

Nanotubos de carbono: mercado global, interacciones ambientales y el reto regulatorio en México

Carbon nanotubes: global market, environmental interactions and regulatory challenges in Mexico

S. J. Estrada-Loredo,^{*} D. Sánchez-Campos,^{*,[◇]} D. Salado-Leza,^{*,^{**},[†]}

ABSTRACT: The increasing production and application of nanomaterials, particularly carbon nanotubes, has raised growing concern due to their release into the environment and the limited development and implementation of regulatory frameworks. This issue is especially relevant in countries such as Mexico, where awareness of, and access to, existing regulations remain insufficient. As a result, the interaction of these materials with living organisms poses potential risks to ecosystems, food security, and bioremediation processes. In this context, the present work examines the interaction between nanomaterials and the environment, with particular emphasis on plants, which represent a critical entry pathway into the trophic chain and constitute a research area that remains relatively underexplored compared to studies in humans. First, general aspects of carbon-based nanomaterials are addressed, including their synthesis and classification, with a specific focus on carbon nanotubes due to their exceptional properties and their widespread production and use at both national and international levels. Subsequently, studies related to their interaction with plant systems and their potential implications are discussed. Finally, Mexican regulations applicable to nanomaterials are analyzed, identifying those related to environmental impact and plant systems. The main limitations associated with their implementation are also discussed, including their non-mandatory nature and limited dissemination, highlighting the need to strengthen the regulatory framework and its application in the national context.

KEYWORDS: carbon nanotubes, global market, exposure, environmental impact, regulation.

RESUMEN: La creciente producción y uso de nanomateriales, en particular de nanotubos de carbono, ha generado una preocupación creciente debido a su liberación al medio ambiente y a la limitada regulación existente, especialmente en países como México, donde el conocimiento y la accesibilidad de las normas son aún insuficientes. Esta situación plantea un riesgo potencial para los ecosistemas, la seguridad alimentaria y los procesos de biorremediación, debido a la interacción de estos materiales con organismos vivos. En este contexto, el presente trabajo analiza la interacción de los nanomateriales con el medio ambiente, con especial énfasis en las plantas, las cuales representan una vía crítica de entrada a la cadena trófica y una línea de investigación aún poco explorada en comparación con estudios en humanos. En primer lugar, se presentan aspectos generales de los nanomateriales de carbono, incluyendo su síntesis

Recibido: 1 de mayo, 2025.

Aceptado: 29 de marzo, 2026.

Publicado: 13 de mayo, 2026.

^{*} Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Física, Av. Parque Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295 San Luis Potosí, México.

^{**} Investigadora por México, SECIHTI.

[◇] Autor responsable del texto.

[†] Autora de correspondencia: daniela.salado@uaslp.mx; daniela.salado@secihtl.mx

sis y clasificación, con un enfoque particular en los nanotubos de carbono, debido a sus destacadas propiedades y su amplia producción y uso a nivel nacional e internacional. Posteriormente, se discuten estudios relacionados con su interacción en sistemas vegetales y sus posibles implicaciones. Finalmente, se analizan las normas mexicanas aplicables a nanomateriales, identificando aquellas vinculadas con el medio ambiente y su impacto en plantas. Se discuten además las principales limitaciones asociadas con su implementación, tales como su carácter no obligatorio y su limitada difusión, evidenciando la necesidad de fortalecer el marco regulatorio y su aplicación en el contexto nacional.

PALABRAS CLAVE: nanotubos de carbono, mercado global, exposición, impacto ambiental, regulación.

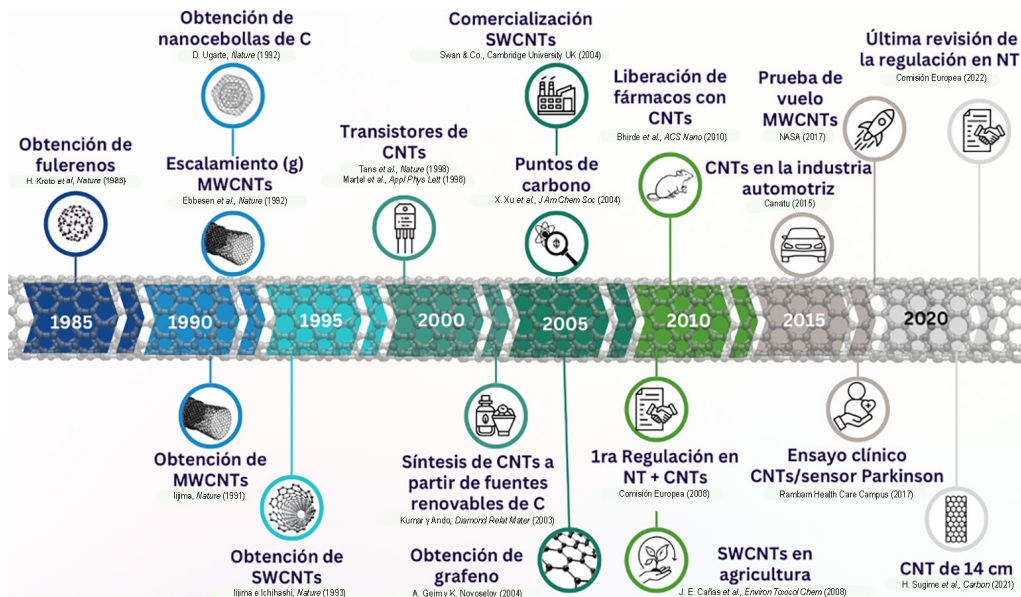
Introducción

El carbono es un elemento químico representado en la tabla periódica con el símbolo C, y constituye la base estructural de los compuestos orgánicos esenciales para la vida. Excepcionalmente, tiene la capacidad de formar enlaces químicos con diversas orientaciones dando origen a su alotropía, lo cual le permite existir en diversas formas estructurales otorgándole propiedades únicas de gran interés para la ciencia y la industria.

Entre las principales formas alotrópicas del carbono se encuentran el grafito y el diamante, así como una serie de nanomateriales (NMs), entre los cuales se incluyen los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés), los fullerenos, y el grafeno junto a sus derivados (eg. óxido de grafeno). Particularmente, los CNTs descubiertos por Iijima en 1991 (figura 1) consisten en láminas de grafeno enrolladas, formando estructuras unidimensionales con una resistencia y conductividad sobresalientes. Estas características los convierten en componentes clave para el desarrollo de dispositivos electrónicos y biomédicos avanzados, y en candidatos excepcionales como materiales de refuerzo. Adicionalmente, los CNTs están posicionados como los NMs de carbono de mayor relevancia, dominando el mercado mundial.

En esta revisión, se presentan las principales características y métodos de síntesis de los CNTs, poniendo énfasis en su mercado, las posibles vías de exposición. Asimismo, se discute la normativa vigente en México orientada al uso seguro de estos materiales y sus tecnologías derivadas. El artículo aporta una perspectiva novedosa al destacar a las plantas como vías clave de entrada de los NMs al ecosistema, un aspecto aún poco explorado en comparación con los estudios centrados en la salud humana. Esta aproximación abre un campo de reflexión sobre la necesidad de establecer políticas ambientales más sólidas y metodologías de evaluación específicas para el contexto nacional, constituyendo un insumo valioso tanto para el sector gubernamental, al orientar el diseño de regulaciones y estrategias de gobernanza, como para la industria, al ofrecer información que les permita anticiparse a futuras normativas y adoptar prácticas de manejo más seguras y sostenibles.

Figura 1. Hitos en el desarrollo de los NMs de carbono, y en el uso y regulación de los CNTs.



Fuente: Elaboración de los autores (Canva Pty Ltd. Software, 2025).

Metodología de búsqueda y selección de información

La información presentada en este trabajo se recopiló mediante una revisión de literatura científica utilizando bases de datos académicas, principalmente Google Scholar y páginas oficiales de gobierno. La búsqueda se realizó empleando palabras clave como “nanotubos de carbono”, “carbon nanotubes”, “CNTs”, “nanomateriales y ambiente”, “impacto ambiental”, “regulación de nanomateriales”, “interacción de nanomateriales y plantas” y “nanotecnología en México”. Se consideraron artículos científicos, revisiones, reportes técnicos y documentos normativos relevantes, priorizando aquellos publicados en revistas indexadas y fuentes oficiales. La selección de la literatura se realizó con base en el enfoque del manuscrito, priorizando el contexto ambiental y regulatorio de los nanotubos de carbono. Asimismo, se dio preferencia a publicaciones recientes, sin excluir trabajos fundamentales que aportan bases teóricas relevantes para la comprensión del tema.

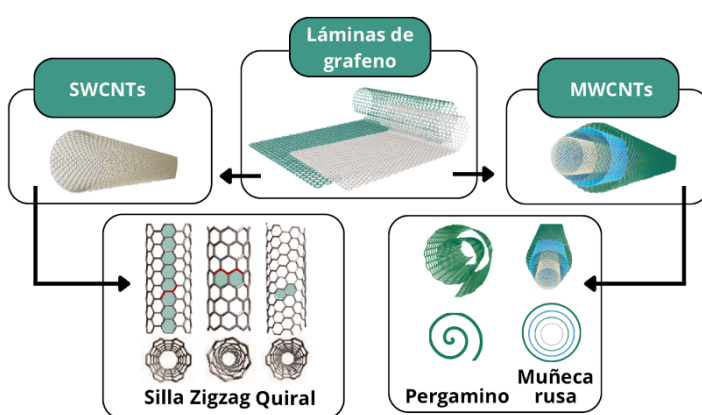
Nanotubos de carbono

Generalidades

Los CNTs presentan una forma cilíndrica, la cual deriva de una lámina de grafeno enrollada. Esta es de un átomo de espesor e inclusive puede tener un

diámetro de 0.4 a 2 nm. La principal clasificación de los CNTs se basa en su estructura: nanotubos de pared simple (SWCNTs) y multicapa (MWCNTs, por sus siglas en inglés) (figura 2). Para los SWCNTs existen tres modelos estructurales básicos en los átomos de carbono: silla, zigzag y quiral. Los MWCNTs se forman por varios cilindros concéntricos de láminas de grafeno alrededor de un núcleo hueco. El diámetro externo de los CNTs ronda de 2 a 100 nm, el diámetro interno de 1 a 3 nm, y su longitud puede llegar a medir varios micrómetros. Asimismo, presentan dos modelos estructurales: tipo pergamino (una sola hoja enrollada) y muñeca rusa (múltiples capas concéntricas) (figura 2).

