

AGRONANOTECNOLOGÍA: PERSPECTIVAS E IMPLICACIONES EN LA GESTIÓN AMBIENTAL

AGRONANOTECHNOLOGY: PERSPECTIVES AND IMPLICATION IN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

RESUMEN

La innovación tecnológica característica del siglo XXI ha abierto múltiples posibilidades para incrementar la productividad, sostenibilidad y eficiencia en la agricultura, con la nanotecnología consolidándose como una herramienta estratégica para reducir el uso de fertilizantes y herbicidas químicos, al tiempo que atiende preocupaciones ambientales y de salud pública. Este trabajo analiza la viabilidad y el marco normativo ambiental respecto a la aplicación de nanomateriales en la agricultura, considerando tanto sus beneficios como los retos regulatorios que conlleva. La metodología se basó en una revisión documental realizada en bases de datos científicas reconocidas como ScienceDirect, Google Scholar y SciELO, abarcando literatura publicada entre 2010 y 2024 en inglés y español. Se utilizaron palabras clave como "nanotechnology", "agriculture", "nanofertilizers", "nanosensors" y "nanopesticides", combinadas con operadores booleanos para optimizar la búsqueda. De un total de aproximadamente noventa documentos identificados, se seleccionaron 45 tras un análisis preliminar de títulos y resúmenes. Estos se organizaron en categorías temáticas: aplicaciones de nanomateriales (nanofertilizantes, nanoplaguicidas, nanosensores y nanoherbicidas), evaluación de riesgos ambientales y de salud, y marcos regulatorios nacionales e internacionales, con especial énfasis en América Latina. Los resultados muestran que, si bien existen avances importantes en la investigación y aplicación de nanomateriales en la agricultura, la región latinoamericana carece de un marco regulatorio específico que norme su producción, uso y gestión. Esta ausencia genera incertidumbre para la adopción segura y sostenible de la nanotecnología en el sector agrícola, representando un desafío urgente para garantizar tanto la innovación como la protección ambiental y de la salud.

Palabras clave: nanotecnología; agricultura; normatividad ambiental; América Latina.

VIRAMONTES MÁRQUEZ, Juan Pablo ¹

ADAME MARTÍN, Angélica Evelyn ²

GARCÍA DE ALBA VERDUZCO, Javier Eugenio ³

RAMÍREZ HERNÁNDEZ, Blanca Catalina ³

GUTIÉRREZ MARTÍNEZ, Paulina Beatriz⁴

MALDONADO VILLEGAS, Marcela Mariel ⁴

1. Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Zapopan, Jalisco, México.
2. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco, México.
3. Departamento de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco, México.
4. Departamento de Ciencias Ambientales, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco, México.

Correspondencia

marcela.maldonado@academicos.udg.mx
<https://orcid.org/0000-0002-0483-6951>

Fecha de recepción
 13 de agosto de 2025.

Fecha de aceptación
 14 de enero de 2026.

ABSTRACT

The technological innovation of the 21st century has opened multiple possibilities to increase productivity, sustainability, and efficiency in agriculture, with nanotechnology emerging as a strategic tool to reduce the use of chemical fertilizers and herbicides while addressing environmental and public health concerns. This work analyzes the feasibility and environmental regulatory framework in Mexico and Latin America regarding the application of nanomaterials in agriculture, considering both their benefits and the regulatory challenges involved. The methodology was based on a documentary review carried out in scientific databases such as ScienceDirect, Google Scholar, and SciELO, covering literature published between 2010 and 2024 in English and Spanish. Keywords including “nanotechnology”, “agriculture”, “nanofertilizers”, “nanosensors”, and “nanopesticides” were used in combination with Boolean operators to optimize the search. From an initial total of approximately 90 documents, 45 were selected after a preliminary analysis of titles and abstracts. These were organized into thematic categories: applications of nanomaterials (nanofertilizers, nanopesticides, nanosensors, and nanoherbicides), environmental and health risk assessments, and national and international regulatory frameworks, with a particular focus on Mexico and Latin America. The results show that, although significant progress has been made in research and applications of nanomaterials in agriculture, the Latin American region lacks a specific regulatory framework to govern their production, use, and management. This absence creates uncertainty regarding the safe and sustainable adoption of agricultural nanotechnology, representing an urgent challenge to ensure innovation while protecting both the environment and public health.

