

La toxicidad de los nanomateriales en el contexto laboral: principio de precaución y control de exposición

Rosa María Rodríguez Casáis

Doctoranda del Programa de Doctorado en Derecho:

Protección jurídica y cohesión social.

Universidad de León (España)

rm.rcasais@unileon.es | <https://orcid.org/0009-0001-7596-0634>

Extracto

La nanotecnología ha experimentado un desarrollo exponencial permitiendo avances que contribuyen al desarrollo de numerosos sectores productivos, principalmente el sanitario, industrial o la construcción, pero que se proyectan también al aeroespacial, automoción, las comunicaciones, la energía, laboratorios de investigación, electrónica, soldadura, cosmética, agroalimentación, textil, material deportivo o incluso industria armamentística. Su uso ya está plenamente integrado en la sociedad, proporcionando innumerables beneficios y oportunidades, pero también una variedad de riesgos (tanto para las personas trabajadoras como para el medio ambiente), en muchos casos desconocidos, que demandan una revisión de las actuaciones en el campo de la seguridad y la salud, pues la exposición laboral a nanopartículas puede producirse a lo largo de las distintas etapas que comprende su ciclo de vida (fabricación, incorporación al producto y uso profesional de este, eliminación de los residuos o tareas de mantenimiento y limpieza). A partir de una hipótesis de incertidumbre sobre los posibles efectos adversos que sobre la salud humana genera el empleo de nanomateriales, tanto a medio como a largo plazo, en el presente ensayo se llega a la conclusión de que, si bien no es posible afirmar que todas las nanopartículas provoquen efectos tóxicos, sí pueden representar una amenaza para el ser humano y su entorno (dada la complejidad de esta innovación científica con el medio ambiente) ante las sospechas fundadas sobre su potencial lesividad. A partir de tal premisa, los estándares de máxima seguridad y de minimización del riesgo impuestos por la normativa de prevención de riesgos laborales exigen aplicar la máxima diligencia en el desempeño de los puestos de trabajo, tomando como pauta segura de actuación el principio de precaución, reduciendo, en la medida de lo posible, los niveles de exposición según exigen las notas técnicas *ad hoc*.

Palabras clave: nanotecnología; sustancia tóxica; seguridad y salud en el trabajo; sanidad laboral; principio de precaución; investigación científica; control de exposición; argiria.

Recibido: 05-04-2025 / Aceptado: 21-04-2025 / Publicado: 07-05-2025

Cómo citar: Rodríguez Casáis, R. M. (2025). La toxicidad de los nanomateriales en el contexto laboral: principio de precaución y control de exposición. *Revista de Trabajo y Seguridad Social. CEF*, 486, 152-181. <https://doi.org/10.51302/rtss.2025.24435>

Toxicity of nanomaterials in the workplace: Precautionary Principle and exposure control

Rosa María Rodríguez Casáis

PhD student on the PhD programme Law: Legal protection and social cohesion.

University of León (Spain)

rm.rcasais@unileon.es | <https://orcid.org/0009-0001-7596-0634>

Abstract

Nanotechnology has experienced exponential growth, enabling advances that contribute to the development of numerous productive sectors, primarily healthcare, industry, and construction, but also extending to the aerospace, automotive, communications, energy, research laboratories, electronics, welding, cosmetics, agri-food, textile, sports equipment, and even the arms industry. Its use is now fully integrated into society, providing countless benefits and opportunities, but also a variety of risks (for both workers and the environment), often unknown. These risks require a review of health and safety measures, as occupational exposure to nanoparticles can occur throughout the various stages of their life cycle (manufacturing, incorporation into the product and its professional use, waste disposal, and maintenance and cleaning tasks). Based on a hypothesis of uncertainty regarding the potential adverse effects on human health generated by the use of nanomaterials, both in the medium and long term, this essay concludes that, while it is not possible to affirm that all nanoparticles cause toxic effects, they can represent a threat to humans and their environment (given the complicity of this scientific innovation with the environment) given the well-founded suspicions regarding their potential harmfulness. Based on this premise, the maximum safety and risk minimization standards imposed by occupational risk prevention regulations require the utmost diligence in the performance of jobs, taking the precautionary principle as a safe guideline for action, reducing exposure levels as far as possible as required by the ad hoc technical notes.

Keywords: nanotechnology; toxic substance; occupational health and safety; occupational health; precautionary principle; scientific research; exposure control; argyria.

Received: 05-04-2025 / Accepted: 21-04-2025 / Published: 07-05-2025

Citation: Rodríguez Casáis, R. M. (2025). Toxicity of nanomaterials in the workplace: Precautionary Principle and exposure control. *Revista de Trabajo y Seguridad Social. CEF*, 486, 152-181. <https://doi.org/10.51302/rtss.2025.24435>



Sumario

1. Consideraciones generales
 2. Una aproximación a los rasgos más característicos de los nanomateriales
 - 2.1. Concepto y tipología
 - 2.2. Las diferentes utilidades de los nanomateriales
 - 2.2.1. La nanomedicina y la mejora en el diagnóstico y los tratamientos
 - 2.2.2. Otras aplicaciones de la nanotecnología
 3. La prevención de riesgos laborales derivados de los nanomateriales
 - 3.1. Nanomateriales y riesgo laboral
 - 3.1.1. Efectos toxicológicos de los nanomateriales: entre el conocimiento y la incertidumbre
 - 3.1.2. Factores capaces de influir en el nivel de riesgo de los nanomateriales
 - 3.2. El principio de precaución como respuesta ante los potenciales riesgos de la exposición laboral a nanomateriales
 - 3.3. Gestión de los riesgos derivados de los nanomateriales en el lugar de trabajo
 4. Síntesis conclusiva
- Referencias bibliográficas

1. Consideraciones generales

La evolución tecnológica y su incidencia en distintas esferas de la vida humana ha reportado grandes beneficios a la sociedad, pero al mismo tiempo ha favorecido la aparición de riesgos emergentes y, con ellos, nuevas patologías laborales que obligan a una revisión de las acciones dirigidas a garantizar la seguridad, la salud y el bienestar laboral (Galera Rodrigo, 2015; Savolainen, 2013). Amenazas que, capaces de forzar una intervención normativa destinada a dar respuesta a sus efectos más nocivos, no se circunscriben en exclusiva a los derivados de las conocidas como tecnologías de la información y la comunicación (TIC), en tanto la nueva revolución digital y científica es mucho más amplia. Ejemplo paradigmático de ello es la nanotecnología, que «ha pasado rápidamente de ser utilizada en un entorno puramente científico y de investigación, a tener una infinidad de aplicaciones en la industria» (Navarro García, 2024, p. 206), introduciéndose en prácticamente todos los sectores de actividad y favoreciendo el desarrollo y el crecimiento.

El prefijo «nano», del griego *vávoς* (pequeño), sirve para designar una gran diversidad de materiales que comparten, como característica común, «que al menos una dimensión externa de todas o parte de las partículas que lo constituyen sea inferior a 100 nanómetros» (INSST, 2015b, p. 5), pudiendo ser fabricados, bien partiendo de la ruptura del material en bruto, bien de la unión de átomos o moléculas; alternativa esta última más complicada pero que permite mejores resultados. Sea como fuere, la clave en la velocidad de integración en el mercado han sido sus innumerables ventajas y beneficios en las distintas actividades económicas, mejorando las propiedades de los productos, en tanto la nanotecnología consigue disminuir el peso y tamaño de las manufacturas, las dota de acabados cuya calidad es más elevada y posibilita una mayor funcionalidad y un rendimiento superior en términos de durabilidad y resistencia (Navarro García, 2024; INSST, 2015a).

Estas virtudes, razón principal del aumento en la manipulación de la materia de muy pequeño tamaño en la actividad productiva, derivan de las extraordinarias propiedades físicas y químicas que presentan los materiales en esta escala inferior, diferentes de las que tienen a escala macro (Veiga Álvarez *et al.*, 2015; Foladori e Invernizzi, 2012), pues «los elementos químicos cambian su resistencia, flexibilidad, conductividad eléctrica, magnetismo, etc., cuando están en tamaños menores a los 100 nanómetros» (Foladori, 2012a, p. 19). El oro es un claro ejemplo, pues no es reactivo en escala macro, pero sí en nanoescala, habilitando su uso como sensor; frente al material en su tamaño normal, el nanooro puede dejar de ser conductor e incluso volverse magnético, además de ver incrementada su inestabilidad, adquiriendo propiedades explosivas y convirtiéndose en un excelente catalizador (Navarro

García, 2024). O el grafito, que se presenta como un material blando en los lápices y cuando es manipulado «en nanoescala como tubo de carbono es 100 veces más duro que el acero» (Foladori, 2012a, p. 19).

El uso de los nanomateriales está cada vez más extendido; de hecho, su empleo ha crecido exponencialmente en ámbitos tan importantes y variados como el aeroespacial, las comunicaciones, la energía, la construcción, la farmacología, la medicina, la industria manufacturera, la automoción, la electrónica o, por no seguir, la alimentación. Para hacerse una idea de la expansión de la nanotecnología en la sociedad actual basta referir que en octubre de 2013 el Nanotechnology Consumer Products Inventory¹ registró en el mercado 1.814 productos de estas características, la mayor parte en el apartado de «salud y bienestar», consagrándose la plata como el nanomaterial más utilizado (por sus propiedades bactericidas y antimicrobianas), si bien es cierto que el 49 % de los productos listados no especificaban la composición del nanomaterial empleado en su fabricación (Vance *et al.*, 2015; Tutor Sánchez, 2016). Casi doce años después, en febrero de 2025, la Base de Datos de Productos de Nanotecnología (NPD) cifra ya en 11.149 los productos de estas características, agrupados en múltiples categorías, tales como electrónica y electricidad, medicina, construcción, cosmética, textil, automoción, medioambiente, energías renovables o alimentación, entre otras².

Pese a ello, y aunque existen diversos estudios que apuntan a un elevado índice de toxicidad en algunos de estos nanomateriales, todavía falta información completa sobre su peligrosidad real y sus posibles efectos en los humanos y el medio ambiente (sobre todo en el largo plazo), cuestión fundamental para determinar con exactitud los riesgos laborales que afrontan las personas expuestas a su manipulación y la medida en que pueden ver dañada su salud y su seguridad. Por ello, *a priori* se impone un principio de precaución y se recomienda controlar la exposición en la medida de lo posible (Colorado Soriano *et al.*, 2013).

