

## LAS NANOPARTÍCULAS Y EL MEDIO AMBIENTE

Miguel E. Medina M.<sup>1</sup>, Luis E. Galván R.<sup>2</sup> y Rosa E. Reyes G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Biología de Organismos, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

<sup>2</sup>Departamento de Tecnología de Servicio, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

---

**Resumen:** La escala nanométrica va desde 1 hasta 100 nanómetros. Las Nanopartículas poseen dimensiones nanométricas. Los términos “material nanoestructurado” y “nanomaterial” se aplican a materiales cuya fabricación o dimensiones, son controladas a nivel nanométrico. Las importantes aplicaciones actuales y potenciales de las Nanopartículas, aunadas a la carencia de datos referentes a límites de exposición, ciclo de vida y efectos sobre el medio ambiente, hacen necesario el estudio de los impactos que puedan ocasionar. En este trabajo, se describen los principales usos de las Nanopartículas y su importancia para la sociedad, se analizan los posibles problemas que ocasionan al medio ambiente y a los organismos vivos y se proponen algunas soluciones. Aún no está establecido el marco legal que regule la producción, empleo y disposición de nanomateriales con la finalidad de proteger a humanos y medio ambiente. No obstante, se han propuesto medidas de seguridad, logística y cursos de acción razonables, que ayudarían a prevenir problemas de contaminación ambiental en un futuro.

---

**Palabras clave:** Nanotecnología, Nanopartículas, Impactos ambientales, Tecnologías limpias.

## NANOPARTICLES AND ENVIRONMENT

---

**Abstract:** The nanometer scale is from 1 to 100 nanometers. Nanoparticles have nanometric dimensions. The terms “nanomaterial” and “nanostructured material” are applied to materials whose manufacture or dimensions are controlled at nanometer level. The important current and potential applications of Nanoparticles coupled with the lack of data on exposure limits, life cycle and effects on the environment make it necessary to study the environmental impacts that may arise. This paper presents the main uses of Nanoparticles and their importance to society, potential problems caused to the environment and living organisms and some solutions proposed are discussed. Are not yet established the legal framework and the rules governing the production, use and disposal of nanomaterials, in order to protect humans and environment. However, security measures have been proposed, logistics and reasonable courses of action that would help prevent environmental pollution problems in the future.

---

**Keywords:** Nanotechnology, Nanoparticles, Environmental Impacts, Clean technologies.

## I. INTRODUCCIÓN

Nanotecnología es un término genérico y en evolución que comprende el desarrollo de muchos productos y procesos, con la característica común de la escala nanométrica. Esta escala va desde 1 nm hasta los 100 nm. Para que una partícula pertenezca a esta escala debe tener dimensiones nanométricas en más de una de sus dimensiones (1). Usualmente, las Nanopartículas poseen dimensiones nanométricas en sus tres dimensiones, mientras que los términos “material nanoestructurado” y “nanomaterial” son más generales y se aplican a materiales cuya fabricación, o cuyas dimensiones sean controladas a nivel nanométrico. Hay tres tipos de Nanopartículas: Las naturales, como las que se producen en erupciones volcánicas; las incidentales, como las emisiones de la combustión en motores; y las fabricadas, generadas a propósito con una finalidad (2). A éstas últimas son a las que se hará referencia a lo largo de este trabajo.

La generación de Nanopartículas es de relevancia básicamente por tres razones: Por los beneficios que aportan en distintas áreas, por ser una tecnología emergente en pleno desarrollo y por los riesgos asociados a ellas (3).

Hay dos razones por las cuales las consideraciones ambientales son fundamentales en cuanto a la generación de Nanopartículas. Una, es el hecho de que es una tecnología naciente que aún no ha causado daños. En las últimas décadas se ha desarrollado una conciencia ecológica en cuanto a los efectos que los distintos materiales pueden tener en los ecosistemas, lo que se aprecia en las regulaciones que han surgido en cuanto a su uso. Así mismo, las técnicas asociadas a la generación y el empleo de Nanopartículas han sido desarrolladas recientemente, lo que da una oportunidad única de controlar el desarrollo de esta tecnología desde sus inicios.

En segundo lugar, está la carencia de datos en cuanto a los posibles efectos que tengan las Nanopartículas sobre los organismos y el ambiente, en caso de que fueran liberadas. Por ejemplo, se ha estimado que en 2010 se liberaron entre 260000 y 390000 toneladas de materiales nanoestructurados, los cuales terminaron en rellenos (63-91%), suelos (8-28%), cuerpos de agua (0,4-7%) y en la atmósfera (0,1-1,5%) (3). Se sabe poco acerca de cómo se comportan en distintos ambientes y de los efectos que tienen sobre los seres vivos (2).

Puesto que las Nanopartículas son producidas con técnicas relativamente nuevas, no hay una reglamentación

específica sobre ellas. En este aspecto, la Nanoética es un área de la Ética que estudia la Nanotecnología y sus productos y cuya finalidad es servir de guía para elaborar normas de entrenamiento, prohibición y restricción en cuanto al uso de nanomateriales (4).