Keywords: nanotechnology; agriculture; environmental management; Latin America.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología surge del interés científico por controlar y manipular la materia a escalas extremadamente pequeñas, donde sus propiedades físicas, químicas y biológicas pueden diferir significativamente de las observadas a nivel macroscópico. Un punto de inflexión en el desarrollo conceptual de esta disciplina fue la conferencia “There’s Plenty of Room at the Bottom”,



presentada por Richard Feynman en 1959 ante la Sociedad Americana de Física. En ella, Feynman planteó la posibilidad de manipular átomos y moléculas de manera individual, sentando las bases teóricas de lo que posteriormente se consolidaría como nanotecnología (Bennett-Woods, 2008). Desde la segunda mitad del siglo XX, particularmente a partir de las ideas planteadas por Feynman y su posterior desarrollo experimental en las décadas de 1980 y 1990, la nanotecnología ha evolucionado hacia una disciplina que permite diseñar materiales con propiedades específicas como lo son las nanopartículas, transformando sectores entre los que destacan: la medicina (Ramsden, 2016), la energía y, más recientemente, la agricultura (Lira Saldivar, 2016). En este último ámbito, Lira Saldivar (2016) señala que sus aplicaciones incluyen el desarrollo de insumos más eficientes, la optimización en el uso de recursos naturales y la mejora en la protección de cultivos. En países como México, donde la agricultura desempeña un papel estratégico (Delgado, 2008; Villegas y col., 2024) tanto en lo económico como en lo ambiental, estas innovaciones representan una alternativa para enfrentar los desafíos asociados al deterioro de suelos, el uso intensivo del agua y la presión sobre la biodiversidad (Terán-Samaniego y col., 2025). Hablando de los campos de aplicación de la nanotecnología, estos son vastos y diversos, extendiéndose más allá de la ciencia básica hacia la medicina, la electrónica, la energía, la agricultura y el medio ambiente (Cuenca, 2017). En la medicina, por ejemplo, los nanomateriales como los hidróxidos dobles laminares (figura 1) permiten desarrollar sistemas de liberación de fármacos capaces de llegar con precisión a células específicas, como las cancerosas, minimizando los efectos secundarios en tejidos sanos. En la electrónica, la miniaturización impulsada por la nanotecnología ha permitido crear dispositivos cada vez más pequeños, rápidos y eficientes, marcando el ritmo del avance en la computación cuántica y los dispositivos móviles (Ramsden, 2016). En el campo energético, se desarrollan materiales que mejoran la eficiencia de las células solares y baterías, permitiendo almacenar y generar energía de manera más sostenible (Kamat, 2019). Incluso en la agricultura y el medio ambiente, la nanotecnología ofrece soluciones para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y pesticidas (Kah y col., 2019), así como para la remediación de suelos y aguas contaminadas.

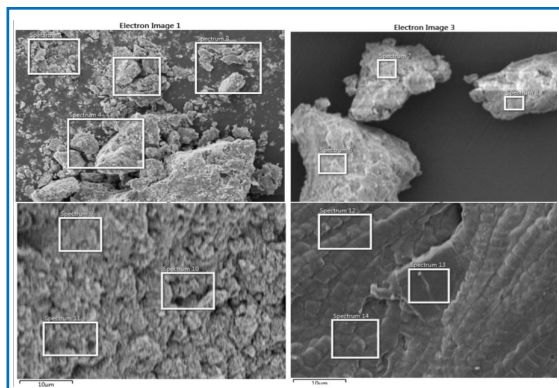


Figura 1. Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de nanomateriales tipo hidróxidos dobles laminares (HDL).

En México, 14 % del territorio es destinado al sector agrícola donde, entre cultivos anuales, cíclicos y perennes se destinan cerca de 53.1 mil toneladas por año de agroquímicos (INEGI, 2019)., sustancias químicas-biológicas que se utilizan como plaguicidas y fertilizantes, que por las filtraciones de residuos al subsuelo y ríos, conllevan altos riesgos de intoxicación para las personas y seres vivos, estos pueden derivar en leucemia, cáncer medular, interrupción de desarrollo en fetos, depresión del sistema inmune y problemas reproductivos como infertilidad y malformaciones genitales, en usuarios directos de los productos como en pobladores aledaños a las zonas agrícolas (Fabrega y col., 2011).

