

---

## USO RESPONSABLE Y SOSTENIBLE DE NANOMATERIALES EN LABORATORIOS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN

**Autores.** Yesid Alejandro Acuña Sastoque y Edgar E. González Jiménez. Pontificia Universidad Javeriana, yesidacuna@javeriana.edu.co y Pontificia Universidad Javeriana, egonzale@javeriana.edu.co

**Tema.** Eje temático 1.

**Modalidad.** 1. Nivel educativo universitario.

**Resumen.** El uso cada vez más frecuente de nanomateriales en actividades formativas y de investigación en instituciones de educación superior y la insuficiente información sobre su potencial toxicidad, plantea la urgente necesidad de aplicar principios de precaución y buenas prácticas que garanticen un uso responsable y seguro con el ambiente y seres vivos. Este trabajo analiza aspectos relacionados con potenciales riesgos e impactos debidos a movilización de nanomateriales utilizados en trabajo académico experimental o en investigación. Se enfatiza en el papel que debe jugar el docente en la aplicación de las recomendaciones sugeridas para el manejo adecuado de los elementos de protección y se establecen criterios sobre gestión de desechos, ciclo de vida de productos y aspectos éticos y de responsabilidad sobre procesos y productos derivados de la utilización de nanomateriales.

**Palabras claves.** Nanotecnología, nanoseguridad, riesgo, principio de precaución, enseñanza.

### Introducción

El interés por los nanomateriales a nivel global crece exponencialmente. Esto está favoreciendo en la academia la adaptación de planes de estudio y didácticas complementarias para favorecer un acercamiento y participación más activa en formación e investigación. Entre las diferentes propuestas y acciones se destacan: la producción de nanomateriales, el diseño y desarrollo de sensores para detección y medición a escalas nanométricas, aplicaciones específicas de nanomateriales en productos de consumo, estudio de impactos de nanoestructuras sobre ambiente, especies, salud humana, caracterización de nanomateriales, entre otras. Según cifras del observatorio de la Unión Europea para nanomateriales, entre 2013 y 2017 se tenía reporte de casi 30.000 instituciones de educación superior, empresas y centros de investigación ejecutando actividades de desarrollo tecnológico relacionados con técnicas de caracterización, síntesis, modificación de sustancias y por supuesto actividades de enseñanza (Nanomaterials, 2017). Programas universitarios de ciencias básicas e ingeniería, maestrías y doctorados en nanotecnología están creciendo en oferta por universidades y centros de investigación (Díaz et al., 2019). Durante la última década, la productividad científica en nanomateriales alcanzó cerca de 2'000.000 de artículos (únicamente en Web of Science), aproximadamente 55'000.000 de citaciones, 153.000 registros de patentes publicadas y casi 86000 patentes concedidas relacionadas con nanotecnología únicamente en la oficina de patentes y marcas en los Estados Unidos (USPTO) (Statnano, 2021).

En Colombia, a partir de las iniciativas de incorporación de la nano como línea estratégica para el desarrollo del país, se dio lanzamiento a la creación de programas de formación, grupos de investigación, empresas y comercialización de productos asociados. En respuesta a este "Nano Boom", se dio lugar a la inserción en instituciones de educación superior a líneas de formación e investigación relacionadas con la producción de materiales nanoestructurados y su uso para atender problemáticas identificadas como accesibles desde estas tecnologías. Además, de motivar el surgimiento de un importante número de propuestas para introducir en los contenidos curriculares componentes con énfasis en nanociencia y nanotecnología.

Esta apropiación de las nanotecnologías y las demandas en investigación y desarrollo, han incrementado considerablemente en los laboratorios el uso de precursores y desarrollo de productos nanoestructurados. Sin embargo,

**Lema.**

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

ante los potenciales riesgos ya identificados y debidamente reportados sobre cierto tipo de nanomateriales, se han incrementado los esfuerzos para la elaboración e incorporación de recomendaciones y guías de buenas prácticas para garantizar no solamente la protección de los usuarios, sino además evitar causales de impacto ambiental y en seres vivos potencialmente expuestos. Es frecuente la manipulación de nanopartículas que han sido identificadas como potencialmente peligrosas para la salud, sin las suficientes condiciones de protección que eviten la exposición por vía aérea o contacto directo, o liberación reiterativa de residuos por lavado de material de laboratorio impregnado con estos materiales directamente en los desagües. Es tarea urgente por parte de las instituciones de formación superior, abrir espacios de formación y socialización sobre los cuidados y gestión de residuos derivados de prácticas relacionadas con producción o manipulación de nanomateriales, aspecto que implica para el docente la urgente necesidad de liderar la implementación y cumplimiento preciso, metódico y minucioso de las recomendaciones y guías establecidas para este fin. Esto va a garantizar las condiciones para hacer de estas tecnologías un factor de desarrollo responsable y sostenible.

