

Más allá del (no) futuro: abordando los dilemas éticos de la nanotecnología*

Ivett Vilchis Torres^a ■ José Luis Anta Felez^b

Resumen: La nanotecnología presenta retos éticos significativos, particularmente en salud, seguridad y privacidad. En este análisis cualitativo se evalúan minuciosamente las implicaciones éticas y de justicia social, considerando el potencial para innovar en medicina, energía e informática, maximizando beneficios y minimizando riesgos, además de abordar la necesidad de balancear la eficacia tecnológica con la seguridad de datos personales. Estas aportaciones se orientan a establecer un enfoque multidisciplinario para revisar y desarrollar políticas que mitiguen riesgos, asegurando que los avances tecnológicos sean equitativos y seguros. Finalmente, se considera esencial una gobernanza responsable y la promoción de un desarrollo tecnológico que priorice el bienestar humano y ambiental, que garantice que la nanotecnología avance de manera ética y beneficie al colectivo, asimismo, a través de la discusión sobre las regulaciones y mecanismos de control, hacer énfasis en la importancia de la participación ciudadana y la responsabilidad social de las empresas para garantizar una justicia social.

Palabras clave: nanotecnología; implicaciones éticas; justicia social; equidad; transparencia

Recibido: 02/04/2024 **Aceptado:** 14/05/2024 **Disponible en línea:** 24/10/2024

Cómo citar: Vilchis Torres, I., & Anta Felez, J. L. (2024). Más Allá del (No) Futuro: Abordando los Dilemas Éticos de la Nanotecnología : Abordando los Dilemas Éticos de la Nanotecnología. *Revista Latinoamericana De Bioética*, 24(2), 97-113. <https://doi.org/10.18359/r/bi.7274>

* Artículo de reflexión.

- a** Doctora en Educación, maestra en Comunicación y Tecnologías Educativas e ingeniera en Computación. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.
Correo electrónico: ivilchist@uaemex.mx; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0197-626X>
- b** Doctor en Antropología Social, maestro en Antropología Social y Estudios de Género, licenciado en Geografía e Historia y Ciencias Políticas y Sociológicas. Universidad de Jaén, Jaén, España.
Correo electrónico: jlanta@ujaen.es; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7063-5288>

Beyond the (No) Future: Addressing the Ethical Dilemmas of Nanotechnology

Abstract: Nanotechnology presents significant ethical challenges, particularly in health, safety, and privacy. This qualitative analysis thoroughly explores the ethical implications and social justice concerns surrounding its potential applications in medicine, energy, and informatics. It focuses on maximizing benefits and minimizing risks, highlighting the need to balance technological efficacy with personal data security. This paper advocates for a multidisciplinary approach to policy development, aimed at mitigating risks and ensuring that technological advancements are both equitable and safe. The importance of responsible governance and prioritizing human and environmental well-being is emphasized to ensure that nanotechnology progresses ethically and benefits society as a whole. Furthermore, the discussion underscores the role of regulations, control mechanisms, citizen participation, and corporate social responsibility in promoting transparency and social justice.

Keywords: Nanotechnology; Ethical Implications; Social Justice; Equity; Transparency

Além do (não) futuro: enfrentando os dilemas éticos da nanotecnologia

Resumo: A nanotecnologia apresenta desafios éticos significativos, particularmente em saúde, segurança e privacidade. Nesta análise qualitativa, são minuciosamente avaliadas as implicações éticas e de justiça social, considerando o potencial de inovação em medicina, energia e informática, maximizando benefícios e minimizando riscos, além de abordar a necessidade de equilibrar a eficácia tecnológica com a segurança dos dados pessoais. Essas contribuições visam estabelecer uma abordagem multidisciplinar para revisar e desenvolver políticas que mitiguem riscos, garantindo que os avanços tecnológicos sejam equitativos e seguros. Por fim, considera-se essencial uma governança responsável e a promoção de um desenvolvimento tecnológico que priorize o bem-estar humano e ambiental, que assegure que a nanotecnologia avance de forma ética e beneficie o coletivo. Além disso, por meio da discussão sobre regulamentações e mecanismos de controle, enfatiza-se a importância da participação cidadã e da responsabilidade social das empresas para garantir a justiça social.

Palavras-chave: nanotecnologia; implicações éticas; justiça social; equidade; transparência

Introducción

El complejo mundo de la nanotecnología nos sitúa en el umbral de un campo científico y tecnológico que promete transformaciones sin precedentes, no solo en el ámbito de la medicina, la energía y la informática, sino también en la estructura misma de nuestras sociedades (1); Küng, en su libro *Proyecto de una ética mundial*, detalla la necesidad de establecer normas y valores a nivel global. Al adentrarnos en esta era de innovaciones a escala molecular, emerge con urgencia la necesidad de abordar las profundas implicaciones éticas y de justicia social que acompañan estos avances. La tarea no es menor: se trata de equilibrar los beneficios potenciales de la nanotecnología con los riesgos inherentes para la salud, la seguridad y la privacidad (2).

Este análisis, inspirado en las reflexiones de expertos como Fritz Allhoff, Susan Cozzens, Christine Peterson, Andrew Maynard, Arthur Caplan y otros más, pretende sumergirse en la reflexión ética que debe acompañar al desarrollo nanotecnológico. Reconocemos la importancia de una aproximación proactiva y reflexiva que no solo contemple la seguridad y la justicia, sino que también promueva la transparencia y la participación de la comunidad en el desarrollo tecnológico.

Además, consideramos los desafíos que plantea la nanotecnología de acuerdo con una perspectiva global, la cual reconoce que los dilemas éticos y sociales no se circunscriben a un solo sector o cultura (3). En este sentido, abogamos por una estructura multidisciplinaria que involucre a científicos, políticos, industria y sociedad en general para construir políticas que aseguren un desarrollo equitativo y seguro de la nanotecnología.

Nuestro enfoque metodológico se centra en una revisión exhaustiva de las distintas áreas de aplicación de la nanotecnología, que evalúe tanto los beneficios potenciales como los riesgos y desafíos éticos asociados. La finalidad es desarrollar un marco de gobernanza responsable que, al priorizar el bienestar humano y ambiental, garantice que los avances en nanotecnología se realicen de una manera ética y beneficien a la sociedad en su conjunto (4). Por lo que se asume una orientación metodológica interdisciplinaria que retoma elementos tanto

de las ciencias naturales, tecnología y la ética, en la búsqueda de una visión holística e integradora del fenómeno en cuestión.

En suma, este análisis busca establecer el tono para una discusión amplia y profunda sobre cómo la nanociencia y la nanotecnología, al tiempo que abren nuevas fronteras en el conocimiento y la aplicación tecnológica, también nos invitan a reflexionar sobre nuestras responsabilidades éticas y sociales. Es en este diálogo entre innovación y ética donde nuestro futuro colectivo empezará a tomar forma.

Análisis crítico del impacto nano en la sociedad

La corta historia del pensamiento nano-

Lejos de ser campos delimitados surgidos de las teorías de un puñado de científicos en un instante determinado, la nanociencia y la nanotecnología se definen como la síntesis de múltiples ideas y teorías desarrolladas a lo largo del último siglo. Este contexto confiere a su historia un carácter tanto apasionante como intrincado. Se podría argumentar que la crónica del mundo *nano-* se asienta sobre las bases establecidas por la teoría atómica y la mecánica cuántica, las cuales revolucionaron profundamente nuestra comprensión de la materia. Durante la década de 1920, se sentaron las bases teóricas para la descripción de átomos y moléculas, lo que se constituyó en los cimientos de lo que hoy conocemos como nanociencia. Aunque retroceder hasta ese momento podría considerarse algo forzado, preferimos ubicar el nacimiento de la nanociencia en la época donde comenzaron a debatirse las técnicas de manufactura a partir del nivel molecular (4).