El incremento en 104 % en el uso de estos productos en los últimos 10 años nos lleva a demandar soluciones innovadoras y sustentables que representen alternativas más seguras y responsables, como la implementación de productos biotecnológicos dentro de la agricultura, sector que cada día demanda mayor producción de alimentos, y donde cada vez escasea más el agua por su mala gestión. Las herramientas biotecnológicas que nos permiten la implementación de métodos biológicos como la bioestimulación vegetal por medio de nanomateriales, son una promesa en la reducción en el uso de agroquímicos y aprovechamiento del agua en los cultivos mexicanos (Martínez Torreblanca y col., 2020).

Atendiendo a la problemática surge la denominada “agronanotecnología” como una herramienta transformadora en el campo agrícola, con la capacidad de mejorar la productividad y resistencia de los cultivos ante condiciones adversas. Es en este último sector donde radica el objetivo de este capítulo: analizar el papel emergente de la nanotecnología en la agricultura y sus implicaciones en la gestión ambiental en el contexto mexicano; se

examina cómo estas tecnologías pueden integrarse a prácticas más sostenibles, qué efectos potenciales pueden generar sobre los ecosistemas agrícolas y qué retos plantea su implementación en términos regulatorios, sociales y ecológicos.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del trabajo se realizó una búsqueda documental en bases de datos científicas reconocidas como ScienceDirect, Google Scholar y SciELO, abarcando literatura publicada entre 2010 y 2024 en inglés y español. Se utilizaron palabras clave específicas como *nanotechnology*, *agriculture*, *environmental sustainability*, *agronanotechnology*, “*nanofertilizers*”, “*nanosensors*” y “*nanopesticides*”, combinadas con operadores booleanos (por ejemplo, “*nanotechnology and agriculture*”) para maximizar la relevancia de los resultados. Se consideraron artículos revisados por pares, revisiones sistemáticas y capítulos de libros relacionados con aplicaciones, riesgos y regulación de la nanotecnología en agricultura, excluyendo tesis, resúmenes y documentos sin acceso completo.

De un total inicial de aproximadamente 90 documentos, tras una revisión por título y resumen se seleccionaron 45 que se analizaron en profundidad. El total se organizó en categorías temáticas que incluyen aplicaciones de nanomateriales (nanofertilizantes, nanoplaguicidas, nanosensores, nanoherbicidas), evaluación de riesgos ambientales y de salud, y el marco regulatorio nacional e internacional, con especial énfasis en México y América Latina. El análisis consideró enfoques cronológicos y geográficos para identificar tendencias, vacíos normativos y desafíos en la implementación segura y sostenible de la nanotecnología agrícola.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

NANOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA (AGRONANOTECNOLOGÍA)

La industria agroalimentaria tiene el gran reto de cumplir no sólo la demanda actual de alimentos, la cual es destinada tanto a industrias ganaderas y dietas

humanas sino que además, por el aumento poblacional, se pronostica que debe incrementar de 70 a 100% la producción actual para el año 2050; este escenario plantea desafíos significativos para la ciencia agrícola, entre los que se incluyen el estancamiento en la productividad de los cultivos, la baja absorción de macro y micronutrientes, la disminución del contenido de materia orgánica en los suelos, la limitada disponibilidad de tierras cultivables, los efectos del cambio climático y la creciente escasez de agua. Es por todas estas razones que las investigaciones en la rama de la agronotecnología están en la mira a nivel mundial, como proyecto destinado principalmente a la aplicación de métodos nanotecnológicos en la agricultura (Zeng, Shakoor & Rui, 2025; Kumar y col., 2023) y suministro de alimentos en zonas marginadas de los países en vías de desarrollo, debido a la virtud en la producción sustentable de los alimentos, ya que se requiere menor volumen de productos químicos en los cultivos (Takeuchi y col., 2011), se presenta una mejora en la calidad e inocuidad de los productos, un mayor valor nutricional en los mismos y la elaboración de nuevos insumos alimenticios con novedosos aromas, texturas y sabores.