Con este trabajo, se pretenden describir los principales usos de las Nanopartículas y su importancia para la sociedad. Así mismo, se busca analizar los posibles problemas que ocasionan al medio ambiente y a los organismos vivos y proponer algunas soluciones para enfrentar estos problemas. Para la consecución de estos objetivos se empleó la metodología descriptiva documental basada en la revisión de las fuentes bibliográficas primarias y secundarias más relevantes sobre este tema. A continuación, se describen los principales usos de las Nanopartículas y su importancia para la sociedad. Seguidamente, se presentan los principales problemas ambientales asociados y algunas medidas propuestas para su solución. Por último, se enumeran las principales conclusiones del trabajo y la lista de referencias bibliográficas que dieron sustento a esta investigación documental.

## II. DESARROLLO

### II.1. Principales usos de las nanopartículas y su importancia para la sociedad

#### 1. Definiciones

El término “Nanotecnología” fue usado por primera vez en 1974 por Norio Taniguchi, un investigador de la Universidad de Tokio, quien señaló así la capacidad de manejar materiales a nivel nanométrico. En términos sencillos, “nano” es un prefijo griego que significa “enano” y abarca una amplia gama de fenómenos y objetos cuyas dimensiones son de una millonésima parte de un milímetro ( $1 \times 10^{-9}$  m) (5).

Las referencias iniciales a la Nanotecnología fueron presentadas en 1959 por el físico Richard Feynmann en una conferencia titulada “*There’s plenty of room at the bottom*”, en la cual vislumbró la posibilidad de manipular materiales a escala atómica y molecular (6).

Surge así la Nanociencia como el estudio de los fenómenos y el manejo de materiales a escala nanométrica. La Nanotecnología involucra el diseño, la caracterización y la aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica (7).

El atractivo de la Nanotecnología, está relacionado con el hecho de que a escala nanométrica, las propiedades de la materia cambian, presentando una superficie más grande que los materiales a macroescala. Esta característica puede hacerlos químicamente más reactivos, afectando su resistencia y propiedades eléctricas, magnéticas u ópticas (8).

## 2. EL NEGOCIO DE LA NANOTECNOLOGÍA

De acuerdo con Paull et al. (9), el grueso de la inversión en Nanotecnología se enfoca en el desarrollo de:

- a) Herramientas o instrumental nanotecnológico (e.g. Microscopio de Efecto Túnel o *Scanning Probe Microscopy*-SPM, por sus siglas en inglés, las matrices o *arrays*, etiquetas moleculares y microfluidos) que se calcula concentran 4% de los fondos totales;
- b) Nuevos materiales (e.g. textiles, cerámicas, etcétera) con 12%;
- c) Dispositivos novedosos (e.g. sensores) con 32%;
- d) Innovaciones Nanobiotecnológicas con 52%, el cual se distribuye en el desarrollo de nuevos medicamentos, procedimientos de diagnóstico, para la administración de medicamentos y para el descubrimiento de biofarmacéuticos.

Adicionalmente, hay numerosas patentes y productos derivados de la Nanotecnología que se comercializan o que aún están en fases de pre-comercialización (10). El grado de retorno sobre la inversión es todavía pequeño, sobre todo en el mediano y largo plazo, puesto que los diversos datos indican que, en términos del mercado global, hay una tendencia de negocio con nano-aplicaciones en alrededor del 15% de las manufacturas a nivel mundial (11).

El desarrollo de la Nanotecnología ha estado liderado por los países altamente industrializados sobresaliendo Estados Unidos, Japón y la Unión Europea y países emergentes como China y Corea. Tales países se consideran líderes en este campo por varias razones, entre las cuales destacan la asignación de presupuestos considerables de los Gobiernos para el fortalecimiento de la investigación y desarrollo. Sin embargo, esta gran inversión va dirigida en su gran mayoría a la creación y desarrollo de materiales nanométricos y sus aplicaciones, dejando rezagado el estudio de las consecuencias que puede traer esta nueva tecnología al ambiente y a los seres vivos (8).

## 3. PRINCIPALES APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA

La medicina, la ingeniería, la informática, la mecánica, la física y la química son algunas de las disciplinas que están utilizando las posibilidades de la Nanotecnología (5). A continuación se presenta una breve reseña de las aplicaciones más citadas en la literatura especializada:

### Nanotecnología aplicada en el agua.

La capacidad de reciclar el agua de cualquier fuente para diferentes usos ahorraría enormes cantidades de agua y permitiría el uso de recursos hídricos hasta ahora no aprovechados. Filtros porosos de una escala nanométrica pueden eliminar el 100% de virus y bacterias. Una tecnología de separación eléctrica que atrae a los iones a láminas especiales, puede eliminar sales y metales pesados (5).

### Nanotecnología aplicada al sector energético.

Se hace necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan sostener el creciente consumo de energía eléctrica a nivel mundial y, al mismo tiempo, que sean amigables con el medio ambiente. En este sentido, las celdas solares surgen como un dispositivo prometedor para la generación de energía limpia a través del uso de recursos alternos (5).