La nanociencia se define como el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular, en el que las propiedades del material difieren sustancialmente de aquellas a mayor escala. Por otro lado, la nanotecnología representa la capacidad de crear y manipular átomos y moléculas en las escalas más

diminutas. De esta manera, la nanotecnología puede concebirse como el estudio de materiales y sistemas cuyas estructuras y componentes presentan propiedades, fenómenos y procesos físicos, químicos y biológicos innovadores y notablemente mejorados gracias a su tamaño a nanoescala. Con el propósito de ensamblar sistemas complejos, como un potencial nuevo tipo de transistor fabricado con moléculas orgánicas, se requiere una comprensión previa de cómo funcionan las moléculas en una escala nanométrica.

Es imperativo desentrañar los principios naturales y los procesos fisicoquímicos que gobiernan dicho dominio, una tarea que ha sido y continúa siendo abordada por la nanociencia (5). No obstante, este proceso no concluye aquí. Una vez que esta comprensión es alcanzada, surge la necesidad de edificar sobre dicho conocimiento, avanzando así hacia la nanotecnología. Este trayecto debe llevarse a cabo con una atención constante a las implicaciones sociales y éticas que conlleva la utilización de tecnologías potencialmente perjudiciales para la humanidad.

Para que la tan anhelada revolución *nano*-pueda materializarse, las ideas deben superar la barrera del tamaño. El auténtico desafío consiste en traducir toda la información que la ciencia nos provee acerca de la nanoescala a 10^{-9} metros, con el fin de construir una tecnología que funcione eficientemente en nuestro mundo métrico. En este punto, la distinción entre nanociencia y nanotecnología se torna más evidente. La primera nos instruye acerca de cómo opera el mundo en esa escala diminuta mientras que la segunda nos otorga la capacidad de construir dispositivos y objetos que compartan nuestra escala y sean capaces de interactuar con nosotros en nuestro entorno cotidiano (6).

Emerge con claridad que la primera persona que abordó la noción de fabricación ascendente, amalgamando componentes “ladrillo a ladrillo”, y, por ende, introdujo el concepto que hoy identificamos como nanociencia, aunque sin utilizar esta terminología, fue el eminente científico estadounidense Richard Feynman. Este distinguido individuo fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1965 por sus contribuciones al campo de

la física de partículas, un ámbito que, en su esencia, no guarda relación directa con la nanociencia (7).

La trayectoria profesional y personal de Feynman fue notoriamente diversa, participó activamente en el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial para la construcción de la bomba atómica. Asimismo, destacó como un ferviente divulgador científico y, hacia el final de su vida, formó parte de la comisión encargada de investigar el accidente del transbordador espacial Challenger. En 1959, años antes de obtener el Premio Nobel, impartió una plática en el Instituto de Tecnología de California, focalizada en el desafío de manipular objetos a un nivel reducido. Durante este discurso, afirmó la existencia de numerosas oportunidades tecnológicas al “jugar” con átomos y moléculas. Concluyó que no existía ninguna ley física que lo prohibiera, y, por ende, alcanzar tal hazaña era simplemente cuestión de tiempo, necesario para que las herramientas apropiadas fueran concebidas. De ahí, su célebre frase utilizada comúnmente como emblema de la nanociencia: *There is plenty of room at the bottom* (hay mucho espacio libre al fondo). Aunque en ese tiempo, su disertación no generó un impacto significativo, hoy en día resulta asombroso observar cómo sus predicciones se han materializado (6).

Feynman evidenció ante el público la capacidad revolucionaria de la nanociencia al referirse a ejemplos de fenómenos que se consideraban insondables, particularmente en condiciones de baja temperatura y alta presión. En respaldo de su afirmación, presentó los siguientes conceptos:

- 1) La litografía por haz de electrones y la litografía por haz de iones focalizados se postulan como herramientas que pueden facilitar la escritura y preparación de estructuras a nanoescala.
- 2) El estampado a pequeña escala emerge como una técnica eficaz para la reproducción de nanoestructuras, partiendo de una nanoestructura originalmente preparada.
- 3) La evolución de los métodos de almacenamiento de información se ha caracterizado por un cambio desde la simple conservación de imágenes hacia el uso de lenguajes de codificación

para representarlas. La posibilidad de escribir una enciclopedia en la cabeza de un alfiler y almacenar información dentro del mismo destaca como una aplicación de la nanociencia y la nanotecnología. Esta noción se relaciona con el sistema biológico, donde una célula alberga la información completa sobre la organización de una criatura compleja en forma de ADN de cadena larga.

- 4) El perfeccionamiento de los microscopios a una escala que permita la exploración y visualización de átomos individuales se presenta como una herramienta valiosa para la lectura de características a nanoescala.
- 5) El estudio de los movimientos de las células biológicas se vislumbra como un medio para la creación de pequeñas máquinas.
- 6) La posibilidad de emplear mecanismos de evaporación para la producción de materiales, dispositivos y máquinas móviles de reducidas dimensiones se plantea como una opción viable.
- 7) La capacidad de unir átomos para formar estructuras en capas constituye una opción adicional en el arsenal de posibilidades exploradas en el ámbito nanocientífico.

Un significativo avance en el ámbito de la nanociencia tuvo lugar cuando el estudiante de secundaria William McLellan construyó un motor eléctrico del tamaño de una uña y lo presentó a Feynman. Este ingenioso invento le valió a McLellan el primer premio en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física en 1960 (7). Desde estos logros pioneros, numerosos científicos e investigadores se han dedicado al desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología modernas. Un ejemplo notable de estos esfuerzos se evidencia en el trabajo de Tom Newman, quien, en 1985, siendo estudiante de posgrado en la Universidad de Stanford, logró reducir un párrafo del libro *Historia de dos ciudades* a 1/25 000 de su tamaño original. Cabe destacar que, a pesar de estas contribuciones notables, Feynman no incursionó directamente en esta área. De hecho, no le asignó un nombre,

ya que el término “nanotecnología” fue introducido por el profesor N. Taniguchi, de la Universidad de Ciencia de Tokio, en un trabajo titulado *On the basic concept of “nanotechnology”* en 1974, presentado en una conferencia de la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Precisión. En dicho artículo se abordaba la nanotecnología y, en su extensión, la nanociencia como la tecnología que posibilitaría la separación, consolidación y deformación de “materiales átomo a átomo o molécula a molécula” (6).

Estas ideas se propagaron en la mitad de los años setenta, pero en ese momento no se exploró cómo podrían concretarse en la realidad, es decir, cómo podría erigirse algún material o dispositivo a partir de sus componentes más elementales. No fue sino hasta 1986 que Eric Drexler publicó un libro titulado *Engines of creation* (en español, traducido como *La nanotecnología. El surgimiento de las máquinas de creación*) en el que delineó la manera en que las nanomáquinas podrían ser capaces de autoconstruirse desde computadoras hasta equipos industriales, ensamblando a partir de partes diminutas (4).

Según la visión de Drexler (8), las entidades encargadas de este proceso de ensamblaje serían nanorrobots constructores cuya operación sería similar a la función de los ribosomas y otras estructuras moleculares que se encuentran en las células de nuestro organismo. Además, estos nanorrobots tendrían la habilidad de autoensamblarse y efectuar autorreparaciones cuando fuera necesario. Su propuesta coincide con la dinámica de los motores moleculares en la que la naturaleza ha creado un sistema de moléculas de tal forma que algunas impulsan el movimiento de otras, creando un verdadero efecto mecánico.

De acuerdo con Kaplan y Radin (9), Drexler también contempló la posibilidad de desarrollar nanosubmarinos capaces de desplazarse por las venas en busca de antígenos, emulando la función de los leucocitos. La concepción mecánica de la nanotecnología, la cual imaginaba a los nanorrobots ensambladores moleculares como los artífices de nuevos dispositivos a partir de átomos y moléculas, fue firmemente rebatida por R. E. Smalley, un científico distinguido por su hallazgo del fulleren, una molécula esencial en la nanociencia, que le

otorgó el Premio Nobel de Química en 1996. Smalley (10) criticó esta idea en un artículo para la revista *Scientific American*, llamado *Química, amor y nanorrobots (Of chemistry, love and nanobots)*, donde argumentaba que las propuestas de Drexler eran incompatibles con los principios básicos de la química y lo acusaba de generar un panorama alarmista que podría influir negativamente en la percepción pública respecto al verdadero desarrollo de la nanotecnología.