Un referente en el ámbito de la agronotecnología es Brasil, país pionero en América Latina con programas avanzados de investigación y desarrollo en este campo; a través de instituciones como la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), Brasil impulsa proyectos que exploran el uso de nanomateriales en la agricultura para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, controlar plagas y minimizar el impacto ambiental de la producción agrícola (Poinern, 2015).

Algunos productos nanotecnológicos utilizados en la industria agrícola emplean nanopartículas (NPs), que pueden ser derivadas de carbono o elementos metálicos como el Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe), y Plata (Ag), además de materiales como las denominadas nanoarcillas; existen diferentes clasificaciones, pero nosotros utilizaremos la proporcionada por Fraceto, L. F. y col., la cual distingue a cada sector por su función en la agricultura: Nanofertilizantes, nanoplaguicidas nanosensores, nanoherbicidas.

La figura 2 presenta una comparación de los principales métodos nanotecnológicos aplicados en distintos cultivos de importancia agrícola, con base en estudios científicos identificados en Google Scholar. En ella se observa la distribución del número de publicaciones relacionadas con el uso de nanopartículas metálicas, como las de zinc (ZnO), plata (Ag) y oro (Au), así

como con estrategias basadas en nanofertilizantes y nanoencapsulación de pesticidas, en cultivos como maíz, trigo, arroz, tomate y soya.

Los resultados evidencian que el tomate y el maíz concentran la mayor cantidad de investigaciones, particularmente en el desarrollo de nanofertilizantes y nanopartículas de ZnO, lo que refleja el interés científico por optimizar la productividad y el manejo nutrimental en cultivos de alta relevancia económica. En contraste, cultivos como la soya y el arroz presentan un menor número de estudios, lo que sugiere áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Asimismo, la nanoencapsulación de pesticidas muestra una presencia constante en varios cultivos, destacando su potencial para mejorar la eficiencia en la protección vegetal y reducir el impacto ambiental asociado al uso convencional de agroquímicos.

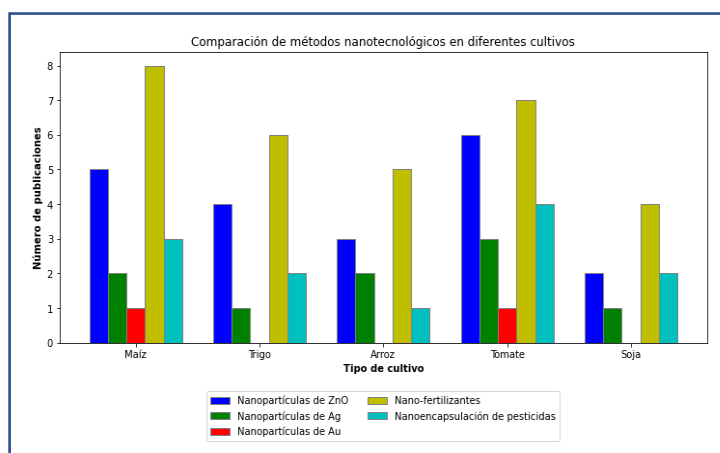


Figura 10. Comparación de nanomateriales y cultivos utilizados en estudios científicos de Google Scholar.

VIABILIDAD AMBIENTAL

El desarrollo de nuevos campos científicos requiere investigaciones que permitan evaluar sus aplicaciones prácticas. En el caso de la agronanotecnología, aunque algunos nanomateriales han demostrado estimular el crecimiento vegetal y aumentar la productividad, su implementación en cultivos comerciales depende de múltiples factores que aún deben ser evaluados.

Un primer aspecto a considerar para la implementación de nanomateriales en la agricultura es su relación costo–beneficio. El costo de producción depende del tipo de nanomaterial y, aunque suele ser ligeramente superior al de fertilizantes comerciales convencionales como el NPK, su función principal no es sustituirlos, sino complementar su uso. De esta manera, los nanomateriales pueden contribuir a reducir la cantidad de fertilizantes químicos aplicados, manteniendo el suministro adecuado de nutrientes a los cultivos.

