

NANOTECNOLOGÍA PARA LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL: UNA PERSPECTIVA SOBRE RIESGOS Y REGULACIONES EN MÉXICO

Victor Ruíz Santoyo ^{a*}, Merced Martínez Rosales ^b, J. A. Cruz-Mérida ^c, Beatriz A.
Andrade Espinoza ^d

^a Laboratorio de Investigación Interdisciplinaria, Nanoestructuras y Biomateriales, ENES León, UNAM, Boulevard UNAM #2011, Los Tepetates, León Gto., C.P. 37684, México. vruizs@enes.unam.mx

^b Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Guanajuato, C.P. 36050, México.

^c Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, Col. Universidad, Puebla, Puebla, C.P. 72570, México.

^d Departamento de Ciencias Biomédicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Nuevo Periférico Oriente 555, Tonalá, Jalisco, C.P. 45425, México.

Resumen

La nanotecnología ofrece soluciones innovadoras para la remediación ambiental, con aplicaciones que van desde la purificación de agua hasta la descontaminación de suelos y aire. Sin embargo, el uso de nanomateriales plantea desafíos significativos en cuanto a los riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud humana. Este artículo explora los beneficios de estas tecnologías emergentes, al tiempo que destaca las preocupaciones sobre la toxicidad, persistencia y dispersión de nanopartículas en el entorno natural. A medida que la nanotecnología se integra en prácticas de remediación, se hace evidente la necesidad de desarrollar regulaciones legales y adecuadas que garanticen su uso seguro. En el presente documento se propone un enfoque basado en la investigación responsable, la evaluación de riesgos y la participación de la sociedad para abordar estos desafíos. Este artículo busca informar y sensibilizar a la comunidad científica, reguladores industriales y público en general sobre la importancia de una regulación proactiva en la nanotecnología aplicada a la remediación ambiental.

Palabras clave: Nanotecnología; remediación ambiental; riesgos; regulación.

NANOTECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTAL REMEDIATION: A PERSPECTIVE ON RISKS AND REGULATIONS IN MEXICO

Abstract

Nanotechnology offers innovative solutions for environmental remediation, with applications ranging from water purification to soil and air decontamination. However, the use of nanomaterials poses significant challenges in terms of potential risks to the environment and human health. This article explores the benefits of these emerging technologies, while highlighting concerns about the toxicity, persistence, and dispersion of nanoparticles in the natural environment. As nanotechnology becomes integrated into remediation practices, the need to develop appropriate regulations to ensure its safe use becomes apparent. This paper proposes an approach based on responsible research, risk assessment and societal involvement to address these challenges. This paper seeks to inform and sensitize the scientific community, industrial regulators, and the general public on the importance of proactive regulation in nanotechnology applied to environmental remediation.

Keywords: Nanotechnology; environmental remediation; risks; regulation.

1. Introducción

La nanotecnología ha emergido como una de las áreas más prometedoras de la ciencia y la ingeniería en el siglo XXI. Su capacidad para manipular la materia a escalas atómicas y moleculares, específicamente en un rango de 1 a 100 nanómetros, ha abierto un vasto horizonte de posibilidades para el beneficio humano (Reihanifar y col., 2024). A medida que los desafíos ambientales globales se agravan, las soluciones basadas en nanomateriales ganan terreno como alternativas eficientes y efectivas para mitigar el daño ambiental. Sin embargo, junto con estos avances, surgen cuestiones cruciales sobre los posibles riesgos y la necesidad de una regulación adecuada para garantizar que estas tecnologías no generen problemas mayores a los que intentan resolver (Zhu y col., 2024). La remediación ambiental con nanotecnología se basa en el uso de materiales con propiedades únicas, que permiten la captura, neutralización o degradación de contaminantes en el ambiente mediante mecanismos físicos, químicos y electroquímicos. Estos nanomateriales pueden actuar a través de procesos como adsorción, catálisis, reducción-oxidación o interacción electrostática, permitiendo la

eliminación selectiva de agentes tóxicos específicos. Gracias a estas características, los nanomateriales se consideran herramientas prometedoras para remediar áreas contaminadas que serían inaccesibles o costosas de tratar con métodos tradicionales (Ningombam y col., 2024). A pesar de estos y otros muchos beneficios, una de las principales preocupaciones es la toxicidad potencial de las nanopartículas en sus diferentes morfologías (Fig. 1), tanto para los organismos acuáticos y terrestres, como para los seres humanos. La pequeña escala de las nanopartículas les permite interactuar con sistemas biológicos de maneras que no se observan con materiales más grandes, lo que puede llevar a efectos adversos imprevistos (Jiang Luo y col., 2024). Además, la persistencia y movilidad de los nanomateriales a través de suelos, cuerpos de agua y atmósfera en el medio ambiente son aspectos que requieren una atención cuidadosa, porque existe la posibilidad de que se acumulen en ecosistemas e ingresen en cadenas alimentarias. Este comportamiento plantea un desafío significativo para la gestión de riesgos, ya que las consecuencias