Figura 2. Clasificación de los nanotubos de carbono. .



Fuente: Elaboración de los autores (Canva Pty Ltd. Software, 2025).

La estructura de los CNTs está directamente relacionada con sus propiedades físicas, químicas y electrónicas. En particular, sus propiedades excepcionales, como la alta resistencia mecánica, conductividad eléctrica y estabilidad química, se atribuyen a la presencia de enlaces sp^2 altamente ordenados, los cuales favorecen la deslocalización electrónica y confieren una elevada integridad estructural.

Asimismo, estas propiedades pueden variar en función de diversos factores, entre los que destacan los nanotubos (SWCNTs o MWCNTs), el método de síntesis empleado y los tratamientos posteriores, como la funcionalización, los cuales influyen directamente en su comportamiento fisicoquímico y en su interacción con otros sistemas. En la tabla 1 se resumen algunas de las características más relevantes reportadas en la literatura (Castillo-Rivera *et al.*, 2025; Hasnain y Nayak, 2019; Speranza, 2021).

Sin embargo, los CNTs presentan limitaciones inherentes, entre las que destacan su carácter hidrofóbico y su tendencia a agregarse debido a interacciones de van der Waals. Estas condiciones pueden afectar significativamente

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los CNTs.

Propiedad	SWCNTs	MWCNTs
Diámetro (nm)	1.2 - 2	5 - 100
Módulo de Young (Gpa)	1054	1200
Área superficial específica (m ² /g)	~ 400 - 900	200 - 400
Densidad (g/cm ³)	1.33 - 1.40	0.80 - 2.10
Resistencia a la tracción (GPa)	50 - 500	~ 150
Resistividad (Ωm)	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³	-
Conductividad eléctrica (S/m)	1 x 10 ⁶	1/13
Conductividad térmica (W/mK)	~ 6000	> 3500
Tenacidad a la fractura (MPa m ^{1/2})	2.70	-
Solubilidad en agua	Baja (mejorable por funcionalización)	Muy baja (requiere tratamiento)
Estabilidad térmica	Alta (superior a 600 °C)	Alta (similar a SWCNTs)

Fuente: Elaboración de los autores a partir de: Balandin (2011), Deng y Berry (2016), y Yang *et al.* (2016).

su dispersión en medios acuosos y, en consecuencia, limitar su aplicabilidad en diversos sistemas. En este sentido, la modificación superficial emerge como una estrategia clave para mejorar su estabilidad, dispersión y desempeño funcional en distintas aplicaciones.

Principales métodos de síntesis

La síntesis de los CNTs es un aspecto clave para controlar sus propiedades y definir sus aplicaciones. En la industria o a nivel laboratorio, se ha optado por diversos métodos que permiten producirlos a baja y gran escala con diferentes niveles de pureza, morfología y rendimiento. Entre ellos destacan la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés), descarga por arco eléctrico y ablación por láser, siendo el primero el más utilizado comercialmente por su eficiencia y versatilidad.

El método CVD consiste en la descomposición térmica de un precursor de carbono, como el etileno o metano, en presencia de un catalizador metálico como Ni, Co, o Fe. Esta reacción se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre los 500 y 1000 °C, provocando que el carbono liberado se deposite sobre las nanopartículas (NPs) del catalizador y se formen los CTNs (Yahyazadeh *et al.*, 2024). Este método presenta diversas variables, las cuales influyen directamente en las características finales de los CNTs. Por ejemplo, la fuente de carbono utilizada puede afectar significativamente la calidad estructural de estos, el tipo de catalizador y su soporte determinan su diámetro, número de capas y cristalinidad. Además, la temperatura y el tiempo de reacción son factores críticos, pues valores inadecuados pueden conducir a la formación de nanotubos incompletos, con estructuras amorfas o baja pureza (Yahyazadeh *et al.*, 2024). Por tanto, el control pre-

ciso de estas condiciones es fundamental para optimizar el rendimiento y las propiedades fisicoquímicas de los CNTs sintetizados por este método.

Por otro lado, la descarga por arco eléctrico se basa en la generación de un arco eléctrico entre dos electrodos, donde el ánodo está cargado con un precursor de carbono y el cátodo consiste en una barra de grafito pura. El proceso se realiza en una atmósfera inerte, comúnmente utilizando helio o argón, donde la alta temperatura generada (entre 4000 y 5700 °C) produce un plasma caliente que sublima el carbono del ánodo. Posteriormente, este carbono se condensa y da lugar a la formación de los CNTs (Madikere Raghunatha Reddy *et al.*, 2025). Existen variables críticas influyendo directamente en la estructura y calidad de los nanotubos obtenidos. Entre ellas se encuentran la corriente eléctrica y el voltaje, que modifican la morfología de los CNTs, así como la presión y el tipo de gas inerte, los cuales afectan la distribución de diámetros y la presencia de NPs de carbono no deseadas. En algunos casos, se incorporan en el ánodo metales de transición como los catalizadores empleados en CVD. La composición, el tamaño y la distribución de estos catalizadores tienen un impacto directo sobre el diámetro, número de paredes y la cristalinidad de los CNTs. El método de descarga por arco eléctrico permite obtener CNTs con alta calidad estructural y bajo nivel de defectos, superando en este aspecto otros métodos. No obstante, la pureza del producto puede verse comprometida por la presencia de impurezas metálicas y formas amorfas de carbono, por lo cual se requiere un proceso de purificación posterior para aplicaciones más exigentes (Rathinavel *et al.*, 2021).

Finalmente, el método de ablación láser es una técnica consistente en vaporizar un blanco de grafito puro mediante un láser, pulsado o continuo, dentro de un horno que mantiene una atmósfera inerte y una presión constante. La temperatura típica en el sistema está por debajo de los 1200 °C, y el uso del láser permite alcanzar las energías necesarias para sublimar el carbono. El carbono vaporizado se condensa para formar CNTs, generalmente SWCNTs de alta calidad, y en algunos casos MWCNTs. A diferencia de la descarga por arco, aquí la energía no proviene de una corriente eléctrica sino del propio láser, proporcionando mayor control sobre ciertas variables (Rathinavel *et al.*, 2021). En la tabla 2, se presenta una comparativa general entre los métodos de síntesis de CNTs más utilizados, destacando las principales características, condiciones operativas, calidad del producto, entre otras.

Usos y aplicaciones

Su combinación única de propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, los hacen altamente atractivos para diversas aplicaciones tecnológicas, médicas e industriales. Por ejemplo, en los sectores aeroespacial, automotriz y energético, los CNTs se dirigen al desarrollo de materiales compuestos poliméricos avanzados como respuesta a la demanda creciente de materiales más ligeros y resistentes, así como a la necesidad de mejorar la eficiencia del combustible (Yahyazadeh *et al.*, 2024) y reducir las emisiones contaminantes (Deshpande, 2022). Una de las principales aplicaciones industriales de los CNTs es su in-

Tabla 2. Comparativa entre los principales métodos de síntesis de CNTs.

Método	Temperatura (°C)	Fuente de C	Catalizador	Control sobre dimensiones	Pureza del producto	Escalabilidad	Aplicación
Deposición química de vapor	500-1000	Metano, etileno, acetileno	Fe, Co, Ni	Alto (diámetro, longitud, alineación)	Alta (requiere purificación posterior)	Alta (apto para producción industrial)	Electrónica, sensores, compuesto, energía
Arco eléctrico	~4000-5700	Electrodos de grafito	Fe, Co, Ni, Pd, Ag, Pt, etc.	Bajo	Baja / media (contiene C- amorfo y nanopartículas)	Baja (más común en laboratorio)	Refuerzo estructural, materiales compuestos
Ablación por láser	1000-1200	Grafito vaporizado con láser	Fe, Co, Ni	Moderado (depende del láser y condiciones)	Muy alta (con menos subproductos)	Baja (costoso y limitado a investigación)	Aplicaciones electrónicas y biomédicas de precisión

Fuente: Elaboración de los autores a partir de: Madikere Raghunatha Reddy *et al.* (2025), Pandey y Dahiya (2016), Rathinavel *et al.* (2021), y, Yahyazadeh *et al.* (2024).

corporación como refuerzo en matrices poliméricas, lo cual permite generar materiales compuestos con propiedades mejoradas para estructuras sometidas a condiciones exigentes. Este avance ha mostrado mejoras significativas en las características de materiales destinados a implantes ortopédicos y a agujas utilizadas en biopsias intervencionistas (Al-Maatoq *et al.*, 2022).

Actualmente, uno de los principales retos enfrentados por la industria es la dispersión uniforme de los CNTs, por lo cual han implementado técnicas avanzadas de funcionalización, métodos de impresión 3D y electrohilado (Merneedi *et al.*, 2021; Sabet, 2025; Srinivasan *et al.*, 2021). Estudios recientes muestran que, a partir de estos métodos, se ha logrado una reducción de peso hasta del 40% en componentes estructurales sin perder resistencia a la tracción.

Empresas del sector automotriz y aeronáutico como BMW y Boeing, respectivamente, utilizan este tipo de compuestos reforzados con CNTs para aligerar piezas. Por ejemplo, BMW en el desarrollo de su vehículo eléctrico i3 ha logrado disminuir su peso en aproximadamente 30% en comparación con otros materiales convencionales. En el caso de Boeing, han reportado para su aeronave 787 Dreamliner que un menor peso estructural mejora el rendimiento del combustible (Khan y Kim, 2011; Sabet, 2024; Wang *et al.*, 2013).

Un estudio enfocado en el desarrollo de paneles de carrocería de automóviles demostró una mejora del 30% en la resistencia al impacto en comparación con materiales convencionales, y con un 20% de reducción de peso (Nguyen-Tran *et al.*, 2018). Esta mejora se observa en el aumento de la eficiencia del combustible y la reducción de emisiones. Otra aplicación de estos materiales es en el desarrollo de carcasas de baterías y en sistemas de control térmico. Los materiales que incorporan CNTs disipan el calor más eficientemente, contribuyendo a optimizar el rendimiento y a prolongar la vida útil de baterías (Sharma y Kumar, 2018).

Además de su relevancia en el sector automotriz, los CNTs destacan por sus propiedades texturales y eléctricas, posicionándolos como candidatos prometedores en aplicaciones biomédicas y farmacéuticas. Los CNTs han sido estudiados y están siendo empleados como sistemas para liberación de fármacos, ingeniería de tejidos, biosensado, y terapia fototérmica. Particularmente, hay registros de numerables estudios clínicos, tanto observacionales como ensayos, completados en la última década para revisar la seguridad de dispositivos que contienen CNTs (Andrade *et al.*, 2024).

