

Nanotecnología para el tratamiento de agua. Claves sobre la investigación en México¹

Laura Saldivar* y Casey Walsh**

RESUMEN: Este artículo presenta información obtenida de una encuesta realizada a investigadores en el área de nanotecnología con aplicaciones en el tratamiento de agua en México. Asimismo, analiza lo expresado por los participantes sobre ciertos aspectos que consideramos claves en el desarrollo de esta línea de investigación, como son: las redes de colaboración, el financiamiento, los riesgos relacionados con el uso de nanotecnología (NT) y nanoprodutos (NPs) y para el tratamiento de aguas, la postura y opinión del público, y la regulación. Concluye reconociendo la importancia de este campo de investigación y recomendando se amplíe la exploración sobre los posibles efectos toxicológicos de la NPs usadas en este campo; para esto se pueden utilizar metodologías como la evaluación del ciclo de vida. Señala también la importancia de ampliar el foco de la investigación para que ésta sea, no sólo interdisciplinaria, sino multidisciplinaria e incluya aspectos éticos, legales, sociales y medioambientales.

PALABRAS CLAVES: Nanotecnología (NT), tratamiento de agua, México, toxicidad, riesgos, regulación.

ABSTRACT: This article presents the results of a survey administered to researchers in the area of nanotechnology and water in Mexico. We analyze the opinions they expressed concerning a series of key topics: networks of collaborative research; funding; risks related to the use of nanotechnology (NT) and nano-products (NPs) for the treatment of water; public opinion regarding NT, and the regulation of NT. We recognize the great importance of this field and argue for more research concerning the toxicology of NPs used in the water sector. Finally, we suggest that research in Nano be expanded to include ethical, legal, social and environmental dimensions.

KEYWORDS: Nanotecnología (NT), water treatment, Mexico, toxicity, risk, regulation.

1 La información contenida en esta publicación fue resultado de un trabajo de investigación intitulado “Dimensiones sociales de la nanotecnología y el tratamiento de aguas en México”. Fue dirigida por el Dr. Casey Walsh, Departamento de Antropología de la Universidad de California en Santa Bárbara (University of California, Santa Barbara–UCSB), y desarrollada entre abril de 2013 y junio de 2014. Contó con financiamiento de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (National Science Foundation–NSF) a través del Centro para el Estudio de Nanotecnología en Sociedad (Center for Nanotechnology and Society–CNS) de la UCSB.

* Investigadora independiente. Tel. (735) 3577836. Correspondencia: (laura.saldivar.tanaka@gmail.com).

** Departamento de Antropología, Universidad de California, Santa Bárbara.

Introducción

La investigación y desarrollo de nanotecnología (NT) para “remediar o mejorar” el ambiente va creciendo, pues se considera que estas tecnologías emergentes son una opción para enfrentar la contaminación y descontaminar agua, suelo y aire (Watlinton, 2005). Si bien México no es aún referente internacional respecto a la investigación en el área de NT para el tratamiento de agua, existe ya un número considerable de instituciones e investigadores trabajando en esta línea de investigación. Por su parte, en torno a las promesas sobre los beneficios ambientales potenciales del uso de NT, existe a nivel internacional preocupación por los posibles impactos negativos de éstas en el ambiente (aire, agua y suelo) y los organismos vivos, incluyendo los humanos (Greenpece, 2007), así como por aspectos éticos y sociales (The Royal Society, 2004; Savages, N. en Delgado, 2006).

