

BUSCANDO LA SOSTENIBILIDAD: EL ENCAJE DE LA NANOTECNOLOGÍA

Pedro A. Serena Domingo

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

RESUMEN

La nanotecnología se ha ido convirtiendo a lo largo de las últimas décadas en una de las disciplinas protagonistas del actual desarrollo científico-tecnológico que crece de una manera exponencial y compleja, mediante la continua hibridación y solapamiento de conocimientos procedentes de diversos campos. Junto con otras disciplinas del conocimiento (biotecnología, informática, economía, sociología, etc.) forma parte de las herramientas de las que disponemos los seres humanos para enfrentarnos a los mayores problemas a los que quizás nos vamos a enfrentar como especie: el cambio climático, el deterioro del planeta y las grandes desigualdades sociales, problemas que hemos creado nosotros mismos por una inadecuada forma del crecimiento socioeconómico. En estos momentos la estrategia consensuada para abordar este reto está definida por la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), y basa su planificación en el cumplimiento de los denominados Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). En este trabajo se revisa el impacto que va a tener el conocimiento que aporta la nanotecnología sobre los ODS, poniéndose de manifiesto que no solo basta con tener las herramientas científico-tecnológicas sino que deben implementarse los adecuados sistemas de gobernanza para potenciar la transferencia y la utilización del conocimiento a la vez que se minimizan sus riesgos inherentes.

1. INTRODUCCIÓN

Tras la convulsión generada por la pandemia de Covid-19, que sigue asolando una buena parte del planeta aunque el rápido desarrollo las vacunas ha proporcionado una esperanza para superar este problema global, parece que podremos volver paulatinamente a la normalidad pre-pandémica que, por cierto, no era nada halagüeña, pues desde hacía mucho tiempo se tenían identificados otros muchos problemas, que a medio y largo plazo, podrían tener devastadoras consecuencias de no ser abordados con rapidez, decisión y contundencia.

Me estoy refiriendo a asuntos como las crecientes emisiones a la atmósfera de CO₂ y otros gases contaminantes que favorecen el efecto invernadero, el aumento global y heterogéneo de temperaturas, el consecuente cambio climático que comienza a ser percibido, el aumento de la frecuencia con la que se producen fenómenos meteorológicos extremos, la desertización de vastas regiones del planeta, el deshielo de glaciares, de la cubierta helada del Océano Ártico o de los estratos de permafrost, la proliferación de gigantescos incendios, la deforestación de regiones boscosas consideradas pulmones de nuestro planeta, la pérdida generalizada de biodiversidad, el aumento de las enfermedades de tipo zoonótico (como la propia Covid-19), el aumento de la contaminación atmosférica en zonas urbanas, el deterioro de las aguas marinas y continentales, el crecimiento desmesurado de las zonas urbanas y de infraestructuras de toda índole, la acumulación de residuos de todo tipo, la incorporación del plástico y de otras sustancias nocivas

a la cadena alimentaria, o las necesidades crecientes de acceso a agua, alimento, sanidad, vivienda, educación, transporte y servicios de todo tipo por parte de la mayor parte de la población mundial deseosa de mejorar su bienestar, siguiendo el camino bien visible que ha sido marcado hasta ahora por los países más desarrollados.

Ninguno de estos problemas es una novedad que nos pille de sorpresa pues en estas últimas décadas se han ido sucediendo los informes emitidos por diferentes entidades de los que se han hecho eco los medios de comunicación y han dado lugar a cierta respuesta social representada por diversos movimientos activistas medioambientales, a la vez que desde las instancias de poder se han mirado de reojo sin ser tenidos en cuenta para el diseño de políticas públicas contundentes. Solo hace falta echar un vistazo a la secuencia de informes de la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), o del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), y en particular los informes más recientes (Díaz 2019, Miletto 2020, Masson-Delmotte 2021), para constatar el rápido deterioro del planeta y una creciente preocupación tanto de la comunidad científica como de los gestores de las organizaciones internacionales por dicho deterioro y sus consecuencias.

Todo parece indicar que en esta senda seguida colectivamente estamos a punto de superar un punto de no retorno (Aengenheyster 2018) siendo bastante dramático el escenario en el que tendremos que vivir una vez que demos los pasos que restan para sobrepasar dicha frontera. Tampoco es una novedad constatar la angustiosa lentitud en la respuesta que de forma colectiva se está dando para hacer frente a estos problemas. Cuando escribo este artículo se está celebrando en Glasgow (Reino Unido) la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP26, que tiene como fin llegar a acuerdos que permitan limitar el calentamiento global a 1,5°C y en la que seguramente se seguirá una liturgia similar a las anteriores: declaraciones, despliegue de medios, manifestaciones de grupos activistas, para llegar a unos consensos mínimos que suponen la aplicación de otro pequeño parche para resolver un serio problema.

Y, finalmente, tampoco es nuevo el aumento del escepticismo de la comunidad científica que reclama una mayor contundencia en los actos, para que se vaya más allá de las declaraciones, como prueban los recientes artículos firmados por varios miles de investigadores de todo el mundo advirtiendo que nos encontramos ante una emergencia climática de consecuencias impredecibles (Ripple 2020, 2021).

Muchos de los problemas señalados anteriormente están fuertemente interconectados y resulta incontestable que tienen como origen la actividad del ser humano, que ha pasado de suponer una pequeña perturbación asimilable a convertirse en un factor desestabilizante del equilibrio del planeta. El impacto de la actividad del ser humano sobre la Tierra en los últimos siglos puede compararse al de las fuerzas geológicas que han configurado su superficie durante miles de millones de años, y no son pocos los expertos que identifican dicho impacto con el inicio de una nueva era geológica, el Antropoceno (Rull 2018) que va convirtiendo lo que antes era la biosfera en una “tecnosfera” repleta de mega-conurbaciones, infraestructuras de transportes y comunicaciones, extensas explotaciones agroalimentarias mecanizadas, regiones dedicadas a la producción minera o energética, y extensas zonas (controladas o no) destinadas a la acumulación de todo tipo de desechos.

Aunque parezca increíble se ha determinado que esta tecnosfera tiene una masa de 30 billones de toneladas (Zalasiewicz 2017). Se espera que esta cantidad crezca a medida que lo haga la población humana, que puede alcanzar la cifra de 9.000 a 11.000 millones de personas a finales del siglo XXI, según diversas estimaciones que tienen en cuenta diferentes escenarios (Adam 2021). Como curiosidad se puede mencionar que por cada ser humano que actualmente habita la Tierra hay casi 3800 toneladas de

“tecnosfera”, acumuladas por la acción de los miembros de nuestra especie tanto a lo largo de miles de años.

2. CUESTIONAMIENTO DEL MODELO DE PROGRESO

Autores como J. Norberg (Norberg 2017), H. Rosling (Rosling 2018) o S. Pinker (Pinker 2018) defienden que, en su conjunto, la humanidad vive mejor ahora que en épocas pasadas gracias a un modelo económico basado en el capitalismo y la economía de libre mercado en conjunción con el uso de un creciente conocimiento tecno-científico (Bornmann 2015). Entre los logros de este progreso como especie estarían su continua expansión territorial, su crecimiento demográfico (a pesar de guerras, genocidios, pandemias y algunas calamidades de origen geológico), el aumento de la esperanza de vida y una considerable disminución de la mortalidad infantil, del analfabetismo, y de la pobreza extrema. Sin embargo, la mejora de ciertos indicadores promedio, sin duda importantes, no evita que otros, como los índices que miden la desigualdad social entre países o en el seno de estos, no sean tan positivos, sino más bien todo lo contrario.