#### Definición de nanomaterial

Ya que se están considerando como objetos de estudio en este trabajo, los nanomateriales, resulta necesario una definición para precisar el uso de este término.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha publicado estándares para la definición de nanomateriales en la serie ISO/TC 229:2005; ISO/TR 13121:2011; ISO/TS 12901-1:2012; IEST-NANO205.1; ISO/TS 12901-2:2014; ISO / ICE 80004; ISO/TR 12885:2018; ISO/TR 21386:2019; que han permitido a las autoridades responsables de normatividad y regulación, estimar el riesgo e introducir indicaciones sobre identificación, clasificación y manipulación (Borm et al., 2006) (Mueller et al., 2012)(ECHA, 2019). Guías de buenas prácticas enfocadas en recomendaciones y sugerencias de académicos, entidades de gobierno y entidades independientes en temas de seguridad de nanomateriales, manuales de seguridad en laboratorio, riesgos, uso de nanomateriales basados en carbono, nanopartículas, usos en actividades de investigación y producción han sido compilados para ser consultados y por supuesto consensuados en los equipos de trabajo (Guerra et al., 2016). En Colombia, la Red Colombiana de Nanociencia y Nanotecnología a través de su Consejo Nacional Asesor, atendiendo la necesidad de consenso a nivel local y global y frente al urgente requerimiento de contar con una definición de nanomateriales, adoptó la siguiente definición para nanomaterial:

*“Material natural o artificialmente sintetizado, manufacturado o fabricado que exhibe propiedades, fenómenos o efectos biológicos que son atribuibles a sus dimensiones hasta una escala límite de un micrómetro. En el caso específico de materiales nanoparticulados, se consideran así cuando estos presenten una distribución mayor al 10% de partículas inferiores o iguales a 100 nm en al menos una de sus dimensiones. Además de esta clasificación se incluyen los materiales no necesariamente nanoparticulados pero que han sido modificados a escala nanométrica en su conformación o interfase para dar lugar a un material con nuevas propiedades”(Camacho et al., 2016).*

Esta definición permite claridad para establecer un marco científico y jurídico que facilite la elaboración de políticas de regulación y adopción de guías de buenas prácticas y uso responsable. De otra parte, adoptar los convenios internacionales, acuerdos bilaterales, multilaterales y regionales sobre transporte de reactivos, productos y su comercialización es uno de los compromisos gubernamentales e institucionales de urgente aplicación para disminuir la exposición y los potenciales peligros. La elaboración de un marco legal y consensuado globalmente es una tarea que busca garantizar que las sustancias fabricadas, comercializadas o utilizadas no afecten negativamente la salud humana o el ambiente (PNUMA, 2006) (Aschberger et al., 2014) (Guerra et al., 2016). Ya que la estimación del riesgo es la base de la legislación sobre nanotecnología, el riesgo y las medidas de seguridad asociadas con nanomateriales también debe reflejarse en los estándares, definiciones subyacentes, protocolos de uso del material prístino y sus derivados, así

como en las descripciones de las fases experimentales de los documentos publicados y productos del mercado (Balas et al., 2010) (Mueller et al., 2012)(Lizarazo-Salcedo et al., 2018).

### Practicas Responsables

Ante la aún insuficiente información científica sobre niveles de riesgo por exposición y movilidad de nanomateriales al ambiente, la aplicación del principio de precaución resulta estratégico para orientar el desarrollo de prácticas responsables y seguras para docentes, estudiantes, investigadores y en especial para trabajadores (Guerra et al., 2016)(National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH, 2014)(Groso et al., 2010)(Lizarazo-Salcedo et al., 2018). Aunque no existe una formulación única de este principio (Cózar Escalante, 2005), podría recogerse su significado en la denominada *Declaración de Wingspread* de 1998, la cual establece que “cuando una actividad hace surgir amenazas de daño para el medio ambiente o la salud humana, se deben tomar medidas de precaución incluso si no se han establecido de manera completamente científica algunas relaciones de causa-efecto”. Así mismo, el principio de precaución está relacionado con un enfoque de gestión de riesgo que busca reducir las afectaciones al público o al medio ambiente en un ambiente de armonía y consenso (EUR-Lex, 2000).

En atención al Principio de precaución, se requiere instruir y actualizar continuamente normatividad, ética de las actividades, métodos de procesamiento, medidas de seguridad, procedimiento para eliminación de residuos y legislación, aspectos que amplían la versatilidad de las actividades de protección al usuario de nanomateriales, al ambiente y al personal en riesgo de exposición (Groso et al., 2010). Además, garantizar condiciones de trazabilidad, reproducibilidad y escalado, definir protocolos de calibración y medición, replicación, utilización de lotes de materias primas provenientes de fuentes confiables de extracción una vez demostradas las propiedades de estos precursores y subproductos, reducción del uso de sustancias químicas y de solventes inorgánicos, inmovilización de nanomateriales y residuos provenientes de los procesos de síntesis y transformación, entre otros, hacen parte de las tareas a realizar en el diseño y desarrollo de las fases experimentales (Nel et al., 2009).

El diseño de experimentos y uso de laboratorios para investigación es pieza clave en el desarrollo tecnológico. La logística, uso de materias primas, cuidado, medidas de seguridad y personal a cargo, depende del tipo de procesos que se lleven a cabo en estos espacios. Por lo tanto, la identificación y clasificación de laboratorios de acuerdo con la exposición real o potencial a nanomateriales ha sido propuesta para disminuir los impactos negativos de las prácticas de enseñanza (Groso et al., 2010). El dialogo y experiencia entre profesionales encargados de los procesos y el desarrollo de fases de modelado, regeneración, inmovilización y postratamiento aumentan la capacidad de reacción ante eventos fortuitos y reducen los efectos nocivos por aplicaciones tecnológicas provenientes de estos materiales (Wang & Chen, 2009).