Nanotecnología y agua en el mundo

La aplicación ambiental de la NT que nos ocupa en el presente artículo es aquella relacionada con el tratamiento de aguas para su a) purificación/desinfección; b) descontaminación de aguas residuales “municipales” (domésticas) e industriales (textil, petroquímica, automotriz, metalúrgica, minera, bebidas); c) desalinización; d) tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios; e) sensores de calidad del agua. Algunas de las nanotecnologías que se están desarrollando y usando internacionalmente para el tratamiento de aguas incluyen: nanosemiconductores para fotocátalisis, nanobiopolímeros, zeolitas nanocristalinas, membranas nanoreactivas y/o nanofiltrantes, nanoarcillas, nanocatalizadores, nanopartículas (NPs) magnéticas, nanosensores, nanopelículas, nanotubos de carbono, dendrímeros, NPs-fotocatalizadoras, poliméricas, con enzimas, de metal (de hierro cerivalentes o titanio), entre otras (Mittal, 2012; Theron *et al.*, 2010; Mahapatra *et al.*, 2010; Meridian, 2006; Watlington, 2005).

Esta diversidad de tecnologías, así como la capacidad de sintetizar nanomateriales (NMs) con características específicas, hace posible incluirlas en los sistemas de potabilización o tratamiento secundario y terciario, diseñándose módulos con NT para eliminar contaminantes indeseados, como arsénico, flúor, metales pesados (cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio), hidrocarburos, agroquímicos, fármacos u otros tipos de contaminantes emergentes.

El tema del agua es de tal importancia y su recuperación y tratamiento a través de NT tan prometedor que en muchos países existen ya grupos especializados en estas líneas de investigación. Algunos ubicados en los sectores públicos son: el Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN) de la Universidad de Rice, Estados Unidos, donde han desarrollado NPs magnéticas de óxido de hierro para la extracción de arsénico; la

University of Central Florida en Orlando, sede del desarrollo de NPs de hierro y magnesio para una mayor degradación de metales pesados y solventes orgánicos; La Stillwater University en Oklahoma, donde se sintetizan polímeros de nanoesferas para detectar materiales peligrosos en ambientes acuáticos (Schmidt, 2007). Para los llamados “países en desarrollo”, la India sería el representante con la creación de filtros domésticos con nanopartículas de plata (AgNPs) para eliminar pesticidas (PEN, 2007).²

En la iniciativa privada hay también quienes desarrollan estas tecnologías. Ejemplos de ello son: El VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. en Finlandia, que desarrolla tecnologías para el tratamiento de aguas incluyendo NTs, y Nanostruck Technologies Inc. (antes Blue Gold Water Technologies Ltd.) una empresa de Canadá que también desarrolla tecnologías “a la medida” para el tratamiento de descargas industriales (tequileras, herramientas, calzado), jales de minas, remoción de metales pesados e incluso el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.

Otra línea de investigación derivada de la relación NT y agua es aquella que se enfoca en el efecto de los NMs en organismos acuáticos, así como los efectos de utilizar NTs para el tratamiento de aguas en plantas de tratamiento (Keller, 2012; Weinberg *et al.*, 2011; Farré *et al.*, 2011; Pérez, *et al.*, 2009; Luoma, S. 2008; Hillie, 2006). Se habla de tres formas principales en que los NMs pueden terminar en los cuerpos de agua: 1) fuentes puntuales; 2) fuentes dispersas, cuando productos de consumo que contiene NMs los liberan al ambiente (aire, suelo y agua) y éstos son lavados, y, 3) descargas de plantas de tratamiento.³

Un ejemplo de NPs que ingresan a medios acuáticos son los utilizados en textiles,⁴ suelen llegar a los cuerpos de agua a través de las descargas de la industria textil que las usa o de efluentes de lavanderías de hospitales u hoteles (Rezic, 2011; Som *et al.*, 2011). Las NPs más frecuentes en medios acuáticos son de plata (Ag), el dióxido de titanio (TiO₂), el óxido de zinc (ZnO) y los nanotubos de carbono (NTC),⁵ y por lo mismo son de los más estudiados

2 Para más datos sobre este desarrollo ver Grimshaw, D. (2009) *Nanotechnology for clean water: Facts and figures*. <<http://www.scidev.net/en/new-technologies/nanotechnology-for-clean-water/features/nanotechnology-for-clean-water-facts-and-figures.html>>