Dentro de nuestra especie, y a pesar de que se ha dotado de valiosos elementos inspiradores como la Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948¹ o las diversas cartas magnas y constituciones de los países, se siguen dando asombrosas diferencias en el acceso a la alimentación, la vivienda, la educación, la sanidad, la información, etc. En estos momentos, por ejemplo, se dan diferencias de casi tres órdenes de magnitud entre las rentas per cápita de los habitantes de los países más ricos con relación a los de los más pobres, y el 1% de la población del planeta acumula la misma riqueza que el 99% restante (Berkhout 2021, Davies 2021). Estas desigualdades limitan las oportunidades para el desarrollo socioeconómico de las personas y los países, generando tensiones que favorecen los conflictos sociales, la implantación de regímenes autoritarios nada respetuosos con los derechos humanos, el incremento de grandes movimientos migratorios, y en algunos casos los enfrentamientos bélicos.

A la anterior realidad un tanto antropocéntrica, que describe lo que ha acontecido a nuestra especie sin reparar en los otros cohabitantes de nuestro único hogar, se deben sumar los efectos descritos anteriormente (aumento de temperaturas, cambio climático, pérdida de biodiversidad, etc.) que afectan a todo el planeta y sus inquilinos, incluidos nosotros mismos. Lo que hemos dado en llamar progreso de nuestra especie tendría una valoración muy diferente por el resto de seres vivos si pudiesen expresarlo (aunque su lenta extinción es quizá es la dramática forma que tiene de hacerlo). En la ecuación del progreso humano el balance neto parecía positivo porque no se tenía en cuenta sus efectos sobre el planeta, aproximación que podría parecer razonable tiempo atrás cuando nuestro efecto suponía una perturbación del resultado, pero esa perturbación comenzó a ser no despreciable con la llegada de la Revolución Industrial y se ha acentuado a medida que éramos más y necesitábamos más recursos para nuestra supervivencia y desarrollo.

La preocupación por estos temas no es nueva pues a lo largo de los últimos siglos han ido surgiendo filósofos y economistas que han llamado la atención sobre el impacto del crecimiento de la población y la sobreexplotación de recursos (Du Pisani 2006), sin demasiado éxito al parecer, ya que el modelo económico de crecimiento continuó funcionando sobre las mismas premisas. La irrupción de modelos alternativos como los basados en sistemas inspirados en las ideas del comunismo no alteró el creciente impacto negativo sobre el medioambiente de los países que adoptaron dichos modelos (sin olvidar que en muchos casos la posible reducción de la desigualdad social se hizo a costa de tensionar otros derechos fundamentales).

¹ <https://www.un.org/es/about-us/universal-declaration-of-human-rights>

Se puede decir que tras la Segunda Guerra Mundial, aumenta paulatinamente la preocupación por el impacto del desarrollo humano sobre el planeta, debido a la conjugación de diversos factores como fueron el desaforado desarrollo industrial debido a la competencia entre los bloques políticos que surgieron tras el conflicto bélico, la preocupación de la opinión pública por graves accidentes causados por industrias químicas o nucleares, el surgimiento de los movimientos ecologistas, etc. En 1972, el Club de Roma, elaboró el controvertido informe “Los límites del crecimiento” (Meadows 1972), donde manifestaba la preocupación por la sostenibilidad del planeta y proponía desarrollar un modelo de crecimiento nulo con el que lograr una situación estacionaria que evitase el colapso económico y social. Más adelante, el informe “Nuestro Futuro Común” (más conocido como “Informe Brundtland”) desarrollado para la Organización de las Naciones Unidas (ONU) presentó una alternativa al crecimiento nulo (Brundtland 1987) proponiendo un modelo de crecimiento socioeconómico no nulo pero capaz de “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones que nos sucedan”, frase con características de eslogan que resume la filosofía del denominado modelo del “desarrollo sostenible”.

En 1992 se llevó a cabo la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro, en la que se proclamó la “Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo”, que perfiló algo mejor el concepto de desarrollo sostenible. Este modelo plantea varias premisas para reconducir las actividades económicas hacia la sostenibilidad: (i) la conservación de los ecosistemas de nuestro planeta; (ii) el desarrollo adecuado que evite el deterioro de estos ecosistemas; (iii) la reducción del consumo excesivo de productos que no están al alcance de todos los individuos; (iv) la consecución del crecimiento económico de los países pobres; (v) el establecimiento de un control demográfico, referido principalmente a las tasas de natalidad; (vi) la utilización eficiente de los recursos no renovables; (vii) la consecución de un escenario mundial de paz, igualdad, y respeto hacia los derechos humanos; y (viii) la expansión y mejora de la democracia.

Se debe destacar que el modelo del desarrollo sostenible no posee una estructura dogmática y se ha retroalimentado de otras propuestas que han surgido en las tres últimas décadas como la economía “circular” (Pearce 1990) o la economía “azul” (Pauli 2010). Tampoco debe olvidarse que diferentes confesiones religiosas con gran influencia han incorporado a sus líneas de pensamiento una profunda preocupación por los temas medioambientales y socioeconómicos (Papa Francisco 2015, Dalai Lama 2020). Muchas ideas que se incluyen en el desarrollo sostenible han impregnado planteamientos como los que se encuentran en el “capitalismo humanista” (Olcese 2009) o el “capitalismo ético” (Collier 2019). Por otro lado, el desarrollo sostenible ha sido criticado desde posturas más extremas, unas de carácter “negacionista” que parten de sostener que el cambio climático no existe, y otras que propugnan cambios más radicales del modelo de economía globalizada, como se postula en el modelo del decrecimiento económico (Latouche 2009).

Para llevar a la práctica, de manera consensuada, el modelo del desarrollo sostenible en la década de los 1990 se fraguó una estrategia que dio lugar a la aprobación de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) por la ONU en el año 2000 como el instrumento con el que defender los principios de dignidad humana, igualdad y equidad, y orientado hacia la erradicación de la pobreza extrema en el mundo antes del 2015. Alcanzada esa fecha se constató que, si bien se habían dado pasos en la dirección correcta, estos fueron insuficientes y los resultados no eran los esperados, por lo que desde la Organización de las Naciones Unidas se impulsó un nuevo plan que involucrase más países y agentes sociales (Sachs 2012). Como resultado, en la Cumbre de París de 2015 se aprobó la resolución “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (ONU 2015), en la que se recogen 17 ambiciosos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reflejados en la Tabla 1, que deben alcanzarse a lo largo del periodo 2016-2030, ampliando los ODM y enfatizando la lucha contra el cambio climático.

Los ODS se alcanzarán a través del cumplimiento de una serie de 169 tareas que cada país debe acometer con sus propias estrategias y la cooperación internacional. El seguimiento de la implementación de la Agenda 2030 a diferentes niveles (global, regional, país, ciudad) se realiza mediante un complejo sistema de 231 indicadores que permite evaluar las estrategias de cada entidad involucrada, desde una nación a un municipio. Sin duda alguna, se trata de un ambicioso conjunto de objetivos, tareas e indicadores cuyo cumplimiento y seguimiento requiere la acción coordinada de gobiernos, organizaciones, empresas, y que concierne también a los habitantes del planeta en la medida de sus posibilidades. Numerosos organismos públicos y entidades privadas colaboran para la consecución de los ODS gracias a la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (SDSN) creada en 2012, que cuenta en España con un nodo, la Red Española de Desarrollo Sostenible (REDS)².