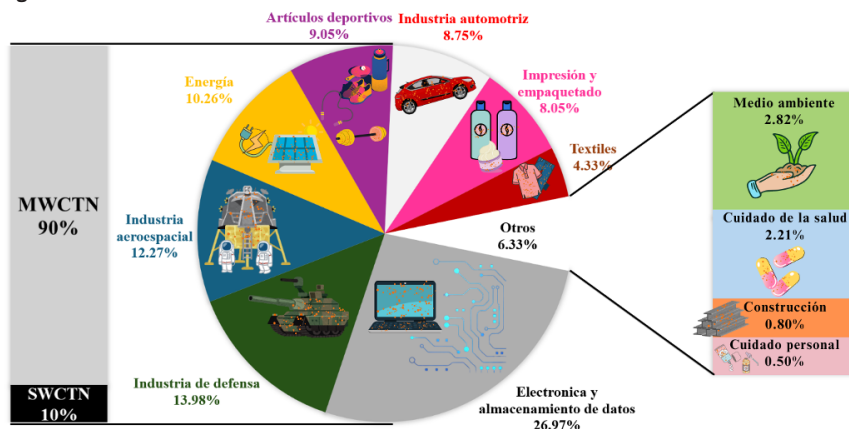
Mercado global

Debido a sus diversos usos y aplicaciones, actualmente a nivel mundial existen cerca de más de 100 empresas desarrollando y comercializando CNTs. Destacan empresas como: Arkema Group (Francia), Toray Industries Inc. (Japón), Carbon Solutions Inc. (USA), Cheap Tubes Inc. (USA), Nanocyl SA (Bélgica), Jiangsu Cnano Technology Co. (China), CHASM Advanced Materials Inc. (USA), y Biopact (USA) en el área biomédica y ambiental.

La demanda de CNTs crece por la gran necesidad de materiales ligeros y resistentes principalmente en los sectores automotriz, aeroespacial y energético, entre otros (figura 3). Según datos del 2014, el principal mercado para los CNTs, desde el punto de vista de su uso final, fue para la fabricación de dispositivos electrónicos y de almacenamiento, y para el 2021, los MWCNTs representaron el 90% de la producción total. La tasa de crecimiento anual compuesta global (CAGR, por sus siglas en inglés) es de aproximadamente 16.7% (México, 6.4%), alcanzando 9.41 miles de millones de USD en 2024 (Business Wire, 2023).

Por otro lado, resulta complejo cuantificar la producción anual de CNTs en México y el resto del mundo debido a la falta de datos públicos. Sin em-

Figura 3. Clasificación de los nanotubos de carbono.

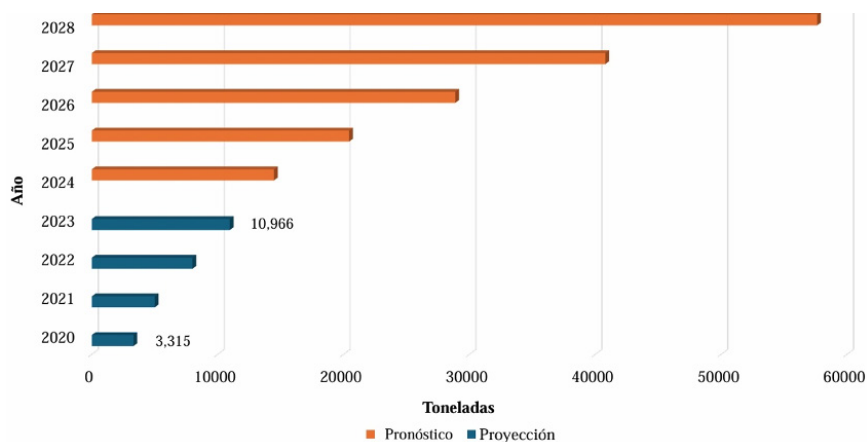


Fuente: Elaboración de los autores (Canva Pty Ltd. Software, 2025).

bargo, estas cifras pueden estimarse a partir de la capacidad de producción¹ y volumen en movimiento² de los principales fabricantes. De acuerdo con una encuesta de mercado realizada por el Instituto de Investigación Yano, el volumen global de envíos de CNTs alcanzó las 10,966 toneladas en 2023. Estas cifras corresponden a un pronóstico, es decir, a estimaciones realizadas con base en datos reales reportados por los fabricantes y el mercado en años previos. A partir de 2024, las cifras pasan a ser proyecciones, construidas mediante modelos de crecimiento y tendencias de capacidad de producción y demanda, con lo cual se estima que los envíos superen las 20,000 toneladas en 2025 y alcancen aproximadamente 50,000 toneladas hacia 2028 (figura 4) (Yano Research Institute, 2024).

Desafortunadamente, en años previos ya se ha observado un desfase, en donde la capacidad de producción supera ampliamente el consumo del mercado. Esto, debido al impulso tecnológico en las técnicas de fabricación, así como en las expectativas de crecimiento en aplicaciones emergentes. Modekwe *et al.* (2021) muestran que, en el año 2014, el consumo estimado de CNTs a nivel mundial osciló entre 1,800 y 2,100 toneladas mientras que la capacidad de producción llegaba hasta las 20,000 toneladas. Aun así, actualmente empresas como LG Chem y CNano tienen planes de expansión. Por ejemplo, LG Chem planeó aumentar su capacidad anual hasta 6,100 tone-

Figura 4. Transición y pronóstico del mercado mundial de nanotubos de carbono, encuesta del Instituto de Investigación Yano.



Fuente: Elaboración de los autores (Canva Pty Ltd. *Software*, 2025).

¹ Capacidad de producción: cantidad máxima de nanotubos de carbono (CNTs) que una empresa puede fabricar utilizando sus recursos disponibles como maquinaria y personal en un periodo de tiempo determinado.

² Volumen en movimiento: cantidad de CNTs circulando en el mercado, es decir, que se comercializa, distribuye o utiliza en aplicaciones industriales, no solo lo que las plantas son capaces de producir.

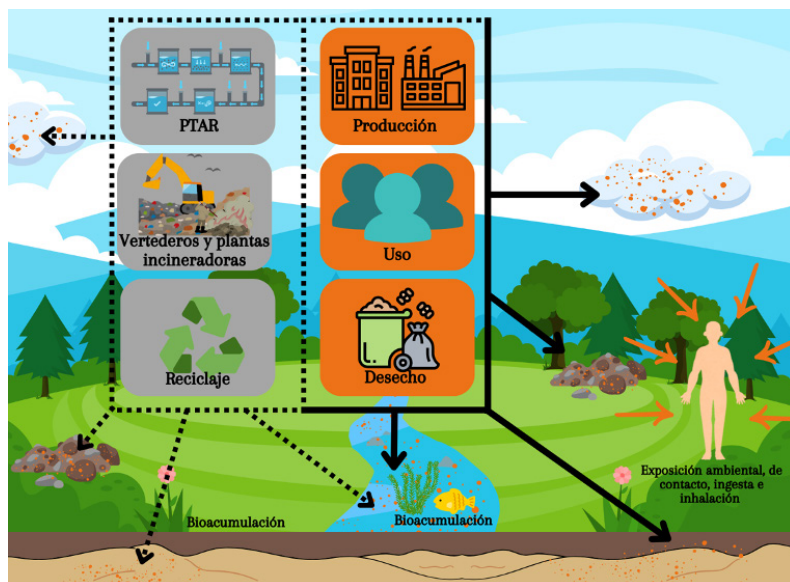
ladas, para el año 2024. Cabot Corporation planea producir 15,000 toneladas para 2025, mientras que JEIO planea aumentar casi 50 veces su capacidad actual de producción (Business Wire, 2023).

Vías de exposición y riesgos

La toxicidad de los CNTs varía según su tipo, tamaño y vía de exposición. Para el ser humano, la inhalación es una de las principales vías de exposición a NMs, incluidos los CNTs, con una importante posibilidad de translocación a otros órganos (IRAC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2014). Desafortunadamente, durante la síntesis de este tipo de materiales, es común que los productos generen polvo respirable, afectando a las personas encargadas de estos procesos en laboratorios e industrias (Brouwer *et al.*, 2006; Evans *et al.*, 2013). Diversos estudios con roedores han mostrado efectos pulmonares adversos como inflamación pulmonar y fibrosis persistente de rápida evolución (NIOSH, 2013).

Su alta producción y uso llevan a que de forma directa o indirecta (vertederos o plantas de tratamiento de aguas residuales) estos materiales ingresen al medio ambiente, a la cadena trófica y al cuerpo humano. Esto puede ser a través de tres escenarios principales: durante la producción de materias primas y productos, durante su uso, y después de su eliminación (eg. vertedero o incineración). La figura 5 ilustra las posibles vías de exposición de los CNTs a lo largo de su ciclo de vida.

Figura 5. Posibles vías de exposición a CNTs a lo largo de su ciclo de vida.



PTAR: Planta tratadora de aguas residuales.
 Fuente: Elaboración de los autores (Canva Pty Ltd. Software, 2025).

Los efectos negativos al medio ambiente presentan complejidades como la identificación de los NMs, límites de detección y concentraciones ambientales previstas,³ lo cual dificulta llegar a una conclusión sobre los efectos ecológicos y la estabilidad ambiental de los NMs (Kabir *et al.*, 2018). Sin embargo, también mencionan que los efectos negativos al medio ambiente se pueden clasificar en dos grupos principales: toxicidad de baja a alta en la vida acuática, y afectación a organismos del suelo.

Un informe publicado por el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks [SCENIHR], 2020), bajo la Dirección General de Salud y Seguridad Alimentaria de la Comisión Europea, concluye que los CNTs representan un riesgo potencial para la salud humana y ambiental, debido a su alta persistencia en los tejidos biológicos, similar a materiales fibrosos como el asbesto. Asimismo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, considera a los CNTs como un material a nanoescala que debe ser notificado antes de su comercialización. La EPA establece requisitos de manejo y control, como el uso de equipos de protección personal, sistemas cerrados de producción, prohibiciones, y el reporte obligatorio de cualquier liberación ambiental (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Adicionalmente, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, por sus siglas en inglés) ha establecido un límite de exposición ocupacional de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para carbono elemental en el aire (masa respirable de 8 horas), alertando sobre posibles efectos respiratorios incluso a bajas concentraciones (The National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2013). En el Reino Unido, la Dirección de Salud y Seguridad (HSE, por sus siglas en inglés) clasifica a los CNTs como sustancias de extrema preocupación y recomienda aplicar el principio de precaución en todas las fases de su manejo (Hasnain y Nayak, 2019). Por lo anterior, existe la urgencia de contar con más estudios toxicológicos y ecotoxicológicos, especialmente de largo plazo, para realizar evaluaciones de riesgo más precisas (SCENIHR, 2020).