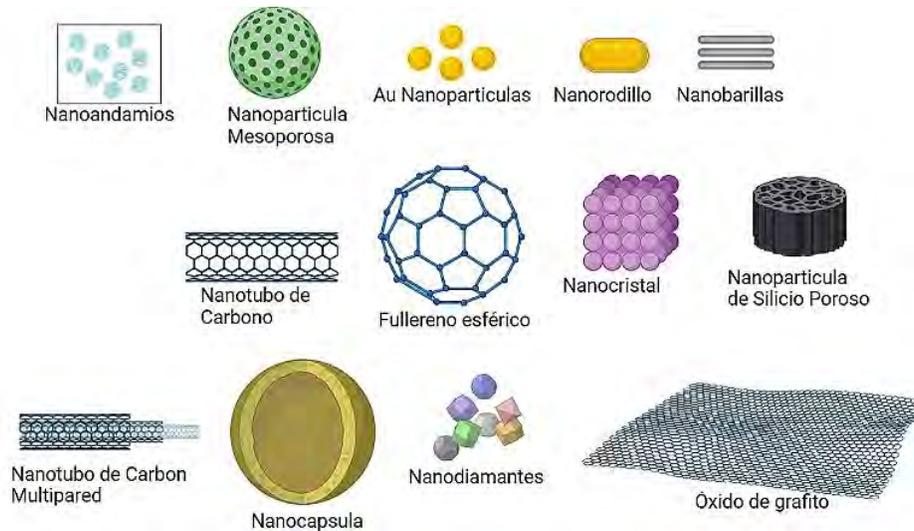


Figura 1. Diferentes morfologías que pueden presentar los nanomateriales. Hecho en biorender.com

de una liberación accidental o no controlada de nanomateriales podrían ser difíciles de prever y mitigar (Ouda y col., 2023). Actualmente, las normativas específicas para la nanotecnología son limitadas, y muchas de las regulaciones existentes no abordan adecuadamente las particularidades de los nanomateriales. Esto crea un vacío en la protección ambiental y de seguridad pública que deben ser abordados a medida que estas tecnologías se integran cada vez más en la vida diaria. En el presente documento exploraremos en detalle los riesgos asociados con la nanotecnología en la remediación ambiental, revisaremos el estado actual de las regulaciones y propondremos enfoques integrales para una gestión responsable y segura de estas tecnologías.

2. Nanomateriales en la Remediación Ambiental

Con la evolución de la nanotecnología, se ha abierto una nueva era en la gestión y tratamiento de la contaminación, ofreciendo alternativas más eficientes frente a los tratamientos tradicionales, que suelen ser extensivos, costosos y, en muchos casos, poco efectivos para la eliminación completa de contaminantes (Arabzadeh Nosratabad y col., 2024). Los métodos convencionales, como la filtración mecánica, el tratamiento químico y la bioremediación, requieren largos periodos de aplicación, altos consumos de energía y recursos, además de generar residuos secundarios que complican aún más la remediación ambiental. En contraste, el desarrollo de nanomateriales con propiedades únicas ha permitido superar muchas de estas

limitaciones. Su alta relación superficie-volumen les otorga una reactividad química excepcional, lo que mejora la eficiencia en la captura, degradación y neutralización de contaminantes a nivel molecular (Ravi y col., 2024). Por ejemplo, en el tratamiento de agua, las tecnologías convencionales, como la ósmosis inversa y la precipitación química, implican altos costos operativos y un mantenimiento constante. En respuesta a estos desafíos, se han integrado nanomateriales como nanopartículas de óxido de hierro, óxido de titanio y nanocompuestos de carbono, que permiten la eliminación de metales pesados, pesticidas y contaminantes orgánicos con menor consumo de reactivos y energía. Estos nanomateriales, al actuar como fotocatalizadores o adsorbentes, pueden degradar o retener contaminantes de manera más rápida y efectiva que los sistemas tradicionales, reduciendo significativamente los costos operativos y el impacto ambiental (Zhang y col., 2024). Asimismo, la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados ha sido históricamente un proceso prolongado y oneroso, que implica excavaciones masivas, transporte de residuos peligrosos y tratamientos in situ de baja eficiencia. En este contexto, el uso de nanopartículas como el hierro cero valente (nZVI) ha demostrado ser

una alternativa rentable y eficaz, ya que facilita la reducción y transformación de contaminantes en compuestos menos tóxicos sin la necesidad de remover grandes volúmenes de suelo. Esta tecnología no solo optimiza el proceso de remediación, sino que también disminuye el tiempo y el costo de los tratamientos extensivos convencionales (Ortiz-Galvez y col., 2024). Por otro lado, la contaminación atmosférica en entornos urbanos representa otro desafío costoso y difícil de mitigar con los métodos tradicionales, como los filtros de carbón activado o los sistemas de lavado de gases. Estos procesos requieren reemplazos constantes y generan desechos adicionales. En cambio, los nanomateriales han permitido desarrollar filtros de aire avanzados capaces de capturar partículas finas, gases tóxicos y compuestos volátiles con una eficiencia superior y una vida útil más prolongada. Además, ciertos nanomateriales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio, pueden descomponer contaminantes orgánicos presentes en el aire mediante procesos fotoquímicos, proporcionando una alternativa más sostenible y de menor costo a largo plazo (T. Gupta y col., 2021). En general, la nanotecnología ofrece soluciones innovadoras y económicamente viables para la remediación ambiental, reduciendo los

altos costos y tiempos prolongados de los tratamientos tradicionales. Su capacidad para ser diseñada con alta selectividad permite atacar contaminantes específicos sin afectar el entorno circundante, minimizando el impacto en los ecosistemas (Xiao y col., 2024). Además, su versatilidad les permite aplicarse en diversos escenarios de contaminación, desde aguas subterráneas hasta la purificación de gases industriales, optimizando así los recursos económicos y operativos en la gestión ambiental, Tabla 1.