Aunque la Agenda 2030 parece un sólido instrumento, su implementación está sometida a vaivenes políticos como ha ocurrido con el abandono y la re-adopción de los acuerdos de París por parte de EE.UU., una nación clave para conseguir los ODS a nivel global, o por los aún incuantificables efectos debidos a la pandemia de Covid-19. Lo cierto es que alcanzar los ODS requiere llevar a cabo una serie de cambios y transformaciones en un tiempo relativamente breve que van a requerir un gran esfuerzo de inversión y de coordinación a todos los niveles (Kriegler 2018). Por otro lado, parece que no existe un plan alternativo que en estos momentos tenga el suficiente consenso. No hay “plan B”.

La gran mayoría de las propuestas recogidas en la Agenda 2030 han sido bien recibidas por la sociedad, cada vez más sensibilizada y afectada por las cuestiones medioambientales y por diversos problemas socioeconómicos, lo que ha favorecido la incorporación, al menos formalmente, de los ODS en la planificación estratégica de gobiernos, instituciones, empresas, y organizaciones no gubernamentales. Es raro encontrarse a una entidad, pública o privada, que no publicite su adhesión a los ODS mediante estrategias de todo tipo, aunque se está lejos de valorar qué grado real de compromiso, cumplimiento y de eficacia tienen las mismas, por lo que es posible que estos movimientos solo sean meras operaciones de marketing y de lavado de imagen en algunos casos.

Tabla 1. Descripción de los ODS

ODS	Descripción
1	Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo
2	Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible
3	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades
4	Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos
5	Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas
6	Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos
7	Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos
8	Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos
9	Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación
10	Reducir la desigualdad en y entre los países
11	Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles
12	Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
13	Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
14	Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible
15	Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de forma sostenible, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica

² Red Española para el Desarrollo Sostenible (REDS): <https://reds-sdsn.es/>

16	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles
17	Fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible

3. LA CONSOLIDACION DE LA NANOTECNOLOGÍA

Los nombres de los ODS, e incluso la descripción de las 169 tareas que contienen, no hacen excesivas referencias explícitas a la ciencia y la tecnología, aunque ambas son herramientas fundamentales para facilitar su consecución (Vessuri 2016, Messerli 2019). Dentro de estas herramientas, la nanociencia y la nanotecnología (Roco 2005, Serena 2010, 2013, Diallo 2013), van a ser disciplinas emergentes imprescindibles para lograr alcanzar los ODS junto con otras fuentes de conocimiento científico-tecnológico.

La nanotecnología, en su definición amplia, contiene a la nanociencia y se puede definir como el conjunto de conocimientos y metodologías, procedentes de diferentes ramas científicas, con las que los seres humanos han aprendido a entender y dominar la materia a escala atómica y molecular, diseñando y construyendo diferentes tipos de nanoobjetos, nanoestructuras y nanomateriales, que se caracterizan por poseer propiedades diferentes a sus homólogos de tamaño micro o macroscópico, a causa de los denominados efectos de tamaño clásicos o cuánticos. Por lo general se considera que aquellos objetos con alguna de sus dimensiones por debajo de los 100 nm son objeto del estudio de la nanotecnología. Por cierto, un nanómetro equivale a la milmillonésima parte de un metro. La versatilidad de estos conocimientos, acumulados en los últimos 50 años, y su origen multidisciplinar hacen que desde finales del siglo pasado este dominio de la materia a escala nanométrica (nanoescala) se considerase estratégico por su potencial de aplicación transversal a diferentes sectores. Es precisamente esta capacidad de aplicación multisectorial la que ha seguido manteniendo el impulso de las investigaciones en este campo gracias a fuertes inversiones primero de origen público a las que se han sumado las de las grandes corporaciones empresariales. El mayor exponente del empuje público es la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI³) de los EE.UU., aún vigente tras 20 años, y que fue imitada por los países más desarrollados con el fin de no perder el tren de la competitividad.

Quizás resulte sorprendente saber que la nanotecnología ya tiene una larga tradición, pues siempre se la vincula con los campos emergentes del conocimientos, pero ha sufrido un largo recorrido en el que se han ido sucediendo avances significativos tanto en la instrumentación necesaria para la caracterización y la fabricación o síntesis en la nanoescala como en el descubrimiento de nanoobjetos y nanomateriales que ha habido que conocer con profundidad. A modo de ejemplo de esta larga tradición basta mencionar que este año, 2021, se celebra el 40º aniversario de la invención del Microscopio de Efecto Túnel (STM en inglés), instrumento que permitió la observación y manipulación de átomos y moléculas, y que facilitó el diseño de otras herramientas capaces de caracterizar los fascinantes parajes de la nanoescala a partir de una nueva forma de estudiar la materia mediante el uso de sondas locales. Dicha invención crucial para el desarrollo de la nanotecnología se debe a H. Rohrer y G. Binnig, quienes recibieron en 1986 el Premio Nobel de Física.

Tras una fase embrionaria, dominada por la nanociencia, la rama aplicada de este conocimiento fue cobrando fuerza y desde hace 20 años se ha venido observando la consolidación de la nanotecnología en diferentes campos de aplicación, con diferentes ritmos e impactos en función de diversos factores. La mejor forma de analizar esta evolución es a través de las publicaciones (generalmente asociadas a la investigación de centros académicos) y de las patentes (donde cobran más peso los centros de perfil

³ National Nanotechnology Initiative (NNI): <https://www.nano.gov/>

tecnológico y las entidades empresariales). En la Figura 1 se muestra la evolución 2001 y 2021 del número de artículos publicados en revistas internacionales, de patentes registradas en la Oficina de Patentes de EE.UU. (USPTO⁴) y de patentes registradas en la Oficina Europea de Patentes (EPO⁵).

Los datos han sido extraídos del repositorio de información Statnano⁶. La cantidad de artículos que cada año se publican en nanotecnología ya supera los 200.000, mientras que el número de patentes en la USPTO se acerca a las 10.000 patente año. Si se calcula el “conocimiento acumulado” durante estas dos décadas estaremos hablando de más de 2 millones de artículos y de más de 100.000 patentes. Se debe mencionar que el ritmo de crecimiento anual de publicaciones fue de un 18% en la década 2001-2010, y que en la década siguiente este ritmo descendió al 10%. Algo similar ha ocurrido con el número de patentes registradas en la USPTO cuya tasa anual de crecimiento medio ha pasado del 16% al 9% de la primera a la segunda década del siglo XXI. Estos datos pueden indicar el inicio de saturación en el crecimiento de la creación de conocimiento, pero por el momento se puede decir que la generación de conocimiento sigue siendo vigorosa en el campo de la nanotecnología.