3 La NPs pueden ser liberadas accidentalmente debido a impactos externos como abrasión, calor y presión. (Som, *et al.*, 2011). Hay diferentes formas de categorizar las rutas de exposición, según la GAO (2011) en: 1) Fuente de producción de NMs, 2) Fuente de producción de productos con NMs, 3) Uso – Consumo, 4) Término de vida útil, disposición o reciclamiento; o según Aschberger y coautores (2011) en exposición 1) laboral, 2) consumidor, 3) ambiental al ser liberados durante la fabricación, el uso, la combustión y el desgaste o ruptura de los productos que las contienen, aunque hay que recordar que hay NPs en el ambiente de origen natural.

4 Las NPs en textiles se agregan para conseguir las siguientes propiedades: autolimpiado, repelente de agua y suciedad, antimicrobial, propiedades conductivas y antiestáticas, solvente, resistencia a abrasión y rayos UV, reducción en la permeabilidad de gas y flameabilidad. (Siegfried, 2007; Mantovani y Zappelli, 2009 en Som *et al.*, 2011).

5 Las NPs de TiO₂, Ag y ZnO, contenidas en productos líquidos o en polvo, tienen mayor

en cuestión de toxicidad ambiental y humana⁶ (Faunce y Watal, 2010; Som, 2011). De acuerdo con varios estudios (ver recuadro) las NPs de ZnO causan mayores efectos negativos como el de inhibir el crecimiento de los productores primarios, las algas.

Estudios sobre toxicología química y ecotoxicidad

Som *et al.* (2011): Las NPs de Ag, ZnO y TiO₂ sí pueden tener efectos peligrosos en el ambiente. El ZnO presentó mayores efectos a la salud humana.

Aschberger *et al.* (2011): Las NPs de Ag u óxidos de metal (ZnO y TiO₂) son altamente tóxicas para crustáceos y tóxicos para algunos peces, algas y plantas acuáticas, mientras que los NTC y fulerenos (C₆₀) mostraron menor toxicidad.

Nano y agua en México

En México no es claro o no existe suficiente información si se usa ya algún tipo de NT con fines de purificación o tratamiento secundario y terciario a gran escala, aunque hay ya empresas que dicen contar con sistemas que la contienen, todos ellos de origen extranjero (Hasars Grupo Ecológico, Bio-DAE, TSSI). Dado las promisorias funciones de la NT para purificar y eliminar ciertos contaminantes del agua y la necesidad de mejorar los sistemas y procesos de tratamiento primario, secundario y terciario en nuestro país, no es extraño que ya se esté usando o que en poco tiempo así sea.

Por otro lado, existe ya un número reducido de investigadores en México que desarrollan NTs con aplicaciones en el sector agua. Hay también un escaso número de investigadores que investigan el efecto del uso de estas NT y NMs en ambientes acuático (Cuevas, 2014 *com. per.*). A continuación se presentan resultados parciales de la investigación “Dimensiones sociales de la nanotecnología y el tratamiento de aguas en México”.

Metodología

Primero se hizo trabajo bibliográfico de internet. Se llevaron a cabo varias búsquedas alrededor de los siguientes temas: nano + agua + tratamiento de agua, potabilización + México; búsqueda en páginas de instituciones académicas nacionales que trabajan NT; redes de NT e investigadores en el tema;

probabilidad de ser liberados al ambiente que aquellos embebidos en matrices sólidas como los NTC (Brouwer, 2010 en Aschberger, *et al.*, 2011).