Smalley expresó sus críticas mediante un elocuente ejemplo. Cuando dos personas se enamoran, se suele decir que hay buena química entre ellas, pero para que surja el amor no es suficiente con que entren en contacto. No obstante, una vez que surge esa “química”, la atracción es tan intensa que nada puede separarlas. No le sirve una persona diferente; debe ser el objeto de su amor y, de ser posible, permanecerían juntas hasta el final. Smalley aplicó este concepto a los átomos que conformarían el nanorrobot ensamblador: si no hay “química” con otros átomos, los ignorarían, pero si surge esa afinidad, se unirían en una reacción tan fuerte que los incapacitaría para seguir buscando o moviendo otros átomos. A esto se le conoce como la teoría de los “dedos pegajosos”. La respuesta de Drexler fue inmediata, y con el apoyo de otros expertos como R. Freitas, contrarrestó los argumentos de Smalley, señalando que los ribosomas realizan esta misma labor y no tienen el problema de los “dedos pegajosos”. La discusión se prolongó en diferentes medios y textos científicos sin concluir con un ganador definitivo (10).

Actualmente, la perspectiva de los científicos que trabajan en el tema tiende a estar más cercana a la de Smalley que a la de Drexler. Se podría sostener que los mecanismos de ensamblaje molecular sugeridos por Drexler no satisfacen prácticamente ninguna de las normas mencionadas previamente. No son sencillos, no operan de manera conjunta y, más aún, replican en menor escala los motores existentes (6). En resumen, en *Engines of Creation*, Drexler invita a imaginar objetos ficticios, tal como Julio Verne inspiró a nuestros antepasados a soñar con expediciones a la Luna o al núcleo terrestre. Aunque el ser humano consiguió alunizar, nunca ha alcanzado (ni alcanzará) el centro de la Tierra.

De forma parecida, es altamente improbable que la mayoría de los inventos descritos y patentados por Drexler se integren alguna vez en nuestra cotidianidad, quedando en la historia como simples productos de la imaginación (10).

No obstante, la importancia de las contribuciones de Drexler (9) se encuentra en su habilidad para proporcionar visiones del mundo nanométrico, aun cuando previamente existían limitaciones para explorarlo directamente. Coincidentemente, el mismo año que Drexler lanzó su obra, 1986, los científicos G. Binnig y H. Rohrer fueron galardonados con el Premio Nobel de Física por desarrollar el microscopio de efecto túnel STM (Scanning Tunneling Microscope), un instrumento revolucionario que finalmente nos ofreció la posibilidad de observar directamente la apariencia de los objetos a escala nanométrica (no exenta de polémicas por disputas de patentes y desarrollos teóricos). En el mismo año se dio a conocer un microscopio de fuerza atómica con las siglas AFM (Atomic Force Microscope). Dando paso a una nueva forma de observar el mundo, se crean “los ojos de la nanotecnología”.

Para Martín-Gago y otros autores (11), estas metodologías utilizan la interacción delicada entre una punta extremadamente afilada y una superficie. Dicha punta, que puede terminar incluso en un átomo individual, se desliza por la superficie captando sus átomos de una manera parecida a cómo se sienten las teclas de un ordenador o el texto en Braille con el dedo. El Microscopio de Efecto Túnel (STM) y el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), así como otras variantes que aparecieron en la década de los noventa, son actualmente reconocidos como microscopios de sonda de barrido SPM (Scanning Probe Microscope).

Estos mismos autores señalan que manejar objetos de tamaño tan reducido representa un desafío considerable y, de hecho, resultaba casi imposible antes de la invención de los microscopios de sonda de barrido. Estas herramientas innovadoras facilitan actualmente no solo la observación de moléculas, átomos y otros elementos nanométricos, sino también su manejo directo. Utilizándolas bajo condiciones adecuadas, es posible desplazar átomos, tanto inorgánicos como orgánicos, proteínas,

segmentos de ADN, ribosomas, fullerenos, nanotubos y nanopartículas, entre otros (12). Aunque a primera vista no parezca una tarea particularmente impresionante, es fundamental reconocer el significado de visualizar o manipular entidades tan diminutas como un átomo. Es una hazaña destacable frente a la técnica capaz de mostrar cómo son realmente los átomos.

Para los 80, en estudios del nivel medio superior, era común escuchar a los profesores de física decir: “Los átomos ni se ven, ni se podrán nunca llegar a ver” (4). Para muchos de ellos, observar un átomo implicaba someterlo a radiación, atacándolo con electrones, fotones u otros átomos. De esta forma, nunca se podría observar un átomo en su forma original, sino solo una versión alterada por la interacción con las partículas (sondas) utilizadas. No obstante, lo que no se preveía era que, mientras se enseñaba física en las aulas (3), otros investigadores estaban en proceso de desarrollar un nuevo tipo de microscopio. Este dispositivo no requiere irradiar la muestra, sino que capta la nube de electrones alrededor de un material gracias a una propiedad cuántica conocida como “efecto túnel”.

Las microscopías de campo cercano experimentaron un significativo perfeccionamiento durante los años noventa, acompañadas por el desarrollo de metodologías de cálculo numérico que brindaban la posibilidad de simular y percibir muchos de los experimentos realizados en los laboratorios. Durante el cambio de milenio, entre finales del siglo xx y comienzos del XXI, se realizaron descubrimientos clave que definieron la nanociencia y nanotecnología, tal como las entendemos actualmente; se identificaron los fullerenos, las nanopartículas, los nanotubos de carbono y el grafeno (4). Estos materiales recientes generaron un entusiasmo excepcional al acercar las ideas “nano-” a las aplicaciones tecnológicas. Simultáneamente, las administraciones públicas y los organismos de gestión de la ciencia, reconociendo el potencial de esta novedosa disciplina científica y sus posibles impactos en la sociedad, instauraron programas de investigación para impulsar los estudios en nanociencia y nanotecnología. De este modo, se

facilitó la transformación de estos conceptos en la realidad tangible que simbolizan hoy.

Los problemas éticos implicados con la nanotecnología

La mirada más académica respecto a la relación entre ética y nanociencia se enfoca en la necesidad de aplicar un enfoque interdisciplinario que involucre a científicos, filósofos, sociólogos, juristas y otros especialistas para abordar los desafíos éticos que plantea la nanotecnología. En este sentido, la ética en la nanociencia se refiere a la reflexión crítica sobre las consecuencias morales y sociales de la investigación, el desarrollo y la aplicación de la nanotecnología (13). Esta reflexión se enfoca en cuestiones como la equidad en el acceso a los beneficios de la nanotecnología, la gestión de los riesgos y los impactos ambientales y sociales, la protección de la privacidad y los derechos humanos, y la promoción de la transparencia y la responsabilidad de quienes la aplican.

La ética en la nanociencia también se relaciona con la necesidad de establecer marcos regulatorios adecuados que permitan el desarrollo de la nanotecnología de manera segura y responsable (14). Esto implica la necesidad de definir estándares y normas éticas claras, así como de establecer mecanismos efectivos para la evaluación y gestión de riesgos. De hecho, las opiniones más académicas respecto a la relación entre ética y nanociencia se enfocan en la necesidad de aplicar una visión interdisciplinaria para abordar los desafíos éticos que plantea la nanotecnología y en la importancia de establecer marcos regulatorios adecuados para su desarrollo seguro y responsable.

Aunque la nanotecnología se presenta a menudo como una tecnología objetiva y neutra, fuera de los condicionantes sociales y culturales, en realidad está influenciada por una serie de factores sociales, políticos y económicos. Algunas críticas a la visión de la nanotecnología como una tecnología objetiva e independiente de los condicionantes sociales incluyen (1) intereses comerciales: la investigación y el desarrollo de la nanotecnología están en gran medida financiados por empresas y organizaciones con intereses comerciales y económicos. Esto

puede llevar a que la investigación se centre en aplicaciones que sean rentables en lugar de en las necesidades sociales; (2) desigualdades económicas: la nanotecnología requiere inversiones significativas en investigación y desarrollo, lo que limita el acceso a la tecnología a aquellos que tienen recursos económicos para financiarla. Esto puede llevar a que los beneficios de la nanotecnología se concentren en los países y las empresas más ricos mientras que los países y las comunidades más pobres quedan rezagados; (3) regulación insuficiente: dado que la nanotecnología se está desarrollando a un ritmo muy rápido, lo que hace que la regulación y la supervisión de la tecnología sean más difíciles. Esto puede llevar a la introducción de productos y tecnologías que no han sido completamente evaluados en términos de seguridad y efectos ambientales (15).