Evidencia toxicológica

La evaluación de la toxicidad de los CNTs ha sido predominantemente dirigida hacia aplicaciones biomédicas, dejando en segundo plano su impacto en sistemas ambientales. Esta tendencia ha generado un sesgo importante en la comprensión integral de los riesgos asociados con estos materiales. En este sentido, de acuerdo con la revisión titulada “Human and environmental impacts of nanoparticles”, la mayoría de los estudios analizados (93.16%) se han enfocado en evaluar los efectos de las NPs sobre la salud humana, mien-

³ Concentraciones ambientales previstas: estimaciones teóricas de la concentración de un nanomaterial (u otra sustancia química), el cual se espera encontrar en un compartimento ambiental específico (agua, suelo, aire, sedimentos, etc.), derivadas de modelos matemáticos y de datos sobre producción, uso, liberación y destino en el medio ambiente.

tras que únicamente el 4.58% ha considerado su impacto en el medio ambiente, incluyendo animales y plantas (Kumah *et al.*, 2023).

Dentro de este porcentaje reducido, los estudios en animales no humanos han aportado evidencia relevante sobre los posibles efectos adversos de los CNTs. Por ejemplo, Hosseinpour y colaboradores (2016) investigaron los efectos cardíacos de los MWCNTs funcionalizados en ratas, observando un incremento en la frecuencia cardíaca (taquicardia) tras su inyección, lo cual indica una alteración en la función fisiológica del sistema cardiovascular. De manera similar, en el estudio de Cimbalk y colaboradores (2018) se evaluó la exposición a MWCNTs en peces (*Danio rerio* y *Astyanax altiparanae*), encontrando alteraciones en procesos celulares como el estrés oxidativo, neurotoxicidad y daño al ADN. En conjunto, estos estudios evidencian que los CNTs pueden inducir alteraciones fisiológicas y celulares significativas, por lo que su liberación no controlada al ambiente, sumada a su creciente producción, representa un riesgo potencial para la salud de animales humanos y no humanos.

Asimismo, es importante destacar que una de las principales vías de exposición en animales (acuáticos o terrestres no humanos) es la alimentación, pues organismos como algas y plantas pueden absorber y bioacumular estas partículas, dependiendo de factores como su biodisponibilidad y tamaño (Navarro Espinoza *et al.*, 2021). En este contexto, las plantas adquieren un papel clave, no solo como organismos potencialmente afectados, sino también como una vía importante de entrada de los NM, incluido los CNTs, a la cadena trófica.

Revisión del impacto de los CNTs en plantas

Como se mencionó previamente, las plantas representan un componente fundamental en la evaluación del impacto ambiental de los CNTs, en este sentido, su interacción con los sistemas vegetales depende en gran medida de sus mecanismos de entrada y de sus propiedades fisicoquímicas, particularmente su tamaño, forma y funcionalización.

En este contexto se ha reportado que partículas con diámetros menores al de las aberturas de las estomas (10-50 μm), como los CNTs, pueden ingresar directamente a la cavidad subestomática, generando su obstrucción y por lo tanto un menor crecimiento en plantas debido a la afectación fotosintética (Navarro Espinoza *et al.*, 2021). Este efecto dependiente del tamaño podría afectar de forma directa la producción de alimento para la población, y diversas ecotecnologías que complementan la descontaminación y el abastecimiento de agua.

En el caso de las plantas, un hecho fundamental es que el efecto fisiológico, alteraciones genéticas, daños al ADN y generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) depende de la especie y la fase de desarrollo en la cual se encuentren (Ngo *et al.*, 2014). Un ejemplo es el de Mukherjee y colaboradores (2016), el cual utilizó MWCNTs con diferentes especies de plantas (*Triticum aestivum* (trigo) y *Zea mays* (maíz)) centrándose en la germinación, el desa-

rollo radicular, la biomasa y la eficiencia fotosintética. Los resultados indicaron que a concentraciones bajas (5-60 mg/L), los MWCNTs promovieron un aumento en la germinación y mejoraron la absorción de nutrientes en el trigo, mientras que en el maíz se observó un incremento significativo en la biomasa y la eficiencia fotosintética. Este efecto se atribuyó a la capacidad de los MWCNTs para mejorar la absorción de agua y la regulación de genes involucrados en el metabolismo del nitrógeno y la fotosíntesis. Sin embargo, los autores destacan que estos efectos positivos dependen estrictamente de la concentración utilizada, pues dosis elevadas pueden inducir estrés oxidativo y alterar los procesos fisiológicos de la planta. Asimismo, Yan *et al.* (2013) evaluaron los efectos de SWCNTs en el desarrollo de raíces de maíz (*Zea mays* L.). En este caso, las semillas de maíz se expusieron a una concentración de 20 mg/L, evaluando el crecimiento de las raíces durante 24, 36, 48, 60 y 72 h. Los SWCNTs aceleraron el crecimiento de las raíces seminales, aumentando su longitud y porcentaje de aparición. Asimismo, se observó una reducción significativa en la longitud y número de pelos radiculares.

Como podemos apreciar en la tabla 3, existen resultados contrastantes en la literatura. Autores como (Chhajer *et al.*, 2023) sugieren que los CNTs podrían utilizarse en dosis bajas como aditivos estimulantes del crecimiento de plantas de interés agronómico, lo cual podría transformar las prácticas agrícolas. Asimismo, la internalización de SWCNTs (Liu *et al.*, 2009) y MWCNTs (Khodakovskaya *et al.*, 2009) en plantas y semillas ha favorecido la captación de agua, la germinación y crecimiento de plántulas (Khodakovskaya *et al.*, 2009). Por otro lado, investigaciones como las de Begum *et al.* (2012) advierten que ciertos NMs pueden afectar negativamente el desarrollo vegetal a través de la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo cual puede ocasionar daño celular irreversible dañando el ADN, proteínas y membranas. Sumado a esto, Cañas *et al.* (2008) concluyeron en sus estudios que las especies responden de manera diferente a los CNTs, incluso en condiciones experimentales idénticas.

La variable respuesta se puede deber a diferencias en las estructuras del xilema (Begum *et al.*, 2012), al tamaño de la semilla, ya que las especies de semillas pequeñas presentan una mayor relación superficie-volumen y, por lo tanto, una mayor sensibilidad (Pennacchio *et al.*, 2005), o simplemente por hidrofobicidad, a la aglomeración de los CNTs sobre la raíz, lo cual puede alterar procesos bioquímicos esenciales para el crecimiento y la supervivencia de las plantas (Cañas *et al.*, 2008). Sumado a esto, Begum *et al.* (2012) mencionan la posibilidad de que algunos NMs ejerzan sus efectos tóxicos como agregados o mediante la liberación de materiales tóxicos.

Todo lo anterior demuestra la necesidad de un estudio exhaustivo de las interacciones entre las NPs de carbono y plantas, que además correlacione el destino final de las plantas expuestas. En este contexto, y ante la ausencia de regulaciones específicas y la falta de comprensión completa de los mecanismos de toxicidad de los CNTs, las agencias recomiendan minimizar la exposición mientras se avanza en investigaciones más completas.

Tabla 3. Efectos reportados en distintas especies vegetales tras la exposición a CNTs.

Especie	Tipo de CNT (concentración - exposición)	Etapa de desarrollo y parámetros	Efecto/respuesta en planta	Mecanismo	Referencias
<i>Amaranthus tricolor</i> L. (espinaca roja)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Reducción del peso y longitud de raíces y brotes conforme aumentó la concentración. Aumento de muerte celular. Pérdida de electrolitos influenciada por la dosis.	Acumulación en la superficie de la raíz. Formación de ROS que promueven la muerte celular y la fuga de electrolitos.	Begum et al. (2012)
<i>Cucumis sativus</i> (pepino)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Reducción del peso y longitud de raíces y brotes, a excepción de la longitud de brotes a 20 y 200 mg/L. Aumento de muerte celular. Pérdida de electrolitos influenciada por la dosis.	Acumulación en la superficie de la raíz. Formación de ROS que promueven la muerte celular y la fuga de electrolitos.	Begum et al. (2012)
<i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Aumento en longitud de raíz, y peso de raíz y brotes a 20 y 200 mg/L. Disminución en altura de brotes conforme aumenta la concentración. Pérdida de electrolitos influenciada por la dosis.	Acumulación en la superficie de la raíz. Formación de ROS que promueven la muerte celular y la fuga de electrolitos.	Begum et al. (2012)
<i>Oryza sativa</i> L. (arroz)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Reducción del peso y longitud de raíces y brotes conforme aumentó la concentración. Pérdida de electrolitos influenciada por la dosis.	Acumulación en la superficie de la raíz. Formación de ROS que promueven la muerte celular y la fuga de electrolitos.	Begum et al. (2012)
<i>Capsicum annuum</i> L. (chile)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Sin afectación.	NA	Begum et al. (2012)
<i>Glycine max</i> (soja)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Sin afectación.	NA	Begum et al. (2012)
<i>Abelmoschus esculentus</i> (abelmosco)	MWCNTs (0, 20, 200, 1000, 2000 mg/L - 15 días).	Plántulas:* Crecimiento de raíz y brote, muerte celular, fuga de electrolitos.	Sin afectación.	NA	Begum et al. (2012)
<i>Solanum lycopersicum</i> (tomate)	MWCNTs (10, 20, 40 µg/mL - 20 días).	Plántulas y semillas:** Germinación, crecimiento de plántulas y humedad.	A mayor concentración, mayor porcentaje de germinación, altura y peso. Semilla aparentemente mayor a mayor concentración del nanomaterial.	Aumento en la absorción de agua dentro del embrión de la semilla.	Khodakovskaya et al. (2011)

Continúa ►

Tabla 3. Efectos reportados en distintas especies vegetales tras la exposición a CNTs (continuación).