- 6 Las NPs afectan de forma diferencial el ambiente y la salud humana, en particular los NTC. El riesgo ambiental, es altamente dependiente del ciclo de vida de las cantidades producidas de cada NP (Som *et al.*, 2011), así como de su tamaño, forma y propiedades fisicoquímicas (contenido de metal, agregación, aglomeración, química de superficie y funcionalización) (Aschberger, *et al.*, 2011).

la consulta de información bibliométrica⁷ para identificar actores científicos en el tema; y la búsqueda de artículos científicos de investigadores mexicanos sobre NTs con aplicaciones en agua. Se identificó a investigadores que trabajan esta línea de pesquisa y se les contactó vía correo electrónico o telefónico para solicitarles contestaran una encuesta sobre el tema en cuestión (anexo 1).

Paralelamente se asistió a cuatro eventos académicos⁸ y a un foro de divulgación⁹ y se visitó y entrevistó a investigadores de las siguientes instituciones académicas o de investigación: Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMAV) en Monterrey y Chihuahua; Instituto Potosino de Investigación en Ciencia y Tecnología (IPICYT); Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM); Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL); Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en Iztapalapa; Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP); Universidad de Guanajuato (UdeGto); Universidad de la Ciudad de México (UCM).

Finalmente, las opiniones expresadas por los investigadores que trabajan en el área (encuestados y entrevistados) fueron analizadas y ordenadas en temas recurrentes.

Resultados

Los siguientes resultados reflejan las respuestas de 19 encuestas y 3 entrevistas a investigadores en el área. Se enviaron correos electrónicos a 43 investigadores, de los cuales se obtuvo respuesta de 19 de ellos de las siguientes instituciones: UAM-Iztapalapa, IPN, UdeGto., CIMAV, IPICYT, UANL, BUAP, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Instituto Tecnológico de Toluca (ITT), Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) y Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

Las líneas específicas de investigación en que trabajan los encuestados y algunos entrevistados son, en orden de mención: nanocatalizadores (8), nanopelículas (6), nanoarcillas (4), NPs magnéticas (3), membranas nanofiltrantes (2), fotocatalizadores, nanoesferas sólidas semiconductoras, materiales adsorbentes a base de NPs metálicas, materiales tipo hidrotalata (HDL), hidróxidos doble laminares, nanozeolita, nanosuavización de aguas y toxicidad de NPs en los procesos de tratamiento de aguas aerobios y anaerobios. Todos

7 Información proporcionada por el Dr. Eduardo Robles Belmont del Laboratorio de Redes, MMSS. IIMAS, UNAM.

8 The Annual Meeting of the Society for Social Studies of Science, 2013, San Diego, California; el 5to Encuentro de Investigadores de la Red de Nanociencia y Micro-Nanotecnología, 2013. Instituto Politécnico Nacional de México (IPN), México, DF; El 2do Coloquio Diseño y Textura de Nanoestructuras," Guadalajara, Jalisco; el 14 Encuentro Internacional e Interdisciplinario en Nanociencia y Nanotecnología, 2014, Pachuca, Hidalgo.

9 Nano Monterrey 2014, Monterrey, Nuevo Leon, México.

los casos están en etapa experimental, excepto uno en que ya se había incluido como un fase de una planta de tratamiento piloto para una comunidad rural en Puebla.

Algunos usos de la NT fueron mencionados: electrodos para purificación de agua; foto degradación y adsorción; fotocatalisis combinada con TiO_2 y ZnO ; degradación de contaminantes fenólicos-fungicidas y colorantes; en forma de polvos para la eliminación de pesticidas, insecticidas, fenoles, polifenoles, fármacos, metales altamente tóxicos como cromo (Cr), arsénico (As), mercurio (Hg), y cadmio (Cd); remoción de clorofenoles y paracetamol; NPs de óxido de hierro (Fe_2O_3) para la remoción de arsénico; nanosilice para absorber clorofenoles y paracetamol; adsorción de contaminantes de efluentes; nanocatalizadores para la degradación de diclofenaco, y naproxeno, así como para la desinfección de agua (desactivación del parásito *Ascaris suum*); nanozeolitas para eliminar flúor en planta de potabilización en población de menos de 3,000 habitantes. En entrevistas se habló de una tecnología ya utilizada: nanozeolita en tratamiento de lixiviados de relleno sanitario (Nanostruck/Blue Gold); membranas vibrantes en plantas de tratamiento (New Logic Research Inc.); y de una propuesta para usar NPs para remoción de arsénico en una planta potabilizadora de Guanajuato, Guanajuato.