La nanotecnología cuenta con el potencial de tener un impacto significativo en la sociedad y en el medio ambiente, por lo que los “impactos sociales y ambientales” pueden ser difíciles de predecir. Es necesario llevar a cabo evaluaciones cuidadosas al respecto para evitar consecuencias negativas no deseadas.

En efecto, la nanotecnología se presenta a menudo como una tecnología objetiva y fuera de los condicionantes sociales, en realidad está influenciada por una serie de factores sociales, políticos y económicos que pueden tener consecuencias negativas (16). Es importante abordar estas críticas y trabajar para desarrollar la nanotecnología de manera ética, responsable y sostenible. Todo ello plantea una serie de consecuencias morales que deben ser consideradas en la toma de decisiones éticas y políticas.

Algunas de estas consecuencias incluyen posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente debido a la exposición a nanopartículas y otros materiales en la producción y uso de nanotecnología (17); impactos sociales y económicos como la creación de nuevas desigualdades y la pérdida de empleos debido a la automatización y la optimización de la producción; posiblemente la creación de tecnologías invasivas que puedan afectar la privacidad y la libertad de las personas, pero también generar tecnologías de mejoramiento humano que

puedan reforzar la discriminación y la desigualdad; incluso llevará aparejado una exacerbación de la brecha entre países desarrollados y países en desarrollo debido a las desigualdades en la capacidad de producción y acceso a la nanotecnología, y, seguramente, una posible falta de transparencia y responsabilidad en la investigación y desarrollo de la nanotecnología, lo que puede llevar a la ocultación de riesgos y violaciones de derechos humanos (15).

Estas son solo algunas de las consecuencias morales de la nanotecnología que deben ser consideradas en la reflexión crítica y la toma de decisiones éticas y políticas. Es importante tener en cuenta que la nanotecnología también puede tener beneficios significativos para la salud, el medio ambiente y la economía, pero estos beneficios deben ser evaluados en relación con los posibles riesgos y consecuencias morales (14). La nanotecnología también plantea una serie de consecuencias sociales que deben ser consideradas en la “toma de decisiones éticas y políticas”: cambios en la economía y el empleo debido a la automatización y la optimización de la producción, lo que puede llevar a la pérdida de empleos y la creación de nuevas desigualdades sociales.

El surgimiento de nuevas cuestiones éticas en relación con la seguridad, la privacidad y los derechos humanos en un mundo cada vez más conectado y dependiente de la tecnología (18). La necesidad de regulaciones y estándares internacionales para garantizar que la nanotecnología se desarrolle de manera segura y responsable y para evitar el uso indebido o la explotación de la tecnología. En este sentido es importante evaluar estos impactos sociales en relación con los posibles beneficios de la nanotecnología y trabajar para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos y consecuencias negativas. De hecho, la nanotecnología tiene el potencial de cambiar significativamente la sociedad en muchos aspectos y áreas en las que se espera que tenga un impacto social revelador (18). En la medicina, la nanotecnología puede permitir la entrega de fármacos de manera más precisa y dirigida, desarrollar diagnósticos con mayor exactitud y mejorar las terapias de enfermedades graves como el cáncer y neurodegenerativas.

En la electrónica, puede permitir la fabricación de dispositivos electrónicos más pequeños y

eficientes, así como el desarrollo de nuevas tecnologías como la electrónica vestible y los sensores inteligentes (8). En el campo específico de la energía, donde seguramente puede contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y limpias para la generación de energía, como las células solares y las baterías de alta capacidad. En el impacto sobre el medio ambiente, que contribuirá a la eliminación de contaminantes del agua y del aire, así como buscar soluciones a los suelos contaminados. En agricultura, que mejorará la producción agrícola mediante el desarrollo de fertilizantes y pesticidas más eficientes y la creación de sistemas de riego y control de plagas más exacto. Podemos decir que la nanotecnología tiene el potencial de lograr un impacto significativo en la sociedad, al mejorar ciertos campos que son significativos y problemáticos en la actualidad.

Se puede observar que algunos de los grandes hitos en el campo de la ética y la nanotecnología son: (1) La creación de la Iniciativa de Nanotecnología en 2001 por parte del gobierno de los Estados Unidos, que impulsó la investigación y el desarrollo de la nanotecnología e impulsó una reflexión crítica sobre sus implicaciones éticas y sociales; (2) el lanzamiento del Proyecto de Nanotecnología Responsable por parte del Centro Woodrow Wilson en 2005, que promovió la investigación y el diálogo sobre la nanoética; (3) la publicación en 2007 del libro *Nanoethics: The ethical and social implications of nanotechnology*, de Fritz Allhoff, Patrick Lin, James H. Moor y John Weckert (19), que se convirtió en un hito en la reflexión crítica sobre la ética y la nanotecnología; (4) la creación en 2007 del Centro Internacional para la Investigación en Nanotecnología Responsable, que promueve la investigación y la reflexión crítica sobre las alcances éticos y sociales sobre este tema; (6) el establecimiento en 2011 de la Red Global de Investigación en Nanotecnología Responsable, que conecta a investigadores y expertos en todo el mundo para promover la reflexión crítica y la investigación en ética y nanotecnología; (7) la aprobación en 2013 del Informe sobre Nanotecnología y Alimentos por parte del Parlamento Europeo (https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-6-2009-0255_ES.html), que llama a la regulación de la nanotecnología en

la industria alimentaria y a una reflexión crítica sobre el tema, y (8) la publicación en 2014 del Informe del Consejo de Bioética de España sobre Ética y Nanotecnología, que llama a la reflexión crítica y la regulación de la nanotecnología para proteger los derechos humanos y la justicia social (14).

Por otro lado, tenemos que entender que la relación entre nuevos materiales, nanotecnología y ética es compleja y multidimensional (de hecho, esta parte es especialmente delicada, al verse triangulada la ciencia con el mundo empresarial y las regulaciones gubernamentales), y puede abordarse según diversas perspectivas éticas y morales. En términos generales, la nanotecnología se centra en la manipulación y el control de materiales a nivel molecular y atómico, lo que ha dado lugar al desarrollo de nuevos materiales con características y propiedades únicas y sorprendentes (20). Sin embargo, la producción y utilización de estos también plantea importantes cuestiones éticas y sociales. Por ejemplo, la creación de materiales más resistentes y duraderos puede tener efectos positivos en diversas áreas como la industria, la construcción o la medicina. Sin embargo, también puede tener efectos negativos en el medio ambiente, especialmente si estos materiales no son biodegradables o su producción genera grandes cantidades de residuos tóxicos.

Otra cuestión ética importante relacionada con la nanotecnología y los nuevos materiales es la seguridad y la salud de las personas. La producción de nuevos materiales puede implicar el uso de sustancias tóxicas o peligrosas, lo que puede tener efectos negativos en la salud de los trabajadores y de las comunidades cercanas a las fábricas o plantas de producción (21). También es importante considerar cómo estos nuevos materiales pueden afectar la salud de los consumidores y usuarios finales, especialmente si se utilizan en dispositivos médicos o productos alimentarios (17).

Los agentes del debate, el breve estado de la cuestión

Christine Peterson es una autora y experta en tecnologías de la información y la nanotecnología, fundadora del Instituto Foresight (<https://>

foresight.org), una organización sin fines de lucro que se dedica a la educación y promoción de tecnologías avanzadas, que incluyen la nanotecnología. Peterson ha escrito extensamente sobre la ética y la nanotecnología, argumentando que es importante abordar las cuestiones éticas desde las primeras etapas del desarrollo de la tecnología. Peterson ha señalado que la nanotecnología plantea nuevas preguntas éticas que no se han abordado en el pasado.