Asignar un técnico responsable del uso de equipos, restringir el uso de equipos por personal sin capacitación, solicitar cartas especiales de trabajo emitidas por médicos ocupacionales a mujeres en estado de embarazo, realizar entrenamiento continuo, auditar los procesos, vigilar periódicamente el estado de salud de empleados, disminuir el valor umbral límite para sustancias desconocidas, utilizar filtros de aire en cabinas, tener control sobre las condiciones ambientales, asignar personal de limpieza competente para cada tipo de laboratorio y restringir el uso de aspiradoras hacen parte de las actividades organizacionales para evitar peligros asociados al contacto con nanomateriales de los que se desconozca el nivel de riesgo y aportar datos para realizar estudios epidemiológicos posteriores (Groso et al., 2010) (Borm et al., 2006)(Lizarazo-Salcedo et al., 2018).

Ya han sido desarrolladas en algunos países del mundo, guías de buenas prácticas, conducentes a orientar la protección frente a potenciales exposiciones, así como el uso y gestión adecuada de residuos provenientes de la actividad experimental. En la Tabla 1 se ilustran algunas de las guías disponibles. En Colombia aún no hemos consensado una

guía de buenas prácticas para protección del docente, investigador o estudiante, así como directrices para la gestión de residuos.

Tabla 1. Guías manipulación y gestión de nanomateriales.

GUÍA	FUNCIÓN	AÑO/ ORIGEN	LINK
Aproximación a los Nanomateriales	Consejos y Recomendaciones	2008/USA/ Gubernamental	<a href="http://science.energy.gov/~media/bes/pdf/doe_nsrc_approach_to_nanomaterial_esh.pdf">http://science.energy.gov/~media/bes/pdf/doe_nsrc_approach_to_nanomaterial_esh.pdf</a>
Manual de Seguridad de laboratorio	Investigación	2016/USA/ Academia	<a href="http://publications.ehs.iastate.edu/labsm/#1/z">http://publications.ehs.iastate.edu/labsm/#1/z</a>
Guía de Manejo de nanopartículas	Investigación	2009/USA/ Academia	<a href="http://compliance.uhsc.edu/ibc/Home/Resources.aspx">http://compliance.uhsc.edu/ibc/Home/Resources.aspx</a>
Hoja de datos de seguridad de laboratorio No 32 - Nanomateriales de ingeniería: Pautas para prácticas de investigación seguras	Investigación	2009/USA/ Academia	<a href="http://www.ehs.ucsb.edu/labsafety/fact-sheets">http://www.ehs.ucsb.edu/labsafety/fact-sheets</a>
Buenas prácticas para trabajar con nanopartículas	Investigación y producción	2008/USA/ Academia	<a href="http://eprints.internano.org/34/1/Best_Practices_for_Working_with_Nanoparticles_Version_1.pdf">http://eprints.internano.org/34/1/Best_Practices_for_Working_with_Nanoparticles_Version_1.pdf</a>
Enfoques de la nanotecnología segura: gestión de los problemas de salud y seguridad	Consejos y recomendaciones	2009/USA/ Gobierno	<a href="https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf">https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf</a>
Riesgos potenciales de los nanomateriales y cómo manipular de forma segura materiales de toxicidad incierta	Consejos y recomendaciones	2009/USA/ Academia	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871553208000492">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871553208000492</a>
Guía de buenas prácticas para la gestión de riesgos con nanopartículas sintéticas	Consejos y recomendaciones	2009/Canadá/ Independiente	<a href="https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSS/T/R-599.pdf">https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSS/T/R-599.pdf</a>
Directrices para la prevención de la exposición a nanomateriales	Consejos y recomendaciones	2009/Japón/ Gobierno	<a href="http://www.jniosh.go.jp/oldsite/joho/nano/files/mhlw/Notification_0331013_en.pdf">http://www.jniosh.go.jp/oldsite/joho/nano/files/mhlw/Notification_0331013_en.pdf</a>
Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales	Consejos y recomendaciones	2015/España/ Gobierno	<a href="http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/Higiene/2015%20Seguridad%20y%20salud%20en%20el%20trabajo%20con%20nanomateriales/SST%20con%20nanomateriales.pdf">http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/Higiene/2015%20Seguridad%20y%20salud%20en%20el%20trabajo%20con%20nanomateriales/SST%20con%20nanomateriales.pdf</a>

Fuente. (Adaptado de: Guerra, et al. 2016)

---

### Potenciales riesgos en el uso de nanomateriales y sus efectos en estructuras biológicas

La exposición a nanomateriales puede ocurrir por ingestión, inhalación, inyección y contacto dérmico (Borm et al., 2006). Usar máscaras con ventilación asistida o filtros especiales, separar prendas de vestir, utilizar gafas de seguridad y bata impermeable, duchas de seguridad, protectores de calzado y en casos extremos doble par de guantes reduce, casi en su totalidad el riesgo de contacto cutáneo, ocular, nasal o auditivo (Groso et al., 2010). La disposición, el uso de recipientes y doble empaque para residuos de nanoobjetos, transporte y protocolo especial para desecho, captura de polvos, humos, derrames de líquidos en la fuente, reutilización segura de material y disminución de los efectos asociados a incineración y vertimiento aumentan las posibilidades de aprovechamiento y contrarrestan los efectos perjudiciales reportados por este tipo de procesos (Groso et al., 2010) (Wang & Chen, 2009).