2. Una aproximación a los rasgos más característicos de los nanomateriales

Muchos han sido los esfuerzos de la comunidad científica –sobre todo a la vista de la apuntada proliferación– para explicar el comportamiento de los nanomateriales, cuyas características físicas, químicas, biológicas y toxicológicas, como ya se avanzó, difieren de las propias de los mismos materiales a escala mayor. A resultados de este empeño, existe ya una extensa investigación cuyos mimbres básicos deben ser tenidos en cuenta de cara a las actuaciones de prevención y protección que en su caso sean precisas.

¹ Elaborado por el Woodrow Wilson International Center for Scholars de Washington en el marco del Project on Emerging Nanotechnologies.

² Nanotechnology Products Database (NPD), <https://product.statnano.com/>

2.1. Concepto y tipología

El conocimiento actual de la ciencia nanométrica surge de la confluencia de múltiples disciplinas, encontrando origen en conceptos de física y química a los que se han incorporado aspectos de biología, medicina, ingeniería y ciencias ambientales (Cruz, 2011)³. De este modo, el universo de la nanotecnología, o «la manipulación de la materia a escala atómica y molecular» (Foladori, 2012a, p. 18), se configura por un carácter marcadamente multidisciplinar y especializado (Tutor Sánchez, 2016).

Ya en 1959, Richard Feynman (Premio Nobel de Física en 1965) se convertiría en el pionero de la nanotecnología cuando en la conferencia celebrada en el Instituto de Tecnología de California sorprendió a su audiencia con una intervención titulada *There's Plenty of Room at the Bottom*, donde estableció los cimientos de la disciplina⁴. Desde entonces, muchas han sido las definiciones empleadas por la comunidad científica en referencia a la nanotecnología: para la Royal Society and the Royal Academy of Engineering, abarca «el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas controlando el tamaño y la forma a escala nanométrica»; la NASA la conceptúa como «la creación de materiales funcionales, dispositivos y sistemas a través del control de la materia en la escala nanométrica (1-100 nm) y la explotación de nuevos fenómenos y propiedades (físicos, químicos, biológicos, mecánicos, eléctricos...) en esta misma escala»; a efectos de la International Standard Organization (ISO) se trata de aplicar el «conocimiento científico para manipular y controlar la materia a escala nanométrica con el fin de hacer uso de sus propiedades y fenómenos relacionados con su tamaño y estructura»; o, en fin, también ha sido definida por la Fundación Española para la Ciencia y Tecnología (FECYT) como la «tecnología generada con objetos cuyo tamaño oscila desde una décima de nanómetro a una centena de nanómetro» (Ávalos Fúnez *et al.*, 2016, pp. 2-3).

En un primer acercamiento terminológico, los nanomateriales no son otra cosa que «materiales que contienen partículas con una o más dimensiones entre 1 y 100 nm» (EU-OSHA, 2013c). Para hacerse una idea de la magnitud de esta cifra de referencia, baste con recordar que un nanómetro es «la millonésima parte de un milímetro, una longitud 80.000 veces más pequeña que el diámetro de un cabello humano y 10 veces el diámetro de un átomo de hidrógeno» (Ávalos Fúnez *et al.*, 2016, p. 3); que «60 nanómetros pueden ser el diámetro de un virus» (Foladori, 2012a, p. 19); «que el diámetro de una molécula de ADN es de 2,5 nm y que el diámetro de un átomo es de un tercio de nanómetro» (Cheang Wong, 2005, p. 7)

³ Así lo constató también años atrás, en el seno de Comisión Europea, el Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) en su documento de 2006 *Modified Opinion (after public consultation) on The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*.

⁴ Esta presentación para la American Physical Society in Pasadena será publicada por el autor un año después (Feynman, 1960).

o que «un nanómetro es 100 mil veces menor que [...] el espesor de una hoja de papel» (Rossi, 2013, p. 2). Algo muy importante a los efectos de este trabajo, en tanto «una célula humana puede ser 20 mil veces mayor a una nanopartícula, por lo cual estas últimas pueden introducirse fácilmente a través de la piel e inclusive ser “tragadas” por las células» (Foladori, 2012a, p. 19).

Atendiendo a la petición del Parlamento Europeo sobre la necesidad de introducir una definición científica exhaustiva en la legislación de la Unión Europea que permitiera determinar con la máxima exactitud cuándo un material debe ser considerado nanomaterial, se aprobó la Recomendación 2011/696/UE de la Comisión, de 18 de octubre, relativa a la definición de nanomaterial⁵, que entiende por tal, sin perjuicio de diversos matices y explicaciones, «un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas», ya sea sueltas, ya sea conformando un agregado o un conglomerado, siempre y cuando «el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm»; no obstante, en supuestos específicos justificados «por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad», dicho porcentaje del 50 % puede ser sustituido «por un umbral comprendido entre el 1 % y el 50 %». Además –añade la recomendación–, «los fullerenos, los copos de grafeno y los nanotubos de carbono de pared simple con una o más dimensiones externas inferiores a 1 nm deben considerarse nanomateriales» en todo caso.

Según se aprecia en esta definición, las nanopartículas pueden agruparse formando estructuras más grandes: agregados o aglomerados. En los segundos, «la unión entre las nanopartículas se realiza mediante fuerzas relativamente débiles [...] por fuerzas electrostáticas o de tensión superficial» y «la superficie específica resultante es similar a la suma de la superficie de los componentes por separado»; en cambio, «en los agregados las uniones entre las partículas se producen con enlaces más fuertes que dificultan la redistribución por medios mecánicos» y «la superficie que se forma es menor que la suma de las superficies específicas de los componentes que se unen» (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009, p. 36).

Además, la recomendación de la Comisión Europea especifica que los nanomateriales pueden ser de tres tipos: naturales, secundarios o fabricados con las características establecidas para los mismos. Los que produce la naturaleza se encuentran en el humo, en el aire o en las emisiones volcánicas. Los secundarios surgen de forma accidental y no intencional, a consecuencia de labores de soldadura, corte de metales o reacciones de combustión. Respecto de cuantos han sido fabricados intencionadamente para cumplir con fines

⁵ Recomendación 2011/696/UE de la Comisión Europea de 18 de octubre de 2011, relativa a la definición de nanomaterial, DOUE L 275/38 de 20 de octubre de 2011, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011H0696&qid=1743008424879>

determinados, procede puntualizar como peculiaridad la paralela existencia de técnicas e instrumentos seguros que se complementan con el conocimiento científico necesario en su manipulación y producción (Foladori e Invernizzi, 2012; Navarro García, 2024).

Más allá de esta tipología basada en el origen, los nanomateriales también pueden clasificarse con base en otros criterios. Así, atendiendo a su estructura, cabe diferenciar entre aquellos cuyas tres dimensiones se encuentran en la escala nanométrica (las nanopartículas), los que tienen dos (las nanofibras) y los que solo tienen una (los nanodiscos) (Veiga Álvarez *et al.*, 2015). Según su naturaleza, los nanomateriales pueden ser orgánicos, como los dendrímeros, los liposomas y los polímeros, e inorgánicos, como los nanotubos de carbono, los metálicos, cerámicos y semiconductores (Cruz, 2011). En fin, y por no seguir, desde el punto de vista de la forma, destacan los citados nanotubos de carbono, importantes conductores del calor que pueden ser de pared sencilla o pared múltiple, así como las nanocápsulas o «nanoestructuras esféricas huecas», caracterizadas por su «gran solubilidad y resistencia a los jugos gástricos, lo que permite, por ejemplo, dirigir los medicamentos a su punto de acción»; también los nanocables, los fullerenos y las *quantum dots* (Tanarro Gózalo y Gálvez Pérez, 2009, pp. 35-36).

2.2. Las diferentes utilidades de los nanomateriales

La nanotecnología ha experimentado un desarrollo exponencial impulsado, en gran medida, por los progresos científicos que contribuyen al crecimiento de los distintos sectores de la economía aportando nuevos materiales cuyo potencial representa oportunidades y amplios beneficios para la industria, en particular, y para la sociedad, en general. Entre otros, destacan por su uso industrial distintos nanomateriales no metálicos orgánicos (sílice amorfa sintética, dióxido de titanio, óxido de zinc, óxido de aluminio), metales y aleaciones metálicas (oro, plata, platino, cobre), nanomateriales con base de carbono (fullerenos, nanotubos y nanofibras de carbono, negro de humo, grafeno), nanopolímeros y dendrímeros, puntos cuánticos o nanoarcillas (Navarro García, 2024).

Esta revolución tecnológica supone un cambio en el tratamiento de la materia que afecta a todos los sectores económicos y de producción, haciéndose con los mercados en un tiempo récord. Actualmente, la nanotecnología permite fabricar raquetas de tenis más ligeras, flexibles y resistentes, así como gafas con cristales que no se rayan y tejidos anti-manchas y antiarrugas. En agricultura, los pesticidas que se presentan nanoencapsulados contienen menos cantidad de producto y, en consecuencia, se reducen los costes, resultando por ello más eficientes. En alimentación, la nanotecnología está detrás de productos como los saborizantes, los colorantes o los anticoagulantes. Pero también gracias a esta ciencia han tenido lugar enormes avances en la investigación médica, reduciendo la cantidad de producto químico preciso para la eficacia de los fármacos o aportando su granito de arena, por ejemplo, en la lucha contra el cáncer.

2.2.1. La nanomedicina y la mejora en el diagnóstico y los tratamientos

En las últimas décadas no han sido pocos los esfuerzos científicos orientados al desarrollo del conocimiento relativo a la nanotecnología y sus posibles aplicaciones para la vida y la actividad humana. Uno de los campos más favorecidos por este denodado empeño es el de las ciencias de la salud, donde la nanomedicina ha realizado aportaciones relevantes que permiten la mejora en los procedimientos de diagnóstico (nanosistemas de imagen y nanobiosensores), en las terapias (nanoterapia) y en los tratamientos, mediante la administración controlada de fármacos y la posibilidad de regenerar tejidos y órganos dañados (Lechuga, 2011). En efecto, dada la capacidad de desplazamiento que tienen las nanopartículas a través del flujo sanguíneo y atravesando membranas celulares, se convierten en instrumentos imprescindibles en el diagnóstico y tratamiento, pero también en la vigilancia y prevención de enfermedades como el cáncer, la diabetes u otras patologías de tipo neurodegenerativo, musculoesquelético e inflamatorio, infeccioso y cardiovascular. Así pues y, en definitiva, la influencia de las nanotecnologías en el sector de la asistencia sanitaria ha permitido la combinación de técnicas de miniaturización con «la síntesis química y el control de la organización molecular», ofreciendo herramientas que solo unos años atrás resultaban prácticamente inimaginables (EU-OSHA, 2013b, p. 1).