En particular, la capacidad de la nanotecnología para manipular la materia a nivel atómico y molecular puede tener implicaciones profundas para la salud humana y el medio ambiente. También ha señalado que la nanotecnología tiene el potencial de aumentar la desigualdad económica y social, ya que los países y empresas que tienen acceso a la tecnología podrían tener una ventaja sobre los que no. En términos generales, ella ha defendido la necesidad de una aproximación cuidadosa y reflexiva a la nanotecnología, que incluya una consideración prudente de las cuestiones éticas y sociales. En particular, ha argumentado que se necesitan mayores esfuerzos para fomentar la transparencia y la participación pública en la investigación y el desarrollo de la nanotecnología (4).

Andrew Maynard, un reconocido experto en nanotecnología y ética, ha escrito extensamente sobre el tema. Según Maynard, la nanotecnología plantea desafíos éticos únicos debido a la capacidad de manipular la materia a una escala tan pequeña. Él sostiene que el enfoque ético en la nanotecnología debería centrarse en la seguridad, la justicia y la transparencia. Por otro lado, argumenta que la seguridad es fundamental para la ética de la nanotecnología porque aún no se comprenden completamente los riesgos potenciales para la salud y el medio ambiente asociados con la exposición a materiales nanoestructurados (7). La justicia es importante porque la nanotecnología podría crear desigualdades en la distribución de los beneficios y riesgos, y es importante que estos se distribuyan equitativamente. La transparencia es crucial para garantizar que los procesos de desarrollo y regulación de la nanotecnología sean abiertos y accesibles a todos los interesados, incluyendo al público en general. Maynard argumenta que es necesario

abordar la ética de la nanotecnología de manera proactiva y reflexiva, y que se necesitan enfoques interdisciplinarios para asegurar que la tecnología se desarrolle de manera responsable y ética.

Arthur Caplan es un bioeticista estadounidense conocido por sus contribuciones en el campo de la ética médica. Aunque no ha centrado sus investigaciones específicamente en la nanotecnología, ha hecho algunas observaciones y comentarios sobre las implicaciones éticas de esta tecnología emergente. En un artículo de opinión publicado en Forbes en 2016, Caplan discute las preocupaciones éticas que rodean a la nanotecnología en relación con la seguridad del consumidor, la justicia social y la privacidad (21). Sostiene que las preocupaciones éticas en torno a la nanotecnología son similares a las que rodean a otras tecnologías emergentes como la biotecnología y la inteligencia artificial.

Específicamente, Caplan argumenta que la nanotecnología tiene el potencial de aumentar la brecha entre ricos y pobres al permitir que los primeros tengan acceso a tecnologías más avanzadas mientras que los segundos se quedan atrás. También, señala la necesidad de que los responsables políticos regulen adecuadamente la nanotecnología para garantizar su seguridad y efectividad. En particular, destaca la necesidad de desarrollar estándares de seguridad y de etiquetado claros para los productos que contengan nanomateriales. Además, sugiere que las empresas que trabajan en nanotecnología deben ser transparentes sobre los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con sus productos. Por lo demás, hace hincapié en la necesidad de un enfoque ético para el desarrollo y la aplicación de la nanotecnología. Según él, es importante que los responsables políticos y los científicos trabajen juntos para garantizar que la nanotecnología se desarrolle de manera responsable y para minimizar los riesgos.

Susan Cozzens es una reconocida académica en el campo de la ciencia, la tecnología y la política pública, y ha realizado importantes contribuciones en el estudio de la nanotecnología y la ética. Algunos de sus principales argumentos son que la nanotecnología plantea desafíos éticos importantes debido a su potencial para transformar la naturaleza misma de la vida y la materia. Por ejemplo,

la capacidad de manipular átomos y moléculas individuales podría tener implicaciones significativas en campos como la medicina, la energía y la informática (11).

Por otro lado, que la nanotecnología también plantea desafíos regulatorios importantes debido a la naturaleza única de los materiales y procesos a nanoescala. La falta de comprensión completa de los riesgos potenciales y los posibles efectos adversos de los productos y tecnologías a nanoescala significa que se necesitan políticas y regulaciones sólidas y bien informadas para abordar estos desafíos (14). En este sentido, ella considera que los debates éticos en torno a la nanotecnología también deben considerar los desafíos globales, incluidos los desafíos de equidad y justicia social. Por ejemplo, es importante considerar cómo se pueden desarrollar y distribuir tecnologías a nanoescala de manera justa y equitativa, y cómo se pueden evitar las desigualdades y disparidades sociales. También, señala la importancia de una investigación multidisciplinaria y colaborativa en la nanotecnología y la ética. La colaboración entre expertos en ciencia, tecnología, ética, regulación y política puede ayudar a abordar los desafíos complejos y multifacéticos asociados con la nanotecnología.

Erik Fisher es un destacado académico en el campo de la ética y la política de la nanotecnología. En su trabajo, ha explorado cómo la nanotecnología está transformando la manera en que se lleva a cabo la investigación científica, así como la necesidad de desarrollar nuevas políticas públicas y estrategias de gobernanza para hacer frente a los desafíos éticos y sociales que plantea la nanotecnología (22). En particular, Fisher destaca la necesidad de involucrar una amplia gama de partes interesadas, que incluyen a los investigadores científicos, a los responsables políticos, a las empresas y a la sociedad en general en el proceso de desarrollo y aplicación de la nanotecnología. También aboga por la necesidad de una mayor transparencia y responsabilidad en el desarrollo de la nanotecnología y por la necesidad de considerar cuidadosamente las consecuencias morales y comunitarias del desarrollo nanotecnológico antes de su lanzamiento al mercado.

En el análisis de las contribuciones de Fritz Allhoff, junto a coautores, se destacan dos obras principales:

La primera, *Nanotechnology and society: current and emerging ethical issues* (23), reúne investigaciones que exploran las implicaciones éticas derivadas del avance de la nanotecnología. Este compendio subraya cómo la nanotecnología plantea desafíos regulatorios críticos y aborda aspectos clave como la privacidad, la seguridad y la equidad. Además, el texto revisa cómo estos desafíos se manifiestan en sectores específicos, como la medicina y la industria, que hacen énfasis en la importancia de adoptar un enfoque ético integral para guiar el desarrollo responsable de la nanotecnología.

La segunda, *Nanoethics: the ethical and social implications of nanotechnology* (19), profundiza en el impacto ético y social de la nanotecnología. Está organizado en tres partes, comienza introduciendo la relación entre nanotecnología y ética, sigue discutiendo problemas éticos detallados y finaliza examinando la nanotecnología a partir de una óptica global y multicultural. Este volumen trata temas éticos variados, desde el riesgo y la privacidad hasta la justicia y la sostenibilidad, los cuales proponen un debate equilibrado sobre los desafíos éticos y recomiendan estrategias para la participación de la sociedad en la toma de decisiones éticas sobre la nanotecnología. Ambas obras señalan la transformación potencial que la nanotecnología puede traer a la sociedad y subrayan la necesidad de una reflexión ética cuidadosa para navegar su futuro desarrollo de manera responsable.

Perspectiva crítica: reflexiones y avances en la nanoética

El trabajo *Nanotechnology and the challenges of equity, equality and development*, una compilación de Susan E. Cozzens y Jameson Wetmore (24), explora las cuestiones de equidad, igualdad y desarrollo relacionadas con la nanotecnología. Los autores argumentan que, aunque la nanotecnología tiene el potencial de mejorar la vida de las personas en todo el mundo, también hay preocupaciones sobre quiénes se beneficiarán más y quiénes se verán más afectados negativamente. Por otro lado, discuten

varios aspectos de la nanotecnología, como la salud, el medio ambiente y la seguridad. Señalan que los países más pobres pueden ser más vulnerables a los posibles riesgos de la nanotecnología y tener menos acceso a sus beneficios. También discuten que la nanotecnología podría crear una brecha aún mayor entre los países desarrollados y los países en desarrollo. Los autores proponen un enfoque de justicia distributiva para abordar estas preocupaciones. Argumentan que los beneficios y los riesgos de la nanotecnología deben distribuirse de manera justa entre todas las personas, independientemente de su origen geográfico, social o económico. Destacan la importancia de la participación pública y la transparencia en la toma de decisiones relacionadas con la nanotecnología.