### Nanotecnología aplicada a dispositivos informáticos.

Usando nanotubos semiconductores, se han desarrollado circuitos de computación de funcionamiento lógico y transistores, incrementando la velocidad, disminuyendo el consumo de energía y aumentando las prestaciones. El desarrollo de nanotransistores y nanomemorias son cruciales para absorber las crecientes e inmensas capacidades de procesamiento de datos y capacidad de memoria que demandan los desarrollos multimedia (5).

### Nanotecnología aplicada a la agricultura.

En lo que respecta a la producción agroindustrial, por un lado se experimenta la nanoestructuración de todo tipo de agroquímicos (fertilizantes, herbicidas y pesticidas, entre otros). Por otro lado, también se avanza en el diseño de materiales funcionales para aplicaciones puntuales tales como sistemas de irrigación, plásticos "inteligentes" para embalaje, entre otros (8).

## Nanotecnología aplicada a la Medicina.

Entre las aplicaciones de la Nanotecnología más prometedoras y dinámicas están aquellas del sector salud. Destacan las investigaciones en enfermedades como el cáncer, VIH sida, diabetes, osteoartritis, enfermedades

degenerativas y desórdenes cardiovasculares y nerviosos, entre muchas otras (12, 13).

En la Tabla I se muestran algunas de las aplicaciones más significativas de diferentes tipos de Nanopartículas.

**TABLA I. Aplicaciones de diferentes tipos de Nanopartículas (NPs)**

APLICACIÓN	TIPO DE NANOPARTÍCULA
<b>POTENCIA/ENERGÍA</b>	
<i>Células Solares sensibilizadas por Colorante</i>	<b>TiO<sub>2</sub> es el más empleado. ZnO y Au</b>
<i>Almacenamiento de Hidrógeno</i>	<b>Nanopartículas Híbridas Metálicas</b>
<i>Mejora de los materiales para Ánodo y Cátodo para Pilas de Combustible</i>	<b>Nanoarcillas, CNTs y NPs en CNTs</b>
<i>Catalizadores Ambientales</i>	<b>TiO<sub>2</sub>, Cerio</b>
<i>Catalizadores para Vehículos</i>	<b>NPs Cerámicas Óxidos Metálicos (Cerio, Zirconio) y Metales (Pt, Rh, Pd y Ru)</b>
<b>SALUD/MEDICINA</b>	
<i>Promotores de crecimiento óseo</i>	<b>Hidroxiapatita (HAp) Cerámica</b>
<i>Los Protectores Solares</i>	<b>ZnO y TiO<sub>2</sub></b>
<i>Apósitos para heridas antibacterianos</i>	<b>Ag</b>
<i>Fungicidas</i>	<b>Nanopartículas Cu<sub>2</sub>O</b>
<i>Biomarcaje y detección</i>	<b>Nanopartículas de Plata y Coloides de Oro</b>
<i>Agentes de contraste de MRI</i>	<b>Óxidos de Hierro ultrapequeños: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
<b>INGENIERÍA</b>	
<i>Herramientas para cortar</i>	<b>ZrO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cerámicos No-Óxidos (WC, TaC, TiC) y Co</b>
<i>Sensores Químicos</i>	<b>Diversas NPs válidas, depende de la aplicación</b>
<i>Resistentes al Desgaste / Recubrimientos resistentes a la abrasión</i>	<b>Nanopartículas de Alúmina y Y-Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
<i>Nanoarcilla Polímero reforzado con Materiales Compuestos</i>	<b>Organoarcillas (<i>Sepiolite, Laponite y Smectite</i>). Silicagels y POSS</b>
<i>Pigmentos</i>	<b>Pb, Zn, Mg y Ag. Otras NPs Metálicas incluyendo ViO, AlO, CdO y otras</b>
<i>Tintas: Conductores, Magnéticos, etc (utilizando polvos de metal)</i>	<b>Buenos conductores como la Plata</b>
<i>Mejora estructural y física de Polímeros y Materiales Compuestos</i>	<b>Nanoarcillas, NanoÓxidos y NanoHidróxidos de Metales. Montmorillonita modificada orgánicamente, TiO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o SiO<sub>2</sub></b>
<b>UTENSILIOS DE CONSUMO</b>	
<i>Barrera de embalaje utilizando Silicatos</i>	<b>Nanoarcillas, en particular Bentonita y Kaolinita</b>
<i>Vidrio autolimpiable</i>	<b>TiO<sub>2</sub></b>
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	
<i>Tratamientos de agua (Foto-Catálisis)</i>	<b>Cerámicas Óxidos Metálicos, TiO<sub>2</sub></b>

**ELECTRÓNICA**

*Nanoescala partículas magnéticas para la alta densidad de almacenamiento de datos*

*Circuitos electrónicos*

*Ferro-líquido (utilizando materiales magnéticos)*

*Optoelectrónica dispositivos tales como interruptores*

*Química Mecánica*

**Fe solo o en combinación con otros Metales (o no metales), CoPt o FePt**

**Plata, Cobre y Nanopartículas de Al**

**Fe (posiblemente recubiertas con una capa de Carbono), Co, FeCo y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

**Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopados con Eu, Tb, Er, Ce**

**Alúmina, Sílica y Cerio**

Fuente: Red para la transferencia de conocimientos en Nanomateriales.  
<http://carboninspired.com/blog/?p=523>. Consultada el 29-09-2014