Aunque el experimentador debería conocer las propiedades de precursores, procesos de síntesis y subproductos para reducir el riesgo por manipulación inadecuada, la cantidad de comportamientos entre nanocompuestos y estructuras biológicas es innumerable (Nel et al., 2009). Por tanto, determinar estructura, actividades químicas y ciclo de vida y evaluar interacciones entre interfaces abiertas y cerradas mediante variedad de escenarios (Nowack et al., 2012) y pruebas escalonadas, integradoras y progresivas que evalúen el rendimiento en ambientes simulados en silicio, in vitro y otros modelos alternativos, aporta al desarrollo de modelos de predicción de la exposición, biodisponibilidad y propiedades biocatalíticas y reduce los impactos sobre el ambiente y el uso de organismos biológicos vivos (Groso et al., 2010) (Nel et al., 2009) (Hillie & Hlophe, 2007) (Stueckle & Roberts, 2019). La evaluación in situ del tamaño, hidratación, la disolución y variación en tamaño y las modificaciones de respuestas espectroscópicas por variación en adsorbatos, recubrimientos y su interacción en medios acuosos y otros fluidos es una tarea extensa pero necesaria que está en fase de investigación (Nel et al., 2009) (Casals et al., 2012).

Debido a la alta naturaleza reactiva producto de la variación en la relación superficie-volumen especialmente en nanopartículas de menos de 2.5nm (González et al., 2015; 2016) y de los parámetros estructurales característicos como cristalinidad, forma, relación de aspecto y rigidez, se hace pertinente implementar un conjunto de test para evaluar variaciones en propiedades fotónicas, electrónicas, semiconductoras y catalíticas, efectos biológicos genuinos a nanoescala, así como la eliminación de estados cristalinos y defectos materiales. La producción de especies reactivas de oxígeno, estrés oxidativo en ADN, peroxidación de lípidos, formación de micronúcleos, formación de micelas o recubrimientos, absorción celular, modificación en el metabolismo celular, eficiencia del procesamiento de partículas vía endocítica, citotoxicidad y cambios estructurales en la morfología celular, son necesarios para determinar la relación individual entre el tamaño de cada nanoobjeto y los efectos superficiales y farmacocinéticos (Borm et al., 2006) (Nel et al., 2009) (Lovestam et al., 2010) (Li et al., 2015) (Shin et al., 2015).

La modificación de carga superficial, el confinamiento de electrones o la formación de pares electrón-hueco debidos a la acoplamiento de grupos funcionales y revestimientos es una estrategia que ha sido usada para causar comportamiento anfótero o anfífilico, conducir a la escisión de enlaces estructurales, reticular covalentemente los dominios de proteínas, formar dispersiones estables con altas tasas de excreción, aumentar la adsorción selectiva de iones, proteínas y biomoléculas, prevenir la bioreactividad o reducir la toxicidad en organismos vivos (Nel et al., 2009) (Li et al., 2015). La penetración de barreras biológicas y la absorción de nanopartículas en los órganos puede estar mediada por dicha carga superficial efectiva y su determinación es un parámetro relevante para evaluar el comportamiento en fluidos biológicos (Lovestam et al., 2010).

La inestabilidad termodinámica de nanomateriales, la variación en las tasas de disolución, la capacidad de formación de agregados y fibrillas amiloides, la creación de corona proteica, la nucleación y el cambio en el impedimento estérico afectan la dispersión y movilidad de nanomateriales y la adsorción de iones en las matrices circundantes en un ambiente

**Lema.**

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

mediado por la competencia iónica y el pH de la solución (Nel et al., 2009) (Lovestam et al., 2010)(Palika et al., 2021). Identificar los comportamientos de distintas matrices al momento de integrar este tipo de sustancias es tarea relevante para mejorar el diseño, evaluar la exposición, el potencial de liberación y complejación y las condiciones de movilidad, pérdida de función, exposición, fibrilación y acumulación debidas a la interacción entre nanoobjetos, organelos biológicos, proteínas, partículas y estructuras moleculares (Borm et al., 2006) (Nel et al., 2009)(Casals et al., 2012).