El texto explora cómo la nanotecnología puede ser utilizada para abordar problemas sociales y ambientales, pero también cómo puede perpetuar la desigualdad y crear nuevas formas de marginación. Inicia con una introducción a la nanotecnología y su potencial para abordar problemas globales como la pobreza, el cambio climático y la salud pública. El resto de los autores discuten los desafíos de desarrollar tecnologías equitativas y justas, que no perpetúen las desigualdades existentes y consideran cómo los marcos de gobernanza y regulación pueden promover la equidad y la igualdad en la nanotecnología. Sigue examinando los aspectos éticos y políticos de la nanotecnología y explora cómo los intereses de diferentes grupos pueden influir en el desarrollo y uso de la nanotecnología.

Los autores también analizan las preocupaciones de seguridad y los riesgos asociados con la nanotecnología, y argumentan que la equidad y la igualdad deben ser consideradas en las decisiones sobre los riesgos y los beneficios de la nanotecnología. Además, el libro discute la importancia de involucrar a las comunidades locales y a las personas afectadas en la toma de decisiones sobre la nanotecnología, y aboga por un enfoque participativo en la gobernanza de la nanotecnología. Los autores concluyen que la nanotecnología puede ser una herramienta poderosa para abordar los desafíos globales, pero solo si se aborda de manera equitativa, justa y sostenible. En conclusión, el trabajo destaca la importancia de considerar las cuestiones de

equidad, igualdad y desarrollo en el desarrollo y la implementación de la nanotecnología, y propone un enfoque de justicia distributiva para abordar estas preocupaciones.

El texto *Nanotechnology, risk and communication* es una compilación de Alison Anderson, Alan Petersen, Clare Wilkinson y Stuart Allan (25), que examina los desafíos de comunicar los riesgos asociados con la nanotecnología a los diversos públicos interesados en esta tecnología emergente. Los autores destacan que la nanotecnología presenta riesgos desconocidos y potencialmente peligrosos para la salud y el medio ambiente, y que la falta de información precisa y accesible para el público puede aumentar la preocupación y la desconfianza hacia este campo. Explora los enfoques de comunicación de riesgos que se han utilizado en la nanotecnología, desde la comunicación unilateral hasta la participación pública activa en la toma de decisiones. Se analizan los diferentes tipos de públicos interesados, como los consumidores, los trabajadores, los reguladores y los grupos de interés, y cómo cada uno de ellos puede tener diferentes percepciones y preocupaciones sobre los riesgos asociados con la nanotecnología. Además, los autores sugieren que la comunicación efectiva de los riesgos asociados con la nanotecnología requiere una mayor transparencia y apertura por parte de los fabricantes y reguladores, así como una mayor colaboración entre los investigadores, los responsables políticos y los públicos interesados. Concluyen que una comunicación efectiva de los riesgos de la nanotecnología puede ayudar a garantizar que los beneficios potenciales de la tecnología se realicen de manera responsable y equitativa.

El artículo *Ethical issues in nanotechnology* de Uday Patel e Izabela Radecka (26) examina las principales inquietudes éticas sobre la nanotecnología y proporciona una discusión detallada sobre la naturaleza y el alcance de estos problemas. Describe los avances en la tecnología y el potencial de la nanotecnología en diversos campos como la medicina, la electrónica, la energía y la producción de materiales avanzados. A continuación, se discuten cuestiones de seguridad y salud, equidad, privacidad, responsabilidad y la evaluación de los riesgos y beneficios de la tecnología. Por otro

lado, profundiza en los posibles efectos tóxicos de los nanomateriales, tanto para los seres humanos como para el medio ambiente. También, se observan los problemas de justicia social relacionados con la nanotecnología, como la brecha digital y la desigualdad en el acceso a la tecnología. Así mismo, analiza cuestiones de privacidad, responsabilidad y evaluación de riesgos y beneficios.

La privacidad es un tema especialmente importante en la nanotecnología debido a la capacidad de la tecnología para recolectar y transmitir datos personales. Resulta una preocupación clave debido a la dificultad de atribuir la responsabilidad por los efectos negativos de la tecnología. Finalmente, la evaluación de riesgos y beneficios es necesaria para garantizar que la tecnología se utilice de forma responsable y ética. El artículo proporciona una visión general de las preocupaciones éticas relacionadas con la nanotecnología y proporciona una discusión detallada de cada uno de los temas clave. Concluye con una discusión sobre la importancia de abordar estos problemas éticos de manera responsable para avalar que la nanotecnología se utilice para mejorar la calidad de vida de las personas y del planeta en general.

El libro compilado *Nanoethics and nanotoxicology: ethical and societal considerations* (27) discute las cuestiones éticas y sociales relacionadas con la nanotecnología, con un enfoque en la nanotoxicología, es decir, los efectos tóxicos de los materiales a escala nanométrica en el medio ambiente y la salud humana. Los autores señalan que la nanotecnología ha generado grandes expectativas en términos de innovación y avances tecnológicos, pero también plantea preocupaciones éticas y sociales relacionadas con la seguridad y el medio ambiente. Comienza describiendo los posibles impactos ambientales y de salud de la nanotecnología, incluyendo la toxicidad de los nanomateriales y su posible acumulación en el medio ambiente. Los autores argumentan que estas cuestiones deben ser abordadas de manera ética y socialmente responsable, y que los riesgos deben ser evaluados y gestionados de forma adecuada. El texto aborda la responsabilidad ética de los investigadores y las empresas en la nanotecnología, y la necesidad de una mayor transparencia y divulgación de información en la

investigación y el desarrollo de productos basados en la nanotecnología. Además, se discute la necesidad de una regulación adecuada y el papel de la sociedad civil en el control de la nanotecnología. Resalta la importancia de abordar temas éticos y sociales relacionados con la nanotecnología y la nanotoxicología, y argumenta que esto es crucial para garantizar que los beneficios de la nanotecnología se maximicen mientras se minimizan los riesgos y se protege el bienestar de las personas y el medio ambiente.

El artículo de Joel Rothstein Wolfson, *Social and ethical issues in nanotechnology: lessons from biotechnology and other high technologies* (28), se enfoca en la regulación de la nanotecnología y su papel en la promoción de la ética. Rothstein discute que, aunque la regulación no puede garantizar la ética en sí misma, es un componente clave para promover prácticas éticas en la nanotecnología. El autor analiza los desafíos éticos específicos de la nanotecnología como la seguridad y la salud en el lugar de trabajo, la incertidumbre sobre los riesgos ambientales y de salud, la privacidad y la distribución justa de beneficios y riesgos, y la responsabilidad social y ambiental. Rothstein examina los enfoques regulatorios actuales como la autorregulación, la regulación gubernamental y la regulación internacional, y analiza sus fortalezas y debilidades. Por último, argumenta que una regulación adecuada de la nanotecnología puede ayudar a promover prácticas éticas y evitar posibles daños a la salud y el medio ambiente. Sin embargo, señala que la regulación por sí sola no es suficiente para garantizar la ética en la nanotecnología y que se necesitan esfuerzos adicionales para fomentar la responsabilidad social y la educación ética en la comunidad científica y empresarial.

Nanotechnology and society: the evolution of risk es un artículo de Dan Kahan (29), que analiza las cuestiones éticas, sociales y políticas relacionadas con la nanotecnología. El texto se divide en tres secciones: riesgo, gobernanza y catástrofe. En la sección de riesgo, los autores exploran las posibles consecuencias negativas de la nanotecnología como la toxicidad de los nanomateriales, el riesgo de exposición en el lugar de trabajo y el impacto ambiental. También se discute la falta de

información disponible sobre los riesgos potenciales y la necesidad de una evaluación rigurosa de riesgos. En cuanto a la gobernanza, los autores analizan los desafíos de regular la nanotecnología. Se discuten temas como la necesidad de transparencia y participación pública en la toma de decisiones, la responsabilidad social de las empresas y la necesidad de coordinación entre los gobiernos y las organizaciones internacionales. Finalmente, en la sección de “catástrofe”, los autores discuten posibles escenarios de desastres relacionados con la nanotecnología, como la liberación accidental de nanomateriales tóxicos en el medio ambiente o la posibilidad de usos malintencionados. También se discute la necesidad de planes de contingencia y la importancia de la prevención en la gestión de riesgos.