**II.2. PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A LAS NANOPARTÍCULAS**

Varios autores sostienen que la fortaleza de las Nanotecnologías se basa en la posibilidad de: 1) Hacer más eficientes los productos conocidos; 2) hacer productos multifuncionales; y 3) reducir y sustituir significativamente la cantidad de materia prima en muchas ramas industriales. Pero estos cambios no se dan sin efectos enlazados, colaterales, e imprevisibles. Y, aquí residen las debilidades de las Nanotecnologías: 1) El hecho de que la materia trabajada en nanoescala tiene propiedades toxicológicas desconocidas; 2) está la pregunta de quién se verá afectado en cuanto a la salud, por esas tecnologías y 3) se considera la situación del empleo y la división social del trabajo, tanto a nivel regional, nacional e internacional (5, 8, 13, 14, 15, 16). Específicamente, el impacto que las Nanopartículas puedan tener sobre el ambiente a largo plazo, aún no se ha investigado. Para que una Nanopartícula sea considerada un riesgo debe haber una fuente de exposición a ellas y un daño que resulte de esta exposición (1). Las Nanopartículas se comportan de manera distinta a sus contrapartes macro debido a su tamaño, sin embargo, aún no está claro cómo difieren en sus interacciones.

Cada tipo de Nanopartícula debe ser estudiado en cuanto a sus posibles riesgos, pero los hallazgos individuales no deben ser generalizados a cualquier tipo de Nanopartícula, ya que, debido a sus propiedades únicas, la toxicidad puede ser diferente. En este sentido, Helland (17) señala que hay propiedades intrínsecas de las Nanopartículas que deben ser consideradas en cuanto a su toxicidad. Una, es la forma que puede afectar cómo la Nanopartícula interactúa con las membranas biológicas. Otra, es el conjunto de propiedades superficiales, por ejemplo, si catalizan

alguna reacción o si tienen añadido algún compuesto tóxico que pueda ser liberado al ambiente, ya que la gran superficie de las Nanopartículas podría conducir a la liberación repentina de tal compuesto. La tercera es la composición química; por ejemplo, los metales de transición y sus combinaciones con sustancias orgánicas en distintas proporciones podrían hacer que el grado de toxicidad varíe.

Se ha acuñado el término ‘Nanotoxicidad’ para referirse a los efectos adversos que las Nanopartículas manufacturadas tienen sobre los organismos vivos y los ecosistemas (18). Los efectos tóxicos de las Nanopartículas, en general, sobre los distintos sistemas a nivel de organismos han sido revisados recientemente (19) y, específicamente, los de las Nanopartículas de Oro, de las cuales se concluye que la información actual es insuficiente para determinar su status en lo referente a la salud humana y ambiental (20). Asimismo, se han propuesto los factores que contribuyen a su toxicidad y los mecanismos por los cuales actúan, concluyéndose que los procedimientos de toxicología convencional de partículas son un punto de partida recomendable para estudiar las Nanopartículas (21).

Un ejemplo que advierte contra de la generalización de los resultados, es el estudio de la toxicidad de Nanopartículas de Oro esféricas en ratones (22) donde se demostró que sólo un cierto rango de diámetros de estas nanopartículas resultaba tóxico para los ratones. En ese estudio, los ratones fueron inoculados con Nanopartículas de Oro de diámetro comprendido entre 3 y 100 nm, de las cuales, sólo resultaron tóxicas las que tenían un diámetro entre 8 y 37 nm.

La mayoría de las Nanopartículas fabricadas por el hombre no se encuentran naturalmente en el medio ambiente, por lo que, los organismos pueden carecer

de sistemas inmunes o de purificación necesarios para tratar con ellas (4). Se ha señalado que Nanopartículas de 12 nm pueden atravesar la barrera sangre-cerebro y que Nanopartículas de 30 nm o menos, pueden ser endocitadas por las células (23), sin embargo, sus efectos sobre la salud ambiental y humana aún no han sido determinados debido en parte, a que la mayoría de los estudios han sido realizados *in vitro*.

Un aspecto a tener en cuenta para el estudio de la toxicidad de las Nanopartículas de Oro es su capacidad para formar complejos con otras moléculas de interés biológico. Por una parte, muchas de las aplicaciones de las AuNPs requieren su recubrimiento con algún agente estabilizante o de reconocimiento; en este caso, se conoce desde su diseño el tipo de complejo que formarán. Por otra parte, las Nanopartículas de Oro pueden formar complejos incidentalmente con los componentes del medio. Por ejemplo, con los suplementos del medio de cultivo en los ensayos de citotoxicidad, del medio fisiológico en el caso de organismos expuestos a estas nanopartículas o del medio ambiente en los ecosistemas. La formación de estos complejos puede modificar propiedades fisiológicas de las Nanopartículas de Oro, como carga, química superficial y estado de agregación, lo que afecta la interacción con las células. Esto, a su vez, aumenta la complejidad del sistema en cuanto a la interpretación de datos en ensayos de toxicidad y su extrapolación al impacto de las Nanopartículas de Oro en el medio ambiente (23). Alkily y Morphy (23) presentan distintos métodos para investigar la toxicidad de las estas partículas, *in vitro* e *in vivo*, y señalan la importancia de considerar reactivos accesorios que puedan estar presentes como impurezas en el medio donde se encuentran las Nanopartículas y que pueden tener efectos tóxicos por sí mismos. Presentan una extensa recopilación de estudios de toxicidad *in vitro* e *in vivo* sobre células y organismos incluyendo, además, parámetros sobre las Nanopartículas de Oro usadas, como tamaño y grupos funcionales. Constantemente se adelantan nuevos métodos en el estudio de la toxicidad a nivel celular (24).