Dada la complejidad de la cuestión, resulta imposible reflejar de forma exhaustiva en el presente análisis todo el potencial médico de la nanotecnología. Baste, pues, con plantear una visión global capaz de mostrar una imagen panorámica de la situación, suficiente para hacerse una idea de las posibilidades que se abren gracias a estos avances:

1. La importancia de la nanomedicina está fuera de toda duda en el nanodiagnóstico, de cara a identificar las enfermedades en fase incipiente, lo que incrementa la capacidad de respuesta y permite implementar la solución adecuada con mayores garantías de curación. En este sentido, no se puede negar que las nanopartículas han contribuido significativamente al perfeccionamiento de la tecnología de la imagen (Lechuga, 2011). Entre otros logros, procede destacar, por ejemplo, cómo estas nuevas tecnologías han permitido dar un paso importante en la detección del virus de inmunodeficiencia humana (VIH), en tanto un equipo de investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ha desarrollado y patentado un dispositivo que permite obtener resultados clínicos en 4 horas y 45 minutos y puede llegar a detectar el VIH tipo 1 durante la primera semana tras la infección. Se trata de un biosensor que, gracias a la combinación de estructuras muy pequeñas de silicio con nanopartículas de oro, produce señales mecánicas y ópticas que se amplifican mutuamente (Kosaka *et al.*, 2017).
2. Las nanopartículas representan una auténtica revolución para la farmacología, ámbito donde se están desarrollando, con gran eficiencia, técnicas para la administración de fármacos al cerebro por vía intranasal (IN) en el tratamiento de enfer-

medades neurodegenerativas (Bonaccorso *et al.*, 2024)⁶; por vía oral y parenteral en el tratamiento del cáncer, así como vacunas orales.

Las propiedades de las nanopartículas les permiten atravesar las barreras biológicas y alcanzar órganos como los pulmones o el cerebro (Ríos de la Rosa, 2011; EU-OSHA, 2013b; Oropesa Núñez y Jáuregui-Haza, 2012). En oftalmología contribuyen a prolongar la duración de los fármacos evitando su degradación, al tiempo que se ha conseguido mejorar la tolerancia y la permeación transcorneal (Llabot *et al.*, 2008). Asimismo, en la administración de medicamentos para el tratamiento pulmonar los resultados confirman que «las nanopartículas poliméricas muestran una mayor estabilidad durante el proceso de nebulización, con lo que se elimina la posibilidad de pérdida de fármacos» (Llabot *et al.*, 2008, p. 46). No se olvide tampoco que los nanomateriales han convertido en solubles fármacos insolubles hasta ahora o que es posible servirse de nanoesponjas para ocuparse de las infecciones resistentes a los antibióticos (Tutor Sánchez, 2016).

Para hacer llegar la medicación al objetivo se utiliza una amplia variedad de nanoestructuras como nanocápsulas, nanopartículas, nanotubos, dendrímeros, micelas, liposomas, conjugados poliméricos y microgeles, entre otros (Krötzsch, 2015; Oropesa Núñez y Jáuregui-Haza, 2012; Gómez Saldívar, 2011)⁷; nanosistemas que ofrecen mayor precisión e incrementan la efectividad del medicamento mediante el control de la dosis exacta requerida, del tamaño y la morfología, así como de las propiedades superficiales del compuesto (Lechuga, 2011). De esta manera, el uso de nanopartículas en el diseño de fármacos inteligentes permite ajustar la liberación y distribución del producto de forma menos invasiva, mediante la dosificación controlada, y sirve para hacer realidad nanofórmulas y nanoterapias personalizadas que, dirigidas a órganos y tejidos enfermos, evitan que se vean afectadas otras células sanas próximas, eliminando múltiples efectos secundarios y adversos, a la par que mejorando los resultados y reduciendo las cantidades necesarias (Oropesa Núñez y Jáuregui-Haza, 2012).

3. Los avances de la nanotecnología en el ámbito de los implantes y de la ingeniería tisular han impulsado el desarrollo de la medicina regenerativa, con importantes repercusiones para la ingeniería de tejidos, aportando nuevos materiales y técnicas

⁶ Es más, recoge este estudio cómo en el campo de las patentes William H. Frey II, pionero de la administración de insulina de la nariz al cerebro, descubrió ya en el año 1989 la ruta IN como «un método no invasivo para eludir la barrera hematoencefálica (BHE) y dirigir agentes terapéuticos (incluida la insulina) al cerebro para trastornos neurodegenerativos, como la enfermedad de Alzheimer, los accidentes cerebrovasculares y la enfermedad de Parkinson» (Bonaccorso *et al.*, 2024, p. 5620).

⁷ Sirvan como muestra los nanotubos de carbono, convertidos en un elemento de gran potencial en nanomedicina por su versatilidad y sus múltiples aplicaciones en distintos ámbitos, incluida la farmacología, donde son utilizados como soporte y como excipiente en la elaboración de formulaciones farmacológicas para el control de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson.

que hacen posible la regeneración mediante el empleo de algunas nanopartículas como la hidroxiapatita o la zirconia, los nanotubos de carbono, los nanocomposites o las nanofibras de polímeros biodegradables. También han permitido el empleo de las células madre, tanto en fase embrionaria como adulta; pero

uno de los mayores logros es el desarrollo de biomateriales con capacidad de imitar a la matriz extracelular, constituyendo un auténtico soporte, idéntico al que aparece de forma natural en las células, sobre el que pueden crecer las células progenitoras para posteriormente implantarlo en el paciente y así reparar o sustituir el órgano dañado (Lechuga, 2011, p. 110).

Como muestra de los estudios más recientes, procede citar el liderado por un equipo de investigadores del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC) que ha logrado reconectar la médula espinal de una rata totalmente seccionada a nivel torácico mediante una espuma en tres dimensiones de óxido de grafeno reducido (rGO), lo que demuestra las posibilidades reales de este material en el tratamiento de lesiones medulares, generando nuevas expectativas para los pacientes parapléjicos (Zaforas *et al.*, 2025).

4. Los logros de la nanociencia en la lucha contra el cáncer resultan especialmente significativos, pues, aunque los tumores pueden ser destruidos quemándolos, con este procedimiento es difícil actuar sin dañar el tejido sano circundante; inconveniente que sirviéndose de la nanomateria puede solventarse. No cabe negar que –en línea con lo ya apuntado– una de las principales innovaciones en el campo de la nanomedicina es el desarrollo de fármacos capaces de dirigir la administración terapéutica a órganos concretos, transportando e implantando nanopartículas en el interior de células cancerosas (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009).

En el año 2005 científicos de la Universidad de Michigan presentaron un estudio pionero que probaba cómo un medicamento inteligente podía alcanzar las células cancerosas a través del flujo sanguíneo transportado mediante nanopartículas; el medio utilizado para el transporte fue un dendrímero de diámetro inferior a los 5 nm en cuyas ramificaciones se adhirió un potente fármaco anticancerígeno (metotrexato), así como, por un lado, agentes fluorescentes y, por otro, ácido fólico, del que las células tumorales están especialmente necesitadas (Gómez Saldívar, 2011). Otro estudio de gran transcendencia fue el publicado en el año 2010 por científicos de la Universidad de Missouri, quienes consiguieron eliminar los tumores de próstata sin afectar al tejido sano mediante nanopartículas de oro radiactivo (Chanda *et al.*, 2017).

También ha transcurrido bastante tiempo desde las investigaciones que mostraron cómo la exposición a luz infrarroja de nanoesferas térmicas de plástico recubiertas con oro y anticuerpos, e introducidas en el flujo sanguíneo de ratones con cáncer, hacía que aquellas se concentraran en los tumores, quemándolos, pero

dejando intacto el tejido de alrededor (Cruz, 2011). Tampoco es del todo novedoso el modelo de nanoterapia basado en la utilización de las nanopartículas de óxido de hierro recubiertas de aminosilano, que ha abierto las puertas a un método terapéutico consistente en destruir las células cancerígenas mediante el calentamiento local de la zona del tumor sirviéndose de una inyección en la misma y el ulterior empleo de un campo magnético de alta frecuencia, con la consiguiente vibración de las nanopartículas (Lechuga, 2011)⁸.

Más recientemente, en el año 2025, un equipo de investigadores de la Universidad de Wuhan (China) acaba de publicar los resultados de un estudio basado en un nuevo método que aumentará la eficacia de los nanofotosensibilizadores inmuoactivadores basados en marcos orgánicos covalentes (COF) para la inmunoterapia contra el cáncer, proporcionando, al mismo tiempo, valiosa información para el desarrollo de protocolos de fotoinmunoterapia altamente adaptables y eficientes. Entre las posibles aplicaciones clínicas –amplias y prometedoras, conforme afirma el estudio– destaca la viabilidad de su empleo, de forma sinérgica, «junto con la quimioterapia o la radioterapia tradicionales para reforzar su eficacia y mitigar los efectos secundarios» (Yang *et al.*, 2025, p. 291).

5. Las propiedades bactericidas de las nanopartículas de plata ofrecen gran interés instrumental en el ámbito sanitario, por cuanto pueden optimizar la limpieza y desinfección del equipamiento del personal sanitario, la ropa de cama o de los enfermos, las toallas, etc. (Foladori, 2012a).

2.2.2. Otras aplicaciones de la nanotecnología

Además del sector sanitario, otras actividades económicas se han beneficiado también del impulso proporcionado por la nanotecnología. Así, y de forma notoria, la construcción, donde el uso de nanomateriales facturados se ha incrementado notablemente debido a sus características y comportamientos específicos, que aportan mejoras significativas con relación a los materiales tradicionales. Así, de forma creciente se utilizan nanomateriales plásticos para cubrir y aislar pisos y se incorporan nanopartículas a las pinturas, también en formato aerosol.

Este avance en la utilización de nanomateriales, principalmente dióxido de titanio (TiO₂) y dióxido de silicio (SiO₂), ha contribuido en gran medida a mejorar la eficiencia energética, el aislamiento térmico y la sostenibilidad, convirtiéndolos en la mejor alternativa posible para la transición ecológica del sector (INSST, 2015a). Además, las técnicas nanotecnológicas utilizadas en la producción de los vidrios consiguen la antiadherencia del polvo o de la suciedad a la vez que facilitan el escurrimiento del agua.