El artículo de 2005 de Susanne, Casado y Buxó Rey, *What challenges offers nanotechnology to bioethics?* (30) y los capítulos de Buxó (31) y García (32), *Bioética y nanotecnología*, discuten la nanotecnología a partir de una óptica ética. Subrayan su etapa inicial y su impacto social desconocido, abarcando desde sus fundamentos hasta sus aplicaciones y regulaciones. Analizan la responsabilidad corporativa y científica y las consecuencias en salud y medio ambiente. Resaltan la importancia de un debate ético y la participación ciudadana en su desarrollo. Buxó, en *Dialogar la nanoética* (33), aborda estos dilemas con énfasis en los derechos humanos y la justicia social, instando a una regulación cuidadosa y a una discusión inclusiva.

Otro de los trabajos que está en esta línea es el de José Manuel de Cózar Escalante, *La vida en una nanocasa. Efectos socioambientales de las nanotecnologías* (34), en el que analiza la relación entre la nanotecnología y la justicia social, la igualdad y la solidaridad según la perspectiva de los derechos humanos. En cuanto a la justicia social, de Cózar señala que la nanotecnología puede ser utilizada para mejorar las condiciones de vida de las personas más desfavorecidas. Por ejemplo, se pueden desarrollar tecnologías más eficientes y menos contaminantes para el suministro de agua y energía en las comunidades más pobres. Sin embargo, también puede haber un riesgo de exclusión social si estas tecnologías son demasiado costosas o

inaccesibles para las personas más pobres. En relación con la igualdad, señala que la nanotecnología puede tener efectos positivos en términos de igualdad de oportunidades en la educación y el acceso al empleo, ya que el desarrollo de esta tecnología requiere una formación especializada que puede ofrecer nuevas oportunidades de empleo. Sin embargo, también puede haber una brecha de desigualdad en la accesibilidad a esta formación, que solo estaría disponible para personas de ciertos estratos socioeconómicos. Por último, en relación con la solidaridad, de Cózar destaca la necesidad de que la investigación y desarrollo de la nanotecnología estén orientados hacia el beneficio común en lugar del beneficio exclusivo de ciertas empresas o países.

Enfatiza en la importancia de que las decisiones sobre el desarrollo y la aplicación de la nanotecnología se basen en el diálogo y la colaboración con los grupos más vulnerables de la sociedad, y que se respeten los derechos humanos y los valores éticos en todo momento. En conclusión, en todos sus trabajos José Manuel de Cózar defiende que la nanotecnología puede tener un papel importante en la promoción de la justicia social, la igualdad y la solidaridad, pero solo si se aborda de manera crítica y se toman en cuenta los derechos humanos y los valores éticos desde el principio de su desarrollo y aplicación.

Prospectiva

En un mundo cada vez más influenciado por los avances de la nanotecnología, enfrentamos un horizonte lleno de oportunidades y desafíos. Este análisis prospectivo se centra en prever cómo los dilemas éticos, la seguridad y la privacidad evolucionarán bajo la visión de una tecnología revolucionaria, que destaca la necesidad de una aproximación cuidadosa y bien fundamentada para su integración en la sociedad, como lo menciona Hans Jonas (22), al considerar necesario prevenir las potenciales consecuencias del desarrollo tecnológico.

La perspectiva de expertos como Christine Peterson y Andrew Maynard subraya la urgencia de adoptar enfoques éticos que abarquen la seguridad, justicia y transparencia no solo como principios

abstractos, sino como pilares fundamentales de toda iniciativa nanotecnológica. La colaboración propuesta por Arthur Caplan entre científicos y responsables políticos es crucial para la creación de un marco regulador que asegure un avance responsable, el cual minimice los riesgos para la salud y el medio ambiente.

Anticipamos que en el futuro la interacción entre la nanociencia y la sociedad deberá ser más inclusiva y democrática, tal como sugieren Susan Cozzens y Erik Fisher. La participación activa de las comunidades y la consideración de las implicaciones sociales y globales serán determinantes para garantizar que los beneficios de la nanotecnología sean accesibles para todos y, al mismo tiempo, evitar las exacerbaciones de desigualdades existentes.

En este contexto, anticipamos la creación de políticas públicas y estrategias de gobernanza que se extiendan más allá de la regulación tradicional. Las recomendaciones de Alison Anderson, Alan Petersen, Clare Wilkinson y Stuart Allan apuntan hacia una comunicación efectiva y la educación pública como herramientas esenciales para fomentar una comprensión equilibrada de los riesgos y beneficios asociados con la nanotecnología (35).

En cuanto a la salud y seguridad, los estudios de Uday Patel e Izabela Radecka nos recuerdan la importancia de la vigilancia continua para identificar y mitigar posibles efectos tóxicos de los nanomateriales. Este enfoque proactivo debe ir acompañado de esfuerzos para cerrar la brecha digital y garantizar un acceso equitativo a la tecnología.

Mirando hacia adelante, nos esforzamos por establecer un futuro en el que la nanotecnología se desarrolle dentro de un marco ético robusto que respete los derechos humanos y promueva la justicia social, como plantean María Jesús Buxó Rey y José Manuel de Cózar Escalante. El compromiso con un desarrollo equitativo y la deliberación cuidadosa de cómo las innovaciones pueden impactar en diversas esferas de la vida será esencial.

Hacia un futuro responsable en la era de la nanotecnología, se subraya la necesidad de una colaboración interdisciplinaria y transnacional para abordar los desafíos presentes y futuros de la nanotecnología. Este enfoque colaborativo debe ser flexible y evolucionar constantemente para

responder a los rápidos cambios en la tecnología y en la sociedad (36). Al hacerlo, podemos asegurar que la nanotecnología no solo avance en términos de innovación y eficiencia, sino que también contribuya positivamente al bienestar humano y la sostenibilidad ambiental.

A manera de conclusiones

La reflexión sobre la nanoética como parte del desarrollo de la nanotecnología es un tema complejo que exige una consideración cuidadosa de múltiples factores éticos, sociales y ambientales. El análisis y la discusión sobre estos aspectos son cruciales para asegurar que el avance tecnológico se alinee con los valores humanos fundamentales y promueva un progreso equitativo y justo para todos.

La importancia de un enfoque reflexivo y proactivo se resalta en el contexto de la nanotecnología, donde expertos como Peterson, Maynard y Caplan enfatizan la necesidad de una evaluación detallada de la seguridad, la justicia y la transparencia. Estos conceptos no solo son fundamentales para el desarrollo tecnológico en sí, sino que también son cruciales para asegurar que los avances beneficien a la sociedad en su conjunto, sin exacerbar las desigualdades existentes o introducir nuevos riesgos.

La participación pública y la responsabilidad social emergen como temas centrales en los discursos sobre nanoética. Según Cozzens, Fisher, y Allhoff y Lin, involucrar a diversos grupos en el diálogo sobre nanotecnología no solo mejora la transparencia y la aceptación de la tecnología, sino que también asegura que diferentes perspectivas y preocupaciones sean consideradas en el proceso de desarrollo. Esto es vital para construir políticas y prácticas que sean inclusivas y equitativas.

Los trabajos examinados sugieren que es esencial abogar por un desarrollo de la nanotecnología que sea equitativo y cuidadoso. Esto implica no solo crear políticas bien informadas, sino también incluir una amplia gama de voces en el diálogo sobre cómo se deben usar y regular estas tecnologías. La inclusión y la equidad deben ser piedras angulares en el enfoque hacia la nanoética para asegurar que todos tengan la oportunidad de beneficiarse de

los avances tecnológicos y que nadie quede desprotegido ante posibles daños.

La nanoética trasciende las consideraciones tecnológicas puras y plantea cuestiones profundas sobre el impacto de la nanotecnología en la sociedad y el medio ambiente. Los autores como Anderson y colaboradores, Patel y Radecka, y Wolfson, instan a una reflexión sobre cómo la nanotecnología puede afectar aspectos fundamentales de la vida y la naturaleza. Abordan desde la toxicidad y la privacidad hasta las implicaciones más amplias de la justicia social y ambiental, subrayando la necesidad de un enfoque cuidadoso y bien regulado.