3. Riesgos Asociados al Uso de Nanomateriales

A pesar de las notables ventajas que ofrece la nanotecnología en la remediación ambiental, su uso también presenta desafíos significativos. Estos riesgos están relacionados principalmente con la toxicidad potencial de los nanomateriales, su persistencia en el medio ambiente, y la incertidumbre sobre sus efectos a largo plazo en los ecosistemas y la salud humana. La evaluación y gestión de estos riesgos es esencial para garantizar que la nanotecnología no cause más daño del que pretende mitigar (Azizah y col., 2024). Una de las preocupaciones más importantes en el

uso de nanomateriales es su toxicidad. Debido a su tamaño extremadamente pequeño (< 100 nm), las nanopartículas pueden interactuar con organismos vivos de maneras que no se observan con materiales más grandes. Estas interacciones pueden tener efectos adversos inesperados. Por ejemplo, algunas nanopartículas metálicas, como las de plata o zinc, han mostrado ser altamente tóxicas para microorganismos acuáticos y terrestres, lo que podría alterar significativamente los ecosistemas si se liberan en grandes cantidades (Vardakas y col., 2024). Además, ciertos nanomateriales pueden generar especies reactivas de oxígeno (ROS) oxidantes, lo que puede llevar a daños celulares en plantas y animales, (Fig. 2).

Estos efectos pueden ser particularmente preocupantes en organismos más sensibles, como los peces o los invertebrados acuáticos, que podrían experimentar mortalidad o cambios en su desarrollo debido a la exposición a nanopartículas. Otra preocupación es la persistencia de los nanomateriales en el medio ambiente. Algunas nanopartículas pueden resistir la degradación y permanecer en el suelo, el agua o el aire durante largos períodos.

Tabla 1. Nanomateriales para la remediación ambiental, usos y aplicaciones.

Nanomaterial	Aplicación Ambiental	Referencia
Óxido de Hierro (Fe ₃ O ₄)	Remoción de metales pesados, contaminantes orgánicos, residuos peligrosos. Separación magnética.	(Roy y col., 2021)
Dióxido de Titanio (TiO ₂)	Fotocatalizador para la degradación de contaminantes orgánicos en agua y aire bajo irradiación UV.	(Zahmatkesh y col., 2023)
Óxido de Cobre (CuO)	Eliminación fotocatalítica y adsorción de contaminantes acuosos como colorantes, metales pesados y fármacos.	(Saleem y col., 2022)
Dióxido de Estaño (SnO ₂)	Eliminación fotocatalítica y adsorción de contaminantes acuosos como pesticidas, herbicidas y fármacos.	(Cheriyamundath & Vavilala, 2021)
Nanopartículas de plata (AgNPs)	Desinfección de agua debido a sus propiedades antibacterianas.	(Altaf y col., 2021)
Nanotubos de carbono (CNTs)	Adsorción de contaminantes por su gran área superficial, alta conductividad y resistencia mecánica.	(Anusha y col., 2024)
Óxido de zinc (ZnO)	Fotocatalizador en la degradación de contaminantes orgánicos y purificación del aire.	(Vignesh y col., 2012)
Nanopartículas de cero valente de hierro (nZVI)	Remediación de suelos y aguas contaminadas con metales pesados y contaminantes orgánicos clorados.	(Cardito y col., 2025)
Óxido de cerio (CeO ₂)	Eliminación de gases contaminantes y mejora de la calidad del aire mediante almacenamiento y liberación de oxígeno.	(Lara-López y col., 2017)
Grafeno y óxido de grafeno (GO)	Adsorción de metales pesados y compuestos orgánicos en aguas contaminadas.	(Sharma y col., 2018)
Nanopartículas de oro (AuNPs)	Detección y remediación de contaminantes por sus propiedades catalíticas.	(Che-Galicia y col., 2021)
Nanopartículas de sílice (SiO ₂)	Adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos en la remediación de aguas.	(Xie y col., 2022)

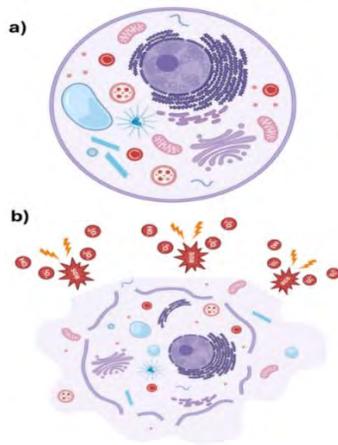


Figura 2. Célula sana a) y célula destruida por efecto de ROS b). Elaboración propia hecha en biorender.com