Especie	Tipo de CNT (concentración - exposición)	Etapas de desarrollo y parámetros	Efecto/respuesta en planta	Mecanismo	Referencias
<i>Daucus carota</i> (zanahoria)	SWCNTs (0, 56, 160, 315, 900, 1750, 5000 mg/L - 48 h).	Plántulas:* Elongación de raíz y absorción del material (SEM).	No se observó efecto significativo en la elongación de raíz.	No se detectó absorción de nanotubos en las raíces.	Cañas et al. (2008)
<i>Allium cepa</i> (cebolla)	SWCNTs (0, 56, 160, 315, 900, 1750, 5000 mg/L - 48 h).	Plántulas:* Elongación de raíz y absorción del material (SEM).	Aumento de la elongación radicular a 24 y 48 h.	Adsorción de nanotubos en la superficie de las raíces. Sin absorción interna.	Cañas et al. (2008)
<i>Ficus carica</i> (higuera)	SWCNTs (2 y 6 µg/mL - 30 días).	Plántulas:** Desarrollo y crecimiento de raíces <i>in vitro</i> .	Mayor crecimiento de raíces y tallo, a concentraciones bajas. Supervivencia del 100% en comparación con el control (93.33%).	Acumulación de SWCNTs en las paredes celulares del xilema, facilitando el transporte de nutrientes a mayores distancias.	Flores et al. (2013)
<i>Salvia macrosiphon</i> Boiss (planta medicinal)	SWCNTs (0, 10, 20, 30, 40 mg/L).	Plántulas y semillas: Germinación y crecimiento de plántulas.	Aumento del porcentaje de germinación, hasta 59.6% a 30 mg/L. Mayor crecimiento a 10 mg/L.	Penetración de SWCNTs a través del tegumento de la semilla, facilitando la absorción de agua y nutrientes.	Pourkhaloee et al. (2011)
<i>Triticum aestivum</i> (trigo harinero)	MWCNTs oxidados (10, 20, 40, 80, 160 µg/mL - 7 días).	Plántulas y semillas: Germinación, elongación de raíz y biomasa vegetal.	Mayor crecimiento radicular y producción de biomasa vegetal. Sin cambios en la germinación y longitud del tallo.	Penetración de o-MWCNTs en células radiculares, que aumentó la elongación celular y actividad de las deshidrogenasas.	Wang et al. (2012)
<i>Triticum aestivum</i> (trigo harinero)	MWCNTs (70, 80, 90 µg/mL - 6 horas).	Plántulas y semillas: Germinación, desarrollo radicular y rendimiento.	Aceleración de la germinación. Aumento del crecimiento radicular y de la densidad estomática. Aumento del rendimiento por grano en un 63%.	Penetración de MWCNTs en la raíz y el sistema vascular, facilitando el transporte de agua y nutrientes. Lo que aumenta la elongación celular y expansión de xilema y floema.	Joshi et al. (2018)
<i>Zea mays</i> (maíz)	MWCNTs (0, 200, 400, 800, 1200 mg/L).	Plántulas:* Crecimiento, desarrollo radicular, metabolismo del nitrógeno y fotosíntesis.	Promueve el crecimiento: mayor longitud de raíces y biomasa. Mayor estabilidad de la membrana celular. Mayor eficiencia fotosintética y metabolismo del nitrógeno. Concentración óptima: 800 mg/L.	Penetración de MWCNTs en células radiculares, que mejoran la actividad de las deshidrogenasas, reducen ROS y regulan enzimas fotosintéticas y de metabolismo del nitrógeno.	Hao et al. (2023)

Continúa ►

Tabla 3. Efectos reportados en distintas especies vegetales tras la exposición a CNTs (continuación).

Especie	Tipo de CNT (concentración - exposición)	Etapas de desarrollo y parámetros	Efecto/respuesta en planta	Mecanismo	Referencias
<i>Triticum aestivum</i> (trigo harinero)	MWCNTs (20 µg/mL y 50 µg/mL - una noche).	Plántulas y semillas: Germinación, vigor, biomasa y longitud de raíz y tallo.	Mejora significativa en la germinación, vigor, producción de biomasa y longitud de raíz y tallo.	Aumento en la absorción de agua y nutrientes. Modificación de respuestas hormonales. Mayor resistencia al estrés.	Srivastava y Rao (2014)
<i>Zea mays</i> (maíz)	MWCNTs (20 µg/mL y 50 µg/mL - una noche).	Plántulas y semillas: Germinación, vigor, biomasa y longitud de raíz y tallo.	Incremento en la germinación, desarrollo radicular y fotosíntesis.	Optimización del transporte de agua y nutrientes, regulación del metabolismo y activación de respuestas antioxidantes.	Srivastava y Rao (2014)
<i>Arachis hypogaea</i> (cacahuete)	MWCNTs (20 µg/mL y 50 µg/mL - una noche).	Plántulas y semillas: Germinación, vigor, biomasa y longitud de raíz y tallo.	Incremento en la germinación, desarrollo radicular y fotosíntesis.	Interacción con procesos hormonales y enzimáticos, que promueven el crecimiento temprano.	Srivastava y Rao (2014)
<i>Allium sativum</i> (ajo)	MWCNTs (20 µg/mL y 50 µg/mL - una noche).	Plántulas y semillas: Germinación, vigor, biomasa y longitud de raíz y tallo.	Estimulación de la germinación, mejor absorción de nutrientes y mayor tolerancia al estrés.	Incremento en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes, y estimulación de procesos metabólicos clave.	Srivastava y Rao (2014)
<i>Brassica juncea</i> (mostaza)	MWCNTs (10, 20 y 40 µg/mL - 7 días).	Plántulas y semillas:* Germinación y desarrollo. Elongación de las raíces, biomasa, longitud de las plúmulas y radículas.	Aumento de biomasa y longitud de raíz hasta 202%	Ingreso a la semilla que mejora la captación de agua y nutrientes.	Srivastava y Rao (2014)
<i>Cicer arietinum</i> (garbanzo)	CNTs funcionalizados (100 y 200 µl - 10 días).	Plántulas:* Desarrollo vegetal e internalización del material.	Mayor tasa de supervivencia, longitud de tallo y longitud de raíz.	Mejora en la capacidad de absorción de agua.	Tripathi et al. (2011)
Los estudios de toxicidad en cultivos alimentarios se realizan comúnmente a concentraciones altas de nanopartículas (2000-5000 mg/L) (Lin y Xing, 2007).			*Cultivo hidropónico. **Cultivo <i>in vitro</i> . NA: no aplica. SEM: por sus siglas en inglés de la microscopía electrónica de barrido.		

Fuente: Elaboración de los autores.

Marco normativo y regulatorio de nanomateriales en México

Regulación nacional de nanomateriales

La regulación de los NMs a nivel internacional tuvo su origen en China en 2003, con la creación del United Working Group for Nanomaterials Standardization, considerado el primer órgano de normalización en este ámbito (Saldívar Tanaka, 2019). Posteriormente, en 2005, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) formalizó el establecimiento del Comité Técnico ISO/TC 229, dedicado específicamente a los nanomateriales (Saldívar Tanaka, 2019). Su objetivo principal es desarrollar normas técnicas internacionales que reduzcan barreras comerciales, facilitando la circulación de productos nanotecnológicos a nivel global. Sin embargo, estas normas son de aplicación voluntaria y no consideran las particularidades sociales, políticas o económicas de los países en desarrollo (Anzaldo Montoya *et al.*, 2024).

El TC229 está conformado por 38 países miembros, entre ellos México, y 20 países observadores (ISO, 2025). Siendo la Dirección General de Normas (DGN) de la Secretaría de Economía el representante en México. Sus funciones incluyen el desarrollo de normas para terminología, nomenclatura, metrología e instrumentación, así como las especificaciones para materiales de referencia, metodologías de prueba, modelos y simulaciones, y prácticas de salud, seguridad y medio ambiente basadas en evidencia científica (ISO, 2025). A la fecha, el comité ha publicado 113 normas y tiene 38 más en proceso de desarrollo (ISO, 2025).

A nivel nacional e internacional, la regulación de la nanotecnología (NT) y sus productos se clasifica en dura (obligatoria o vinculante) y blanda (voluntaria, flexible, no reglamentaria) (Saldívar Tanaka, 2019). En México, la elaboración de normas obligatorias, conocidas como Normas Oficiales Mexicanas (NOM), es responsabilidad del Estado, mientras que las normas de carácter voluntario, las Normas Mexicanas (NMX), son desarrolladas por el Comité Técnico de Normalización Nacional en Nanotecnologías (CTNNN), coordinado por el Centro Nacional de Metrología (CENAM) (Programa de metrología para las nanotecnologías, 2017).

En contextos como el de México, donde las capacidades institucionales y técnicas para generar regulación propia son limitadas, las normas de la ISO se adoptan como referencia, sin un análisis profundo sobre su pertinencia local. Además, los esquemas de regulación obligatoria suelen enfrentar resistencia, debido a los costos adicionales, implicando tanto a los fabricantes (por pruebas de seguridad y cumplimiento normativo) como a las autoridades (por tareas de monitoreo y vigilancia). En consecuencia, prevalece la regulación blanda como forma dominante de gobernanza en este campo (Anzaldo Montoya *et al.*, 2024).

El CTNNN está integrado por dependencias del gobierno federal, representantes de la industria y la academia, agrupando más de 30 instituciones y organizaciones, como el Centro de Nanociencias y Nanotecnología, la Univer-

sidad Nacional Autónoma de México, FEI Technology de México S. A. de C. V, el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Tecnológica del Estado de Querétaro (Programa de metrología para las nanotecnologías, 2017). Sin embargo, los principales actores involucrados en la elaboración y adopción de estas normas voluntarias provienen del sector industrial y académico, los cuales están directamente vinculados con el mercado y la innovación. En contraste, la participación ciudadana y el debate público en estos procesos son mínimos o inexistentes. Esta configuración refleja una lógica de gobernanza de mercado, en donde la regulación se subordina a intereses económicos y a la promoción de la competitividad tecnológica (Anzaldo Montoya *et al.*, 2024).

Actualmente, México no cuenta con Normas Oficiales Mexicanas (NOM) relacionadas con nanotecnologías (NT), pero sí con 17 Normas Mexicanas (NMX) (ver tabla 4), las cuales pueden agruparse según la rama de actividad económica, conforme al Catálogo Mexicano de Normas, en tres categorías principales: gestión tecnológica, industrias diversas y protección ambiental.