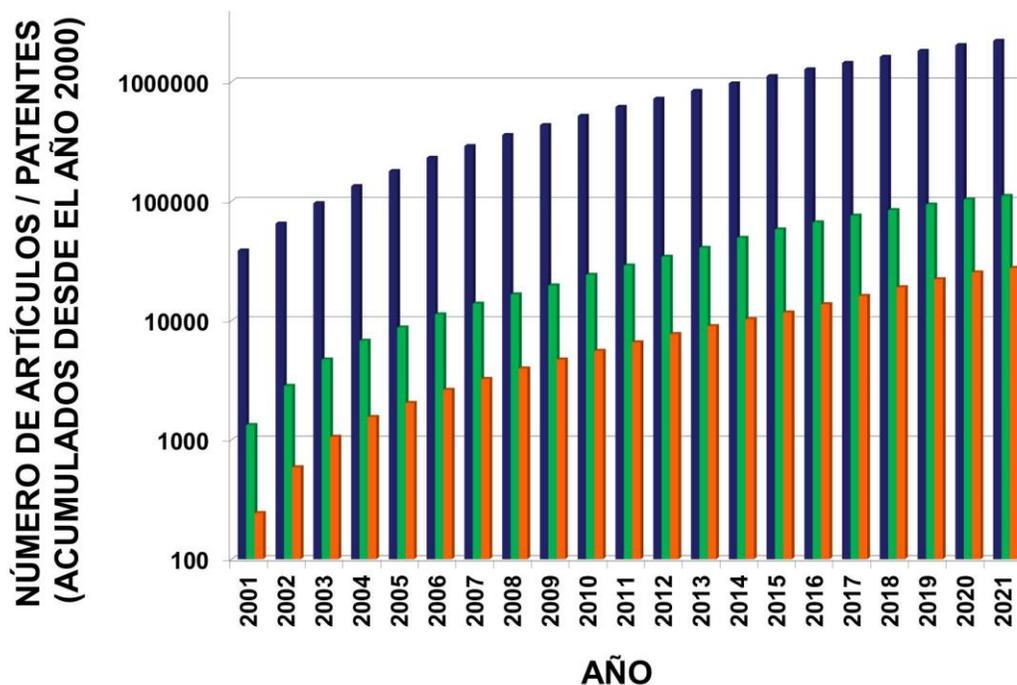


Figura 1. Evolución anual entre 2001 y 2021 del número acumulado desde 2000 de artículos publicados en revistas internacionales (barras azules), patentes registradas en la Oficina de Patentes de EE.UU. (USPTO) (barras verdes), y patentes registradas en la Oficina Europea de Patentes (EPO) (barras naranjas). Los datos de 2021 reflejan la cantidad acumulada hasta septiembre de dicho año. Elaboración propia a partir de los datos de Statnano (<https://statnano.com/>).

Queda claro que hablar de nanotecnología es muy difícil por su amplitud, por la confluencia de campos diversos en sus orígenes y por el solapamiento con otras disciplinas emergentes como la biotecnología o la electrónica. Estos números impresionantes, sin entrar a valorar la calidad e impacto de

⁴ United States Patents and Trademark Office (USPTO): <https://www.uspto.gov/>

⁵ European Patent Office (EPO): <https://www.epo.org/>

⁶ Statnano: <https://statnano.com/>

todos estos trabajos, reflejan que la etapa de conocimiento emergente está dando paso a otra de consolidación. Sin embargo no debemos olvidar que el término nanotecnología es una promesa, en sí mismo, de unas aplicaciones que son esperadas por los consumidores y usuarios tras años de publicitar las espectaculares ventajas de los nanonobjetos y nanomateriales.

Al igual que sucede en otros campos, la protección del conocimiento en formato de patentes no implica su inminente traslación al mercado, por lo que existe un retardo en la aparición de productos. En la Tabla 2 se muestra la situación del “nanomercado” reflejada por el número de productos con contenido nanotecnológico que se comercializa a nivel mundial según el repositorio de información sobre productos Nanotechnology Products Database⁷.

Como se puede ver el número total de productos es 9411, siendo la electrónica, la medicina, la construcción, la cosmética, la fabricación textil, y la automoción, en ese orden, los sectores que se están beneficiando del mayor impacto por la llegada de la nanotecnología. Esta lista está creciendo al ritmo de 800-900 productos por año, pero es probable que este ritmo se acelere en el futuro debido al creciente arsenal de conocimiento (reflejado en artículos y patentes) que se convertirán en bienes de consumo.

Sector	Número de productos	Sector	Número de productos
Electrónica	1918	Alimentación	362
Medicina	1140	Aparatos domésticos	339
Construcción	931	Energías renovables	326
Cosmética	903	Petróleo	297
Textil	821	Agricultura	229
Automoción	695	Impresión	163
Otros	567	Material deportivo	159
Medioambiente	561	Total	9411

Tabla 2. Número de productos comerciales que a fecha de 1 de noviembre de 2021 se podían encontrar en el repositorio de productos Nanotechnology Products Database (<https://product.statnano.com/>).

4. LA NANOTECNOLOGÍA COMO HERRAMIENTA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

En la anterior sección se ha hecho evidente que la nanotecnología es una de las bazas del conocimiento humano contemporáneo que tiene un gran potencial de aplicación en innumerables sectores productivos y que puede jugar un papel relevante para encontrar soluciones que remedien o mitiguen muchos de los problemas que deben resolverse para conseguir los ODS (Roco 2005, Diallo 2013, Serena 2021a,b). En primer lugar se debe recordar que la nanotecnología representa una aproximación minimalista de la fabricación, en búsqueda del ideal de la construcción átomo a átomo, por lo que conlleva de forma inherente la optimización del uso de recursos energéticos y de materias primas, a la vez que se aspira a la minimización de generación de residuos en las diversas etapas de fabricación.

Además el carácter multidisciplinar del conocimiento nanotecnológico permite que la nanotecnología pueda presentar amplias fronteras con otras, como la biotecnología, las tecnologías de la información y las comunicaciones, o las neurociencias, favoreciendo el trasvase de conocimientos de todo tipo y la denominada convergencia tecnológica NBIC (Echeverría 2008). Esta convergencia sin duda tendrá su protagonismo en la llegada de la Cuarta Revolución Industrial (Schwab 2016). Pensemos que cuando se habla de inteligencia artificial (IA) o internet de las cosas (IoT) en la base de todos sus desarrollos se encuentran los procesadores, los elementos de almacenamiento de datos, los sensores y los

⁷ Nanotechnology Products Database: <https://product.statnano.com/>

sistemas de datos que están fabricados a partir de transistores, chips, transductores, láseres, etc. en los que el conocimiento nanotecnológico es una pieza clave.

Por otro lado, tal y como demuestra la Tabla 2, la incorporación de nanomateriales y nanodispositivos en productos y servicios podrán impulsar estrategias más sostenibles en diversos sectores. Un análisis pormenorizado de todas las tareas que configuran cada uno de los ODS, así como de los productos existentes en el mercado de la nanotecnología junto con un análisis de las diferentes líneas de investigación que ahora se dan en el ámbito de la nanociencia, permite determinar aquellos ODS para los que los desarrollos derivados de la nanotecnología tienen o van a tener mayor importancia. En este trabajo se ha hecho una extensa revisión de los artículos de revisión más recientes sobre el impacto de la nanotecnología en cada sector de aplicación. Las temáticas analizadas y las fuentes usadas han sido: tratamiento, descontaminación y depuración del agua (Gehrke 2015, Santhosh 2016, Álvarez 2018, Teow 2019, Yaquooob 2020), remediación medioambiental (Khin 2012, Kumar 2021), conversión y almacenamiento de energía obtenida a partir de fuentes renovables (Zhang 2013, Hussein 2015, Ahmadi 2019, Pomerantseva 2019), sector biomédico, farmacéutico y cosmético (Shi 2017, Chandarana 2018, Wang 2018, Farjadian 2019, Salvine 2019, Hepel 2020, Fytianos 2020, Abdel-Mageed 2021), el ámbito de la agroalimentación (Villena de Francisco 2018, Alfei 2020, Kisskisseva 2020, Nile 2020, Sahani 2021), el sector de la arquitectura y la construcción (Sánchez 2010, Khitab 2014, Du 2019), la industria textil (Rivero 2015, Jayathilaka 2019, Saleem 2020) y la industrias relacionadas con la información y las comunicaciones (Lim 2006, Bathia 2013, Koenderink 2015, Savelev 2015, Lay-Ekiakille 2021). En la Figura 2 quedan reflejadas aquellas temáticas en las que se han encontrado vinculaciones directas con los ODS dentro de las referencias analizadas.