En este contexto, los nanomateriales representan una alternativa para disminuir el consumo excesivo de insumos agrícolas y, en algunos casos, para proteger a las plantas frente a factores abióticos. Particularmente, los sistemas de liberación controlada permiten una aplicación más eficiente y dirigida de los compuestos, una estrategia que ha sido ampliamente utilizada en la nanomedicina para el transporte y liberación controlada de fármacos mediante materiales como polímeros y liposomas.

No obstante, uno de los aspectos más relevantes a evaluar es el posible impacto de ciertos nanomateriales y nanopartículas sobre los ecosistemas y la salud pública. Debido a su tamaño, estas partículas pueden atravesar membranas celulares e interactuar con biomoléculas u organelos, lo que podría alterar procesos biológicos fundamentales. Aunque los efectos de estas interacciones aún no se comprenden completamente, constituyen un área activa de investigación a nivel mundial.

En biotecnología vegetal, el uso de nanomateriales y otros compuestos bioestimulantes se explica en parte por el efecto hormético (figura 3), en el cual dosis bajas promueven el crecimiento y la respuesta al estrés, mientras que concentraciones elevadas pueden resultar tóxicas. Este fenómeno se ha observado en nanopartículas metálicas como las de plata y cobre, que a bajas concentraciones inducen mecanismos de defensa, pero a niveles altos pueden causar daño oxidativo y citotoxicidad (Robles & Cantú, 2017).

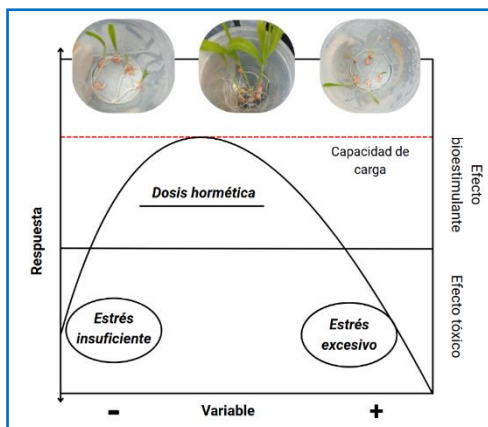


Figura 3. Gráfica del efecto hormético en plántulas de maíz.

Sin embargo, este mismo efecto plantea preocupaciones en términos de bioacumulación y toxicidad ambiental. A medida que las nanopartículas se acumulan en el suelo y los ecosistemas acuáticos, pueden afectar organismos no objetivo, interfiriendo con procesos fisiológicos esenciales (Handy y col., 2008) y alterando las cadenas tróficas. En el caso de la bioacumulación, algunos estudios han reportado que las nanopartículas

pueden persistir en tejidos vegetales y ser transferidas a consumidores primarios, lo que podría representar un riesgo tanto para la biodiversidad como para la seguridad alimentaria (Zhang y col., 2018). Por ello, es fundamental evaluar no solo su impacto en la productividad agrícola, sino también su persistencia y toxicidad en el medio ambiente.

VINCULACIÓN CON LOS ORDENAMIENTOS JURÍDICOS EN MÉXICO

La regulación de la nanotecnología en México, especialmente en el ámbito de la agronotecnología, se articula a través de diversas leyes y Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Entre las leyes más relevantes se encuentran la Ley General de Salud, que asegura la seguridad sanitaria de productos que incluyen nanomateriales, y la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que establece criterios para evaluar el impacto ambiental de nuevas tecnologías. Además, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización facilita el establecimiento de normas técnicas relacionadas con la nanotecnología. En cuanto a las NOM, aunque no existen regulaciones específicas obligatorias para nanotecnologías, hay normas voluntarias como la NMX-R-10867-SCFI-2013, que aborda la caracterización de nanotubos de carbono, y la NMX-R-12901-1-SCFI-2015, que trata sobre la gestión de riesgos ocupacionales en el manejo de nanomateriales. También se han desarrollado lineamientos para regular las nanotecnologías, orientados a proteger el medio ambiente y la salud pública. En conjunto, este marco normativo está en constante evolución para adaptarse a los avances tecnológicos y asegurar prácticas seguras en el uso de nanomateriales en el sector agrícola.