⁸ Esta terapia (sistema de nanoterapia de MagForce) puede ser de aplicación a diversos tipos de tumores sólidos.

También el sector agroalimentario se ha visto beneficiado por la nanotecnología. No solo porque favorece el incremento de la eficacia y eficiencia de los procesos productivos, sino también porque permite potenciar el sabor de los alimentos, reducir el contenido de las grasas, aportar suplementos alimenticios nanoencapsulados (como Omega3, fortificantes o adelgazantes), contribuir a los colores y texturas y aumentar la biodisponibilidad de vitaminas y minerales; virtudes a las que se suma su papel en la prevención del deterioro microbiano en el proceso de envasado, desarrollando materiales más seguros y que alargan la vida útil del producto (Foladori, 2012a y 2012b). Es más, las aplicaciones de la nanotecnología que impulsan la industria alimentaria permiten, mediante un principio fundamental que logra sustancias orgánicas de un tamaño nanométrico, mejorar la ingestión, digestión y biodisponibilidad en el organismo con respecto a las mismas sustancias consideradas en la escala micro o macroscópica (Ávalos Fúnez *et al.*, 2016).

Otro de los sectores que más ventajas ha obtenido de esta revolución tecnológica es el de los cosméticos, pues la mayoría de las compañías multinacionales que ofrecen artículos como cremas antiarrugas, filtros solares o champús se benefician de las muchas oportunidades que la nanociencia ofrece hoy en día (Foladori, 2012a; Foladori e Invernizzi, 2012).

Al final, las ventajas de los nanomateriales alcanzan a prácticamente toda la industria: las nanopartículas de plata se incluyen en electrodomésticos como frigoríficos, lavadoras, lavavajillas y aires acondicionados, y en la electrónica se ha extendido el uso de «baterías de litio con ánodos recubiertos con nanotecnología». Por su parte, en la rama textil, el recurso a la misma «evita que la ropa se manche y se arrugue» y en el área deportiva su influencia afecta a las propiedades de los tejidos térmicos, el calzado, las raquetas de tenis, los palos de golf... y, en general, de todo tipo de material diseñado para la práctica del deporte. También en la industria del armamento la aportación de las nanotecnologías ha resultado clave, al promover la investigación y el desarrollo de misiles de precisión superexplosivos y de sensores para chalecos antibala (Foladori, 2012b).

Todo ello sin olvidar, además, la necesaria complicitad de esta innovación científica con el medioambiente, pues más allá de las exigencias impuestas por la transición ecológica (Miñarro Yanini, 2024), ha posibilitado «el uso de nanomateriales para descontaminación de metales pesados en recursos hídricos, eliminación de contaminantes orgánicos en aguas de consumo humano, animal y vegetal, descontaminación y purificación del aire, etc.» (Tutor Sánchez, 2016, p. 494).

3. La prevención de riesgos laborales derivados de los nanomateriales

Argumentos como que las nanopartículas presentan características diferentes a las partículas en tamaños normales, que pueden ser de materiales muy diversos, que en muchos

casos se desconoce el ciclo de vida de estos productos o que los estudios toxicológicos han demostrado la evidencia de los efectos cancerígenos de algunos de ellos en ratones o en estudios *in vitro*, entre otras, se sitúan en la base de cierta desconfianza y conducen a tomar conciencia de la posible aparición de nuevos riesgos con efectos desconocidos, tanto para el medioambiente, como para la salud humana, lo que hace aflorar la importancia que la cuestión puede alcanzar en el ámbito de la prevención de riesgos laborales.

3.1. Nanomateriales y riesgo laboral

Dado que toda nueva tecnología puede traer aparejadas amenazas emergentes, es preciso detenerse en la reflexión sobre los problemas que la exposición a los nanomateriales puede plantear para la salud laboral, pues, aunque resulte paradójico, «las mismas propiedades que hacen que las nanopartículas puedan ser útiles para el transporte de fármacos a sitios específicos del organismo las hacen peligrosas para los trabajadores expuestos» (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009, p. 34).

La exposición laboral a nanomateriales puede producirse a lo largo de las distintas etapas que comprende el ciclo de vida de estos, como son la fabricación, la incorporación al producto y el uso profesional de este, así como la eliminación de los residuos o las tareas de mantenimiento y de limpieza (INSST, 2015a y 2015b; Navarro García, 2024). Ahora bien, dadas las múltiples y dispares utilidades de los nanomateriales, no cabe duda de que el sanitario será uno de los sectores más afectados por este factor de riesgo, pudiendo perjudicar a personal que presta servicios de tal naturaleza en hospitales, urgencias móviles, centros médicos o a domicilio; pero también a quienes trabajan en laboratorios y a cuantos, pese a no ser sanitarios, realizan su actividad profesional en instalaciones médicas o análogas. De un modo u otro, estos sujetos pueden manipular o entrar en contacto con gran variedad de productos compuestos por nanomateriales (los más usados son las nanopartículas de plata y de corteza de oro, las partículas metálicas de óxido de hierro, los nanotubos de carbono, los puntos cuánticos, los dendrímeros, las nanopartículas cerámicas y magnéticas o los nanoalambres) que pueden provocar daños de diversa consideración en los pulmones, tales como inflamación y daños en los tejidos, toxicidad crónica, estrés oxidativo y citotoxicidad, fibrosis e incluso originar tumores y afectar al sistema cardiovascular (EU-OSHA, 2013b). Sirvan como referente, una vez más, los nanotubos de carbono (de uso muy extendido también en otras industrias y ramas económicas), que por su toxicidad se han comparado con el amianto y otras fibras cancerígenas (Krötzsch, 2015; Muller *et al.*, 2005; Tanarro Gozalo y Gálvez, Pérez, 2009)⁹.

⁹ «La paradoja que se desprende de este concepto es que al emplear nanoacarreadores con blanco terapéutico específico, en muchos casos se presenta una alta neurotoxicidad e incluso daños superiores a los manifestados por la misma enfermedad de Parkinson, por lo que los tecnólogos farmacéuticos

Otro de los sectores dignos de mención particular, en consonancia con el discurso precedente, es el de la construcción, pese al limitado conocimiento de las personas afectadas acerca del uso de estos materiales y los riesgos asociados. Esta situación, subsistente hoy en gran medida, ya había sido puesta de manifiesto en la encuesta realizada en el año 2009 por la Federación Europea de la Industria de la Construcción (FIEC) en colaboración con la Federación Europea de Trabajadores de la Construcción y de la Madera (EFBWW), en la que se desveló cómo el 71 % de los empresarios y el 80 % de los representantes del personal encuestados desconocían que los productos y materiales que estaban siendo utilizados por su empresa contenían nanomateriales y, por tanto, no se habían tenido en cuenta en la evaluación de riesgos ni en la planificación de las medidas preventivas, dejando a las personas trabajadoras del sector desprotegidas frente a sus potenciales peligros (INSST, 2015a).

Más allá de sanidad y construcción, y además de los propios procesos de fabricación o gestión de nanomateriales o de productos que los contengan, habrá de prestarse especial atención a aquellas actividades en las que se desarrollen trabajos de soldadura o de pintura, en las que se utilicen polímeros o se empleen motores de combustión o en las industrias agrícola y de la alimentación (Navarro García, 2024).

En cualquier caso, teniendo en cuenta que el artículo 4 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de riesgos laborales (LPRL), define riesgo como «la posibilidad de que un trabajador sufra un determinado daño derivado del trabajo», no cabe duda de que los nanomateriales interesan en el ámbito de la seguridad y salud laboral y justifican el establecimiento de protocolos de nanoseguridad en las empresas, teniendo presente en todo caso la gran singularidad que presentan –debido a sus propiedades únicas– y la necesidad de aceptar todavía hoy cierto nivel de incertidumbre en cuanto hace a los riesgos que algunos de ellos pueden significar para las personas trabajadoras (Galera Rodrigo, 2015)¹⁰. Incertidumbre de la que se deriva la necesidad de aplicar en este ámbito el principio de precaución.

deben analizar antes de idear una estrategia de vehiculización, los elementos que componen la “triada de identidad” que consiste en la forma del nanomaterial, el efecto bioquímico causado por el acarreador y la fisiología que genera, en ambos sentidos, positivo y negativo, ya que en poblaciones susceptibles los nanomateriales pueden llevar a efectos adversos sobre la fertilidad y el desarrollo embrionario por tener la capacidad de atravesar la barrera placentaria, así como a alteraciones vasculares, cardíacas y respiratorias entre una variedad más de daños tisulares» (Kröttsch, 2015, pp. 89-90).

¹⁰ La incertidumbre generada por los potenciales riesgos para la seguridad y la salud laboral derivados de la exposición a nanomateriales o nanosustancias recibió años atrás la respuesta de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) que ya en 2013 advertía (en su informe *Prioridades para la investigación sobre seguridad y salud laboral en Europa: 2013-2020*) «del enorme desfase entre el conocimiento en las aplicaciones de la nanotecnología y el de su impacto en la salud, brecha que la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (EU-OSHA) cuantifica en 20 años».

3.1.1. Efectos toxicológicos de los nanomateriales: entre el conocimiento y la incertidumbre

Tal y como se avanzó, existen diferencias de comportamiento de los materiales en la escala macro y en la escala nano. El temor es que materiales en principio inocuos se tornen en peligrosos en su menor tamaño; de hecho, ya se han encontrado evidencias de toxicidad en nanopartículas que no la presentan en su versión a mayor escala. En concreto, las nanopartículas insolubles son las que han venido generando mayor preocupación entre la comunidad científica por su capacidad para atravesar barreras biológicas, situación que permite que algunas partículas inhaladas lleguen a la sangre y transiten por el organismo o, incluso, que traspasen los nervios olfativos y alcancen el cerebro (Colorado Soriano *et al.*, 2013).

Lo cierto es que en este ámbito se abre un escenario de incertidumbre, pues del mismo modo que existen múltiples estudios que apuntan a la toxicidad de este o aquel nanomaterial de uso común, otros muchos se han venido utilizando desde hace ya mucho tiempo y su toxicidad se ha demostrado baja. Por consiguiente, la hipótesis de que una sustancia más pequeña es más reactiva y, por ende, más tóxica, no puede ser respaldada de forma indubitada; al contrario, los nanomateriales son similares en este punto a otros productos químicos «normales», en el sentido de que algunos pueden ser tóxicos y otros, en cambio, no.