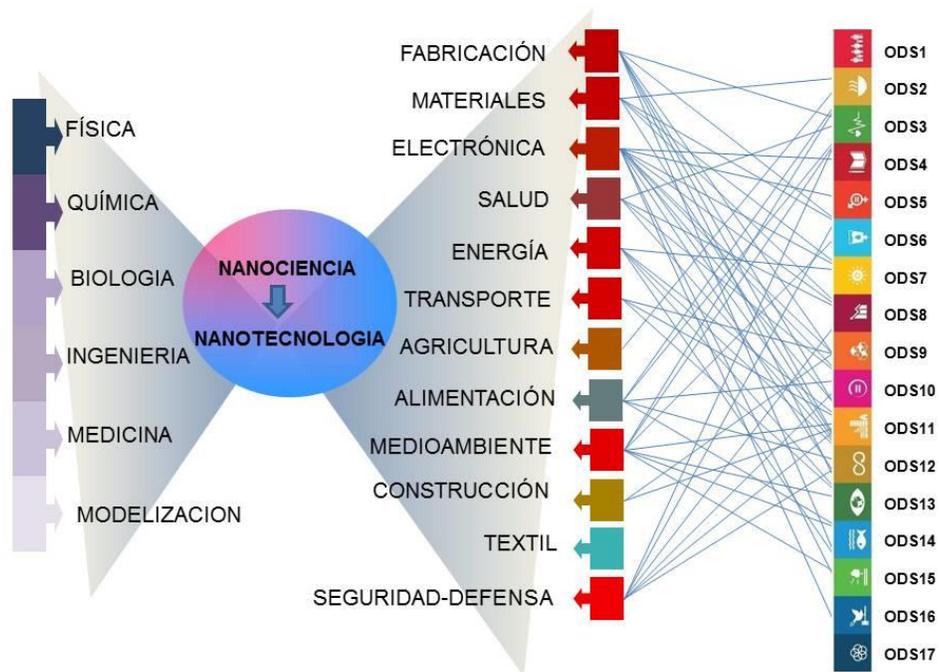
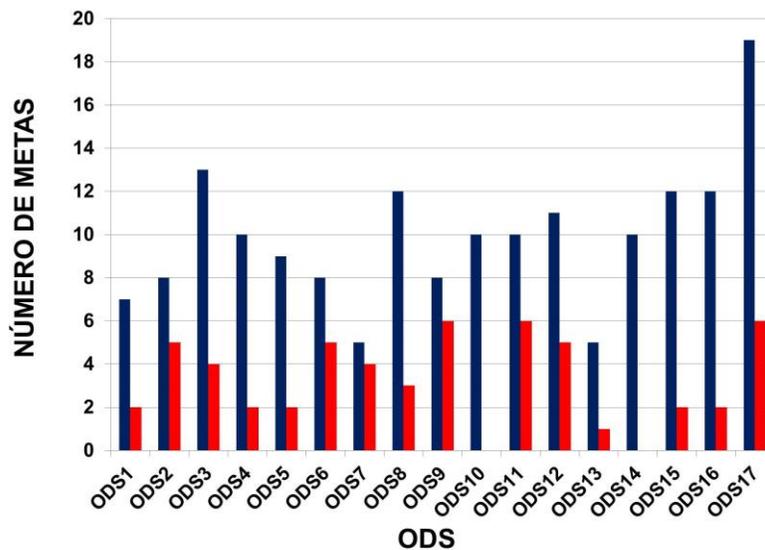


Figura 2. Esquema que muestra la generación de conocimiento en el ámbito de la nanociencia, su transformación en nanotecnología que tiene aplicación en diversos sectores productivos que están conectados con los ODS. Elaboración propia.

Es cierto que la nanotecnología impacta en cada tarea de una manera diferente, lo que requeriría un mayor análisis cuantitativo (Serena 2021b), pero la anterior figura sirve para realizar una estimación del

impulso que cada ODS puede recibir gracias a la irrupción de materiales, dispositivos y servicios propiciados por la nanotecnología. Los ODS que más se van a beneficiar de este impacto nanotecnológico directo son los ODS 7, 9, 2, 3, 6, 11 y 12, por orden de intensidad tecnológica de dicho impacto. En cualquier caso, dado que los propios ODS están interrelacionados y dado que la nanotecnología tiene un carácter transversal, la evaluación real del impacto tecnológico no es una tarea fácil. Por ejemplo, una línea consistente en el desarrollo de nuevos cementos ligeros de alta resistencia que requieran menor aporte de agua y menor consumo energético mediante la incorporación de nanomateriales y materiales reciclados, además del evidente impacto en el ODS9 (infraestructuras resilientes), favorecerán el ahorro de recursos como el agua (ODS6) y la energía (ODS7), el aprovechamiento de residuos (ODS12), la mejora de los asentamientos humanos (ODS11), el abaratamiento, durabilidad y habitabilidad de infraestructuras básicas como hospitales (ODS3) o colegios (ODS4).

El anterior ejemplo ilustra lo difícil que es valorar de forma precisa el impacto de un desarrollo de la nanotecnología sobre cada ODS específico, por lo que el esquema mostrado en la Figura 2 debe interpretarse con cautela. Además, si para cada una de las metas de un ODS además del posible impacto tecnológico (directo) se tiene en cuenta el impacto indirecto, el número total de metas que pueden resultar afectadas por los desarrollos de la nanotecnología alcanza la cifra de 55 (sobre un total de 169 metas). La Figura 3 muestra para cada ODS el número total de metas que lo conforman junto con el número de estas que pueden tener impacto por la irrupción de la nanotecnología.



*Figura 3. Número total de metas por cada uno de los ODS (columnas azules) y número de metas que pueden recibir impacto tecnológico directo o indirecto de la nanotecnología (columnas rojas).
Elaboración propia.*

Por tanto, el alcance de los prometedores desarrollos que vienen de la mano de la nanotecnología para alcanzar el paradigma del desarrollo sostenible ya comenzó a vislumbrarse hace una década durante la implantación de los Objetivos del Milenio (ODM) (Salamanca-Buentello 2005, Diallo 2013), pero en aquel momento el mercado real de la nanotecnología estaba poco desarrollado por lo que el impacto real de sus aportaciones a los ODM fue muy limitado.

5. LA GOBERNANZA DE LA NANOTECNOLOGÍA EN EL MARCO DE LOS ODS

Se ha visto como la nanotecnología tiene capacidad, debido a su condición de herramienta transversal, para penetrar invisiblemente en productos y servicios, algunos de los cuales pueden facilitar el camino que queda por recorrer para completar los ODS. Sin embargo, esta penetración no está exenta de la aparición de impedimentos e imprevistos que producen efectos no deseados y provocan rechazo en ciertos sectores sociales que muchas veces están condicionados por experiencias negativas previas surgidas como consecuencia de la implantación de algunas tecnologías. Por lo tanto junto con los beneficios del desarrollo de las nanotecnologías también se van a encontrar elementos de riesgo (Bermejo 2017). Esta dualidad o ambivalencia de la nanotecnología es un elemento común a la gran mayoría de las tecnologías que el ser humano ha ido desarrollando (Andreu Pinillos 2019).