Esta persistencia plantea el riesgo de bioacumulación, donde los nanomateriales se concentran en organismos vivos a lo largo de la cadena alimentaria. La movilidad de las nanopartículas, impulsada por su pequeño tamaño y propiedades fisicoquímicas, también significa que pueden dispersarse ampliamente en el medio ambiente, alcanzando áreas alejadas del punto de liberación inicial. El impacto potencial de los nanomateriales en la salud humana es una de las áreas más estudiadas, pero también una de las más complejas (Zickgraf y col., 2023). Las nanopartículas pueden ingresar al cuerpo humano a través de la inhalación, la ingestión

o el contacto con la piel y una vez dentro del cuerpo, pueden atravesar barreras biológicas, como la barrera hematoencefálica, y acumularse en órganos vitales, lo que podría causar daños a nivel celular y molecular (Vogel, 2024). Algunos estudios han mostrado que la exposición prolongada a ciertas nanopartículas puede inducir respuestas inflamatorias, estrés oxidativo, e incluso daños al ADN, aumentando potencialmente el riesgo de enfermedades crónicas como el cáncer. Aunque la investigación en esta área está en curso, la falta de datos a largo plazo y la variabilidad en las respuestas biológicas a diferentes tipos de nanomateriales hacen que sea difícil evaluar completamente los riesgos para la salud humana (R. K. Gupta y col., 2024), Tabla 2. Es importante mencionar que los efectos de los nanomateriales dependen de factores como el tamaño, la dosis, la forma, la superficie y el tipo de organismo expuesto. En organismos animales, los principales efectos tóxicos incluyen la inflamación y el estrés oxidativo, mientras que en plantas el daño más común ocurre a nivel de las raíces y los procesos fotosintéticos.

Tabla 2. Afectaciones causadas por continuo contacto con óxidos nanoestructurados

Nanomaterial	Daño a Nivel Celular, Molecular y/o en Órganos en Animales/Plantas	Referencia
Óxido de Zinc (ZnO)	Induce estrés oxidativo, daño al ADN, apoptosis en células de mamíferos; genera ROS y daño en la membrana celular en plantas. Causa disfunción pulmonar en ratones.	(Khan y col., 2021)
Óxido de Titanio (TiO ₂)	Genera especies reactivas de oxígeno (ROS), provoca inflamación pulmonar, daño hepático y neurotoxicidad en animales. En plantas, afecta la fotosíntesis.	(Khan y col., 2021)
Óxido de Cobre (CuO)	Daño a membranas celulares y proteínas, apoptosis y necrosis. En plantas, causa toxicidad en raíces y afecta la fotosíntesis. Causa daño hepático en animales.	(Ameh & Sayes, 2019)
Óxido de Cerio (CeO ₂)	Estrés oxidativo y daño mitocondrial en células; acumulación en el hígado y los pulmones de mamíferos. En plantas, interfiere con la fotosíntesis y el crecimiento radicular.	(Y. Yang y col., 2023)
Óxido de Hierro (Fe ₃ O ₄)	Daño a ADN y producción de ROS, alteración en la función mitocondrial. En plantas, afecta la absorción de nutrientes y el desarrollo de raíces.	(Popescu y col., 2014)
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	Provoca inflamación en los pulmones y daño hepático en animales; afecta la estructura celular y la fotosíntesis en plantas.	(Wang y col., 2024)
Óxido de Silicio (SiO ₂)	Daño al ADN, genera ROS y apoptosis en células animales. En plantas, interfiere con el metabolismo celular y el crecimiento radicular.	(Cai y col., 2024)
Óxido de Estaño (SnO ₂)	Afecta la integridad de la membrana celular y genera estrés oxidativo. Puede provocar inflamación pulmonar y daño hepático en animales. En plantas, altera la fotosíntesis y la absorción de agua.	(Bessa y col., 2020)
Óxido de Níquel (NiO)	Provoca genotoxicidad, apoptosis, daño en el hígado y los pulmones en animales. En plantas, reduce el crecimiento radicular y afecta la fotosíntesis.	(Fidan y col., 2024)
Óxido de Magnesio (MgO)	Induce daño a membranas celulares, provoca apoptosis y alteración mitocondrial. En plantas, afecta el crecimiento y causa toxicidad en las raíces.	(J. Yang y col., 2024)
Óxido de Grafeno (GO)	Genera estrés oxidativo y daño a la membrana celular, interfiere con la función mitocondrial y provoca apoptosis en células animales. En plantas, puede causar inhibición del crecimiento, daño a las raíces y alteración en la fotosíntesis.	(Turkevich y col., 2015)

1

De lo anterior, evaluar los riesgos asociados con la nanotecnología en la remediación ambiental es un proceso complejo y multifacético. A diferencia de los materiales convencionales, los nanomateriales tienen propiedades muy diferentes dependiendo de

su tamaño, forma y reactividad química, es decir, que cada tipo de nanomaterial puede presentar riesgos diferentes complicando la creación de acuerdos para su uso seguro.

4. Necesidad de una Regulación

A medida que los nanomateriales se utilizan cada vez más en aplicaciones comerciales e industriales, la falta de una regulación adecuada presenta un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública. Uno de los principales desafíos en la regulación de los nanomateriales es la ausencia de normas y directrices específicas que aborden las particularidades de estos materiales (Delgado-Ramos, 2014). A diferencia de los productos químicos convencionales, los nanomateriales tienen propiedades únicas que dependen de su tamaño, forma, composición y superficie, lo que significa que no se pueden aplicar de manera efectiva las mismas regulaciones que para sustancias a mayor escala. Además, la falta de metodologías estandarizadas para la caracterización y el monitoreo de nanomateriales en diferentes entornos dificulta la implementación de medidas regulatorias efectivas (Feitshans y Sabatier, 2022). Sin datos confiables y consistentes sobre cómo se comportan y dispersan los nanomateriales, los reguladores se encuentran con un vacío de información que complica la evaluación de riesgos y la creación de políticas. Para abordar estos desafíos, es esencial desarrollar un marco regulatorio que