Dado que aún no se dispone de un paradigma de aplicación general para identificar los peligros de tales sustancias, organismos como el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (CCRSEI), el Comité Científico de Seguridad de los Consumidores (CCSC), la Autoridad Europea de Salud Alimentaria (EFSA) o la Agencia Europea del Medicamento (EMA) recomiendan un análisis «caso por caso» para la determinación del riesgo asociado a los nanomateriales¹¹. Además, en relación con muchos de ellos, la regla general es la falta de información suficientemente contrastada y la consiguiente necesidad de seguir investigando, imponiéndose el principio de precaución mientras se salvan las lagunas de conocimiento existentes, capaces de comprometer la seguridad y la salud de todos los agentes implicados en su manipulación.

La investigación sobre los riesgos que pueden generar las nanopartículas se ha fijado fundamentalmente en cuestiones como las vías de absorción, transporte y distribución, así como los efectos de la translocación y la interacción con sistemas biológicos del cuerpo humano, entre otros aspectos (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009)¹². En cualquier caso,

¹¹ Según recoge la Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo y al Comité Económico y Social Europeo titulada *Segunda revisión de la normativa sobre los nanomateriales*, Bruselas, 3.10.2012, COM(2012) 572 final, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0572&from=ES>

¹² La translocación hace referencia a un proceso que permite a las nanopartículas traspasar barreras biológicas y aparecer en zonas del organismo diferentes a las de entrada, sin alterar por ello su integridad como partícula al no producirse su disolución.

el análisis de los efectos toxicológicos de los materiales resulta sumamente complejo, pues existen múltiples factores que pueden influir, tales como la modalidad de exposición (vías de entrada, frecuencia, duración, concentración ambiental), las características de la persona expuesta (susceptibilidad individual, actividad en el lugar de trabajo) y las del propio nanomaterial (composición química, forma, tamaño y área superficial o estado de aglomeración) (INSST, 2015b; Navarro García, 2024).

Por si las afirmaciones precedentes no reflejaran en grado suficiente la dificultad del empeño, esta se incrementa aún más por la pluralidad de escenarios y combinaciones posibles. Así, por ejemplo, la presencia de un gran número de nanopartículas puede verse afectada si se produce una aglomeración, lo que puede disminuir la toxicidad relativa (Ávalos *et al.*, 2013). De igual modo, cabe la posibilidad de que un nanomaterial no tóxico se una a otro que sí lo es y acabe convirtiéndose en un caballo de Troya que posibilita el acceso a distintos órganos y células del cuerpo (EU-OSHA, 2013b). Y es que está contrastado científicamente que la toxicidad de los nanomateriales o nanofibras no solo está relacionada con su tamaño, forma, composición química o carga superficial, sino que existen otros elementos a considerar, como son los recubrimientos superficiales, disolventes, concentración, estructura cristalina o sistema de agregación (Veiga Álvarez *et al.*, 2015).

3.1.2. Factores capaces de influir en el nivel de riesgo de los nanomateriales

Uno de los elementos nucleares en la labor preventiva de las empresas es la determinación del nivel de riesgo a través de su oportuna evaluación. Aceptado que en el caso de los nanomateriales esta labor alcanza grandes cotas de complejidad, dada la singularidad de aquellos y las peculiaridades de su funcionamiento, resulta imposible proporcionar una respuesta global y unívoca. Pero tampoco aspira este estudio a ofrecer un análisis exhaustivo de cualesquiera materiales en las diversas situaciones posibles; lo que sí pretende es destacar, al menos, la importancia que factores como tamaño, forma, disolución y vía de entrada al organismo pueden tener para identificar su peligrosidad:

1. La primera variable que afecta a la toxicidad de una nanopartícula es su área superficial, ya que, al ser su tamaño menor, el porcentaje de átomos que se encuentran en la superficie es mayor, convirtiéndola en más reactiva si es comparada con el mismo material a escala macroscópica.

Para resaltar la importancia del tamaño en la determinación de la peligrosidad cabe fijarse en el caso de la plata, ya que diversas publicaciones coinciden en señalar que la toxicidad de sus nanopartículas (AgNPs) depende de aquel factor, que afecta tanto a la distribución intestinal y tisular como a la captación celular, habiéndose demostrado que las AgNPs más pequeñas representan mayores ni-

veles de riesgo (Ávalos *et al.*, 2013)¹³. Otro ejemplo podría ser el dióxido de titanio (TiO₂), pues, pese a ser considerado no tóxico en un rango de mayor tamaño, diversos estudios sobre el nano-TiO₂ han aportado como resultado un alto nivel toxicológico en los pulmones y las células (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009).

2. La forma se alza, asimismo, como condicionante toxicológico, toda vez que se ha constatado que las nanopartículas que presentan forma de triángulo truncado resultan más nocivas que las que tienen forma alargada o esférica (Ávalos *et al.*, 2013). A este respecto, la investigación en estudios *in vitro* ha hecho patente «la importancia de la forma en el caso del TiO₂, resultando más tóxico en la forma de fibra que la misma partícula con forma esférica» (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009, p. 38).
3. También resulta fundamental para determinar el riesgo el medio en el que están disueltas las nanopartículas, siendo de mayor a menor –conforme a la escala facilitada por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)¹⁴– los polvos en estado sólido (cosméticos), las suspendidas en líquidos (nanotubos en agua), las fijas en matrices (filmes delgados) o las incorporadas en nanoestructuras (aleaciones en metales) (Foladori e Invernizzi, 2012).
4. En fin, otro aspecto importante de cara a identificar y ponderar el riesgo es la vía de ingreso potencial al organismo. A este respecto, procede señalar que las principales vías de exposición humana a los nanomateriales, por cuanto hace al ámbito laboral, serán la respiratoria o inhalatoria, la dérmica y la digestiva (Ávalos *et al.*, 2013)¹⁵. La más destacada será la primera y el órgano más perjudicado el pulmón, motivo por el cual la mayoría de los estudios centran su atención sobre las vías respiratorias y encuentran en este órgano su principal objetivo, aunque ocasionalmente se ha comprobado que resultan afectados otros como el riñón, el hígado e incluso el cerebro (Tanarro Gozalo y Gálvez Pérez, 2009). Sirva de nuevo

¹³ Si bien es cierto que se han realizado numerosos estudios referentes a las nanopartículas de plata, existe cierta preocupación en distintos sectores de la sociedad con relación a su toxicidad, así como a sus posibles efectos sobre la salud, la seguridad y el medio ambiente. A este respecto, afirma el Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) que no hay evidencia de efectos adversos significativos que puedan asociarse a la manipulación y exposición a la plata, pero no está tan claro si el uso de las nanopartículas de plata puede ocasionar otras consecuencias negativas para la salud. Así lo afirmó en el documento de 2014 *Opinion on Nanosilver: safety, health and environmental effects and role in antimicrobial resistance*, https://health.ec.europa.eu/latest-updates/scenihp-preliminary-opinion-nanosilver-safety-health-and-environmental-effects-and-role-2013-12-13_en

¹⁴ Agencia de investigación estadounidense enfocada en el estudio de la seguridad y salud de las personas trabajadoras para la prevención de lesiones y enfermedades relacionadas con el trabajo.

¹⁵ En nanomedicina, sin embargo, también se puede hablar de otra vía de exposición como en el caso de la inyección intravenosa utilizada para la liberación y direccionamiento de fármacos. Con un alcance más general, procede efectuar oportuna alusión también a la vía de exposición a través del sistema reproductivo femenino por la implantación de artículos anticonceptivos y otros productos de higiene íntima con presencia de nanopartículas de plata.

el ejemplo de las nanopartículas de plata, toda vez que «el sistema respiratorio es la principal vía de entrada para las partículas ambientales», provocando daños en la salud, principalmente de carácter pulmonar y cardiovascular con patologías de tipo inflamatorio (Ávalos *et al.*, 2013, p. 8).

La exposición dérmica, que tiene como barrera la piel, también está estrechamente relacionada con estas nanopartículas de plata. En este supuesto, por su función antibacteriana, razón última de su empleo cada vez más común en la producción de artículos sanitarios como los vendajes o apósitos utilizados en el tratamiento de heridas y quemaduras o el instrumental quirúrgico. Además, se ha demostrado que es posible en una piel sana la penetración de finas partículas (INSST, 2015a y 2015b)¹⁶, efecto que se agrava en la dañada, según confirman las investigaciones sobre hallazgos de depósitos de plata dentro de la piel o argiria (Ávalos *et al.*, 2013).

Algunos estudios han probado, por ejemplo, la existencia de absorción dérmica de nanopartículas de plata en el caso de un paciente con quemaduras en el 30 % de su cuerpo y que, después de someterse durante una semana a un tratamiento con vendajes y gasas impregnadas con partículas de tal material, «presentó síntomas de hepatotoxicidad y coloración grisácea en la cara, encontrándose niveles de plata en orina y plasma elevados, que se normalizaron tras el cese de la exposición». De igual modo, se ha acreditado el padecimiento de un eritema multiforme por parte de una persona empleada en un laboratorio de investigación, como consecuencia de una exposición laboral a dendrímeros que le provocó una respuesta alérgica similar a una dermatitis de contacto cuyos síntomas desaparecían en periodos de baja, reapareciendo nuevamente tras la incorporación al puesto de trabajo (Veiga Álvarez *et al.*, 2015, p. 148).

Por último, la exposición por vía digestiva se produce no solo por comer alimentos o sustancias contaminados, sino que también puede deberse a un contacto entre la mano y la boca después de manipular superficies u objetos contaminados. Es más, la ingestión puede ser consecuencia de la respiración, ya que «las partículas inhaladas que se eliminan de las vías respiratorias a través del sistema mucociliar pueden tragarse» y estos nanomateriales ingeridos en algunas ocasiones logran cruzar el epitelio intestinal, entrar en el torrente sanguíneo y llegar a diferentes órganos y tejidos (EU-OSHA, 2013b, p. 5).

En el caso de las nanopartículas de plata, los daños asociados a su ingesta llevan aparejadas lesiones de diversa consideración que pueden afectar a riñones, pulmones, testículos o cerebro, y que van desde úlceras intestinales hasta la argiria, aunque todos los estudios ponen de manifiesto que el «órgano diana» de esta sustancia, una vez ingerida, es el hígado (Ávalos *et al.*, 2013).

¹⁶ La forma de las nanopartículas también es importante para determinar las posibilidades de penetración en el organismo; así, aquellas que tienen forma esférica penetran mejor que las que tienen forma de elipse.