En el caso de la nanotecnología esta ambivalencia está mucho más acentuada a causa de su origen multidisciplinar y de su implantación transversal, lo que propicia la aparición de un gran número de frentes en los que es posible que se produzcan puntos de fricción, aparezcan riesgos y se generen incertidumbres. En estos momentos la nanotecnología presenta diversas fuentes de incertidumbre como son (Bermejo 2017): (i) la aparición de dispositivos nanométricos que faciliten el control de la ciudadanía, la invasión de la intimidad y la aparición de nuevas formas de delito; (ii) el aumento de la brecha económico-social entre países en función de su grado de acceso a la nanotecnología; (iv) la posibilidad de mejorar órganos y tejidos y de acceder a nuevas terapias que permitan que ciertos individuos puedan prolongar su vida y sus capacidades; y (v) el posible impacto de los nanomateriales en los ecosistemas, seres vivos y los propios seres humanos.

Todos estos riesgos, de convertirse en daños reales, irían en contra del cumplimiento de varios de los ODS, por lo que se debe avanzar teniéndolos en cuenta. El último de los riesgos mencionados es el más preocupante dado que los nanomateriales y nanoobjetos operan en la nanoescala, por lo que no se puede descartar su interacción con las células y su maquinaria provocando anomalías metabólicas, así como alteraciones mutagénicas o carcinogénicas (Kahru 2010, Bermejo 2017, Gupta 2018). Además, la creciente producción, comercialización y uso de grandes volúmenes de nanomateriales (Keller 2013), ha generado la consiguiente preocupación de diversos sectores sociales. Aunque es complicado determinar el tráfico mundial de nanomateriales un indicador cualitativo de de la comercialización de los mismos se puede encontrar visitando las paginas web de grandes proveedores de materiales procesados. En el caso de la plataforma de venta on-line Alibaba⁸, se pueden encontrar sin grandes dificultades miles de ofertas de nanopartículas de diversa composición, nanotubos de carbono o grafeno. Para algunos nanomateriales específicos resulta muy llamativo encontrar que varios fabricantes solo realizan envíos cuyo pedido mínimo sea de varios cientos de kilogramos. Es evidente que tan elevada producción responde a una gran demanda de los nanomateriles a nivel mundial que se están usando ya en multiples sectores.

Parece evidente que es deseable mantener una situación de equilibrio que permita la búsqueda de una buena parte de los beneficios largamente prometidos por la nanotecnología a la vez que se controlan y regulan sus posibles riesgos, haciendo partícipe a todos los agente sociales en la toma decisiones y en su seguimiento. Es decir, el desarrollo de la nanotecnología pasa por una adecuada gobernanza (Echeverría 2005, Rip 2020, Serena 2021b) capaz de mantener una visión holística y participativa de la implantación de la nanotecnología. Entre los elementos que dicha gobernanza integral debe incluir estarían:

- (i) la potenciación de una investigación segura y transparente en un marco regido por la cautela y la responsabilidad social de la comunidad científica,
- (ii) la aceleración en el desarrollo de la nanotoxicología,

⁸ Alibaba: <https://www.alibaba.com/>

- (iii) la adecuada regulación de la producción, el comercio y el uso de nanomateriales o de los productos que los contengan, teniendo en cuenta su ciclo de vida y su grado de riesgo,
- (iv) la incorporación de políticas preventivas en el marco laboral,
- (v) la información transparente a los consumidores, pacientes y usuarios de bienes o servicios que incluyan nanomateriales o nanodispositivos, y
- (vi) la incorporación de la nanotecnología en contenidos informativos, divulgativos y educativos (desde la formación STEM en la etapa preuniversitaria hasta la formación continua de los trabajadores).

Sin duda alguna, poner en marcha un esquema de gobernanza de este tipo requiere un gran esfuerzo, dada la complejidad de un campo de conocimiento tan extenso y ramificado que afecta a tantos sectores productivos y que se enlaza con numerosos aspectos de índole ética, social y legal (Díaz 2021), y dado que requiere alcanzar consensos desde perspectivas muy diferentes para progresar de un modo sostenible sin menoscabar los derechos de los ciudadanos. Por el momento, esta gobernanza se ha ensayado (de forma parcial) en algunos países dada la mayor capacidad y tradición organizativa de su tejido administrativo y empresarial (Rip 2020). Si nos fijamos en la Unión Europea (UE), a pesar de las diferencias existentes entre los países que la conforman, se han realizado notorios avances reguladores en algunos de los puntos señalados anteriormente en muchos casos inspirados por el principio de precaución, convirtiéndose quizás en el espacio más seguro del mundo con el fin de minimizar los riesgos de los nanomateriales (Rauscher 2017; Casado 2021). El compendio de la regulación de la UE en cuanto a la nanotecnología se encuentra en el Observatorio de la Unión Europea para los Nanomateriales⁹ y abarca aspectos como la alimentación, los cosméticos, los dispositivos médicos, sustancias biocidas, la prevención de riesgos laborales, la salud laboral y la gestión y el uso de productos químicos. Otra iniciativa que merece la pena ser mencionada es el repositorio danés “The Nanodatabase”¹⁰ promovido por las entidades Danish Ecological Council y Danish Consumer Council que cuenta con más de 5.200 productos analizados de los que se han identificado sus riesgos para operarios, usuarios y el medioambiente mediante un profundo análisis finalmente resumido en un sencillo código de colores. Estas iniciativas proporcionan herramientas a la sociedad para avanzar en la implantación de las nanotecnologías y los nanomateriales de una forma segura.

6. CONCLUSIONES

La nanotecnología juega un papel clave en el actual desarrollo científico-técnico por lo que este conocimiento, junto con el aportado por otras disciplinas científico-técnicas, va a servir de apoyo para avanzar en las diferentes tareas y actuaciones en las que se estructuran los 17 ODS que forman la Agenda 2030. La nanotecnología va a permitir desarrollar materiales y dispositivos que tendrán impacto tecnológico medio o alto en los ODS 2, 3, 6, 7, 9, 11 y 12, aunque de forma indirecta los otros ODS también se verán beneficiados. Sin embargo, la implantación de la nanotecnología no está exenta de cuestiones problemáticas, exhibiendo así su ambivalencia, como ocurre con otras tecnologías, frente a la consecución de los ODS. Esta situación de equilibrio entre los beneficios prometidos y los posibles riesgos nos enfrenta a un modelo de desarrollo tecnológico que requiere una gobernanza a distintas escalas capaz de gestionar de forma holística la implantación de la nanotecnología. Es evidente que la forma en la que se diseñe esta gobernanza de la nanotecnología puede condicionar la forma en la que esta se incorporará a los ODS. Dada la situación de degradación del planeta dicha gobernanza debe implementarse y desenvolverse de forma rápida y sin mucho margen para el error porque es imprescindible contar con la ciencia para salir del atolladero, pero debe hacerse de un modo en el que el remedio que proponamos no sea peor que la enfermedad que deseamos combatir.