En específico, los contaminantes mencionados que se pueden tratar fueron: materia orgánica, microorganismos (bacterias, virus); compuestos orgánicos (fármacos, colorantes, clorados); una gran variedad de contaminantes inorgánicos: metales pesados y metaloides; contaminantes recalci-trantes, compuestos fenólicos, metales en solución como cromo, arsénico, fenol, notroferol, ácido 2-4 doclorofeferoxiacetico, y flúor. Un investigador dijo que “con las nanotecnologías existentes, se es capaz de eliminar la gran mayoría de los contaminantes que actualmente hay en el agua. Por mencionar algunos, los colorantes, los compuestos fenólicos, algunos fármacos”. Otro mencionó el uso de NT para limpiar “aguas residuales industriales”.

Respecto a si colaboran con otra institución académica o empresa mexicana o extranjera, siete personas no mencionaron colaboración alguna. En las colaboraciones nacionales se mencionaron los siguientes centros: CIMAV (2); UANL (2); IPN –CICATA (2), Legaria (2), ESFM, CINVESTAV; UAM-Azcapotzalco; UAM-Iztapalapa; Universidad de Guadalajara; Universidad de Morelia; BUAP (2); Universidad de Las Américas, Puebla; Universidad Veracruzana; II-UNAM; Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM); Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) UNAM; Facultad de Química (FQ) UNAM; Instituto Mexicano del Petróleo (IMP); Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA); Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIATEC) de Guanajuato; Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica de Querétaro (CIDETEQ).

Mientras que para las colaboraciones internacionales se nombró: La Sun-Moon University en Corea del Sur (2); Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ) Brasil; Universidad de Concepción en Chile; Eindhoven

University of Technology en Holanda; Brown University, en los Estados Unidos; y en un caso con la corporación Freescale de los Estados Unidos.

Sobre las fuentes de financiamiento, 14 personas mencionan que reciben financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), seis de ellos exclusivo; cuatro además cuentan con apoyos de su institución académica; dos de programas internacionales; y uno del Instituto de Ciencia y Tecnología (ICT). Los seis restantes no reciben financiamiento especial.

Se preguntó también si conocían empresas mexicanas que desarrollaran NTs para aplicaciones en agua y nadie contestó afirmativamente a esta pregunta. Asimismo, al preguntar ¿en qué sectores o lugares se está usando NT para el tratamiento de aguas en México?, nadie contestó con certeza, sin embargo, se mencionó que “algunos estados están comenzando a emplear nanofiltración”; que “han implementado nanomembranas en plantas potabilizadoras”; y “posiblemente en industrias donde utilicen membranas, sintetizadas con estos materiales, en [sus] plantas de tratamiento”.

A la pregunta ¿qué países consideraban están a la vanguardia respecto al desarrollo de NT para el tratamiento de aguas?, los países referidos, en orden de mención e importancia fueron: Japón (7), Estados Unidos (7), China (6), Alemania (2), Rusia (2), Europa, en general (1), Francia (1), España (1), Cuba (1), Corea del Sur (1), India (1), países asiáticos (1), algunos países árabes (1). Tres personas no supieron qué contestar.

Respecto a ¿cree usted que México podría ser líder a nivel internacional en algún aspecto de la nanotecnología en el sector agua?, 15 contestaron que sí, siempre y cuando se diera el apoyo económico y hubiera coordinación. Una persona agregó que “en el país se tienen aguas superficiales y precipitaciones pluviales que requieren tratamiento para potabilizar el agua”. Al menos dos afirman que en nanofotocatálisis México podría ser líder, al ser “beneficiado con un alto índice de irradiación durante la mayor parte del año, esto permite generar un desarrollo continuo de conocimiento”. Un investigador mencionó que México podría serlo en el área de la síntesis de nuevas matrices para los nanocompositos y sus diferentes presentaciones, membranas, películas, materiales reticulados, etcétera.