3.2. El principio de precaución como respuesta ante los potenciales riesgos de la exposición laboral a nanomateriales

Como orientación para la gestión de riesgos en contextos de incertidumbre científica (como lo es el planteado por los nanomateriales) tiempo atrás se forjó el conocido como «principio de precaución». Sin perjuicio de precedentes más o menos significativos, en la actualidad encuentra su reflejo normativo más importante a nivel internacional en el artículo 191.2 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (TFUE), donde es mencionado (pero no definido) en relación con la protección del medio ambiente¹⁷. Ahora bien, tal y como indicó hace ya un cuarto de siglo la Comisión Europea, «en la práctica, su ámbito de aplicación en mucho más vasto»; en concreto, en aquellas hipótesis en las que «la evaluación científica preliminar objetiva» genera un temor razonable respecto a «efectos potencialmente peligrosos para el medio ambiente y la salud humana, animal o vegetal» derivados de un fenómeno, producto o proceso¹⁸.

Por cuanto aquí importa, alcanza al ámbito de la salud pública y permite concluir que, ante una amenaza seria para la salud humana o el ecosistema, la incertidumbre científica existente no puede servir de excusa para posponer las actuaciones preventivas o de protección, pues no se puede paralizar la acción necesaria a la espera de pruebas que a menudo se demoran años. De este modo, ante situaciones en las que el daño posible es grave, pero el análisis científico no permite una verificación segura de la relación causal, el principio general enunciado habilita a los poderes públicos para actuar o tomar medidas de seguridad como si existiera un riesgo acreditado, pese a la ausencia de certeza absoluta respecto al mismo (Muñoz Ruiz, 2020), pues en estas hipótesis «se podrán tener todas las dudas que se quieran, pero hay que tomar alguna decisión sin esperar a resolverlas» (Rebollo Puig e Izquierdo Carrasco, 2003, p. 234). Este presupuesto esencial explica, asimismo, que las medidas adoptadas deban ser objeto de revisión a la luz de ulteriores datos científicos y de la nueva información disponible (Muñoz Ruiz, 2020).

No se trata de una regla totalmente desconocida para el ordenamiento jurídico español, donde se localiza, siquiera de forma tácita, en algunas normas. Así, en el artículo 26 de la Ley 14/1986, de 25 de abril, general de sanidad, en cuya virtud «en caso de que exista o se sospeche razonablemente la existencia de un riesgo inminente y extraordinario para la salud, las autoridades sanitarias adoptarán las medidas preventivas que estimen pertinentes»¹⁹;

¹⁷ Artículo 191.2 (antiguo art. 174 Tratado Constitutivo de la Comunidad Europea –TCE–) de la Versión consolidada del TFUE, DOUE C 83/47, 30.3.2010.

¹⁸ Así lo establece en la Comunicación de la Comisión sobre el recurso al principio de precaución, Bruselas, 2.2.2000 COM(2000) 1 final, p. 2.

¹⁹ «Tales como la incautación o inmovilización de productos, suspensión del ejercicio de actividades, cierres de empresas o sus instalaciones, intervención de medios materiales y personales y cuantas otras se consideren sanitariamente justificadas», según continúa el precepto antes de añadir, en su apartado

precepto que sirvió para validar las acciones seguidas con ocasión de la crisis del aceite de orujo acontecida en 2001 (alerta alimentaria por sospechas de presencia del benzopireno, un carcinógeno), ante la cual las autoridades ordenaron la retirada del producto, que finalmente la investigación científica reveló inocuo (Rodríguez Font, 2012). También en el artículo 99 de la Ley 29/2006, de 26 de julio, de garantías y uso racional de los medicamentos y productos sanitarios, en tanto determina que «en el caso de que exista o se sospeche razonablemente la existencia de un riesgo inminente y grave para la salud, las autoridades sanitarias podrán adoptar» medidas cautelares de puesta en cuarentena; suspensión de elaboración, prescripción, dispensación y suministro o, en fin, limitación, prohibición, suspensión o sujeción a condiciones especiales de la fabricación, importación, comercialización, exportación, publicidad, puesta en servicio o utilización.

Además, tal y como constata Guardia Hernández (2023), el principio de precaución se ha incorporado a la doctrina constitucional en varios pronunciamientos y, aunque –preciso es indicarlo– no sirvió para justificar las restricciones dictadas en respuesta a la pandemia del COVID-19, declaradas inconstitucionales por sentencia de 2021²⁰, sí lo hizo para fundamentar los votos particulares a este pronunciamiento, uno de los cuales reclamaba una mayor deferencia con las medidas adoptadas por los poderes públicos ante una crisis cuya envergadura justificó la proclamación del estado de alarma a partir de hechos no abordados de forma concluyente por la comunidad científica²¹.

A tenor de lo expuesto, no debería plantear dudas la posible aplicación del principio de precaución a la seguridad industrial, en general, y a la seguridad y salud en el trabajo, en particular (Tost Pardell, 2023); ámbito en el que los nanomateriales podrían constituir señalado ejemplo, en tanto las conclusiones científicas sobre su verdadero potencial lesivo, sobre todo a largo plazo, no alcanzan todavía el grado de certeza (Pellin y Engelman, 2017). De este modo, las personas trabajadoras también se podrán beneficiar de aquella regla de orden, sobre todo por cuanto hace a la «fabricación de nuevos productos sobre los que debería conocerse toda la información disponible acerca de su eventual toxicidad a corto y largo plazo, así como en las condiciones específicas de la manipulación que comporta la fabricación» (Segura Benedicto, 2003, p. 156). Una utilidad concreta en este ámbito vendría

segundo, que «la duración de las medidas a que se refiere el apartado anterior, que se fijarán para cada caso, sin perjuicio de las prórrogas sucesivas acordadas por resoluciones motivadas, no excederá de lo que exija la situación de riesgo inminente y extraordinario que las justificó».

²⁰ La Sentencia del Tribunal Constitucional 148/2021, de 14 de julio, consideró que se había producido una suspensión (que no una limitación) de la libertad de circulación, contraviniendo así el artículo 55 de la Constitución española.

²¹ Molina Navarrete (2020, p. 148) se muestra sorprendido por el hecho de «una regla tan elemental de cautela ante un posible peligro –aunque incierto científicamente– haya sido absolutamente orillada por las principales autoridades de la práctica totalidad del mundo frente a la COVID-19», al punto de hablar de «una suerte de secundaria “pandemia de imprudencia”».

dada por la fijación de un *precautionary occupational exposure limit* en caso de exposición a productos o sustancias «eventualmente» tóxicas o cancerígenas; en la actualidad, sin embargo, no existe un límite estandarizado de exposición a nanomateriales, lo que no obsta para que algunos organismos hayan propuesto sus propios valores límite (Navarro García, 2024).

La imposición de un estándar de máxima seguridad y de minimización del riesgo por parte de la LPRL, como directriz básica en la gestión empresarial de la seguridad y salud de su plantilla, permite trasladar aquel enfoque de derecho público al ámbito privado (al menos en su espíritu y con elevadas dosis de flexibilidad) para forzar a la persona empleadora a extremar la cautela frente a factores cuyo nivel de riesgo no se conoce con exactitud, pero de los que existen sospechas científicas sobre su potencial lesividad, como acontece en el caso de múltiples nanomateriales. Y a hacerlo con un enfoque dinámico, tal y como exige el artículo 14 de la LPRL, adaptando las actuaciones al avance del conocimiento o, según especifica el artículo 15.1 e) de la LPRL, acomodando las acciones «a la evolución de la técnica».

Recuérdese, de un lado, que en el marco de la empresa la persona empleadora ostenta el rol de garante de la seguridad y salud de sus trabajadoras y trabajadores y, de otro, que todo el sistema preventivo de la empresa se edifica sobre los parámetros de la identificación y gestión del riesgo, ámbito en el que está llamado a operar el principio aquí analizado. Por ello no pueden causar sorpresa las manifestaciones doctrinales a favor de elaborar (preferentemente en el marco del diálogo social patronal-sindicatos) criterios de aplicación de dicho principio en el marco del trabajo, permitiendo «replantear la seguridad y salud globalmente» y revisar, en especial, actividades preventivas como la vigilancia periódica de la salud (Segura Benedicto, 2003, p. 156). Novedoso enfoque que en el momento actual de la ciencia puede resultar singularmente relevante para la protección de las personas trabajadoras expuestas a nanopartículas y otros nanomateriales.

3.3. Gestión de los riesgos derivados de los nanomateriales en el lugar de trabajo

En la medida en que las empresas están obligadas a integrar la prevención de riesgos laborales en su sistema general de gestión y a adoptar cuantas medidas sean precisas para proteger la seguridad y salud de las personas trabajadoras en todos los aspectos relacionados con el trabajo (ajustando su comportamiento a los principios listados en el art. 15 de la LPRL y a las obligaciones concretas dispersas a lo largo de la extensa normativa preventiva), ninguna duda cabe de que, entre las posibles amenazas que se ciernen sobre la plantilla, debe tomar en consideración también las que puedan derivar del uso de nanomateriales.

Procederá, por tanto, aplicar sin matiz lo establecido en la LPRL y en el Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención (RSP), así como, en su caso, la normativa específica de desarrollo de aquel texto legal

y que resulte operativa en función de las características del nanomaterial. Así, por ejemplo y entre otros, el Real Decreto (RD) 374/2001, de 6 abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo; el RD 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual; el RD 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo; el RD 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos, mutágenos o reprotóxicos durante el trabajo (según la nueva denominación que le otorga el art. único.1 del RD 612/2024, de 2 de julio) o, por no seguir, y si el material presentara propiedades explosivas, el RD 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

Así pues, sin perjuicio de los condicionantes y las dificultades específicas que puedan plantear los nanomateriales, en la medida en que representen un peligro para la seguridad y la salud profesional, deben incorporarse a la política empresarial en la materia. Y deben hacerlo, por aplicación del principio de precaución, considerándolos «de la más alta peligrosidad a no ser que exista información que asegure lo contrario» (Navarro García, 2024, p. 208).

El primer paso en la gestión preventiva vendrá dado por la evaluación de riesgos (art. 16 LPRL y arts. 3-7 RSP), cuya dificultad salta a la vista a tenor de la indicada falta de límites estandarizados (Navarro García, 2024). El propio Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) constata en su Nota Técnica de Prevención 877 la complejidad que tal labor presenta en relación con los nanomateriales, por lo que propone metodologías de control *banding* o simplificadas²². En cualquier caso, este análisis debe concretar la información relativa a las personas trabajadoras potencialmente expuestas, la relación de materiales manipulados (en escala nano o no nano) y en qué cantidades, la duración y frecuencia de la exposición y las condiciones singulares del centro de trabajo (INSST, 2015b).