En la rama de gestión tecnológica, por ejemplo, se concentran normas como la NMX-R-80004-1-SCFI-2020, enfocada en terminología, vocabulario y definiciones. En la categoría de industrias diversas, se encuentra la NMX-R-12901-1-SCFI-2015, que trata sobre la gestión de riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales manufacturados, y la NMX-R-13830-SCFI-2014, que contiene la guía para el etiquetado de nano-objetos manufacturados y sus subproductos.

Por último, en la rama de protección ambiental (marcada en gris en la tabla 4), que coincide con el enfoque central del artículo, se clasifican solamente cuatro normas. Dos de ellas están dirigidas a materiales específicos: la NMX-R-20660-SCFI-2019, que trata nanopartículas antibacterianas de plata, y la NMX-R-10868-SCFI-2019, que se enfoca en nanotubos de carbono de capa simple, nuestro material de estudio. Las otras dos normas trabajan a un nivel más general: la NMX-R-13121-SCFI-2019 aborda la evaluación del riesgo de los nanomateriales, y la NMX-R-16197-SCFI-2019 compila y describe métodos de detección toxicológica para NMs manufacturados.

Aunque la NMX-R-10868-SCFI-2019 es la única norma mexicana que aborda de forma específica los nanotubos de carbono, las demás normativas identificadas también inciden en su regulación de manera indirecta, al estar dirigidas a nanomateriales en general. Dado el creciente uso, producción y distribución de los CNTs, resulta fundamental que estas regulaciones generales sean aplicadas de forma particular a este tipo de compuestos, en tanto se desarrollan lineamientos normativos más específicos.

Aunque las 17 NMX identificadas abordan temas clave como terminología, gestión de riesgos y toxicología, su carácter voluntario y el limitado desarrollo institucional para su implementación reducen su impacto real. En particular, los riesgos ambientales y a la salud asociados con el uso de nanomateriales son reconocidos en las normas, pero no están sujetos a límites regulatorios ni mecanismos de control obligatorio, generando vacíos en la protección efectiva de la salud pública y el ambiente (Secretaría de Economía, 2025).

Tabla 4. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) relacionadas con NT (Secretaría de Economía, 2025).

No.	Código	Rama de actividad	Título	Entrada en vigor	Concordancia internacional
1	NMX-R-80004-6-SCFI-2015	Industrias diversas	Nanotecnologías – Vocabulario – Parte 6: caracterización de nano-objetos.	2019-11-19	ISO/TS 80004-6:2013 Nanotechnologies –Vocabulary –Part 6: Nano-object. characterization.
2	NMX-R-80004-5-SCFI-2015	NE	Nanotecnologías – Vocabulario Parte 5: interfaz Nano/Bio.	2017-04-02	NEQ.
3	NMX-R-80004-4-SCFI-2019	Gestión tecnológica	Nanotecnologías – Vocabulario- Parte 4: materiales nanoestructurados.	2020-08-03	ISO/TS 80004-4:2011 Nanotechnologies-Vocabulary- Part 4: nanostructured materials.
4*	NMX-R-80004-3-SCFI-2022	Gestión tecnológica	Nanotecnologías – Vocabulario- Parte 3: nano-objetos de carbono.	2022-04-26	ISO/TS 80004-4:2011 Nanotechnologies-Vocabulary- Part 4: nanostructured materials.
5	NMX-R-80004-2-SCFI-2020	Gestión tecnológica	Nanotecnologías – Vocabulario- Parte 3: nano-objetos de carbono.	2022-04-26	ISO/TS 80004-2:2015 Nanotechnologies-Vocabulary- Part 2: nano-objects.
6	NMX-R-80004-1-SCFI-2020	Gestión tecnológica	Nanotecnologías – Vocabulario- Parte 1: conceptos básicos.	2022-04-26	ISO/TS 80004-1: Nanotechnologies-vocabulary- Core terms.
7	NMX-R-62622-SCFI-ANCE-2014	NE	Nanotecnologías – Descripción, medición y parámetros de calidad dimensional de rejillas artificiales.	2015-06-12	IEC/TS 62622: Nanotechnologies- description, measurement and dimensional quality parameters of artificial gratings.
8	NMX-R-20660-SCFI-2019	Protección ambiental	Nanotecnologías – Especificación de materiales-nanopartículas antibacteriales de plata.	2020-08-02	ISO/TS 20660: Nanotechnologies- antibacterial silver nanoparticles- specification of characteristics and measurement methods.
9	NMX-R-13830-SCFI-2014	NE	Nanotecnologías – Guía para el etiquetado de nano-objetos manufacturados y de productos que contengan nano-objetos manufacturados.	2015-10-10	NEQ.
10	NMX-R-13121-SCFI-2019	Protección ambiental	Nanotecnologías – Evaluación del riesgo de nanomateriales.	2020-08-03	ISO/TR 13121:2011 Nanotechnologies-nanomaterial risk evaluation.
11	NMX-R-12901-2-SCFI-2016	NE	Nanotecnologías – Gestión de riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales manufacturados. Parte 2: uso del enfoque de control por bandas.	2019-11-24	ISO/TS 12901-2:2015 Nanotechnologies-occupational risk management applied to engineered nanomaterials-part 2: use of the control banding approach.
12	NMX-R-12901-1-SCFI-2015	Industrias diversas	Nanotecnologías – Gestión de riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales manufacturados. Parte 1: principios y enfoques.	2017-04-02	NEQ.
13*	NMX-R-10929-SCFI-2014	NE	Nanotecnologías – Caracterización de muestras de nanotubos de carbono de múltiples capas (NTCMC).	2014-12-19	NEQ.

Continúa ►

Tabla 4. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) relacionadas con NT (Secretaría de Economía, 2025) (continuación).

No.	Código	Rama de actividad	Título	Entrada en vigor	Concordancia internacional
14*	NMX-R-10868-SCFI-2019	Protección ambiental	Nanotecnologías – Caracterización de nanotubos de carbono de una capa mediante espectroscopía de absorción de UV-VIS-IR.	2021-08-03	ISO/TS 10868:2011 Nanotechnologies – Characterization of single-wall carbon nanotubes using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption spectroscopy.
15*	NMX-R-10867-SCFI-2014	Industrias diversas	Nanotecnologías – Caracterización de nanotubos de carbono de una capa (NTCUC) mediante espectroscopía de fotoluminiscencia en el infrarrojo cercano (EFL-IRC).	2015-01-20	NEQ.
16*	NMX-R-10798-SCFI-2016	NE	Nanotecnologías – Caracterización de nanotubos de carbono de una capa por microscopía de barrido con electrones y espectrometría de dispersión de energía de rayos x.	2019-11-19	ISO/TS 10798:2015 Nanotechnologies-characterization of single-wall carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive x-ray spectrometry analysis.
17	NMX-R-16197-SCFI-2019	Protección ambiental	Compilación y descripción de métodos de detección toxicológica para nanomateriales manufacturados.	2020-08-02	ISO/TR 16197:2014 Nanotechnologies- compilation and description of toxicological screening methods for manufactured nanomaterials.
NEQ = no es equivalente con ninguna norma internacional. *Específicas para CNTs.					

Fuente: Elaboración de los autores.

Normas mexicanas para nanomateriales con enfoque ambiental

La NMX-R-20660-SCFI-2019 Nanotecnologías-especificación de materiales-nanopartículas antibacteriales de plata, además de las especificaciones generales de las NPs antibacteriales de plata (Ag), menciona la importancia de realizar evaluaciones de riesgo ambiental y análisis de toxicidad para entender el comportamiento ambiental. Sin embargo, la norma no entra en detalles sobre los métodos específicos a utilizar. La norma menciona que estas pruebas se deben realizar conforme a normativas internacionales como las guías de ensayo de toxicidad ecológica de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el cual es un organismo supranacional. Las guías OCDE incluyen análisis de toxicidad para plantas, microorganismos del suelo, organismos terrestres y acuáticos e interacción del material con el suelo, para ver si las NPs pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas o afectar la fauna del suelo. En el caso de las plantas se evalúa germinación de semillas, crecimiento de plántulas, toxicidad sobre raíces, acumulación de

NPs, fototoxicidad, estrés y biomarcadores (Organization for Economic Cooperation and Development [OECD], 2025).

La NMX-R-13121-SCFI-2019 (Secretaría de Economía, 2025). Nanotecnologías-evaluación del riesgo de nanomateriales, se centra en establecer los criterios y procedimientos para la evaluación del riesgo de todos los productos y procesos que involucren nanomateriales, tanto para la salud humana como para el medio ambiente. En cuanto al medio ambiente, menciona la importancia de analizar el comportamiento de los NMs en agua, suelo y aire, así como el nivel de toxicidad en organismos acuáticos y terrestres, para así comprender la persistencia, biodegradabilidad y acumulación en los ecosistemas a corto y largo plazo, todo desde un enfoque multidisciplinario.

La norma propone un proceso estructurado que incluye: 1) la formación del contexto de evaluación, delimitando alcances, condiciones de uso y poblaciones expuestas; 2) la generación de datos, mediante análisis fisicoquímicos y toxicológicos del nanomaterial; 3) la evaluación de la exposición, considerando diversas rutas (inhalación, ingestión, dérmica, ambiental) y concentraciones; 4) la caracterización del riesgo, basado en efectos previamente conocidos; 5) la toma de decisiones, que puede incluir medidas de control o reducción de la exposición y, por último, la 6) la comunicación de resultados, decisiones y limitaciones del estudio, todo documentado rigurosamente para asegurar trazabilidad y fomentar una revisión continua del proceso.

La norma presenta varias ventajas, como el proporcionar un marco estructurado para la evaluación de riesgos asociados con NMs (útil ante la complejidad de sus propiedades) y promover la transparencia, al exigir que se expliciten las suposiciones y las incertidumbres presentes en los análisis. Un punto jugando a favor y en contra es que dicha norma, como la anterior, está basada en prácticas internacionales como la OCDE y la ISO/TR 13121, lo cual facilita su compatibilidad con estándares globales, facilitar el comercio, la colaboración internacional y el acceso a mejores prácticas; sin embargo, como se mencionó previamente no presenta especificidad al contexto de México.

A pesar de sus fortalezas, la NMX-R-13121-SCFI-2019 presenta limitaciones significativas. Al ser una norma voluntaria, su aplicación depende de la disposición y capacidad técnica de cada organización, representando, en el contexto mexicano, un desafío considerable. La falta de infraestructura especializada, escasez de datos toxicológicos específicos para NMs como los nanotubos de carbono, y la limitada formación del personal dificultan su implementación efectiva. Además, no establece mecanismos de verificación ni sanciones, debilitando su impacto en la protección real de la salud de los trabajadores.