Asimismo, se dijo que “se necesita inversión y mayores recursos para la investigación y acrecentar el número de grupos de trabajo dedicados a este campo para poder competir con los países citados”, también “es necesario inyectar más recursos económicos en investigación en el área de la NT, sobre todo en toxicidad”. Se mencionó que “la voluntad política... en los diferentes niveles de gobierno e instituciones responsables de administrar, tratar y suministrar el agua potable en el país es indispensable”.

En la encuesta se incluyeron dos preguntas sobre riesgos: una relacionada con el uso de nanotecnología y nanoproductos y otra específica para el uso de la NT en el tratamiento de aguas. Ambas presentaron la mayor diversidad de respuestas. Para la primera: ¿Qué riesgos relacionados con el uso de

NT y nanoproductos conoce? unos mencionan que no hay, dos no contestaron y cuatro expresaron no conocerlos "... todavía hace falta mucha investigación para conocer cuáles son los impactos que ocasionan estos nuevos materiales en el ambiente". Entre los doce restantes, uno considera que son pocos los riesgos, los demás mencionan algún tipo de riesgo ya sea para el ambiente o los humanos. "Los riesgos están, desde el punto de vista biológico, en la cito, fito y geno toxicidad de los nanomateriales. Esto es, afectan a animales y a plantas a nivel de las paredes celulares. Pero además, una vez dentro de la célula, tienen la capacidad de interferir con el DNA y el RNA de las células, generando modificaciones en los seres vivos a nivel de procesos celulares. Dos factores son importantes en la nanotoxicidad: la concentración de los nanobjetos, y su tamaño..."; "... llegan hasta el pulmón"; "toxicidad en plantas y afectación a microorganismos"; "los metales empleados y subproductos producidos son en ocasiones dañinos para la salud".

Otros riesgos mencionados son: "La posible contaminación de nuestros ríos al usarlos como destinos de desechos químicos durante el procesamiento de las nanoestructuras y nanomateriales con reactivos altamente contaminantes como ácidos y bases altamente puros..." o aquellos relacionados con procesos de elaboración e implementación o aspectos sociales: "se debe tener cuidado en la materia prima seleccionada para la preparación de los materiales y los métodos de síntesis empleados..."; ya en su uso "...los nanobjetos pueden desencadenar procesos de corrosión acelerados, por lo que constituyen también un factor de afectación sobre la infraestructura física". Asimismo, algunos encuestados reconocen que "hasta ahora no hay estudios suficientes para la aplicación de la NT y sus repercusiones hacia el entorno social." Una respuesta que resume lo dicho por casi el 58% sería: "sí, hay muchos riesgos considerados, éste es un tema crucial sobre el cual se ha debatido mucho y una de las áreas que requiere de mucha investigación en paralelo con el desarrollo tecnológico".

Con respecto a la segunda: ¿Y respecto a su uso para el tratamiento de aguas, existen riesgos?, la diversidad de respuestas van desde quién dijo no saber (uno), los que expresan que no existen riesgos (dos), aquellos que consideran distintos niveles de riesgo fueron un 84%. Cinco de ellos consideran que el riesgo depende del tipo de material, tecnología o manejo que se le dé: "son mínimos usando los materiales adecuados"; "depende de la presentación utilizada" o de "si los materiales a base de NT no están bien diseñados y sintetizados"; o por "el manejo de reactivos".