Además de encontrarse y extraerse en todo tipo de matrices, tener alta superficie disponible, competir con proteínas y virus e interactuar por medio de contacto con regiones hidrofóbicas o cargadas, unión a ligandos superficiales o fuerzas de corto alcance con estructuras moleculares y atómicas eficientemente respecto al material en bulk, los *nanooobjetos* pueden programarse para catalizar la producción de oxígeno reactivo produciendo estrés oxidativo celular, la formación de coronas proteicas, el cubrimiento de partículas, la captación intracelular y actuar como bioceldas (Qian et al., 2003)(Nel et al., 2009) (Li et al., 2015). La capacidad de difusión, acoplamiento de grupos funcionales, la modificación de parámetros topológicos de forma y superficie, el aumento de la complejidad estructural, el uso en procesos de catálisis, transporte, intercambio, compatibilidad, retención específica, sensado y reactividad vertiginosa y selectiva son bondades de los nanomateriales (Gonzalez, 2015) (Li et al., 2015).

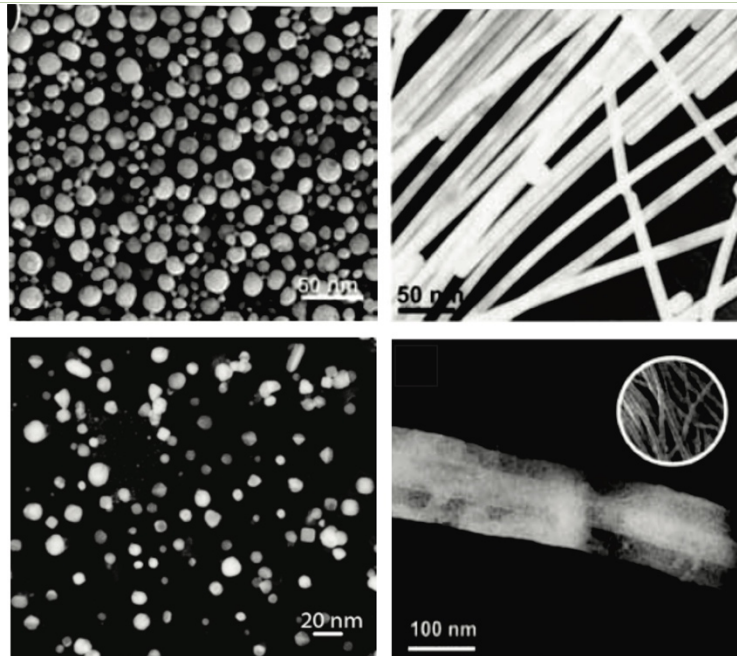
Las matrices y objetos en interacción, los tipos de interacciones y los agentes ambientales externos constituyen un sistema de alta complejidad. El uso de modelos computacionales basados en teorías clásicas es insuficiente para predecir y evaluar comportamientos en la nanoescala y para apoyar el diseño y predicción de resultados experimentales. Aunque la simplicidad de algunas nanoestructuras permite determinar experimentalmente los efectos producidos por afectaciones externas progresiva e independientemente, la interacción nanomaterial-superficie es fluctuante y dependiente del tiempo, lo que implica un incremento en complejidad y una disminución en la predictibilidad de los comportamientos receptor-ligando y las fuerzas asociadas (Van Der Waals electrostáticas, estériles, repulsivas y atractivas) (Nel et al., 2009).

Específicamente, para el caso de nanomateriales confeccionados por plata los cuales se han posicionado como los de mayor comercialización y uso, los estudios de toxicidad muestran un importante efecto en numerosas líneas celulares y organismos acuáticos. En mitocondria, se produce inflamación y metabolismo aberrante con potencial apoptosis celular. Se han demostrado además potenciales daños en el ADN (González et al., 2015). Las NPs de plata, por su creciente demanda, han incrementado su movilidad al ambiente por vía antrópica, alcanzando valores cercanos al 2% de la plata utilizada para productos comerciales.

Figura 1. Fotografía tomada con Microscopio Electrónico de Transmisión de nanopartículas de dióxido de titanio, de plata, nanohilos de plata y nanotubos de carbono. Estos materiales son muy utilizados para investigación y desarrollo de productos comerciales. Sus potenciales efectos de toxicidad en seres vivos e impacto en ambiente aún se encuentran bajo investigación.

Lema.

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.



Fuente. Fotografías reproducidas de (Gonzalez, 2013) con permiso de *nanoCiTec*.

En tratamientos médicos, la biodegradación, la liberación de energía libre, la reestructuración y disolución de la superficie de nanopartículas en el entorno celular o en las secreciones celulares puede inducir activación de vías de señalización, plegamiento, endocitosis, fagocitosis o penetración directa, intercambio iónico, afectar la integridad de la membrana, la actividad mitocondrial, causar lesiones oxidantes por especies reactivas de oxígeno o muerte a células malignas (Nel et al., 2009). Uno de los aspectos a evaluar es el uso de nanomateriales para provocar lesiones por especies reactivas de oxígeno en células tumorales, ya que puede ocurrir que este efecto también se manifieste en células sanas y con ello incrementa la probabilidad de aparición de enfermedades degenerativas, artritis, enfermedades cardiovasculares, parkinson, cáncer, entre otras (Li et al., 2015). En ese mismo sentido, la variación en potencial zeta ha demostrado que partículas catiónicas son más citotóxicas que partículas neutras o aniónicas ya que es más probable que induzcan hemólisis y agregación plaquetaria (Nel et al., 2009).