En el caso específico de quienes fabrican nanotubos en México, esta norma podría ser un instrumento útil, pero insuficiente por sí sola. Si no se acompaña de políticas públicas, supervisión y regulación obligatoria, su efecto será limitado.

La NMX-R-10868-SCFI-2019 (Secretaría de Economía, 2019) establece los procedimientos para la caracterización de SWCNTs mediante espectros-

copía de absorción en el rango UV-VIS-IR. Su objetivo es obtener información sobre las propiedades ópticas y estructurales de los nanotubos, permitiendo comprender su comportamiento y mejorar su calidad. Aunque esta norma no aborda directamente los riesgos ambientales, su clasificación como norma de protección ambiental se justifica por su enfoque en propiedades fundamentales para evaluar el comportamiento de los nanotubos en diferentes medios como agua, suelo y aire, pues la dispersión y persistencia de los SWCNTs en estos medios pueden tener implicaciones ambientales. Dicha norma es la única que se enfoca directamente con CNTs y el cómo diversas propiedades son indicadores clave para la evaluación ambiental.

La NMX-R-16197-SCFI-2019 (Secretaría de Economía, 2019) establece los métodos estandarizados para la evaluación de riesgos toxicológicos de NMs manufacturados para garantizar que no representan una amenaza contra la salud humana, animal o el medio ambiente, es decir, para un uso seguro. Para esto, sugiere una caracterización fisicoquímica para inferir el cómo interactúan con organismos biológicos y el entorno, complementado con estudios *in vivo* e *in vitro* para organismos vivos, además de pruebas de ecotoxicidad, como pruebas de germinación y dosis letales para diferentes especies. La metodología tiene como objetivo determinar el potencial de exposición y los riesgos asociados con el uso o liberación de los NMs en el medio ambiente o en el ámbito industrial. Dicha norma también recomienda medidas de control y precaución, para el manejo de los NMs durante la fabricación, transporte y almacenamiento, para minimizar los riesgos para los trabajadores y el medio ambiente. Dicha norma señala que no sustituye estudios toxicológicos completos ni detallados, los cuales son necesarios para determinar efectos crónicos, dosis seguras o mecanismos de acción. Los métodos que propone están pensados como indicadores tempranos, no como pruebas definitivas de riesgo, por lo que incluso podrían arrojar falsos negativos. Además, como se mencionó previamente, estas normas presentan limitaciones importantes relacionadas con la disponibilidad de recursos técnicos, infraestructura adecuada y financiamiento, sumándose a esto el hecho de que su aplicación es voluntaria, reduciendo aún más su alcance e impacto potencial.

Finalmente, la NMX-R-16197-SCFI-2019 hace referencia a otras normas nacionales e internacionales, para la evaluación toxicológica, como las mencionadas en la tabla 5.

México no cuenta con ninguna regulación obligatoria, como es el caso de Francia con el Código del Medio Ambiente, el cual obliga a la declaración anual de las sustancias a la nanoescala fabricadas, o Estados Unidos de América con la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) (Saldívar Tanaka, 2019). Esto se puede deber a la dificultad para formular una regulación dura adecuada para este campo difuso y emergente, así como a los puntos tratados previamente. Por lo que su uso va a depender solamente de las empresas, su compromiso y responsabilidad por crear confianza, mejorar su reputación y anticipar futuras regulaciones.

Tabla 5. Normas nacionales e internacionales para evaluación toxicológica (NMX-R-16197-SCFI-2019).

Código	Nombre
ISO/TR 13121:2017	Nanotecnología – Guía para la evaluación de riesgos de los NMs.
ISO 10993-17:2002	Evaluación biocompatible de dispositivos médicos.
IEC 62677	Nanotecnología – Prácticas para la medición de la exposición a los NMs.
EPA Nanotechnology White Paper	Evaluación de los riesgos ambientales de los NMs.
OECD Test No. 318	Test Guidelines for the Toxicity Testing of Manufactured Nanomaterials.
ASTM E2909-14	Standard Guide for the Use of Nanotechnology in the Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials.
ASTM E2535-13	Standard Guide for Characterizing the Toxicological Hazards of Nanomaterials.
NIOSH Current Intelligence Bulletin 65	Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers.
EN 17169:2019	Nanomaterials – Framework for the Evaluation of the Human Health and Environmental Safety of Nanomaterials

ISO: International Organization for Standardization.

IEC: International Electrotechnical Commission.

EPA: Environmental Protection Agency.

OECD: Organization for Economic Co-operation and Development.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health.

EN: Environmental Safety of Nanomaterials.

Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusión

A pesar del creciente interés en los nanotubos de carbono y sus múltiples aplicaciones, aún se sabe poco sobre su comportamiento en sistemas biológicos, especialmente en plantas. La falta de información sobre su absorción, acumulación y toxicidad, así como la influencia del tipo de planta en estos procesos, evidencia una necesidad urgente de desarrollar estudios a corto y largo plazo que consideren distintas especies vegetales y las diversas modificaciones de estos NMs. Tales investigaciones no solo permitirían comprender mejor la fitotoxicidad, sino también sentar las bases para metodologías estandarizadas que guíen su uso responsable y su adecuada eliminación. Es necesario construir un puente entre los resultados obtenidos en la ciencia básica (realizados en condiciones controladas de laboratorio) y su aplicación en contextos reales a través de normativas claras y accesibles.

Contribución de autorías

Sarahi Josefina Estrada Loredo, Daniela Salado Leza: conceptualización y diseño.
Sarahi Josefina Estrada Loredo, Daniel Sánchez Campos: desarrollo metodológico.

gico y redacción del borrador.

Sarahi Josefina Estrada Loredo, Daniel Sánchez Campos, Daniela Salado Leza: análisis e interpretación.

Daniel Sánchez Campos, Daniela Salado Leza: revisión y edición final del texto.
Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Referencias

- Al-Maatq, M., Fuentealba, P., Facht, M., Glüge, R., Ali, S. y Hoeschen, C. (2022). Carbon nanotube-based reinforced polymers for medical applications: improving impact strength of polymer-polymer composites. *Journal of Nanomaterials*, 2022: 1-15. <https://doi.org/10.1155/2022/1760198>.
- Andrade, L. R. M., Andrade, L. N., Bahú, J. O., Cárdenas Concha, V. O., Machado, A. T., Pires, D. S., Santos, R., Cardoso, T. F. M., Cardoso, J. C., Albuquerque-Junior, R. L. C., Severino, P. y Souto, E. B. (2024). Biomedical applications of carbon nanotubes: a systematic review of data and clinical trials. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 99(105932): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105932>.
- Anzaldo Montoya, M., Hernández-García, Y. I., Hernández-Montiel, L. G. y Hernández-Adame, L. (2024). Agronanotechnology in the arid zones of northern Mexico: research, challenges, and new trends. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 26: 1-29. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.53>.
- Balandin, A. A. (2011). Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*, 10(8): 569-581. <https://doi.org/10.1038/nmat3064>.
- Begum, P., Ikhtiar, R., Fugetsu, B., Matsuoka, M., Akasaka, T. y Watari, F. (2012). Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes assessed by selected plant species in the seedling stage. *Applied Surface Science*, 262: 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.028>.
- Brouwer, D. H., Links, I. H. M., De Vreede, S. A. F. y Christopher, Y. (2006). Size selective dustiness and exposure; simulated workplace comparisons. *The Annals of Occupational Hygiene*, 50(5): 445-452. <https://doi.org/10.1093/ANNHYG/MEL015>.
- Business Wire. (2023). *Global market for carbon nanotubes 2023-2033: production capacities to more than double by 2025 due to the explosion in demand from EV battery market*. 31 de mayo. <https://www.businesswire.com/news/home/20230531005634/en/Global-Market-for-Carbon-Nanotubes-2023-2033-Production-Capacities-to-More-than-Double-by-2025-Due-to-the-Explosion-in-Demand-from-EV-Battery-Market--ResearchAndMarkets.com>.
- Cañas, J. E., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., Lee, E. H. y Olszyk, D. (2008). Nanomaterials in the environment: effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9): 1922-1931. <https://academic.oup.com/etc/article/27/9/1922/7764327>.
- Castillo-Rivera, F., Sánchez-Campos, D., Meza-Pardo, I. G., Díaz-López, O. y Salado-Leza, D. (2025). Milestones in nanotechnology-aided cancer phototherapy. En

- P. Manivasagan, J. Venkatesan y E.-S. Jang (eds.), *Nanophototherapy*. Elsevier, 25-98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13937-6.00016-0>.
- Chhajer, A. K., Sen, S., Kumar, R., Singh, N., Wadhavan, V., Sharma, P. y Saini, T. (2023). Applications of carbon nanotubes in plant growth and development: a review. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 14(5): 1088-1095. <https://www.researchgate.net/publication/374053305>.
- Cimbaluk, G. V., Ramsdorf, W. A., Perussolo, M. C., Santos, H. K. F., Da Silva De Assis, H. C., Schnitzler, M. C., Schnitzler, D. C., Carneiro, P. G. y Cestari, M. M. (2018). Evaluation of multiwalled carbon nanotubes toxicity in two fish species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150: 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.034>.
- Deng, S. y Berry, V. (2016). Wrinkled, rippled and crumpled graphene: an overview of formation mechanism, electronic properties, and applications. *Materials Today*, 19(4): 197-212. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.002>.
- Deshpande, P. P. (2022). *Molecular modeling of high-performance thermoset polymer matrix composites for aerospace applications*. Tesis doctoral, Michigan Technological University. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etrdr/1430>.
- Evans, D. E., Turkevich, L. A., Roettgers, C. T., Deye, G. J. y Baron, P. A. (2013). Dustiness of fine and nanoscale powders. *Annals of Occupational Hygiene*, 57(2): 261-277. <https://doi.org/10.1093/ANNHYG/MES060>.
- Flores, D., Chaves, J. S., Chacón, R. y Schmidt, A. (2013). A novel technique using SWCNTs to enhance development and root growth of fig plants (*Ficus carica*). *Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo*, 3: 167-170). Nano Science and Technology Institute.
- Hao, Y., Yu, Y., Sun, G., Gong, X., Jiang, Y., Lv, G., Zhang, Y., Li, L., Zhao, Y., Sun, D., Gu, W. y Qian, C. (2023). Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. *Plants*, 12: 1-25. <https://doi.org/10.3390/plants12081604>.
- Hasnain, M. S. y Nayak, A. K. (2019). *Carbon nanotubes for targeted drug delivery*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0910-0>.
- Hosseinpour, M., Azimirad, V., Alimohammadi, M., Shahabi, P., Sadighi, M. y Nejad, G. G. (2016). The cardiac effects of carbon nanotubes in rat. *BioImpacts*, 6(2): 79-84. <https://doi.org/10.15171/bi.2016.11>.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2014). *Report of the advisory group to recommend priorities for IARC monographs during 2015-2019*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer. <https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/priorities2015-2019.pdf>.
- Iijima, Sumio. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354: 56-58 <https://doi.org/10.1038/354056a0>.
- International Organization for Standardization (ISO). (2025). *ISO/TC 229: Nanotechnologies*, marzo. <https://www.iso.org/committee/381983.html>.
- Joshi, A., Kaur, S., Dharamvir, K., Nayyar, H. y Verma, G. (2018). Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair, growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(8): 3148-3160. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8818>.