sea específico para los nanomateriales y que tenga en cuenta sus características únicas. Por ejemplo, es fundamental que cualquier regulación sobre nanotecnología comience con una evaluación de riesgos rigurosa que considere tanto los efectos agudos como los crónicos de la exposición a nanomateriales. Esta evaluación debe incluir estudios sobre la toxicidad, la persistencia, y la movilidad de los nanomateriales en el medio ambiente, así como sus posibles impactos en la salud humana (Ramani y col., 2024). Además, establecer metodologías estandarizadas para la caracterización y monitoreo de nanomateriales es crucial para garantizar una regulación eficaz. Esto incluye el desarrollo de protocolos para medir la concentración, la distribución, y la reactividad de nanomateriales en diferentes entornos, así como la creación de bancos de datos que recopilen información sobre su comportamiento. Este enfoque de transparencia también debería extenderse a la divulgación de datos de investigación sobre los efectos de los nanomateriales, lo que permitiría a la comunidad científica y a los reguladores tomar decisiones informadas (Gottardo y col., 2021).

5. Marco Legal y Regulatorio de la Nanotecnología en México

En México, el marco legal y normativo que regula el uso de la nanotecnología aún se encuentra en una fase de desarrollo, ya que no existe una legislación específica que se dedique exclusivamente a esta área. Sin embargo, el uso de la nanotecnología en diferentes sectores está regulado a través de normativas y leyes generales que abarcan temas de salud, medio ambiente, seguridad y propiedad intelectual (Saldivar Tanaka, 2018). Por ejemplo, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece los derechos fundamentales relacionados con el acceso a la ciencia y la tecnología, protección al medio ambiente y el derecho a la salud. Estos principios generales sirven de base para regular actividades tecnológicas, incluyendo la nanotecnología. Por otra parte, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) regula aspectos de protección ambiental y podría aplicarse a la nanotecnología donde su uso afecte el medio ambiente, particularmente en aplicaciones de remediación ambiental, manufactura y procesamiento de nanomateriales. Por su parte, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) es una de las

entidades más relevantes en la regulación de productos nanotecnológicos en sectores como la salud, alimentos y productos farmacéuticos (Asiva Noor Rachmayani, 2020). Antes de que un producto nanotecnológico se comercialice, debe ser evaluado por esta comisión para garantizar que cumple con los estándares de seguridad. En adición, la Ley General de Salud regula cualquier producto que pueda afectar la salud pública. Los productos que utilizan nanotecnología en alimentos, medicamentos, cosméticos o dispositivos médicos están sujetos a la regulación de esta ley. Es importante mencionar que, aunque actualmente no existen Normas Oficiales Mexicanas (NOM) específicamente dirigidas a la nanotecnología, las normas relacionadas con productos industriales, farmacéuticos, alimentarios y ambientales pueden aplicar en casos específicos donde se empleen productos o procesos nanotecnológicos (Foladori y col., 2017). No obstante, La Declaratoria de Vigencia de la Norma Mexicana NMX-R-12901-1-SCFI-2015 es un paso significativo hacia la regulación de la nanotecnología en México. Esta norma se basa en el estándar internacional ISO/TS 12901-1:2012 y aborda las mejores prácticas para gestionar la exposición a los nanomateriales, enfocados en la protección

de la salud y la seguridad en el lugar de trabajo. Esta norma mexicana establece lineamientos y recomendaciones para manejar y controlar la exposición a nanomateriales manufacturados. Además, busca guiar a las empresas e instituciones en la identificación de riesgos asociados con la manipulación de nanomateriales y sugiere medidas de control para reducir la exposición de los trabajadores. Los puntos clave de la NMX-R-12901-1-SCFI-2015 son los siguientes:

- i) Alcance y propósito: Establece lineamientos para la identificación, evaluación y control de riesgos relacionados con los nanomateriales en el entorno laboral.
- ii) Evaluación de riesgos: Proporciona un marco para identificar los peligros asociados con la exposición a nanomateriales, enfocándose en su potencial para causar efectos adversos en la salud humana.
- iii) Control de la exposición: Establece procedimientos para reducir la exposición de los trabajadores a nanomateriales, promoviendo la aplicación de medidas de control técnico, prácticas laborales seguras y equipos de protección personal.
- iv) Medición y monitoreo: Requiere el establecimiento de mecanismos de monitoreo

para medir la concentración de nanomateriales en el ambiente laboral, garantizando que los niveles de exposición se mantengan por debajo de los límites permitidos.

v) Capacitación y concientización: Obliga a las empresas a proporcionar programas de capacitación a los trabajadores, con el objetivo de asegurar que estén informados sobre los riesgos potenciales de los nanomateriales y las prácticas seguras para su manejo.

vi) Requisitos de documentación: Establece la necesidad de mantener registros detallados sobre la manipulación de nanomateriales, incluidos informes de monitoreo y medidas de control implementadas.

vii) Revisiones y actualizaciones: Enfatiza la importancia de realizar evaluaciones periódicas de los riesgos y ajustar las medidas de control en función de los nuevos conocimientos científicos y cambios en los procesos productivos.