A escalas nano, los efectos de solubilidad de la saturación, cristalización, nucleación, transferencia de masa y calor aumentan por interacciones de corto alcance (Lovestam et al., 2010). En fluidos biológicos, la fuerza iónica es a menudo de aproximadamente 150 nm, lo que significa que las fuerzas electrostáticas tienen más probabilidades de ser detectadas dentro de unos pocos nanómetros de la superficie. Así mismo, las variaciones son dependientes de la posición exacta en la cual un nanobjeto interactúa. Entre los 10 y 50nm la energía de interacción es suficiente para causar efectos significativos (Nel et al., 2009). El flujo de desplazamiento y la selectividad son efectos que se atribuyen a la competencia iónica entre nanobjetos y ligandos en superficie. La eficiencia en procesos de adsorción puede incrementarse programando la selectividad, el flujo de desplazamiento y diseñando estructuras que potencialicen los efectos entre fuerzas de corto alcance, rugosidad, hidrofiliicidad y los efectos de apantallamiento por competencias iónicas debidas al potencial de hidrógeno e impurezas del proceso.



### Beneficios y riesgos en el uso de nanomateriales

De lo anotado anteriormente, existen potenciales riesgos que deben ser atendidos cuando se producen o manipulan los nanomateriales. Cabe sin embargo enfatizar sobre los extraordinarios beneficios que aportan estas entidades para hacer frente a las problemáticas que afronta la sociedad del presente siglo. Con una actitud responsable y cuidadosa en el trabajo con nanomateriales y siguiendo las recomendaciones y guías de buenas prácticas, se hace posible inclinar la balanza a favor de los beneficios.

La tabla II muestra un comparativo entre los ventajas-beneficios que aportan los nanomateriales y aspectos que pueden implicar riesgos asociados. Como se puede observar, es importante la oferta en el uso de estas entidades para atender problemáticas de interés para el área de la salud, la industria, el medio ambiente, energía, etc. Así, los nanomateriales resultan estratégicos, de acuerdo a las propiedades físico-químicas que se indican en la primera columna de la tabla 2, para el diseño y desarrollo de sistemas para diagnóstico y tratamiento médico, dispositivos de sensado de gran precisión, filtros para remoción de contaminantes con capacidad de reuso y recirculación de materiales en procesos de producción y en la disminución de la liberación de residuos al ambiente, nanocatalíticos para producción eficiente y limpia de energía, entre muchos otros que allí se indican.

Tabla 2. Se indican en función de la propiedad fisicoquímica las ventajas-beneficios y riesgos que ofrecen los nanomateriales.

Propiedad Físico-química	Ventajas-beneficios	Riesgos	Referencia
Alta superficie Disponible	Aprovechamiento en proceso de funcionalización, adsorción, desinfección, separación, catálisis, fotocatalisis.  Alta reactividad	Limitada uniformidad en parámetros superficiales (rugosidad, aspereza, Ondulación)  Efectos peligrosos en especies en solución acuosa	(Li et al., 2015)  (Edgar González et al., 2015)  (Markiewics, 2016)
Tamaño comparable con proteínas y virus	Incremento en la capacidad de control	Ruido en señal o en función	(Nel et al., 2009)
Hidrofobicidad e hidrofiliidad	Control en solubilización	Incremento en la probabilidad de afectación celular por internalización.	(Li et al., 2015)
Unión a ligandos superficiales en membrana	Generación de fagocitosis en células tumorales	Inducción al plegamiento o intrusión en membrana celular normal	(Nel et al., 2009)



Lema.

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

Bogotá, 13 a 15 de octubre de 2021  
Modalidad On Line – Sincrónico

Propiedad Físico-química	Ventajas-beneficios	Riesgos	Referencia
Alteración por fuerzas de corto alcance	Formación de coronas protéicas	Aumento o reducción en la disolución y/o cubrimiento de efectos intraparticulares	(Nel et al., 2009) (Lovestam et al., 2010)
Catalización de oxígeno reactivo	Producción de estrés oxidativo celular –Apoptosis Intercambio iónico.	Producción de estrés oxidativo celular – Necrosis Activación de vías de señalización.	(Li et al., 2015)
Difusión	Capacidad de transporte en fluidos biológicos y penetración directa en membrana.	Aglomeración y bloqueo de ramificaciones en canales iónicos.	(Grumezescu, 2016)
Acoplamiento de grupos funcionales	Capacidad de reconocimiento molecular y selectividad.	Competencia iónica Apantallamiento	(Nel et al., 2009)
Topología	Control sobre forma y superficie Incremento en la porosidad	Disminución en Replicabilidad Bajas propiedades mecánicas	(Edgar González et al., 2011) (Edgar González et al., 2015) (Gonzalez Jiménez, 2016) (Markiewics, 2016)
Compatibilidad	Uso en sistemas biológicos para diferentes tipos de funciones en diagnóstico, tratamiento, etc.	Pérdida de funcionalidad	(Nel et al., 2009)
Modelación	Predictibilidad	Incapacidad de simular sistemas cuánticos con tecnologías clásicas.	(Nel et al., 2009)
Biodegradación	Disolución y reestructuración	Generación de subproductos – Liberación de energía	(Nel et al., 2009)