- Kabir, E., Kumar, V., Kim, K.-H., Yip, A. C. K. y Sohn, J. R. (2018). Environmental impacts of nanomaterials. *Journal of Environmental Management*, 225: 261-271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.087>.
- Khan, S. U. y Kim, J. K. (2011). Impact and delamination failure of multiscale carbon nanotube-fiber reinforced polymer composites: a review. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 12(2): 115-133. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2011.12.2.115>.
- Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F. y Biris, A. S. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *American Chemical Society Nano*, 3(10): 3221-3227. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>.
- Khodakovskaya, M. V, de Silva, K., Nedosekin, D. A., Dervishi, E., Biris, A. S., Shashkov, E. V, Galanzha, E. I. y Zharov, V. P. (2011). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(3): 1028-1033. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008856108/-/DCSupplemental>.
- Kumah, E. A., Fopa, R. D., Harati, S., Boadu, P., Zohoori, F. V. y Pak, T. (2023). Human and environmental impacts of nanoparticles: a scoping review of the current literature. *BioMed Central Public Health*, 23(1059): 2-28. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15958-4>.
- Lin, D. y Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*, 150(2): 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.016>.
- Liu, Q., Chen, B., Wang, Q., Shi, X., Xiao, Z., Lin, J. y Fang, X. (2009). Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. *Nano Letters*, 9(3): 1007-1010. <https://doi.org/10.1021/nl803083u>.
- Madikere Raghunatha Reddy, A. K., Darwiche, A., Reddy, M. V. y Zaghib, K. (2025). Review on advancements in carbon nanotubes: synthesis, purification and multifaceted applications. *Batteries*, 11(2): 1-75. <https://doi.org/10.3390/batteries11020071>.
- Merneedi, A., Natrayan, L., Kaliappan, S., Veeman, D., Angalaeswari, S., Srinivas, C. y Paramasivam, P. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of carbon nanotube-reinforced epoxy composites for automobile application. *Journal of Nanomaterials*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4937059>.
- Modekwe, H. U., Olaitan Ayeleru, O., Onu, M. A., Tobias, N. T., Mamo, M. A., Moothi, K., Daramolad, M. O. y Olubambi, P. A. (2021). The current market for carbon nanotube materials and products. En A. A. Baskar, A. K. Mandal y S. Thomas (eds.), *Handbook of carbon nanotubes*. Springer International Publishing, 1-15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70614-6_73-1.
- Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A. D., Pagano, L., Dhankher, O. P. y White, J. C. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 7(172): 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00172>.
- Navarro Espinoza, S., Meza-Figueroa, D., Soto-Puebla, D., Castañeda, B. y Pedroza-Montero, M. (2021). Nanopartículas: efectos en la salud humana y el medio ambiente.

- Epistemos*, 15(30): 58-64. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i30.166>.
- Ngo, Q. B., Dao, T. H., Nguyen, H. C., Tran, X. T., Nguyen, T. Van, Khuu, T. D. y Huynh, T. H. (2014). Effects of nanocrystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (*Vietnamese species DT-51*). *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 5(1). <https://doi.org/10.1088/2043-6262/5/1/015016>.
- Nguyen-Tran, H. D., Hoang, V. T., Do, V. T., Chun, D. M. y Yum, Y. J. (2018). Effect of multiwalled carbon nanotubes on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced polyamide-6/polypropylene composites for lightweight automotive parts. *Materials*, 11(3): 1-12. <https://doi.org/10.3390/MA11030429>.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). *OECD publications*. <https://www.oecd.org/content/oecd/en/search.html?q=nano-materials&orderBy=mostRelevant&page=0&facetTags=oecd-policy-areas%3Apa8%2Coecd-content-types%3Apublications%2Freports>.
- Pandey, P. y Dahiya, M. (2016). Carbon nanotubes: types, methods of preparation and applications. *International Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 1: 15-21. <https://www.researchgate.net/publication/303994564>.
- Pennacchio, M., Jefferson, L. V. y Havens, K. (2005). *Arabidopsis thaliana*: a new test species for phytotoxic bioassays. *Journal of Chemical Ecology*, 31(8): 1877-1885. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-5932-7>.
- Pourkhaloe, A., Haghighi, M. y Mahdi, M. (2011). Carbon nanotubes can promote seed germination via seed coat penetration. *Seed Technology*, 2: 155-169. <https://www.researchgate.net/publication/262945529>.
- Programa de metrología para las nanotecnologías. (2017). Las nanotecnologías en el CENAM. *Mediciones*, 3: 11-13. <https://www.gob.mx/cenam/articulos/las-nanotecnologia-en-el-cenam>.
- Rathinavel, S., Priyadarshini, K. y Panda, D. (2021). A review on carbon nanotube: an overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. *Materials Science and Engineering: B*, 268, 115095. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>.
- Sabet, M. (2024). Enhancing the thermal and crystallization properties of polypropylene through carbon nanotube integration: a comprehensive investigation. *Iranian Polymer Journal (English edition)*, 33(6): 727-741. <https://doi.org/10.1007/S13726-024-01278-W>.
- Sabet, M. (2025). Innovations in carbon nanotube polymer composites: electrical, thermal, and mechanical advancements for aerospace and automotive applications. *Synthetic Metals*, 310, 117794. <https://doi.org/10.1016/J.SYNTH-MET.2024.117794>.
- Saldívar Tanaka, L. (2019). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional, para la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13(24): 1-27. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>.
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). (2020). *Substance evaluation conclusion document as required by REACH Article 48*

- and evaluation report for multi-walled carbon nanotubes (MWCNT), synthetic graphite in tubular shape and tangled. <http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/registered-substances>.
- Secretaría de Economía. (2019). NMX R 20660 SCFI 2019: Nanotecnologías, especificación de materiales: nanopartículas antibacteriales de plata. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 2020. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-r-20660-scfi-2019/>.
- Secretaría de Economía. (2019). NMX R 10868 SCFI 2019: Nanotecnologías: caracterización de nanotubos de carbono de una capa mediante espectroscopía de absorción UV Vis IR. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 2020. <https://platiica.economia.gobmx/normalizacion/nmx-r-10868-scfi-2019/>.
- Secretaría de Economía. (2019). NMX R 16197 SCFI 2019: Compilación y descripción de métodos de detección toxicológica para nanomateriales manufacturados. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 2020. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-r-16197-scfi-2019/>.
- Secretaría de Economía. (2025). *Plataforma Tecnológica Integral de Infraestructura de la Calidad*. 2 de abril. <https://platiica.economia.gob.mx/>.
- Sharma, A., y Kumar, R. (2018). Fabrication and characterization of carbon nanotubes-based polymer nanocomposites. *Integrated Research Advances*, 5(2): 42-75. <http://www.pubs.iscience.in/journal/index.php/ira/article/view/775>.
- Speranza, G. (2021). Carbon nanomaterials: synthesis, functionalization and sensing applications. *Nanomaterials*, 11(4): 967. <https://doi.org/10.3390/nano11040967>.
- Srinivasan, V., Kunjiappan, S., and Palanisamy, P. (2021). A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications. *International Nano Letters*, 11(4): 321-345. <https://doi.org/10.1007/S40089-021-00328-Y>.
- Srivastava, A. y Rao, D. P. (2014). Enhancement of seed germination and plant growth of wheat, maize, peanut and garlic using multiwalled carbon nanotubes. *European Chemical Bulletin*, 3(5): 502-504. <https://doi.org/10.17628/ecb.2014.3.502504>.
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2013). *Current Intelligence Bulletin 65: Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers* (NIOSH Publication No. 2013 145). Abril. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/default.html>.
- Tripathi, S., Sonkar, S. K. y Sarkar, S. (2011). Growth stimulation of gram (*Cicer arietinum*) plant by water soluble carbon nanotubes. *Nanoscale*, 3(3): 1176-1181. <https://doi.org/10.1039/c0nr00722f>.
- U. S. Environmental Protection Agency. (2024). *Control of nanoscale materials under the Toxic Substances Control Act*. Junio. <https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/control-nanoscale-materials-under>.
- Wang, B., Yin, J. y Wang, L. (2013). Structure and properties of aeronautical composites using carbon nanotubes/epoxy dispersion as nanocomposite matrix. *Polymer Composites*, 34(10): 1690-1697. <https://doi.org/10.1002/PC.22570>.

- Wang, X., Han, H., Liu, X., Gu, X., Chen, K. y Lu, D. (2012). Multi-walled carbon nanotubes can enhance root elongation of wheat (*Triticum aestivum*) plants. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(841): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-0841-5>.
- Yahyazadeh, A., Nanda, S. y Dalai, A. K. (2024). Carbon nanotubes: a review of synthesis methods and applications. *Reactions*, 5(3): 429-451. <https://doi.org/10.3390/reactions5030022>.
- Yan, S., Zhao, L., Li, H., Zhang, Q., Tan, J., Huang, M., He, S. y Li, L. (2013). Single-walled carbon nanotubes selectively influence maize root tissue development accompanied by the change in the related gene expression. *Journal of Hazardous Materials*, 246-247: 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.013>.
- Yang, L., Greenfeld, I. y Wagner, H. D. (2016). Nanomaterials: toughness of carbon nanotubes conforms to classic fracture mechanics. *Science Advances*, 2(2): 1-8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500969>.
- Yano Research Institute. (2024). *Global carbon nanotube market: Key research findings 2023*. 2 de septiembre. <https://www.yanoresearch.com/press/pres>.