6. El Papel de la Sociedad y la Ciencia

- La investigación y desarrollo en el campo de la nanotecnología, especialmente en su aplicación para la remediación ambiental,

requiere un enfoque de investigación responsable que equilibre la innovación con la precaución. Esto significa no solo avanzar en el conocimiento científico y las capacidades tecnológicas, sino también considerar los posibles impactos éticos, sociales y ambientales. Un enfoque de investigación responsable garantiza que los beneficios de la nanotecnología se maximicen, mientras que los riesgos se minimizan de manera proactiva (Tanaka, 2021). Para ello, un componente esencial de la investigación responsable es la integración de la evaluación de riesgos a lo largo de todo el ciclo de vida de los nanomateriales, desde su diseño y síntesis hasta su aplicación y eventual eliminación. Esto implica no solo realizar estudios de toxicidad y persistencia durante la fase de desarrollo, sino también evaluar cómo los nanomateriales se comportarán una vez liberados en el medio ambiente. Los investigadores deben adoptar un enfoque holístico que considere cómo los nanomateriales interactuarán con diferentes ecosistemas y organismos, así como las posibles vías de exposición para los seres humanos (Foladori, 2016). Para abordar los complejos desafíos que presenta la nanotecnología en la remediación ambiental, es crucial fomentar la colaboración entre expertos de diferentes disciplinas. La

colaboración no debe limitarse a la academia, es importante involucrar a los reguladores, las industrias, los gobernantes y las organizaciones no gubernamentales en el proceso de investigación. Este enfoque podría asegurar que las perspectivas y preocupaciones de todas las partes interesadas se tengan en cuenta, lo que puede conducir a una mayor aceptación y éxito en la implementación de nanomateriales en aplicaciones ambientales. Además, dado que muchas personas pueden tener preocupaciones sobre la seguridad de los nanomateriales, es importante proporcionar información accesible y comprensible que explique tanto los beneficios como los riesgos, así como las precauciones que se están tomando para garantizar un uso seguro (Camarillo Abad y col., 2019). La innovación en nanotecnología debe estar guiada por principios de sostenibilidad y responsabilidad social, es decir, que los desarrolladores deben considerar no solo los impactos inmediatos de sus innovaciones, sino también las consecuencias a largo plazo.

7. Sinergias Multisectoriales en la Regulación de Nanomateriales

La regulación de los nanomateriales es un desafío complejo que requiere una colaboración estrecha entre academia, industria, organismos reguladores y gobierno. La academia genera conocimiento sobre propiedades, riesgos y aplicaciones, formando expertos y proporcionando datos científicos que fundamentan las normativas. Por su parte, la industria impulsa la innovación y asume la responsabilidad de garantizar la seguridad de sus productos mediante estudios de impacto, evaluaciones toxicológicas y el cumplimiento de estándares de calidad. En tanto, el gobierno y los organismos reguladores trabajan juntos para diseñar normas y leyes que equilibren el avance tecnológico con la protección ambiental y de la salud, basándose en evidencia científica y promoviendo estándares internacionales. En adición el gobierno debe actuar como facilitador al crear políticas públicas, asignar recursos y fomentar diálogos abiertos.

8. Conclusiones

La nanotecnología ofrece un potencial significativo para abordar desafíos críticos en la remediación ambiental, gracias a las propiedades únicas de los nanomateriales. Sin embargo, este potencial viene acompañado de riesgos que deben ser gestionados cuidadosamente. La toxicidad, persistencia y movilidad de los nanomateriales representan amenazas para los ecosistemas y la salud humana que no pueden ser ignoradas. La falta de regulaciones específicas y de metodologías estandarizadas para la evaluación de estos riesgos resalta la necesidad urgente de desarrollar un marco regulatorio robusto y preciso. Este marco debe basarse en una evaluación integral de riesgos, la colaboración multidisciplinaria y la transparencia en la investigación. Un enfoque de investigación responsable es clave para asegurar que los beneficios de la nanotecnología se maximicen sin comprometer la seguridad ambiental y la salud pública.

Referencias Bibliográficas

- Altaf, N. U. H., Naz, M. Y., Shukrullah, S., Ghaffar, A., Irfan, M., Walczak, D., Głowacz, A., Mahnashi, M. H., Rahman, S.,

Królczyk, G., Alqarni, A. O., y Niazi, U. M. (2021). Concurrent synthesis and immobilization of ag nanoparticles over TiO₂ via plasma reduction for photocatalytic treatment of methyl blue in water. *Materials*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/ma14206082>

Ameh, T., y Sayes, C. M. (2019). The potential exposure and hazards of copper nanoparticles: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 71, 103220. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103220>

Anusha, J. R., Citarasu, T., Uma, G., Vimal, S., Kamaraj, C., Kumar, V., Muzammil, K., y Mani Sankar, M. (2024). Recent advances in nanotechnology-based modifications of micro/nano PET plastics for green energy applications. *Chemosphere*, 352, 141417. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141417>

Arabzadeh Nosratabad, N., Yan, Q., Cai, Z., y Wan, C. (2024). Exploring nanomaterial-modified biochar for environmental remediation applications. *Heliyon*, 10(18), e37123. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37123>

Asiva Noor Rachmayani. (2020). *NANOMEDICINA: ASPECTOS REGULATORIOS Y SOCIOECONÓMICOS*

(L. E. V. Corre (ed.); Primera ed). Universidad Nacional Autónoma de México.