Finalmente, la convergencia de opiniones en estos trabajos sugiere que abordar los desafíos éticos de la nanotecnología requiere un esfuerzo colaborativo y multidisciplinario. Esto señala la importancia de una gobernanza inclusiva y responsable que integre diversas perspectivas y conocimientos. Solo mediante la combinación de experticia técnica, sensibilidad ética y compromiso social podemos esperar navegar de manera efectiva los complejos desafíos que presenta la nanotecnología.

La discusión en torno a la nanoética es esencial para guiar el desarrollo de la nanotecnología de

una manera que respete y promueva los valores éticos y sociales. Es imperativo que los investigadores, legisladores, industrias y la sociedad en general participen en un diálogo continuo y constructivo para asegurar que la nanotecnología se desarrolle de manera responsable, equitativa y sostenible. La nanoética no solo nos desafía a considerar las implicaciones inmediatas de las innovaciones tecnológicas, sino también a reflexionar sobre la clase de futuro que deseamos construir.

Agradecimientos

Expresamos nuestra sincera gratitud hacia los revisores de este artículo por sus constructivas críticas y sugerencias, las cuales han sido fundamentales para perfeccionar tanto la estructura como el contenido de este trabajo. Su meticulosa revisión ha sido clave para enriquecer este documento.

Extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de México y a la Universidad de Jaén por su invaluable apoyo y por brindarnos los recursos necesarios para la conclusión de este trabajo y por su dedicación a la promoción de la investigación y la excelencia académica.

Referencias

1. Küng H. Proyecto de una ética mundial. Madrid: Editorial Trotta; 2006.
2. Leão HM, Gallo JH, Nunes R. Una bioética para hoy con enormes desafíos. *Revista Bioética*. 2022;30(4):695-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1983-80422022304000PT>
3. Villalobos J. La bioética y los desafíos de futuro. *Opción*. 2022;37(96):7-11. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7470444>
4. Rafiquea M, Tahirb MB, Rafiquec MS, Hamzab M. History and fundamentals of nanoscience and nanotechnology. En: Tahir MB, Rafique M, Rafique MS, editores. *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*. Amsterdam: Elsevier; 2020. p. 1-25.
5. Triantis TM, Hiskia A. [Editores]. *Photocatalysis: Applications*. Royal Society of Chemistry; 2022. Disponible en: <https://books.rsc.org>
6. Sharon M, editor. *Histor Sharon M*, Editor. *History of nanotechnology*. Wiley Online Library; 2021. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com>
7. Lindsay SM. *Introduction to Nanoscience*. Nueva York, Oxford: Oxford University Press; 2010.
8. Drexler EK. *La nanotecnología. El surgimiento de las máquinas de creación*. Barcelona: Gedisa; 2014.
9. Kaplan S, Radin J. Bounding an emerging technology: Para-scientific media and the Drexler-Smalley debate about nanotechnology. *Soc Stud Sci*. 2011;41(4):457-85. doi: 10.1177/0306312711402722.
10. Bueno O. The Drexler-Smalley Debate on Nanotechnology: Incommensurability at Work? *Hyle*. 2004;10(2):83-98.
11. Martín-Gago JA, Briones C, Casero E y Serena P. *El nanomundo en tus manos: Las claves de la Nanociencia y la Nanotecnología*. Madrid: Crítica; 2014.

12. Borges de Souza P, Fernandes Ramos D, Gubert PG, Cigognini E, Primo FT. Pesquisa e desenvolvimento de nanomedicamentos: olhar bioético. *Revista Bioética*. 2023;31(1):1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1983-803420233014PT>
13. Osorio-García SN; Roberto-Alba NF. Ética, ecología y ecosofía: perspectivas divergentes para refundamentar la bioética global. *Revista Latinoamericana de Bioética*. 2023;23(1):121-136. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-47022023000100121&lng=es
14. Osorio-García SN, Roberto-Alba NF. Bioética global: entre normatividad biológica y normalización social. *Trilogía Ciencia Tecnol Sociedad*. 2023;15(29):1-22. Disponible en: <https://doi.org/10.22430/21457778.2450>
15. Sparrow R. The social impacts of nanotechnology: An ethical and political analysis. *J Bioeth Inq*. 2009;6(1):13-23. doi: 10.1007/s11673-009-9139-4.
16. Díaz Marcos J, *et al*. Libro blanco de las nanotecnologías. Madrid, Pamplona: Aranzadi; 2021.
17. Tacumá Prada CP, Tovar Riveros BE. La relación entre Bioética y Salud Pública. *Rev Latinoam Bioética*. 2021;21(2):143-56. Disponible en: <https://doi.org/10.18359/rlbi.5020>
18. Wee ATS [Editor]. Selected topics in nanoscience and nanotechnology. New Jersey, Londres, Singapur: World Scientific; 2009. Disponible en: <https://doi.org/10.1142/7214>
19. Allhoff F, Lin P, Moor JH y Weckert J., editores. *Nanoethics: The Ethical and Social Implications of Nanotechnology*. New Jersey: Wiley; 2007
20. National Nanotechnology Initiative. Ethical, Legal, and Societal Issues; 2021. [Internet]. Disponible en: <https://www.nano.gov>
21. Mantilla-García JC. Bioética: orígenes y actualidad. *MedUNAB*. 2022;25(2):148-50. Disponible en: <https://doi.org/10.29375/01237047.4494>
22. Jonas H. El principio de responsabilidad: Ensayo de una ética para la civilización tecnológica [Internet]. Herder Editorial; 2014.
23. Allhoff F, Lin P., editores. *Nanotechnology and Society: Current and Emerging Ethical Issues*. Springer; 2008.
24. Cozzens SE, Wetmore JM, editores. *Nanotechnology and the Challenges of equity, equality and development*. Springer; 2010.
25. Anderson A, Petersen A, Wilkinson C, Allan S. *Nanotechnology, Risk and Communication*. Palgrave Macmillan UK; 2009.
26. Patel U, Radecka I. Ethical Issues in Nanotechnology. *J Long-Term Eff Med Implants*. 2007;17(3):271-80.
27. Houdy P, Lahmani M, Marano F, editores. *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer; 2016
28. Wolfson JR. Social and Ethical Issues in Nanotechnology: Lessons from Biotechnology and Other High Technologies. *Biotechnol Law Rep*. 2003;22:376-96.
29. Kahan D. Nanotechnology and Society: The Evolution of Risk. *Nat Nanotechnol*. 2009;4(11):705-6.
30. Susanne C, Casado M, Buxó Rey MJ. What Challenges Offers Nanotechnology to Bioethics? *Rev Derecho Genoma Hum*. 2005;22:27-45.
31. Buxó Rey MJ. Nanodiálogo: la comunicación y la implicación pública en los avances nanobiotecnológicos. En: Casado González M, editor. *Bioética y nanotecnología*. Navarra: Thomson Civitas; 2010.
32. García R. ¿Necesitamos una nanoética? En: Casado González M, editor. *Bioética y nanotecnología*. Navarra: Thomson Civitas; 2010.
33. Buxó Rey MJ. Dialogar la nanoética. *Rev Bioét Derecho*. 2008;(12):12-16.
34. De Cózar Escalante JM. La vida en una nanocasa. Efectos socioambientales de las nanotecnologías. En: Casado M., coordinador. *Bioética y nanotecnología*. Civitas Thomson Reuters; 2010. p. 255-69
35. Anderson A, Allan S, Petersen A, Wilkinson C. Nanoethics: The Role of News Media in Shaping Debate. En: Luppini R, Adell R, compiladores. *Handbook of Research on Technoethics*. Ottawa: University of Ottawa, Information; 2008. p. 373-90. Science Reference. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-022-6.ch025>
36. Anta Féliz JL. Nanotecnología, éticas y (no) futuro. *Con Texto Humano*. 2023; 2(1):45-59. Disponible en: <https://contextohumano.uaemex.mx/article/view/22206>