⁹ Observatorio de la UE para los Nanomateriales (EUON): <https://euon.echa.europa.eu/regulation>

¹⁰ The Nanodatabase: <https://nanodb.dk/>

BIBLIOGRAFÍA

- ABDEL-MAGEED H.M., ABUELEZZ, N.Z., RADWAN R.A. et al. (2021): Nanoparticles in nanomedicine: a comprehensive updated review on current status, challenges and emerging opportunities, *Journal of Microencapsulation*, 38:6, 414-436.
- ADAM, D. (2021): *How far will global population rise? Researchers can't agree*, *Nature* 597, 462-465. Disponible en <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02522-6>
- AENGENHEYSER, M. FENG, Q.Y., VAN DER PLOEG, F. et al. (2018): “The point of no return for climate action: effects of climate uncertainty and risk tolerance”, *Earth Syst. Dynam.* 9:1085–1095.
- AHMADI, MH, GHAZVINI, M, ALHUYI NAZARI, M, et al. (2019): Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *Int J Energy Res.* 43, 1387–1410.
- ALFEI, S., MARENGO, B., ZUCCARI, G. (2020): Nanotechnology application in food packaging: A plethora of opportunities versus pending risks assessment and public concerns, *Food Research International* 137, 109664
- ÁLVAREZ, .P.J.J., CHAN, C.K., ELIMELECH, M., et al. (2018): Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security, *Nature Nanotech.* 13, 634–641.
- ANDREU PINILLOS, A., FERNÁNDEZ MATEO, J. (2019): La ambivalencia tecnológica para impulsar (¿o no?) los ODS, *Telos* 111.
- BERKHOUT, E., GALASSO N., LAWSON, M. ET AL. (2021): *El virus de la desigualdad*, Oxfam International, Oxford (2021). Disponible en <https://www.oxfam.org/es/informes/el-virus-de-la-desigualdad>
- BERMEJO, M., SERENA, P. A. (2017): *Los riesgos de la nanotecnología*, CSIC-Los Libros de la Catarata, Madrid.
- BHATIA, I. S., RAMAN A., LAL N. (2013): The Shift from Microelectronics to Nanoelectronics – A Review, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering* 12(11): 4464-4468.
- BORNEMANN L., MUTZ R. (2015): *Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references*, *J. Assoc. Inf. Sci. and Technol.* 66(11), 2215-2222.
- BRUNDTLAND, G.H. (coordinadora) (1987): *World Commission on Environment and Development. Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford.
- CASADO, M., LÓPEZ BARONI, M. (2021): *La nanotecnología como problema bioético*, en el *Libro Blanco de las Nanotecnologías* (coordinando por DÍAZ, J. et al.), Aranzadi Thomson Reuters, Pamplona.
- CHANDARANA, M., CURTIS, A., HOSKINS, C. (2018): The use of nanotechnology in cardiovascular disease. *Appl Nanosci* 8, 1607–1619.
- COLLIER, P. (2019): *El futuro del capitalismo: Cómo afrontar las nuevas ansiedades*, Editorial Debate, Madrid.
- DALAI LAMA, ALT, F. (2020): *Our Only Home: A Climate Appeal to the World*, Hanover Square Press, Hanover.
- DAVIES J., LLUBERAS R., SHORROCKS, A. (2021): *Credit Suisse Global Wealth Report 2021*, Credit Suisse Research Institute, Ginebra. Disponible en <https://www.credit-suisse.com/about-us/en/reports-research/global-wealth-report.html>
- DIALLO, M. S. (2013): *Nanotechnology for sustainable development: retrospective and outlook*, *J. Nanopart. Res.* 15, 2044-2059.
- DIAZ MARCOS, J., MENDOZA GONZÁLVIZ, J., PONCE SIGÜENZA, R., et al. (coordinadores) (2021): *Libro Blanco de las Nanotecnologías*, Aranzadi Thomson Reuters, Pamplona.
- DÍAZ, S., SETTELE, J., BRONDÍZIO, E.S. et al. (Editores) (2019): *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*, Intergovernmental Science-

- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn. Disponible en <https://ipbes.net/global-assessment>
- DU PISANI, J.A. (2006): Sustainable development – historical roots of the concept, *Environmental Sciences*, 3:2, 83-96.
- DU, S., WU, J., ALSHAREEDAH, O., et al. (2019): Nanotechnology in Cement-Based Materials: A Review of Durability, Modeling, and Advanced Characterization, *Nanomaterials* 9(9),1213.
- ECHEVERRÍA, J. (2005): *Gobernanza de las nanotecnologías*, *Arbor Ciencia, Pensamiento y Cultura* 715, 301-315.
- ECHEVERRÍA, J. (2008): *Los dos grandes procesos de convergencia tecnológica*, *Quaderns del CAC* 31-32, 5-11
- FARJADIAN, F., GHASEMI, A., GOHARI, O., et al. (2019): Nanopharmaceuticals and nanomedicines currently on the market: challenges and opportunities, *Nanomedicine (Lond)* 14(1), 93-126.
- FYTIANOS, G., RAHDAR, A., KYZAS, G. Z. (2020): Nanomaterials in Cosmetics: Recent Updates, *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 10(5), 979.
- GEHRKE, I., GEISER, A., SOMBORN-SCHULZ A. (2015): Innovations in nanotechnology for water treatment, *Nanotechnol. Sci. Appl.* 8, 1-17.
- GUPTA, R., XIE, H. (2018): Nanoparticles in Daily Life: Applications, Toxicity and Regulations, *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 37(3), 209-230.
- HEPEL, M. (2020): “Magnetic Nanoparticles for Nanomedicine”, *Magnetochemistry* 6(1), 3.
- HUSSEIN, A. K. (2015): Applications of nanotechnology in renewable energies - A comprehensive overview and understanding, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42:460-476.
- JAYATHILAKA, W.A.D.M., QI, K., QIN, Y., et al., (2019) Significance of Nanomaterials in Wearables: A Review on Wearable Actuators and Sensors, *Adv. Mater.* 31, 1805921.
- KAHRU, A.; DUBOURGUIER, H.C. (2010): *From ecotoxicology to nanoecotoxicology*, *Toxicology* 269, 105-119.
- KELLER, A. A., McFERRAN S., LAZAREVA A., et al. (2013): Global life cycle releases of engineered nanomaterials, *J. Nanopart. Res.* 15,1692-1709.
- KHIN M.M., NAIR,S., BABU, J. et al. (2012): A review on nanomaterials for environmental remediation, *Energy Environ. Sci.* 5, 8075-8109
- KHITAB A., ARSHAD T. (2014): Nano construction materials: review, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 38,181-189.
- KISSKISSEVA E. (2020): Nanotechnology in Food Systems: A Review, *Acta Alimentaria* 49(4), 460-474.
- KOENDERINK, A.F., ALÙAND, A., POLMAN A. (2015): Nanophotonics: Shrinking light-based technology, *Science* 348, 516-521.
- KRIEGLER, E., MESSNER, D., NAKICENOVIC, N., et al. (coordinadores) (2018): *The World in 2050 - Transformations to Achieve the Sustainable Development Goals.*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria. Disponible en <http://pure.iiasa.ac.at/15347>
- KUMAR, L., RAGUNATHAN, V., CHUGH, M. et al.(2021) Nanomaterials for remediation of contaminants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19, 3139–3163.
- LATOUCHE, S. (2009): *Pequeño tratado de decrecimiento sereno*, Icaria, Barcelona.
- LAY-EKUAKILLE, A., MASSARO, A., SINGH, S.P. et al. (2021) Optoelectronic and Nanosensors Detection Systems: A Review, *IEEE Sensors Journal* 21(11), 12645-12653.
- LIM, T.-C., RAMAKRISHNA, S. (2006): A Conceptual Review of Nanosensors, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 61 (7-8), 402-412.
- MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A. et al. (Editores) (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chang*, Cambridge University Press, Cambridge. Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>

