuanto al sector agrícola, los nanomateriales tendrán impacto sobre la productividad y la sostenibilidad al permitir la liberación controlada de ciertas sustancias químicas como herbicidas, pesticidas y fertilizantes, optimizando sus efectos.

El principal reto de la aplicación de los nanomateriales en el terreno agroalimentario está en relación con el coste de producción/beneficio para el consumidor. Su comercialización e impacto en el mercado están de alguna forma condicionadas por el desarrollo de tecnologías que permitan la producción masiva, sin elevar los precios de los productos del sector alimentario.

● Aplicaciones en el sector de la madera

A la cabeza de las materias primas naturales –que permiten el desarrollo de una economía de bajo impacto medioambiental y de gran valor añadido– está la madera, que destaca por su versatilidad. Utilizada durante siglos debido a su naturaleza fibrosa y resistente, está experimentando un renovado interés en la industria. Desde el punto de vista químico, la madera está constituida por un 45 % de celulosa y un 20-30 % de hemicelulosas y lignina, proporción que varía según las especies.

La celulosa es un biopolímero constituido por zonas amorfas y otras muy ordenadas, cristalinas, que se pueden extraer mediante procesos físicos y químicos para producir nanocristales o nanofibras. Estos nanocomponentes pueden obtenerse de residuos como restos de madera, biomasa o licores procedentes de la industria del papel, que permiten obtener a partir de desechos una materia prima, a nivel nanométrico, de

gran versatilidad. Esto permite desarrollar materiales de alta tecnología (fibras inteligentes, membranas para la limpieza de aguas) o productos básicos (fibras para la conducción eléctrica o recubrimientos plásticos) con el objetivo de forzar la sustitución de una tecnología preeminente y altamente contaminante basada en materiales derivados del petróleo.

A pesar de tener una tasa de crecimiento vegetal muy lenta, los países nórdicos se encuentran a la vanguardia de desarrollos lignocelulósicos competitivos a nivel industrial. Tanto es así que hay institutos tecnológicos de gran prestigio íntegramente dedicados a la valorización de productos obtenidos de la madera y un sector industrial pujante explotando esta nueva tecnología.

Las ventajas de esta tecnología son evidentes: a nivel medioambiental, se consigue la sustitución paulatina de los materiales derivados del petróleo por matrices de origen vegetal que frenen la presencia de microplásticos en el medio ambiente, así como el aumento del número de explotaciones forestales que ayuden a reducir la huella de carbono y ejerzan de contrapeso al cambio climático; a nivel económico, se fomenta una industria con tendencia a la economía circular y ecológica basada en el aprovechamiento de residuos vegetales de podas, industrias madereras y papeleras, entre otras, para generar materiales avanzados de alto valor añadido, prescindiendo de la dependencia del petróleo; y, a nivel social, se desarrolla una tecnología que valoriza residuos vegetales con capacidad para generar empleo “verde” y crear una cadena de valor desde el ámbito rural al urbano, aportando una posible solución al despoblamiento de las zonas rurales por falta de expectativas económicas, actualmente un problema de gran calado.

● Aplicaciones en el transporte

La manipulación y el desarrollo de los nanomateriales posibilitan la introducción de aleaciones más ligeras y resistentes; nuevas superficies multifuncionales provistas de recubrimientos de gran dureza, resistencia a la abrasión y a la corrosión; y la fabricación de nuevos sensores y actuadores que mejoran la seguridad y el funcionamiento de los actuales medios de transporte.

De este modo, los nanomateriales contribuyen de manera significativa a la construcción de automóviles, aviones y barcos más baratos, ligeros, eficientes energéticamente y sin emisiones contaminantes, además de otros dotados de unas mejores cualidades de seguridad y confort, a través de nuevos automatismos y posiblemente también altamente reciclables.

● Aplicaciones en otros sectores tradicionales: textil, calzado, construcción

Los nanomateriales alcanzan también a otros productos de alto valor añadido con nuevas y mejores características en todo tipo de sectores, como son el textil y el calzado a través de nuevos tejidos de alta tecnología para ámbitos como el aeroespacial, el militar, la automoción o la salud. Este sector es especialmente importante en la Eurorregión Galicia-Norte de Portugal, ya que permite la creación de productos personalizados y de alto valor en una industria de alto peso en la economía de ambos lados de la frontera.

En la industria de la construcción se prevé una introducción paulatina de materiales más ligeros, resistentes, con menor impacto ambiental e incluso autoadaptables e inteligentes, capaces de responder a estímulos externos como la temperatura, la humedad o la tensión y con funciones repelentes del agua, la grasa, la suciedad o los microbios, entre otras. Los desarrollos en nanomateriales jugarán un papel fundamental en la construcción de redes sensoriales con diferentes tecnologías y que convierten los edificios en espacios dinámicos, más seguros y energéticamente más eficientes.

CONCLUSIONES

La nanotecnología y los nanomateriales son una herramienta disruptiva con aplicaciones que alcanzan a infinidad de sectores. Controlar las propiedades de la materia a escala nanométrica permite no solo diseñar nuevos nanomateriales, sino también modificar materiales "clásicos" dotándolos de nanoestructuras que mejoran radicalmente sus propiedades.