Propiedad Físico-química	Ventajas-beneficios	Riesgos	Referencia
Deposición final	Degradable	Persistente	(Lovestam et al., 2010)
Citotoxicidad	Producción de procesos de endocitosis en células tumorales.	Inducción hemolisis Agregación plaquetaria	(Nel et al., 2009)
Solubilidad	Síntesis en soluciones acuosas	Interacción con organelos fuera del rango de trabajo	(Li et al., 2015)
Cristalización	Capacidades fototermoelectricas	Afectación de funcionalidad de organelos biológicos	(Nel et al., 2009)
Nucleación	Favorecer procesos de formación de multimeros claves en procesos de polimerización	Limitación en transporte e intercambio por aglutinamiento	(Edgar González et al., 2015)
Pureza	Control de acuerdo con uso de precursores	Alta con uso solventes orgánicos que afectan el ambiente	(Qian et al., 2003).
Fotocatálisis	Efectividad Eficiencia	Disponibilidad en el consumo de energía externa en forma de luz UV	(Markiewics, 2016)
Costos	Reducción en costo de almacenamiento, transporte, uso de precursores	Escalabilidad Replicabilidad Instrumentación	(Guerra et al., 2016)

Fuente. Elaboración propia

## Conclusiones

No hay duda del extraordinario papel que los nanomateriales están jugando en la consolidación de la tecnología del siglo XXI para el mejoramiento de las condiciones de vida de la sociedad. Sin embargo, se hace imprescindible mejorar sustancialmente prácticas de enseñanza relacionadas con la seguridad y protección a exposición tanto a precursores como productos sintetizados pertenecientes a escalas nanométricas, garantizando una mínima afectación de quienes realizan este tipo de acciones al medio ambiente y seres vivos.

**Lema.**

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

Se recomienda que en la manipulación de Nanomateriales en laboratorios de enseñanza, se incorporen guías de buenas prácticas en las que se establecen las recomendaciones para la disposición y manejo de desechos. De otra parte, atender los potenciales riesgos asociados con inestabilidad y reactividad en entornos no controlados de nanoestructuras y los productos de ellas derivados.

Se requiere con carácter urgente la apertura de espacios de socialización y reflexión sobre el papel de la academia en la evaluación de impacto de las tecnologías emergentes, específicamente sobre riesgos y beneficios, aspecto que va a favorecer una actitud ética y crítica en docentes y estudiantes para inclinar la balanza hacia los beneficios que ofrecen estas tecnologías.

### Referencias bibliográficas

- Aschberger, K., Rauscher, H., Crutzen, H., Rasmussen, K., Christensen, F. M., Sokull-klüttgen, B., & Stamm, H. (2014). *Considerations on information needs for nanomaterials in consumer products consumer products in the EU* (Issue April). <https://doi.org/10.2788/3044>
- Balas, F., Arruebo, M., Urrutia, J., & Santamaría, J. (2010). Reported nanosafety practices in research laboratories worldwide. *Nature Nanotechnology*, 5(2), 93–96. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.1>
- Borm, P. J. A., Robbins, D., Haubold, S., Kuhlbusch, T., Fissan, H., Donaldson, K., Schins, R., Stone, V., Kreyling, W., Lademann, J., Krutmann, J., Warheit, D. B., & Oberdorster, E. (2006). The potential risks of nanomaterials: A review carried out for ECETOC. In *Particle and Fibre Toxicology* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-3-11>
- Camacho, Á., Duarte, Á., Dubay, D., Forero, E., González, E., Jaramillo, F., Maldonado, C., Montoya, J., Obregon, N., Osma, J., Sierra, C., & Urquijo, W. (2016). Definición de nanomateriales para a Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 45(1), 15–20. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n1.58955>
- Casals, E., González, E., & Puentes, V. (2012). Reactivity of inorganic nanoparticles in biological environments: insights into nanotoxicity mechanisms. *Journal of Physics D: Applied Physics*. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/44/443001>
- Cózar Escalante, J. M. de. (2005). Principio de precaución y medio ambiente. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 133–144. <https://doi.org/10.1590/s1135-57272005000200003>
- Díaz, J., Estrada, L., Acuña, Y., & González, E. (2019). The Bio-Nano Offer and its Impact on Environment, Energy, Agriculture, and Health. *Nano Science and Technology*, 5, 14.
- E. Gonzalez. (2015). Nanomateriales: Beneficios, Riesgos y Sostenibilidad. In *La influencia de Internet, genética y nanotecnología en la medicina y el seguro*. Universidad Externado de Colombia.
- ECHA. (2019). *Appendix for nanoforms applicable to the Guidance on Registration and substance identification, 2019. February*.
- EUR-Lex. (2000). *Glossary of summaries*. [https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/precautionary\\_principle.html](https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/precautionary_principle.html)
- González, E, Marrugo, J., & Martínez, V. (2015). Nanotecnología para medición y remediación - Nanopartículas magnéticas para remoción de mercurio. In *El problema de contaminación por mercurio* (pp. 195–197).
- González, Edgar, Arbiol, J., & Puentes, V. F. (2011). Carving at the Nanoscale: Sequential Galvanic Exchange and Kirkendall Growth at Room Temperature. *Science*, 334(6061), 1377–1380. <https://doi.org/10.1126/science.1212822>
- González, Edgar, Puentes, V., & Casals, E. (2015). *Nanomateriales - Nanopartículas Coloidales*.