Finalizada la evaluación del riesgo de exposición laboral a los nanomateriales, es el momento de actuar y tomar medidas, procediendo a su planificación en los términos exigidos por el artículo 16 de la LPRL y los artículos 8 y 9 del RSP. En esta etapa, las fichas de datos de seguridad de los productos químicos se convierten en una herramienta imprescindible, alzándose como activo fundamental por la información que proporcionan respecto a la peligrosidad del manejo de una sustancia o mezcla; las condiciones y protocolos de almacenamiento, manipulación y eliminación segura, etc. En este punto, toda esta información (junto a la obtenida por otras vías) servirá para diseñar (e implementar) las acciones que se han de seguir, necesariamente ajustadas a la situación concreta y a los resultados de la evaluación.

²² NTP 877 (2010). *Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas*. INSST.

Procede señalar que para la adopción de las medidas será necesario actuar conforme a los principios generales de la acción preventiva del artículo 15 de la LPRL. Como consecuencia de las pautas enunciadas en este precepto, la intervención se debe llevar a efecto priorizando aquellas actuaciones dirigidas a suprimir los factores de riesgo, a controlarlo en su origen (fuente) y a impedir su dispersión (medio), pudiendo ser necesarias, para mejorar la protección, otras medidas técnicas y organizativas (art. 17.2 LPRL). En consecuencia, se debe proceder de acuerdo con un orden jerárquico que prima la eliminación y control del riesgo a través de soluciones preventivas, relegando las de protección para aquellas hipótesis en las cuales aquel no pueda ser neutralizado por completo. Por ende, el *iter* que se debe seguir pasaría por los siguientes estadios: eliminación o sustitución del nanomaterial, modificación o confinamiento del proceso, ventilación durante dicho proceso, adopción de medidas organizativas (señalización, mantenimiento, limpieza, formación) y complemento a través de la dotación de equipos de protección personal (INSST, 2015b; Navarro García, 2024).

Según se aprecia, una de las acciones prioritarias consistirá en la sustitución de lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro, tal y como exige el artículo 15.1 f) de la LPRL. Así pues, la empresa, en su labor de gestión preventiva, y de cara a reducir la peligrosidad y la exposición a los nanomateriales en el lugar de trabajo, debe optar por aquellos cuyos efectos sobre la seguridad y salud laboral son conocidos, revelándose como inocuos o respecto de los cuales existen medios de prevención y protección contrastados. Recordando también que, de ser necesario emplear otros respecto de los cuales falta información acerca de sus potenciales riesgos (o es confusa) o sobre cómo actuar frente a los mismos, el principio de precaución ha de ser la guía para salvaguardar a las personas trabajadoras (EU-OSHA, 2013a).

La mera protección individual, por su parte, queda relegada a un rol secundario y subsidiario en relación con la prevención y la protección colectiva (art. 17.2 LPRL), lo que no obsta para reconocer que ofrece un complemento de máxima importancia, pues equipos como guantes o mascarillas pueden constituir herramientas de valor inestimable para impedir que las nanopartículas entren en contacto con la piel o sean inhaladas. Aun así, no cabe pasar por alto los problemas específicos planteados por los nanomateriales, dadas sus posibilidades de permeabilidad.

Respondiendo a esta problemática, desde el INSST se plantearon, ya en el año 2015, las siguientes actuaciones relativas al empleo de equipos de protección individual para afrontar la amenaza de estas sustancias (INSST, 2015b).

En primer lugar, cuando sea necesario utilizar ropa de protección por la incapacidad de lograr un nivel de protección adecuado mediante otras medidas, en el caso de tratarse de un nanomaterial en forma de polvo y en función del grado de exposición, puede ser aconsejable el uso de trajes desechables compatibles contra riesgos químicos de tipo 5, dotados de capucha, cubrezapatos, con sujeción en puños y cuello y sin solapas ni bolsillos.

En el caso de los equipos de protección respiratoria apropiados para nanomateriales son recomendables, de forma general, los equipos filtrantes de partículas de la clase 3, con filtros P3 incorporados en mascarilla (media máscara) o en máscara completa o mascarilla autofiltrante del tipo FFP3. Además, puede ser preceptiva la utilización de otros equipos filtrantes de partículas más específicos y, para determinados supuestos –dada una elevada concentración, de equipos aislantes.

En segundo término, para la protección ocular será aconsejable el uso de gafas de montura universal cuando se trata de prevenir el riesgo de contacto mano-ojo en caso de manipulación de sólidos. Frente a líquidos que contienen nanomateriales, será recomendable recurrir a pantallas faciales que protegen frente a salpicaduras y, cuando se trate de aerosoles, será necesario utilizar una máscara completa que proteja al mismo tiempo ojos y vías respiratorias, pudiendo sustituirse por unas gafas de montura integral sin sistemas de ventilación, acompañadas con la media máscara, comprobando que el empleo de un equipo no interfiera en el del otro.

En fin, sobre el tipo de guante más adecuado para la manipulación de nanomateriales, en espera de datos concluyentes que arrojen nuevos resultados respecto a la idoneidad frente a cada tipo de nanomaterial concreto, lo más conveniente es utilizar guantes de protección indicados contra productos químicos y microorganismos, cuya composición puede ser de elastómeros como nitrilo, neopreno, látex y butilo, considerados muy eficaces. Será preciso utilizar dos pares de guantes superpuestos cuando se opte por emplear guantes desechables, dada su escasa resistencia mecánica, debiendo sustituirse regularmente para que no se interrumpa la protección.

En todo caso, es preciso indicar, para finalizar, que no solo resultará imprescindible incluir la exposición a nanomateriales en la preceptiva evaluación de riesgos y, en su caso, en la planificación de actividades preventivas y de protección, sino también proporcionar a las personas trabajadoras expuestas la información y la formación adecuada y la pertinente vigilancia de la salud en los términos establecidos en los artículos 18, 19 y 22 de la LPRL, procediendo significar a este respecto que la mera sospecha debe ser suficiente para informar de la misma al personal expuesto, así como para controlar especialmente su estado mediante reconocimientos médicos u otras pruebas que se estimen pertinentes.

Sin olvidar –claro está– la eventual necesidad de responder a la presencia de personas especialmente sensibles a los riesgos (art. 25 LPRL, en relación con arts. 26 y 27 LPRL), a eventuales situaciones de concurrencia empresarial (art. 24 LPRL, desarrollado por RD 171/2024, de 30 de enero) o a la obligación de activar, de resultar preciso, las actuaciones singulares ante hipótesis de riesgo grave e inminente (art. 21 LPRL) o de emergencia (art. 20 LPRL), pues pueden darse circunstancias extraordinarias, como accidentes y consecuentes explosiones o incendios, capaces de multiplicar la lesividad del nanomaterial, ya que las nubes de polvo formadas por algunas nanopartículas incrementan de forma considerable su potencial inflamable (INSST, 2015b).

4. Síntesis conclusiva

El universo nanotecnológico es imparable y el uso de los nanomateriales ya está plenamente integrado en la sociedad, tanto en la vida diaria como en los lugares de trabajo. Estas nuevas tecnologías han traído consigo innumerables beneficios y oportunidades, pero también una serie de riesgos, en muchos casos desconocidos, que hacen necesaria una revisión de las actuaciones que se deben desplegar en el ámbito de la seguridad y la salud laboral.

La nanotecnología ha experimentado un desarrollo exponencial debido, principalmente, a los avances en el campo científico que han favorecido la presencia y manipulación de materiales a escala muy pequeña (nanoescala), cuyas características y comportamiento, tal y como se desprende de numerosas investigaciones, no se corresponden con el mismo material a escala macro, ofreciendo así productos de mayor calidad y nuevas utilidades.

De ahí que las propiedades de los nanomateriales representen un enorme potencial para múltiples sectores económicos y que la nanotecnología se haya situado en el origen de logros cuyos beneficios han alcanzado prácticamente a toda la industria y a casi todas las ramas de actividad productiva. Aunque si hay un ámbito especialmente favorecido por los aportes de esta innovación ese es el de las ciencias de la salud, donde gracias a ella ha sido posible el desarrollo de la nanomedicina, la evolución de los procedimientos de diagnóstico, la nanoterapia, la administración controlada de fármacos o el nacimiento de nuevos –y mejores– sistemas para la regeneración de tejidos y órganos dañados.

Ahora bien, las mismas propiedades que convierten a los nanomateriales en la alternativa óptima para el diagnóstico y tratamiento de muchas enfermedades pueden, al tiempo, representar un peligro para las personas trabajadoras. Las nanopartículas de plata (AgNPs) o de dióxido de titanio (TiO₂) constituyen un ejemplo significativo de cómo la toxicidad de una nanopartícula puede ser inversamente proporcional a su tamaño.

En cualquier caso, el empleo de nanomateriales sigue generando incertidumbre por su posible incidencia adversa sobre la salud humana a medio y largo plazo dado que, como es habitual, y pese a los esfuerzos en el mundo científico, la velocidad que caracteriza a la evolución de la nanotecnología supera con creces a la del conocimiento sobre los posibles efectos perversos para la salud y la seguridad de las personas expuestas.

Y aunque en términos generales se pueda afirmar que no todos los nanomateriales provocan efectos tóxicos, se ha demostrado que otros sí representan una amenaza para el ser humano y su entorno, por lo que las empresas, en su calidad de deudoras de seguridad, deben mostrar la máxima diligencia, asumiendo un enfoque casuístico y tomando siempre como pauta de actuación el principio de precaución.

Las dificultades que en este ámbito de marcada incertidumbre plantea la evaluación inicial de los riesgos hace necesario un mayor control de la exposición, alzándose la vigilancia de la salud en fuente de información especialmente importante, al permitir la detección precoz de posibles daños derivados del trabajo y obrar, así, como punto de partida para el refuerzo inmediato de las medidas preventivas y de protección.