Azizah, R. N., Verheyen, G. R., Shkedy, Z., y Van Miert, S. (2024). Overview of in vitro-in vivo extrapolation approaches for the risk assessment of nanomaterial toxicity. *NanoImpact*, 35, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2024.100524>

Bessa, M. J., Brandão, F., Viana, M., Gomes, J. F., Monfort, E., Cassee, F. R., Fraga, S., y Teixeira, J. P. (2020). Nanoparticle exposure and hazard in the ceramic industry: an overview of potential sources, toxicity and health effects. *Environmental Research*, 184, 109297. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109297>

Cai, H., Gao, M., Xu, T., Li, K., Zhou, Y., Lyu, C., y Xu, S. (2024). Silicon dioxide particles induce DNA oxidative damage activating the AIM2-mediated PANoptosis in mice cerebellum. *Chemico-Biological Interactions*, 403, 111258. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.111258>

Camarillo Abad, E., Blome Fernández, R., Castellanos Andrade, P., y Campos Delgado, J. (2019). Mitos y realidades de la nanotecnología en México. *Mundo Nano*,

12(22), 73–88.

Cardito, A., Albarano, L., Sacco, O., Vaiano, V., Lettieri, M., Libralato, G., Lofrano, G., y Carotenuto, M. (2025). Removal and toxicity effects of chloramphenicol and acid orange solutions using zero-valent iron nanoparticles. *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106868>

Che-Galicia, G., Ruíz-Santoyo, V., Zanella, R., Mendoza-González, N. Y., Ruiz-López, I. I., y Sampieri, A. (2021). Kinetic mechanism of CO oxidation on gold catalyst supported on TiSBA-15 previously treated in a hydrogen atmosphere. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126644. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126644>

Cheriyamundath, S., y Vavilala, S. L. (2021). Nanotechnology-based wastewater treatment. *Water and Environment Journal*, 35(1), 123–132. <https://doi.org/10.1111/wej.12610>

Delgado-Ramos, G. C. (2014). Nanotechnology in Mexico: Global trends and national implications for policy and regulatory issues. *Technology in Society*, 37(1), 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2013.09.005>

5

Feitshans, I. L., y Sabatier, P. (2022). Global health impacts of nanotechnology law: Advances in safernano regulation. *Materials Today: Proceedings*, 67, 985–994. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.377>

Fidan, E. B., Bali, E. B., y Apaydin, F. G. (2024). Comparative study of nickel oxide and nickel oxide nanoparticles on oxidative damage, apoptosis and histopathological alterations in rat lung tissues. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 83, 127379. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127379>

Foladori, G. (2016). Nanotechnology Public Policy in Latin America. *Problemas Del Desarrollo*, 47(186), 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2016.03.002>

Foladori, G., Arteaga, E., Záyago, Edgar Appelbaum, Richard Robles-Belmont, Eduardo Villa-Vázquez, L., Parker, R., y Leos, V. (2017). Nanotechnology public policies in Mexico. *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología y Sociedad*, 12(34), 1–12. <http://www.redalyc.org/pdf/924/92452927002.pdf>

Gottardo, S., Mech, A., Drbohlavová, J., Małyska, A., Bøwadt, S., Riego Sintés, J., y Rauscher, H. (2021). Towards safe and

sustainable innovation in nanotechnology: State-of-play for smart nanomaterials. *NanoImpact*, 21, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100297>

Gupta, R. K., Guha, P., y Srivastav, P. P. (2024). Investigating the toxicological effects of nanomaterials in food packaging associated with human health and the environment. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 5, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2024.100125>

Gupta, T., Samriti, Cho, J., y Prakash, J. (2021). Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanorods: formation chemistry, growth mechanism, and tailoring of surface properties for photocatalytic activities. *Materials Today Chemistry*, 20, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100428>

Jiang Luo, J., Rui Zhu, L., Guo, Z., Pi, N., Li, X., Lin Zou, H., Qun Luo, H., Bing Li, N., y Li, B. L. (2024). Hydrogel-innovated nanotechnologies for chemical and biological analysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 511, 215874. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215874>

Khan, M., Khan, M. S. A., Borah, K. K., Goswami, Y., Hakeem, K. R., y

Chakrabarty, I. (2021). The potential exposure and hazards of metal-based nanoparticles on plants and environment, with special emphasis on ZnO NPs, TiO₂ NPs, and AgNPs: A review. *Environmental Advances*, 6, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100128>

Lara-López, Y., García-Rosales, G., y Jiménez-Becerril, J. (2017). Synthesis and characterization of carbon-TiO₂-CeO₂ composites and their applications in phenol degradation. *Journal of Rare Earths*, 35(6), 551–558. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60947-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60947-5)

Ningombam, L., Mana, T., Apum, G., Ningthoujam, R., y Disco Singh, Y. (2024). Nano-bioremediation: A prospective approach for environmental decontamination in focus to soil, water and heavy metals. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 21, 100931. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100931>

Ortiz-Galvez, L. M., Caballero-Guzman, A., Lopes, C., y Alfaro-Moreno, E. (2024). Probabilistic material flow analysis of released nano titanium dioxide in Mexico. *NanoImpact*, 35, 100516.

<https://doi.org/10.1016/j.impact.2024.100516>

Ouda, M., Banat, F., Hasan, S. W., y Karanikolos, G. N. (2023). Recent advances on nanotechnology-driven strategies for remediation of microplastics and nanoplastics from aqueous environments. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103543.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103543>

Popescu, A. N., Ivana, S., y Purdoi, L. (2014). Potential smart solutions for limitation and prevention of microbiological hazards by using multi-functionalized Fe₃O₄ nanoparticles. *Journal of Biotechnology*, 185, S103.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.07.352>

Ramani, A., Taherabbas, S., Saji, R., Bumbadiya, M., y Gandhi, K. (2024). Nanotechnology: An emerging trend in the dairy industry – Applications and future challenges. *Food and Humanity*, 3, 100409.