La regulación de la nanotecnología en México presenta vacíos importantes que podrían comprometer tanto la salud pública como el medio ambiente, en particular, la ausencia de normativas específicas y de cumplimiento obligatorio para la manipulación y el uso de nanomateriales en el sector agrícola limita la gestión adecuada de sus riesgos. A ello se suma la escasa producción científica regional orientada al análisis de marcos regulatorios, situación que se refleja en la figura 4, donde se observa un menor número de publicaciones en revistas con publicaciones de habla hispana, como SciELO y Google Scholar; este contexto genera un amplio margen para interpretaciones normativas y la adopción de prácticas potencialmente inseguras. En concordancia con lo anterior, diversos estudios comparativos muestran que, si bien los nanoagroquímicos pueden mejorar la eficiencia de insumos agrícolas, su impacto ambiental y la evaluación de riesgos aún presentan incertidumbres debido a la falta de protocolos estandarizados y regulaciones claras (Kah y col., 2018; Su y col., 2022).

En ese sentido, la literatura reciente indica que la diversidad de nanomateriales y aplicaciones emergentes exige un desarrollo más robusto de marcos regulatorios que incorporen criterios específicos de seguridad, etiquetado y evaluación de efectos ambientales, especialmente en países en desarrollo. Sin estas directrices armonizadas, la adopción segura y responsable de nanotecnologías agrícolas enfrenta limitaciones que pueden retrasar su implementación efectiva y sostenible (An y col., 2022; Kah y col., 2018).

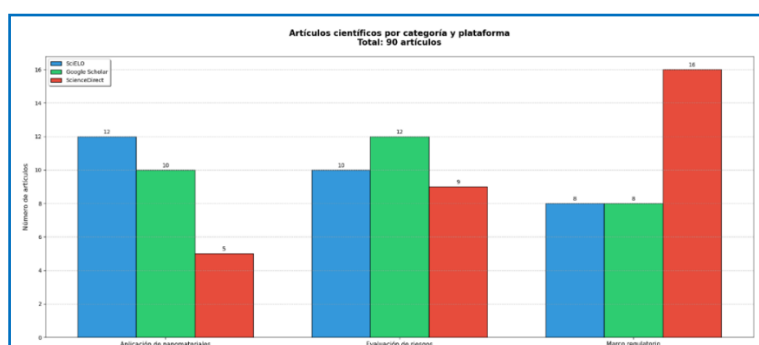


Figura 4. Gráfico de barras de comparación de las diferentes categorías en cada buscador.

Esto es especialmente preocupante, dado que la nanotecnología es un campo en rápida evolución y muchos productos que contienen nanomateriales están ingresando al mercado sin una evaluación exhaustiva de sus riesgos. Además, la falta de protocolos claros para la investigación y la evaluación de impactos ambientales y sanitarios crea incertidumbre en torno a los efectos a largo plazo de estos materiales. Sin un marco regulatorio robusto, es posible que se implementen prácticas agrícolas que, aunque prometedoras, no hayan sido suficientemente estudiadas en cuanto a sus repercusiones en la salud humana y en los ecosistemas. La dependencia de normas voluntarias puede resultar en una falta de consistencia en las prácticas de manejo, lo que podría dar lugar a situaciones de riesgo, donde productos que no cumplen con estándares de seguridad adecuados lleguen al mercado.

Según Anzaldo y Herrera-Basurto (2014), hasta la fecha de su publicación existían ocho normas voluntarias aprobadas y todas de tipo conceptual (NMX-J-699-AN CE-2014, NMX-R-10867 SCFI-2014, NMX-R-10929 SCFI-2014, NMX-R-12901 1-SCFI-2015, NMX-R-13830 SCFI-2014, NMX-R-27687 SCFI-2013, NMX-R 62622-SCFI ANCE-2014, NMX-R-80004 1-SCFI-2014, NMX-R 80004/3 SCFI-2014), pero cabe destacar, ninguna en relación con el campo de la agroindustria.