Referencias bibliográficas

- Ávalos, A., Haza, A. I. y Morales, P. (2013). Nanopartículas de plata: aplicaciones y riesgos tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 7(2), 1-23. https://doi.org/10.5209/rev_RCCV.2013.v7.n2.43408
- Ávalos Fúnez, A., Haza Duaso, A. I. y Morales Gómez, P. (2016). Nanotecnología en la industria alimentaria I: Aplicaciones. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10, 1-17. https://doi.org/10.5209/rev_RCCV.2016.v10.n2.53544
- Bonaccorso, A., Ortis, A., Musumeci, T., Carbone, C., Hussain, M., Di Salvatore, V., Battiato, S., Pappalardo, F. y Pignatello, R. (2024). Administración de fármacos de la nariz al cerebro y propiedades fisicoquímicas de nanosistemas: Análisis y estudios de correlación de datos de la literatura científica. *Revista Internacional de Nanomedicina*, 19, 5619-5636. <https://doi.org/10.2147/IJN.S452316>
- Chanda, N., Kan, P., Watkinson, L. D., Shukla, R., Zambre, A., Carmack, T. L., Engelbrecht, H., Lever, J. R., Katti, K., Fent, G. M., Casteel, S. W., Smith, C. J., Miller, W. H., Jurisson, S., Boote, E., Robertson, J. D., Cutler, C., Dobrovolskaia, M., Kannan, R. y Katti, K. V. (2017). Nanopartículas de oro radiactivas en la terapia contra el cáncer. En *Nanomedicina en el cáncer: estudios de eficacia terapéutica del nanoconstructo GA-198uNP en ratones con tumores de próstata*, (pp. 753-774). Jenny Stanford Publishing.
- Cheang Wong, J. C. (2005). Ley de Moore, nanotecnología y nanociencias: síntesis y modificación de nanopartículas mediante la implantación de iones. *Revista Digital Universitaria*, 6(7), 2-10. https://www.revista.unam.mx/vol.6/num7/art65/jul_art65.pdf
- Colorado Soriano, M., Gálvez Pérez, V. y Sánchez Cabo, M. T. (2013). *Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas*. INSST.
- Cruz, B. (2011). Nanociencia: ante el umbral de una revolución tecnológica. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 3, 64-66.
- EU-OSHA (2013a). Herramientas para la gestión de nanomateriales en el lugar de trabajo y medidas de prevención. *E-fact*, 72, 1-2.
- EU-OSHA (2013b). Los nanomateriales en el sector de la asistencia sanitaria: riesgos profesionales y su prevención. *E-fact*, 73, 1-16.

- EU-OSHA (2013c). Los nanomateriales en el trabajo de mantenimiento: riesgos profesionales y su prevención. *E-fact*, 74, 1-17.
- Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Botton. *Engineering and Science*, 23(5), 22-36. <https://resolver.caltech.edu/CaltechES:23.5.1960Bottom>
- Foladori, G. (2012a). La nueva revolución tecnológica y sus impactos a la salud de los trabajadores. *Temporalis*, 12(24), 17-27. <https://periodicos.ufes.br/temporalis/article/view/4073>, <https://doi.org/10.22422/2238-1856.2012v12n24p17-27>
- Foladori, G. (2012b). Trabajadores y nanotecnología. *Observatorio del desarrollo: Investigación, reflexión y análisis*, 1(3), 21-24. <https://doi.org/10.35533/od.0103.gf>
- Foladori, G. y Invernizzi, N. (2012). *Implicaciones sociales y ambientales del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina y el Caribe*. ReLANS e IPEN.
- Galera Rodrigo, A. (2015). El impacto de la nanotecnología sobre la seguridad y la salud laboral. *ORPjournal*, 2, 31-58.
- Gómez Saldívar, G. (2011). Nanooncología: creando nanoasesinos de células cancerosas. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 3, 67-69.
- Guardia Hernández, J. J. (2023). La recepción del principio de precaución por el Tribunal Constitucional español. *Estudios de Deusto. Revista de Derecho Público*, 71(2), 91-119. <https://doi.org/10.18543/ed.2928>
- INSST (2015a). *Riesgos derivados de la exposición a nanomateriales en distintos sectores: construcción*. INSST.
- INSST (2015b). *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales*. INSST.
- Kosaka, P. M., Pini, V., Calleja, M. y Tamayo, J. (2017). Detección ultrasensible del antígeno p24 del VIH-1 mediante una plataforma híbrida nanomecánica-optoplasmónica con potencial para detectar el VIH-1 en la primera semana tras la infección. *PLoS One*, 12(2), e0171899. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171899>
- Kröttsch, E. (2015). Farmacotoxicidad en la vehiculización de principios activos en la enfermedad de Parkinson. *Investig en Discapac*, 4(2), 86-90.
- Lechuga, L. M. (2011). Nanomedicina: aplicación de la nanotecnología en la salud. 9.ª edición del curso de *Biotecnología aplicada a la salud humana* (pp. 98-112). https://digital.csic.es/bitstream/10261/44635/1/7_Nanomedicina.pdf
- Llabot, J. M., Palma, S. D. y Allemandi, D. (2008). Nanopartículas poliméricas sólidas. *Nuestra Farmacia*, 53, 40-47.
- Miñarro Yanini, M. (2024). Nuevas dimensiones jurídicas vinculadas a la transición ecológica justa: el derecho medioambiental del trabajo. *Lex Social: Revista de los Derechos Sociales*, 14(2), 1-26. <https://doi.org/10.46661/lexsocial.11034>

- Molina Navarrete, C. (2020). Principio de precaución y obligaciones preventivas en las empresas para la «nueva normalidad»: trazabilidad y blindaje digitales del riesgo de contagio, ¿misiones imposibles? Análisis del Real Decreto-Ley 21/2020, de 9 de junio, de medidas urgentes de prevención, contención y coordinación para hacer frente a la crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. *Revista de Trabajo y Seguridad Social. CEF*, 448, 145-168. <https://doi.org/10.51302/rtss.2020.1020>
- Muller, J., Huaux, F., Moreau, N., Misson, P., Heillier, J. F., Delos, M., Arras, M., Fonseca, A., Nagy, J. B. y Lison, D. (2005). Toxicidad respiratoria de nanotubos de carbono multipared. *Toxicología y farmacología aplicada*, 207(3), 221-231.
- Muñoz Ruiz, A. B. (4 de abril de 2020). Aplicación práctica del principio de precaución o cautela ante el coronavirus. *El Foro de Labos*. <https://www.elforodelabos.es/2020/04/aplicacion-practica-del-principio-de-precaucion-o-cautela-ante-el-coronavirus/>
- Navarro García, F. J. (2024). Exposición laboral a nanopartículas y medidas preventivas aplicables. *Revista Jurídica & Trabajo*, 5, 205-247. <https://doi.org/10.69592/2952-1955-N5-DICIEMBRE-2024-ART-9>
- Oropesa Nuñez, R. y Jáuregui-Haza, U. J. (2012). Las nanopartículas como portadores de fármacos: características y perspectivas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 43(3), 1-20.
- Pellin, D. y Engelmann, W. (2017). El principio legal de precaución en escenario de riesgo nanotecnológico. *Cadernos de Dereito Actual*, 6, 9-29.
- Rebollo Puig, M. e Izquierdo Carrasco, M. (2003). El principio de precaución y la defensa de los consumidores. *Documentación Administrativa*, 265/266, 185-236.
- Ríos de la Rosa, J. M. (2011). Llegando al foco del problema: dendrímeros. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 3, 70-72.
- Rodríguez Font, M. (2012). Sobre el déficit regulador y jurisdiccional en la gestión pública del riesgo. Las referencias de un futuro régimen de responsabilidad. *Revista andaluza de administración pública*, 82, 161-197. <https://doi.org/10.46735/raap.n82.939>
- Rossi, M. B. (2013). Nanociencia y Nanotecnología en el Siglo XXI. *Revista Digital de Ciencias, Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y de Salud* (Universidad de Belgrano), 12(6), 1-7.
- Savolainen, K. (2013). *Nanosafety in Europe 2015-2025: Towards safe and sustainable nanomaterials and nanotechnology innovations*. Finnish Institute of Occupational Health.
- Segura Benedicto, A. (2003). El conocimiento científico y el principio de precaución en salud laboral. *Archivos de Prevención de Riesgos Laborales*, 6(4), 155-157.
- Tanarro Gozalo, C. y Gálvez Pérez, V. (2009). Nanopartículas: ¿un riesgo pequeño? *Seguridad y salud en el trabajo*, 52, 34-44.
- Tost Pardell, S. (2023). Aplicación del principio de precaución en el ámbito de la seguridad industrial. *Revista Administración & Ciudadanía*, 18(1), 223-245. <https://doi.org/10.36402/ac.v18i1.5049>

- Tutor Sánchez, J. D. (2016). Divulgación y formación en nanotecnología: un puente hacia la bioética. *Escritos*, 24(53), 483-506. <https://doi.org/10.18566/escr.v24n53.a12>
- Vance, M. E. Kuiken, T., Vejerano, E. P., McGinnis, S. P., Hochella Jr., M. F., Rejeski, D. y Hull, M. S. (2015). Nanotecnología en el mundo real: rediseño del inventario de productos de consumo de nanomateriales. *Revista Beilstein de nanotecnología*, 6(1), 1769-1780. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.181>
- Veiga Álvarez, Á., Sánchez de Alcázar, D., Martínez Negro, M., Barbu, A., González Díaz, J. B. y Maquea Blasco, J. (2015). Riesgos para la salud y recomendaciones en el manejo de nanopartículas en entornos laborales. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 61(239), 143-161. <https://doi.org/10.4321/S0465-546X2015000200002>
- Yang, Q. C., Wang, Y. Y., Wang, S, Song, A., Wang, W. D., Zhang, L. y Sun, Z. J. (2025). Estructura orgánica covalente biomimética de membrana bacteriana diseñada como nanoimmunopotenciador para la inmunoterapia contra el cáncer. *Materiales bioactivos*, 47, 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.01.018>
- Zaforas, M., Benayas, E., Madroñero Mariscal, R., Domínguez Bajo, A., Fernández López, E., Hernández Martín, Y., González Mayorga, A. y Alonso Calviño, E., Hernández, E. R., López Dolado, E., Rosa, J. M., Aguilar, J. y Serrano, M. C. (2025). Los andamios de óxido de grafeno promueven mejoras funcionales mediadas por axones que invaden el andamio en ratas transecadas torácicas. *Materiales bioactivos*, 47, 32-50. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.12.031>

Rosa María Rodríguez Casáis. Doctoranda del programa de Doctorado en Derecho: Protección Jurídica y Cohesión Social. Universidad de León (España). Autora de: «Incapacidades laborales y nuevas tecnologías» (2017). En *Las incapacidades laborales y la Seguridad Social en una sociedad en transformación: I Congreso Internacional y XIV Congreso Nacional de la Asociación Española de Salud y Seguridad Social* (pp. 783-790). Laborum. <https://orcid.org/0009-0001-7596-0634>