Un estudio reciente indica que las Nanopartículas pueden ser bioacumuladas y bioamplificadas en una cadena alimenticia terrestre (25). En su estudio, los investigadores hicieron crecer plantas de tabaco en un medio que contenía Nanopartículas de Oro y luego alimentaron larvas de *Manduca sexta* con estas plantas; se demostró la acumulación de estas Nanopartículas en los tejidos de las plantas y en las larvas. En éstas últimas hubo, además, una amplificación hasta en un

factor medio de 11,6 pero que variaba según el diámetro de la Nanopartícula.

Se han estimado y esquematizado en términos generales los efectos de las Nanopartículas sobre el ambiente y matrices biológicas seleccionadas (26, 27, 28), sin embargo, cada sistema ecológico de interés debe ser estudiado para conocer los ciclos en los que entran las Nanopartículas presentes. Por ejemplo, se han propuesto modelos prácticos cuantitativos para estudiar el comportamiento de las Nanopartículas en general en los sistemas acuáticos y su impacto en los organismos acuáticos (29). En este sentido, Quik (29) plantea interrogantes clave y propone los procesos de sedimentación y disolución como factores determinantes en la concentración efectiva de las Nanopartículas en el medio acuoso. Señala que la presencia de películas biológicas (*biofilms*) aumenta la remoción de Nanopartículas del medio, además, presentan un compendio de sistemas acuáticos naturales donde se ha estudiado la exposición de los organismos a varios tipos de Nanopartículas. Asimismo, se ha señalado que se deben hacer estudios sobre los materiales nanoestructurados antes de permitir su uso difundido, sin embargo, los gobiernos se han retrasado en ordenar estudios del ciclo de vida de los productos y, salvo los relacionados con aplicaciones médicas, se ha ignorado este llamado de atención (30). Haciendo énfasis en el suelo como sistema ecológico, este autor revisa, igualmente, las posibles ventajas de las aplicaciones de los materiales nanoestructurados en la agricultura, como el empleo de nano-fertilizantes y el mejoramiento de los pesticidas con la incorporación de Nanopartículas metálicas. Además, resume la función de los principales organismos en el mantenimiento de la salud del suelo para la agricultura.

## II.3. MEDIDAS PROPUESTAS

### 1. Aspectos Generales

Se han sugerido tres preguntas generales a responder con la finalidad de conocer los efectos ambientales de las Nanopartículas (2): 1. ¿Cómo las Nanopartículas cambian en el tiempo una vez que están presentes en el ambiente?, 2. ¿Qué efectos podrían tener en los organismos?, y 3. ¿Qué efectos podrían tener en los ecosistemas? Para dar respuesta a estas interrogantes se deben hacer estudios sobre su ciclo de vida, cantidad (2, 17), movilidad, reactividad, biodisponibilidad, estabilidad, solubilidad, toxicidad, ecotoxicidad y persistencia (1).

Aun definiendo claramente los objetivos de estudio en los campos médicos, biológicos o ecológicos, resulta intrincado el panorama al que se enfrentan las agencias al tratar de elaborar una reglamentación que regule el empleo de la Nanopartículas, ya que, además deben considerar implicaciones económicas y las necesidades de la sociedad (31).

## 2. Aspectos Éticos

Por su parte, la Nanoética contribuye con otras preguntas que no tienen una orientación hacia el campo científico, como las mencionadas anteriormente, sino hacia la elaboración de políticas públicas. Estas preguntas incluyen: ¿Cuáles son los riesgos potenciales a la seguridad y la salud con las aplicaciones de la Nanotecnología? ¿Quién es responsable si algo pasa? ¿Cuáles son los derechos de un individuo afectado por un proceso o producto de la Nanotecnología (como las Nanopartículas)? ¿Cómo se puede proteger a la sociedad de los riesgos de la Nanotecnología? (4). Las acciones para responder a estas interrogantes se centrarían en: Levantamiento de información, compartir esta información, educar al público y elaborar leyes y reglamentos.

## 3. Necesidad de Normas para la Regulación

Los retos enfrentados por agencias como la FDA para la regulación de nanomateriales han sido especificados por varios autores (32). Uno de los principales problemas en cuanto al establecimiento de una normativa legal referente a los nanomateriales es que aún no hay una definición universal aceptada para nanomaterial, lo que incluye a las Nanopartículas. Aunque los nanomateriales han sido desarrollados desde hace unas décadas, no fue sino hasta el 29 de abril de 2009 cuando el Parlamento Europeo requirió una definición comprensiva y científica del término nanomaterial, así como, una corrección en la legislación de la Unión Europea debido a los riesgos potenciales para la salud de los humanos y el ambiente (33). Sin embargo, no hay un acuerdo general en cuanto al tamaño, el límite hasta el cuál algo puede ser considerado un material, cuándo algo es un material y cuándo no.