<https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100409>

Ravi, M., Venkatesan, R., Thangavel, G., Palanisami, J., Deepa, S., y Kim, S. C. (2024). Advancing environmental remediation through tailored TiO₂

nanomaterials in water and air purification. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113171.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113171>

Reihanifar, M., Takallou, A., Taheri, M., Gholizadeh Lonbar, A., Ahmadi, M., y Sharifi, A. (2024). Nanotechnology advancements in groundwater remediation: A comprehensive analysis of current research and future prospects. *Groundwater for Sustainable Development*, 27, 101330.

<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101330>

Roy, A., Sharma, A., Yadav, S., Jule, L. T., y Krishnaraj, R. (2021). Nanomaterials for Remediation of Environmental Pollutants. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2021, 764647,

<https://doi.org/10.1155/2021/1764647>

Saldivar Tanaka, L. (2018). Regulando la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 12(22), 37-57.

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.63140>

Saleem, H., Zaidi, S. J., Ismail, A. F., y Goh, P. S. (2022). Advances of nanomaterials for air pollution remediation and their impacts on the environment. *Chemosphere*, 287(P2),

132083.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132083>

Sharma, M., Behl, K., Nigam, S., y Joshi, M. (2018). TiO₂-GO nanocomposite for photocatalysis and environmental applications: A green synthesis approach. *Vacuum*, 156, 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.009>

Tanaka, L. S. (2021). Recomendaciones de política pública de nanociencia y nanotecnología en México: privilegiar el bienestar humano y ambiental. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 15(28), 1e-23e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69655>

Turkevich, L. A., Dastidar, A. G., Hachmeister, Z., y Lim, M. (2015). Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials. *Journal of Hazardous Materials*, 295, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.069>

Vardakas, P., Chatziloizou, M., y Kouretas, D. (2024). Nanomaterials: Applications, health implications and environmental risks.

Environmental Research, 252(P3), 118706. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118706>

Vignesh, K., Suganthi, A., Rajarajan, M., y Sara, S. A. (2012). Photocatalytic activity of AgI sensitized ZnO nanoparticles under visible light irradiation. *Powder Technology*, 224, 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.015>

Vogel, U. B. (2024). The toxicology of inhaled nanomaterials and examples of risk assessment and regulation. *Toxicology Letters*, 399, S3. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2024.07.013>

Wang, Y. L., Lee, Y. H., Chou, C. L., Chang, Y. S., Liu, W. C., y Chiu, H. W. (2024). Oxidative stress and potential effects of metal nanoparticles: A review of biocompatibility and toxicity concerns. *Environmental Pollution*, 346, 123617. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123617>

Xiao, H., Zhao, J., Li, X., Zhang, H., Zhou, M., Cao, W., Yan, X., Zhang, X., Sun, X. W., y Chen, L. (2024). “Nanoscale electric vehicle” for the patterning of nanomaterials: Selective electrophoretic deposition of programmable silica composite

nanoparticles. *Nano Energy*, 128(PB), 109906.

<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109906>

Xie, Y., Hu, J., Esmaili, H., Wang, D., y Zhou, Y. (2022). A review study on wastewater decontamination using nanotechnology: Performance, mechanism and environmental impacts. *Powder Technology*, 412, 118023.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118023>

Yang, J., Wang, X., Khan, M. R., Hammouda, G. A., Alam, P., Meng, L., Zhang, Z., y Zhang, W. (2024). New opportunities and advances in magnesium oxide (MgO) nanoparticles in biopolymeric food packaging films. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00976.

<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00976>

Yang, Y., Bustani, G. S., Alawsi, T., Altalbawy, F. M. A., Kareem, A. K., Gupta, J., Zhu, P., Hjazzi, A., Alawadi, A. H., & Mustafa, Y. F. (2023). The cardioprotective effects of cerium oxide nanoparticles against the poisoning generated by aluminum phosphide pesticide: Controlling oxidative stress and mitochondrial damage. *Pesticide*

Biochemistry and Physiology, 197, 105701.

<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105701>

Zahmatkesh, S., Hajiaghahi-Keshteli, M., Bokhari, A., Sundaramurthy, S., Panneerselvam, B., y Rezakhani, Y. (2023). Wastewater treatment with nanomaterials for the future: A state-of-the-art review. *Environmental Research*, 216(P3), 114652.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114652>

Zhang, X., Xiong, S., Sathiyaseelan, A., Zhang, L., Lu, Y., Chen, Y., Jin, T., y Wang, M. H. (2024). Recent advances in photocatalytic nanomaterials for environmental remediation: Strategies, mechanisms, and future directions. *Chemosphere*, 364, 143142.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143142>

Zhu, X., Tang, Q., Zhou, X., y Momeni, M. R. (2024). Antibiotic resistance and nanotechnology: A narrative review. *Microbial Pathogenesis*, 193, 106741.

<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106741>

Zickgraf, F. M., Murali, A., & Landsiedel, R. (2023). Engineered nanomaterials and the microbiome: Implications for human health.

Current Opinion in Toxicology, 35, 100429.

<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2023.100429>