Lema.

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

- Gonzalez Jiménez, E. E. (2016). Control de la superficie y el volumen en la nanoescala para la configuración y el diseño de nanodispositivos. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(157), 590. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.398>
- Groso, A., Petri-Fink, A., Magrez, A., Riediker, M., & Meyer, T. (2010). Management of nanomaterials safety in research environment. *Particle and Fibre Toxicology*, 7(1), 40. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-7-40>
- Grumezescu, A. M. (Ed). (2016). *Water Purification* (Academic Press (ed.); 1st ed.).
- Guerra, E., Forero, E., & González, E. (2016). Good practices and responsible use of nanomaterials. *Nano Science and Technology*, 4(1), 4–9.
- Hillie, T., & Hlophe, M. (2007). Nanotechnology and the challenge of clean water. *Nature Nanotechnology*, 2(11), 663–664. <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.350>
- Li, X., Liu, W., Sun, L., Aifantis, K. E., Yu, B., Fan, Y., Feng, Q., Cui, F., & Watari, F. (2015). Effects of physicochemical properties of nanomaterials on their toxicity. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 103(7), 2499–2507. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35384>
- Lizarazo-Salcedo, C. G., González-Jiménez, E. E., Arias-Portela, C. Y., & Guarguati-Ariza, J. (2018). *Nanomateriales: un acercamiento a lo básico*.
- Lovestam, G., Rauscher, H., Roebben, G., Kluttgen, B. S., Gibson, N., Putaud, J.-P., & Stamm, H. (2010). Considerations on a definition of nanomaterial for regulatory purposes. In *JRC Reference Reports* (Vol. 24403). <https://doi.org/10.2788/98686>
- Markiewicz, R. (2016). Eco-Friendly Alternative for Water Treatment from Nanotechnology. *Nano Science and Technology*, 4, 28–34.
- Mueller, N. C., Van der Bruggen, B., Keuter, V., Luis, P., Melin, T., Pronk, W., Reisewitz, R., Rickerby, D., Rios, G. M., Wennekes, W., & Nowack, B. (2012). Nanofiltration and nanostructured membranes-Should they be considered nanotechnology or not? *Journal of Hazardous Materials*, 211–212, 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.096>
- Nanomaterials, N.-E. U. O. for. (2017). *Organisation Overview - Nano Science & Technology Knowledge Base* -. <https://nanodata.echa.europa.eu/index.php?r=actor%2Foverview>
- National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH. (2014). Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers. *Carbon Nanotubes and Nanofibers: Occupational Exposure Risks and Minimization Strategies*, 1–161.
- Nel, A. E., Mädler, L., Velegol, D., Xia, T., Hoek, E. M. V., Somasundaran, P., Klaessig, F., Castranova, V., & Thompson, M. (2009). Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nature Materials*, 8(7), 543–557. <https://doi.org/10.1038/nmat2442>
- Nowack, B., Ranville, J. F., Diamond, S., Gallego-Urrea, J. A., Metcalfe, C., Rose, J., Horne, N., Koelmans, A. A., & Klaine, S. J. (2012). Potential scenarios for nanomaterial release and subsequent alteration in the environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(1), 50–59. <https://doi.org/10.1002/etc.726>
- Palika, A., Armanious, A., Rahimi, A., Medaglia, C., Gasbarri, M., Handschin, S., Rossi, A., Pohl, M. O., Busnadiago, I., Gübeli, C., Anjanappa, R. B., Bolisetty, S., Peydayesh, M., Stertz, S., Hale, B. G., Tapparel, C., Stellacci, F., & Mezzenga, R. (2021). An antiviral trap made of protein nanofibrils and iron oxyhydroxide nanoparticles. *Nature*

**Lema.**

¿Cuál educación científica es deseable frente a los desafíos en  
nuestros contextos latinoamericanos? Implicaciones para la  
formación de profesores.

---

*Nanotechnology*, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00920-5>

- PNUMA. (2006). Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. *Europa: Síntesis de La Legislación de La UE*, 126. [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/waste\\_management/l28043\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28043_es.htm)
- Qian, Q. Z., Boxman, A., & Chowdhry, U. (2003). Nanotechnology in the chemical industry - Opportunities and challenges. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(5–6), 567–572. <https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000006151.03088.cb>
- Shin, S. W., Song, I. H., & Um, S. H. (2015). Role of physicochemical properties in nanoparticle toxicity. *Nanomaterials*, 5(3), 1351–1365. <https://doi.org/10.3390/nano5031351>
- Statnano. (2021). *Nanomaterials Database*. <https://Statnano.Com/Nanomaterials>. <https://statnano.com/nanomaterials>
- Stueckle, T. A., & Roberts, J. R. (2019). Perspective on Current Alternatives in Nanotoxicology Research. *Applied in Vitro Toxicology*, 5(3), 111–113. <https://doi.org/10.1089/aivt.2019.29020.jrr>
- Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 27(2), 195–226. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002>