Las aplicaciones de la nanotecnología y los nanomateriales son muy diversas y como ejemplo de su transversalidad podemos inspirarnos en la crisis actual causada por la pandemia de la COVID-19. En los últimos meses hemos visto innovaciones en muchos campos y sectores industriales. Gran parte de las nuevas tecnologías frente a la COVID-19 proceden de desarrollos e investigaciones que tienen su origen en la nanoescala.

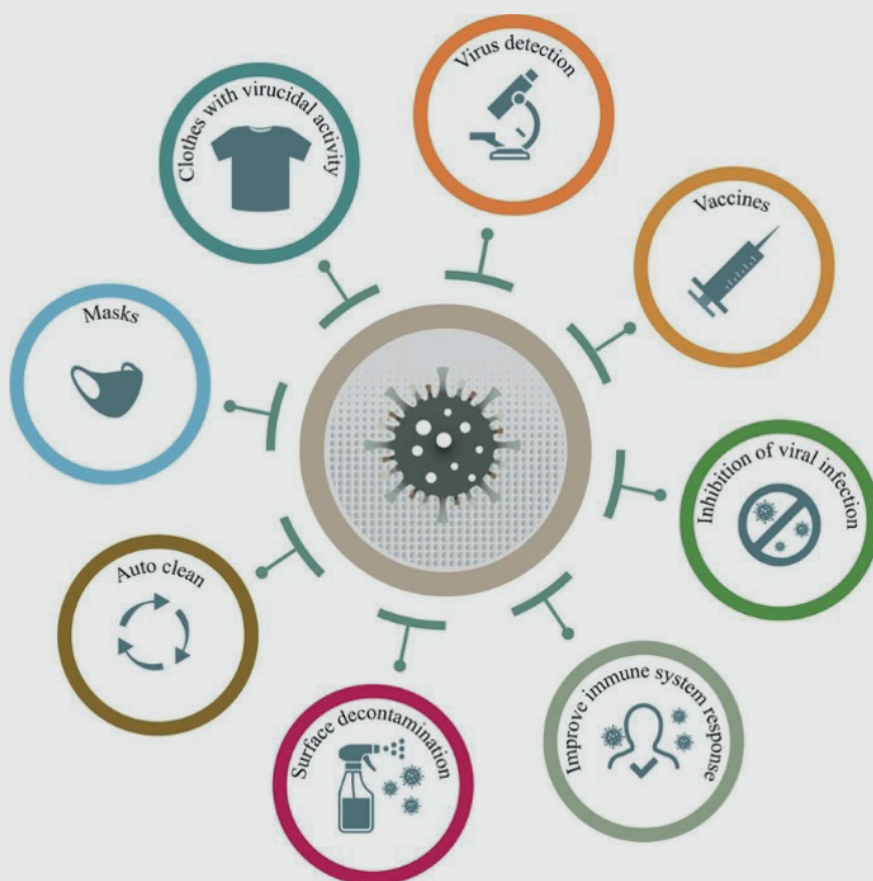


Ilustración de Campos, Pereira et al. (2020)⁹

9. Campos, E.V.R., Pereira, A.E.S., de Oliveira, J.L. et al. "How can nanotechnology help to combat COVID-19? Opportunities and urgent need". J Nanobiotechnol 18, 125 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00685-4>

España y, en particular, Galicia están muy bien posicionadas en la investigación y cuentan con numerosos expertos y una importante capacidad para formar profesionales en este ámbito. Considerando las perspectivas sobre el gran crecimiento del mercado de la nanotecnología, este sector supone una gran oportunidad para incrementar el producto interior bruto de nuestra comunidad. Además, existe una aplicación directa de la nanotecnología a sectores clave para Galicia –recogidos en la Estrategia de Especialización Inteligente RIS31–, como el envejecimiento activo y saludable; los sectores agroalimentario, biotecnológico y maderero; o el aprovechamiento de los recursos marinos, entre otros. Resulta por lo tanto necesario seguir potenciando la investigación en nanotecnología para reforzar los principales sectores industriales de Galicia.

El impacto de los nanomateriales tiene también una dimensión social que incide sobre el empleo, al crear puestos de trabajo de alta cualificación, y también permite paliar los efectos de una población envejecida al proveer soluciones para el sistema de salud público.

Los retos para los próximos años son establecer los mecanismos adecuados para permitir, mediante la colaboración público-privada, que el conocimiento acumulado en las universidades, centros de investigación y empresas de base tecnológica se transfiera de forma efectiva a los sectores más tradicionales para, así, dar un salto en la competitividad. El impacto de la nanotecnología en la actual emergencia sanitaria es quizás el mejor de los ejemplos.

Las claves para aprovechar esta oportunidad, como señala el estudio de Aithal (2016)¹¹, son crear un clima propicio para las inversiones, diseñar modelos de negocio viables y contar con el apoyo de la Administración para trasladar los resultados de investigación al mercado.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Pablo Friero, gestor de la Agrupación Estratégica de Materiales (AeMAT), y al Dr. Sergio Figueiras, director de Innovación en Bahía Software y anteriormente *project manager* en el International Iberian Nanotechnology Laboratory-INL, sus sugerencias y lectura crítica del manuscrito.

10. <http://www.ris3galicia.es/>

11. Aithal, P. S., & Aithal, S. (2016). "A New Model for Commercialization of Nanotechnology Products and Services". *International Journal of Computational Research and Development*, 1(1), 84-93. <https://doi.org/10.5281/zenodo.163536>