- MEADOWS, D.H., MEADOWS, D.L., RANDERS, J., et al. (1972): *The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.
- MESSERLI, P., MURNININGTYAS, E., ELOUNDOU-ENYEGUE, P. ET AL. (2019): *The Future is Now - Science for Achieving Sustainable Development*, Organización de las Naciones Unidas, Nueva York. Disponible en <https://sustainabledevelopment.un.org/gsd2019>
- MILETTO, M. UHLENBROOK, S., CONNOR, R. (coordinadores) (2020): *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Paris. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- NILE, S.H., BASKAR, V., SELVARAJ, D. et al. (2020): Nanotechnologies in Food Science: Applications, Recent Trends, and Future Perspectives, *Nano-Micro Lett.* 12, 45.
- NORBERG, J. (2017): *Progreso: 10 razones para mirar al futuro con optimismo*, Deusto, Barcelona.
- OLCESE SANTONJA A. (2010): *El capitalismo humanista*, Marcial Pons, Madrid.
- ONU (2015): *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, Organización de las Naciones Unidas A/RES/70/1, 1-40. Disponible en https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=S.
- PAPA FRANCISCO (2015): *Laudato SI': Carta Encíclica del Sumo Pontífice Francisco sobre el cuidado de la Casa Común*. Ciudad del Vaticano, Roma. Disponible en https://www.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- PAULI, G. (2010): *The Blue Economy: 10 years, 100 Innovations. 100 Million Jobs*, Paradigm Publications, Taos, New Mexico.
- PEARCE, D.W., TURNER, K. (1990): *Economics of natural resources and the environment*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- PINKER, S. (2018): *En defensa de la Ilustración*, Paidós, Barcelona.
- POMERANTSEVA E, BONACCORSO F., FENG X., et al. (2019): Energy storage: The future enabled by nanomaterials, *Science* 366(6468)
- RAUSCHER, H. (2017): Regulatory Aspects of Nanomaterials in the EU, *Chem. Ing. Tech.* 89(3):224–231.
- RIP, A. (2020): *Nanotechnology and its Governance*, Routledge, New York.
- RIPPLE, W.J., WOLF, C. NEWSOME, T.M. et al. (2020): *World Scientists' Warning of a Climate Emergency*, *BioScience* 70(1), 8-12. Disponible en <https://academic.oup.com/bioscience/article/70/1/8/5610806>
- RIPPLE, W.J., WOLF, C. NEWSOME, T.M. et al. (2021): *World Scientists' Warning of a Climate Emergency*, *BioScience* 71(9), 894-898. Disponible en <https://academic.oup.com/bioscience/article/71/9/894/6325731>
- RIVERO, P.J., URRUTIA, A., GOICOECHEA, J. et al. (2015): Nanomaterials for Functional Textiles and Fibers. *Nanoscale Res Lett* 10, 501.
- ROCO, M.C. (2005): “Environmentally Responsible Development of Nanotechnology”, *Environ. Sci. Technol.* 39(5), 106A–112A.
- ROSLING, H. et al. (2018): *Factfulness. Diez razones por las que estamos equivocados sobre el mundo. Y por qué las cosas están mejor de lo que piensas*, Deusto, Barcelona.
- RULL, V. (2018): *El Antropoceno*, CSIC-Los Libros de la Catarata, Madrid.
- SACHS, J.D. (2012): *From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals*, *Lancet* 379, 2206-221.
- SAHANI, S., SHARMA, Y. C. (2021): Advancements in applications of nanotechnology in global food industry, *Food Chemistry* 342, 128318.
- SALAMANCA-BUENTELLO, F., PERSAD, D.L., COURT, E.B. et al. (2005): *Nanotechnology and the Developing World*, *PLoS Medicine* 2(5): e97.

- SALEEM, H., ZAIDI, S.J. (2020): Sustainable Use of Nanomaterials in Textiles and Their Environmental Impact, *Materials* 13(22),5134.
- SALVIONI, L., RIZZUTO, M.A., BERTOLINI, J.A., et al.. (2019): Thirty Years of Cancer Nanomedicine: Success, Frustration, and Hop”, *Cancers* 11,1855.
- SANCHEZ, F., SOBOLEV, K. (2010): Nanotechnology in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071.
- SANTHOSH, C., VELMURUGAN, V. JACOB, G. et al. (2016): Role of nanomaterials in water treatment applications: A review, *Chemical Engineering Journal*, 306, 1116-1137.
- SAVELEV, R.S., MAKAROV, S.V., KRASNOK, A.E. et al. (2015) From optical magnetic resonance to dielectric nanophotonics (A review). *Opt. Spectrosc.* 119, 551–568.
- SCHWAB, K. (2016): *La Cuarta Revolución Industrial*, Debate, Madrid.
- SERENA, P. A. (2010): *La Nanotecnología*, CSIC-Los Libros de la Catarata, Madrid.
- SERENA, P.A. (2013): *La Nanotecnología, una revolución desconocida*, Encuentros Multidisciplinares 45, 1-8. Disponible en <http://hdl.handle.net/10486/678730>
- SERENA, P.A. (2021a): *Nanotecnología para el Desarrollo Sostenible*, CSIC-Los Libros de la Catarata, Madrid.
- SERENA, P.A. (2021b): *Nanotecnología y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. No dejemos para mañana lo que podemos hacer hoy* en el *Libro Blanco de las Nanotecnologías* (coordinando por DÍAZ, J. et al.), Aranzadi Thomson Reuters, Pamplona.
- SHI, J., KANTOFF, P., WOOSTER, R. et al. (2017): Cancer nanomedicine: progress, challenges and opportunities. *Nat Rev Cancer* 17, 20–37.
- TEOW, Y.H., MOHAMMAD, A.W. (2019): New generation nanomaterials for water desalination: A review, *Desalination* 451, 2-17.
- VESSURI, H. (2017): *La ciencia para el desarrollo sostenible (Agenda 2030)*, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), París. Disponible en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/PolicyPapersCILA-C-CienciaAgenda203-ES.pdf>
- VILLENA DE FRANCISCO, E. y GARCÍA-ESTEPA, R. M. (2018): “Nanotechnology in the agrofood industry”, *Journal of Food Engineering* 238:1-11.
- WANG, Y., SUN, S., ZHANG, Z., SHI, D., (2018): Nanomaterials for Cancer Precision Medicine, *Adv. Mater.* 30, 1705660.
- YAQOOB A.A., PARVEEN T., UMAR K., et al. (2020): Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review. *Water*. 12(2), 495-516. <https://doi.org/10.3390/w12020495>
- ZALASIEWICZ, J., WILLIAMS, M., WATERS, C.N., et al. (2017): *Scale and diversity of the physical technosphere: a geological perspective*, *The Anthropocene Review*, 4(1), 9-22.
- ZHANG, Q., UCHAKER, E., CANDELARIA, S.L., et al. (2013): Nanomaterials for energy conversion and storage, *Chem. Soc. Rev.* 42, 3127-3171.