Hasta el momento presente, ningún gobierno ha establecido un marco regulatorio para la Nanotecnología. Sin embargo, se han planteado consideraciones políticas que pueden guiar a las autoridades competentes en el desarrollo y aplicación de la Nanotecnología en general y, específicamente, en lo referente a las Nanopartículas

(2). Estas medidas incluyen:

- Estandarizar la nomenclatura y los protocolos, para poder comparar los resultados de las pruebas.
- Cooperación entre el sector público y privado.
- Sensibilizar a las agencias reguladoras y ambientales en cuanto a los beneficios y riesgos potenciales de la Nanotecnología.
- Apoyar económicamente la investigación y el desarrollo de Nanotecnologías que contribuyan al desarrollo sustentable.
- Evaluar los posibles impactos ambientales y sobre la salud humana de las Nanopartículas, especialmente, de aquellas que ya están siendo producidas en masa.
- Identificar, evaluar y dar a conocer las buenas prácticas, métodos de manejo y procedimientos de seguridad relativos a los nanomateriales.
- Aplicar, donde sea posible, políticas establecidas en cuanto a las consideraciones ambientales y de salud relativas a productos químicos.
- Educar al público acerca de los beneficios y riesgos de la Nanotecnología.
- Fomentar la cooperación entre Gobiernos y Organizaciones Intergubernamentales con el fin de compartir información referente a los impactos de la Nanotecnología sobre el ambiente y sobre la salud humana.

La Unión Europea tomó en cuenta la Nanotecnología en su programa de trabajo para el 2013 (34). Reconoce que la investigación y la innovación son claves para la competitividad y el progreso social. En este contexto, provee algunos lineamientos sobre cómo mejorar la seguridad en lo referente a la producción y empleo de Nanopartículas. En primer, lugar se refiere a que el manejo de los riesgos debe formar parte de la cultura de todos los involucrados en la provisión del material, lo que se lograría a través de la identificación del peligro, conocimiento de los potenciales efectos adversos, medición y control de la exposición. Para alcanzar estas metas se proponen el objetivo de fomentar el desarrollo de técnicas y equipos que permitan la caracterización de los materiales, la identificación de peligros, la valoración de la exposición en el ámbito laboral, la demostración de los riesgos, así como, su reducción y mitigación.

La carencia de información acerca de los riesgos asociados a los materiales nanoestructurados se evidencia en las propuestas del Programa de Trabajo para el 2013 de la Unión Europea referentes hacia dónde debe enfocarse la investigación, las cuales se orientan hacia el desarrollo de las herramientas de prevención

de la contaminación. Estas propuestas proveen, además, lineamientos más específicos para orientar estas investigaciones. Las propuestas incluyen:

- Desarrollo de buenas prácticas en lo referente a manejo de nanomateriales y tratamiento de desechos.
- Desarrollo de métodos de mitigación de riesgo en técnicas que involucren nanomateriales y que puedan resultar en exposición en el medio ambiente de trabajo o en el ecosistema.
- Desarrollo de herramientas que permitan calcular la exposición a nanomateriales y sus efectos sobre los humanos y los ecosistemas.
- Desarrollo de métodos que permitan la predicción a largo plazo de los efectos eco-toxicológicos de la exposición a nanomateriales.
- Incorporar el conocimiento generado al diseño de procesos y productos en la nanoescala.

En ese documento se sugiere, además, la creación de bases de datos que permitan el cálculo de riesgos de los nanomateriales y la sistematización de la nomenclatura de los nanomateriales (34).

#### 4. Propuestas Prácticas

Se han propuesto medidas prácticas y específicas para el manejo del riesgo ocupacional en lo relacionado a Nanopartículas manufacturadas (35) y, específicamente, en lo referente al personal de laboratorio, donde se dan pautas para la clasificación de los laboratorios “nano” en tres niveles de peligrosidad (36). Para cada nivel, Groso et al. (36) proponen medidas de prevención referentes a la logística del laboratorio, la restricción de acceso, el uso de ventilación y vacío, y equipo de protección personal, entre otros. A pesar de que se han propuesto varias normas, no se conoce si son seguidas y si se necesita desarrollar métodos de validación para conocer su efectividad (37).

En cuanto a la protección de la población, se ha señalado que la Administración de Alimentos y Medicamentos (*Food and Drug Administration* - FDA), no posee un marco regulatorio específico para productos nanoestructurados. Sin embargo, este organismo espera poder regularlos bajo el nombre de “Productos de Combinación”, para los cuales, se ha establecido un estatuto (38). Kaur et al. (38) señalan que los ensayos de toxicidad existentes pueden no ser suficientes para establecer los riesgos y que la posible regulación de un material nanoestructurado depende también de una exigencia del fabricante, quien debe declarar que la Nanotecnología está involucrada en el producto.