Hoy en día el número de normas aumenta a una cantidad de 16. “Si bien México cuenta con normas técnicas, los aspectos de salud y seguridad humana y ambiental no están suficiente ni adecuadamente cubiertos al tratarse de normas voluntarias, y los instrumentos de tipo vinculante en materia de salud, ambiente, seguridad laboral y agropecuaria no son adecuados para regular los peligros y riesgos potenciales implicados en la NT (nanotecnología) y sus productos” comenta Laura Saldivar del Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales (CEDUA); aspectos fundamentales de la vida de un producto como podría ser sus síntesis o los desechos de la misma no son tomados en cuenta cuando se habla de normatividad ambiental relacionada con nanotecnología. En México, la promulgación de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados marcó un hito al proporcionar un marco regulatorio que garantiza la utilización responsable y segura de los OGM en beneficio del desarrollo nacional, la biodiversidad y la salud pública. Este avance legislativo permitió abordar de manera integral los riesgos asociados con la biotecnología moderna, al tiempo que fomentó su aprovechamiento en sectores estratégicos como la agricultura, la salud y la industria alimentaria; sin embargo, en el campo emergente de la nanotecnología, el país carece de



un instrumento jurídico similar, lo que limita su potencial de desarrollo sostenible y su adecuada regulación (Foladori & Invernizzi, 2005).

La nanotecnología, al igual que los OGM, representa una tecnología disruptiva con aplicaciones en diversos ámbitos como la medicina, la energía, la electrónica y la industria manufacturera. Su capacidad para manipular la materia a nivel atómico y molecular implica beneficios significativos, como el diseño de materiales avanzados, tratamientos médicos más eficaces y soluciones energéticas más eficientes. No obstante, también plantea riesgos, entre ellos la exposición a nanopartículas con posibles efectos adversos en la salud y el medio ambiente (Shatkin, 2013), así como dilemas éticos relacionados con su uso y desarrollo. La ausencia de una ley de nanotecnología en México deja al país en desventaja frente a naciones que ya han establecido marcos legales para regular este sector. Un marco normativo permitiría garantizar que el desarrollo de esta tecnología se lleve a cabo de manera segura, ética y alineada con los intereses nacionales (Vega-Baudrit y col., 2023); además, fomentaría la inversión en investigación, el desarrollo de capacidades locales y la competitividad en mercados internacionales, asegurando que México no solo consume, sino que también genere conocimiento y tecnología en este campo.

CONCLUSIONES

La nanotecnología es un campo en expansión con un alto potencial para transformar sectores estratégicos como la agricultura. No obstante, su desarrollo y aplicación en México y en otros países de América Latina enfrentan retos importantes, particularmente en materia de regulación y gestión de riesgos. En este artículo se analizó el marco normativo vigente, identificando avances institucionales, pero también la ausencia de lineamientos específicos y de cumplimiento obligatorio que garanticen un uso seguro y responsable de los nanomateriales.

La evaluación de los posibles riesgos asociados a la nanotecnología, como la toxicidad, la contaminación y la bioacumulación, subraya la necesidad de adoptar un enfoque precautorio que priorice la investigación científica y la evaluación rigurosa de sus efectos antes de su implementación a gran escala. Al mismo tiempo, los beneficios potenciales de esta tecnología, como el aumento de la eficiencia agrícola, la reducción en el uso de agroquímicos y

el incremento de la productividad, evidencian su relevancia para el desarrollo sostenible del sector.

En este contexto, resulta fundamental fortalecer la colaboración entre el gobierno, la academia y la industria para construir un marco regulatorio que promueva la innovación tecnológica sin comprometer la protección ambiental ni la salud pública. Asimismo, la participación informada de la sociedad es clave para una adopción responsable de la nanotecnología, en concordancia con la necesidad de repensar la relación entre la sociedad y la naturaleza desde una racionalidad ambiental más crítica e inclusiva (Leff, 2004).

REFERENCIAS

- An, C., Sun, C., Li, N., y col. (2022). Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: Strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 20, 11. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7>
- Anzaldo, M., & Herrera-Basurto, R. (2014). Actores, visiones y perspectivas de la gobernanza de la regulación en las nanotecnologías en México. *Revista Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (ReLANS)*, 1(1): 28-30.
- Bennett-Woods, D. (2008). *Nanotechnology: Ethics and society*. CRC Press: 10-32.
- Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E., & Villegas-Ramírez, A. (2024). Conservación y manejo sostenible del suelo en la agricultura: una revisión sistemática de prácticas tradicionales y modernas. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(E3): 1–28.
- Cuenca, J. (2017). *Nanotechnology: A comprehensive introduction*. Delve Publishing: 12-35.
- Fabrega, J., Luoma, S. N., Tyler, C. R., Galloway, T. S., & Lead, J. R. (2011). Silver nanoparticles: Behaviour and effects in the aquatic environment. *Environment International*, 37(2): 517–531. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.10.012>
- Foladori, G., & Invernizzi, N. (2005). Nanotecnología: ¿beneficios para todos o mayor desigualdad?. *Redes*, 11(21): 55–75. Universidad Nacional de Quilmes.
- Foladori, G., Invernizzi, N., & Záyago Lau, E. (Eds.). (2015). *Nanotecnologías en América Latina: Trabajo y regulación*. En G. Foladori, N. Invernizzi & E. Záyago Lau (Eds.), *Nanotecnologías en América Latina: Trabajo y regulación* (pp. 11-16). Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad: Porrúa.