Otro avance se obtuvo en la discusión de los NVRs, o “Valores de Referencia Nano”, en el Taller Internacional sobre Valores de Referencia Nano en septiembre de 2011, donde se propusieron límites de exposición para muchos tipos de Nanopartículas según aspectos como composición y biopersistencia (39).

Recientemente, se presentó un informe de *The European Network on the Health and Environmental Impact of Nanomaterials* sobre los peligros y destinos de los nanomateriales en el ambiente, en el cual se resumen los avances en el campo, así como, los distintos talleres y publicaciones referentes al tema (40).

## II. CONCLUSIONES

1) Las importantes aplicaciones actuales y potenciales de las Nanopartículas, aunadas a la carencia de datos referentes a límites de exposición, ciclo de vida e impacto sobre el medio ambiente, hacen necesario el estudio de los efectos ambientales que puedan ocasionar.

2) Los comités y talleres internacionales son de gran ayuda en cuanto a la propuesta de líneas de acción que tiendan a minimizar los vacíos de información referentes a efectos ambientales, sin embargo, es difícil alcanzar un consenso general y se hace necesario un seguimiento de la implementación de las propuestas.

3) Las normas propuestas en cuanto a exposición a Nanopartículas se enfocan preferentemente en la protección de personal de laboratorio, trabajadores y usuarios, relegando al medio ambiente a un segundo plano.

4) Se ha acumulado información concreta acerca de toxicidad en células y animales de Nanopartículas, como las de oro, junto a límites de exposición a éstas y otras Nanopartículas. Sobre esta información es posible comenzar a construir una base de datos. Sin embargo, es necesario estandarizar la nomenclatura, los ensayos de toxicidad y su interpretación, tomando en cuenta que cada tipo de Nanopartícula debe ser estudiado sin generalizar o extrapolar los resultados de un tipo a otro.

5) El marco legal y las normas que regulen la producción, empleo y disposición de nanomateriales, con la finalidad de proteger a humanos y medio ambiente en general aún no están establecidos. No obstante, se han ideado objetivos, medidas de seguridad, logística y cursos de acción razonables que ayudarían a prevenir problemas de contaminación ambiental en un futuro.



### III. REFERENCIAS

- 1) Nowack, B. y Bucheli, T. (2007). Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental Pollution* 150 (2007): 5-22.
- 2) GEO YEAR BOOK (2007) Emerging challenges, nanotechnology and the environment. P. p. 61-70.
- 3) Keller, A., McFerran, S., Lazareva, A. y Suh, S. (2013) Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*. 15:1692.
- 4) Asmatulu, R., Asmatulu, E. y Zhang, B. (2010) Nanotechnology and Nanoethics in Engineering Education. Proceedings of the 2010 Midwest Section Conference of the American Society for Engineering Education, Lawrence, KS, September 22-24, 2010.
- 5) Mendoza, G. y Rodríguez, J. (2007) La Nanociencia y la Nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos* 29: 161-186.
- 6) Feynman, R. (1959) There's Plenty of Room at the Bottom. *J. Electromechanical Systems* 1(1): 60 (re-escrito, 1962).
- 7) Royal Society, UK. (2004) Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and uncertainties. National Academy of Science and the Royal Academy on Engineering. ISBN 0 85403 604 0
- 8) Delgado, G. (2009) Nanotecnología y producción de alimentos: impactos económicos, sociales y ambientales. *Estudios Sociales* 17(34): 186-205.
- 9) Paull, W., Wolfe, P., Herbert, P y Sinkula, M. (2003) Investing in Nanotechnology. *Nature Biotechnology* 21(10): 1144-1147.
- 10) Mazzola, L. (2003) Commercializing Nanotechnology. *Nature Biotechnology* 21(10): 1137 – 1143.
- 11) Nordan, N. (2005) Nanotechnology: Where does the US Stand? Lux Research. Testimonio ante la Hose Committee on Sciences, USA.
- 12) Delgado, G. (2007) Incertidumbres de la Nanotecnología: Riesgos ambientales y salud. *Ingeniería de Recursos Naturales y el Ambiente* 6: 47-61.
- 13) Delgado, G. y Hernández, L. (2013) Avances e implicaciones ético-sociales de la nanomedicina: una revisión desde el caso del cáncer cerebral. *Mundo Nano* 6(10): 63-85.
- 14) Filadori, G. (2012) Las nanotecnologías en contexto. *Sociología y Tecnociencia* 0(2): 35- 55.
- 15) Filadori, G., Bejarano, F. y Invernizzi, N. (2013) Nanotecnología: Gestión y reglamentación de riesgos para la salud y medio ambiente en América Latina y el Caribe. *Trab. Educ. Saúde*. 11(1): 145-167.
- 16) Castagnino, J. (2005) Nanomateriales y Contaminación Ambiental. *Acta Bioquim. Clín. Latinoam.* 40(1): 1-2.
- 17) Helland, Å. (2004) Nanoparticles: A Closer Look at the Risks to Human Health and the Environment, Perceptions and Precautionary Measures of Industry and Regulatory Bodies in Europe. Tesis de Maestría en Ciencias de Manejo y Política Ambiental. Lund, Suecia.
- 18) Oberdörster, G. (2010) Safety assessment for nanotechnology and nanomedicine: concepts of nanotoxicology. *Journal of Internal Medicine*. 267 (1): 89-105.
- 19) Agarwal, M., Murugan, M., Sharma, A., Rai, R., Kamboj, A., Sharma, H. y Roy, S. (2013) Nanoparticles and its Toxic Effects: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2 (10): 76-82.
- 20) Yah, C. (2013) The toxicity of Gold Nanoparticles in relation to their physicochemical properties. *Biomedical Research*. 24 (3): 400-413.
- 21) Donaldson, K. y Poland, C. (2013) Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity. *Current Opinion in Biotechnology*. 24:724–734.
- 22) Chen Y., Hung, Y., Liau, I. y Huang, G. (2009) Assessment of the In Vivo Toxicity of Gold Nanoparticles. *Nanoscale Res Lett*. 4:858–864.
- 23) Alkilany, A. y Murphy, C. (2010) Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far? *J Nanopart Res* 12:2313–2333.
- 24) Vetten, M., Tlotleng, N., Rascher, D., Skepu, A., Keter, F., Boodhia, K., Koekemoer, L., Andraos, C.,