- Handy, R. D., Owen, R., & Valsami-Jones, E. (2008). The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: Current status, knowledge gaps, challenges, and future needs. *Ecotoxicology*, 17(5): 315–325. <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0206-0>
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6): 532–540.
- Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., & Bucheli, T. D. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology*, 13: 677–684. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
- Kamat, P. V. (2019). Quantum dot solar cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 10(9): 1959–1969.
- Kumar, A., Singh, G. A., Gourkhede, P. H., y col. (2023). Revolutionizing Agriculture: A Comprehensive Review of Nanotechnology Applications. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11): 3586–3603.
- Leff, E. (2004). Racionalidad ambiental: La reapropiación social de la naturaleza. Siglo XXI Editores, 6: 195-230.
- Lira Saldivar, R. H. (2016). Agronano tecnología: Nueva frontera de la revolución verde. Editorial Académica Española.
- Lozano Guzmán, A. A. (Coord.). (2008). La nanotecnología en México: Situación actual (Reportes CONCYTEQ, 6). Querétaro, Qro.: Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. 70 pp.
- Martínez Torreblanca, A., Tirado Hernández, J., Villalpando Castro, D., & Villapudua Rodríguez, G. (2020). Nanomedicina desde una perspectiva tecnológica: Revisión de literatura. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 8(16): 56–65. <https://doi.org/10.36825/riti.08.16.006>
- Poinern, G. E. J. (2015). A laboratory course in nanoscience and nanotechnology. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ramsden, J. (2016). Nanotechnology: An introduction. William Andrew.
- Robles, M., & Cantú, L. (2017). Efectos de los nanomateriales en la salud y el ambiente. *Revista de Nanotecnología Aplicada*, 12(3): 45-60.
- Shatkin, J. (2013). Nanotechnology: Health and environmental risks. CRC Press, 2: 25-98.
- Shelley, T. (2006). Nanotecnología: Nuevas promesas, nuevos peligros. El Viejo Topo.
- Su, Y., Zhou, X., Meng, H., y col. (2022). Cost-benefit analysis of nanofertilizers and nanopesticides emphasizes the need to improve the efficiency of nanoformulations for



widescale adoption. *Nature Food*, 3: 1020–1030. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00647-z>

- Takeuchi, N., Basiuk, V., & Basiuk, E. (Eds.). (2011). *Nanociencia y nanotecnología*. En N. Takeuchi, V. Basiuk & E. Basiuk (Eds.), *Nanociencia y nanotecnología* (pp. 75-98). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Terán-Samaniego, K., y col. (2025). *Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Frameworks and Challenges*. *Sustainability*, 17(5): 1805.
- Torres, F. & Rojas Martínez, A. (2018). *Suelo agrícola en México: Retrospección y Prospectiva para la Seguridad Alimentaria*. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(3): 137-155.
- Vega-Baudrit, J. R., Camacho, M., Araya, A., & Corrales-Brenes, R. (2023). *Regulating nanotechnology: Ensuring responsible and safe innovation in the advancement of science and technology*. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 10(2): 1581.
- Zeng, S., Shakoor, N., & Rui, Y. (2025). *Nanotechnology and Agricultural Sustainability: A Review*. *Nanomaterials*, 15(23): 1755.
- Zhang, X., Zhao, L., Liu, W., & Wang, Y. (2018). *Bioaccumulation and phytotoxicity of nanoparticles in agricultural crops: A review*. *Environmental Science & Technology*, 52(15): 9006–9017