- Tshikhudo, R. y Gulumian, M. (2013) Label-free in vitro toxicity and uptake assessment of citrate stabilised gold nanoparticles in three cell lines. *Particle and Fibre Toxicology* 10:50
- 25) Judy, J., Unrine, J. y Bertsch, P. (2011) Evidence for Biomagnification of Gold Nanoparticles within a Terrestrial Food Chain. *Environ. Sci. Technol.* 45: 776–781.
- 26) Grange, S., Chettiar, K., Arestu, M., Pilarski, P., Smitham, P., Loizidou, M., Jell, G. (2012) Nanotechnology and medical devices: Risk, regulation and ‘meta’ registration. *World Journal of Engineering.* 10 (3): 191-198.
- 27) Kumar, R., Rawat, K. y Mishra, A. (2012) Nanoparticles in the soil environment and their behaviour : An overview. *Journal of Applied and Natural Science* 4 (2): 310-324.
- 28) Smita, S., Gupta, S., Bartonova, A., Dusinska, M., Gutleb, A. y Rahman, Q. (2012) Nanoparticles in the environment: assessment using the causal diagram approach. *Environmental Health* 11(Suppl 1):S13.
- 29) Quik, J. (2013) Fate of nanoparticles in the aquatic environment. Removal of engineered nanomaterials from the water phase under environmental conditions. Tesis Doctoral, Radboud University Nijmegen, the Netherlands ISBN: 978-90-6464-692-8.
- 30) Supan, S. (2013) Nanomaterials in Soil: Our Future Food Chain?. Institute for Agriculture and Trade Policy.
- 31) Yen, S., Harmon, S. y Tang, S. (2013) Nanotechnologies: Big Governance Issues for the Science of Small (In Taiwan And Beyond). *Far East Journal of Psychology and Business.* 11 (1): 50-72.
- 32) Bawa, R. (2013) Capítulo 41: FDA and Nanotech: Baby Steps Lead to Regulatory Uncertainty. En: *Bio-Nanotechnology: A Revolution in Food, Biomedical and Health Sciences*, 1º Ed. Editado por Debasis Bagchi, Manashi Bagchi, Hiroyoshi Moriyama, and Fereidoon Shahidi. John Wiley & Sons, Ltd.
- 33) Lidén, G. (2011) The European Commission Tries to Define Nanomaterials. *Ann. Occup. Hyg.* 55 (1): 1–5.
- 34) Work Programme 2013, Cooperation, Theme 4, Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and New Production Technologies – NMP, European Commission C (2012) 4536 of 09 July 2012.
- 35) Moraru, R. y Babut, G. (2013) Occupational Risk of Engineered Nanoparticles, Assessment and Prevention-Control Measures. *Quality - Access to Success.* 14 (133): 96-100.
- 36) Groso, A., Petri-Fink, A., Magrez, A., Riediker, M. y Meyer, T. (2010) Management of nanomaterials safety in research environment. *Particle and Fiber Toxicology* 2010, 7:40.
- 37) Kuempel, E., Geraci, C. y Schulte, P. (2012) Risk Assessment and Risk Management of Nanomaterials in the Workplace: Translating Research to Practice. *Ann. Occup. Hyg.* 56 (5): 491–505.
- 38) Kaur, K., Gupta, A., Narang, R. y Murthy, R. (2010) Regulations in Nanotechnology: A Brief Review. *Journal of Pharmacy Research* 3(9): 2083-2087.
- 39) Van Broekhuizen, P., Van Veelen, W., Streekstra, W., Schulte, P. y Reijnders, L. (2012). Exposure Limits for Nanoparticles: Report of an International Workshop on Nano Reference Values. *Ann. Occup. Hyg.* 56 (5): 515–524.
- 40) Fernandes, T., Nowack, B., Baun, A., van de Meent, D., Peijnenburg, W., Brink, N., Handy, R. y Stone, V. (2012) D2.9 Final Report on the Hazards and Fate of Nanomaterials in the Environment. The European Network on the Health and Environmental Impact of Nanomaterials.