Sin embargo, para la mayoría de los encuestados el uso de la NT en este sector tiene sus "dificultades y limitaciones", por ejemplo, "la dificultad para tratar grandes cantidades de volúmenes de aguas residuales... y el inconveniente de tener que separar el catalizador del agua una vez que ha concluido el proceso. Todo estudio debe incluir una evaluación de la solubilidad del fotocatalizador en agua para determinar si esto traería algún problema de toxicidad, si es que los materiales de conformación del fotocatalizador fueran

tóxicos”. Otros riesgos mencionados son los “nanocatalizadores... que debido a su pequeño tamaño pueden ser emitidos al ambiente y causar efectos adversos en la vida acuática”; “la posible desfuncionalización del metal que se tiene como nanocarga y que eventualmente sea tóxico para la salud”.

Un investigador considera que “los de mayor riesgo son los que emplean NPs como agentes biocidas porque las NPs pueden difundirse fuera del sistema de tratamiento”; razonamiento que sigue la línea de que aún no conocemos bien las implicaciones de su uso y posible ingesta humana: “al utilizarlo en el tratamiento de agua existe el riesgo de que sea ingerido por la población, entrando de manera directa al cuerpo humano y todavía no se sabe cuáles son los efectos de éstas en el ser humano”. El hecho de que existan estos riesgos en el uso de la NT para el tratamiento de aguas “no termina de convencer a un sector de la población” y según el mismo, esto explica por qué México “se ha tardado en incorporar esta tecnología de forma oficial en las industrias”.

A la pregunta ¿cuál cree usted que sea la postura del público respecto al uso de la nanotecnología para el tratamiento de agua? Nueve opinaron que el público aceptaría, en algunos casos esto dependería de “si se informa adecuadamente...”; otros la verían como “una nueva oportunidad” o que “al saber que es ciencia, les maravilla saber que en México hacemos este tipo de trabajo y tienen la esperanza de que los científicos puedan resolver el problema”.

Por otro lado, siete encuestados consideran que el público mexicano carece de información para poder tener una opinión consciente: “la gente no tiene información suficiente en cuanto al tema de nanotecnología...”; “si no se conoce bien a nivel académico en nuestro país...”; “Existe poca información al respecto para el público en general. No obstante, sí existe algo de conocimiento general de la población sobre el beneficio de la NT en el área de la salud, al difundirse esporádicamente logros alcanzados en este ramo. Lo anterior de alguna forma considero que abre las puertas a la aplicación de la NT en otros campos como el tratamiento de agua”. Estas opiniones se podrían resumir en la siguiente frase: “Actualmente, todavía hace falta dar a conocer lo que es la nanotecnología para que la sociedad esté consciente de emitir una opinión al respecto. La sociedad hoy día lo acepta como algo nuevo, pero no está consciente de los efectos positivos y negativos que podría tener la aplicación de la NT en el desarrollo”.

Un investigador expresa que la reacción inicial será “de desconfianza, pero creo que disminuirá cuando se trabaje en una presentación clara, transparente y objetiva de la tecnología usada para ello, y también cuando el beneficio de contar con sistemas de tratamiento efectivos y económicos ayuden a contar con este recurso en los lugares que lo necesiten”. Sólo una persona considera que la reacción sería de oposición o desconocimiento.

Respecto a si ¿sabe si existe alguna legislación en México que la regule?, cuatro investigadores desconocen si existe alguna legislación en el tema y los

quince restantes dicen que no la hay, es decir, la duda y ambigüedad persisten sobre esta importante cuestión.

También se indagó si han participado en alguna discusión (taller, congreso, publicación) sobre las dimensiones sociales y políticas de la NT. A este respecto, sólo dos investigadores expresaron haber participado en algún evento (taller, seminario, simposium...) donde se discutió sobre las dimensiones sociales y políticas de la NT; asimismo, un investigador ha impartido pláticas de divulgación acerca de la nanotoxicidad desde 2009, pero no ha participado en talleres formales en los que se discuta las implicaciones sociales y éticas.

Análisis

A continuación el análisis de las opiniones expresadas en las encuestas y entrevistas a investigadores y otros actores claves, indicado según los principales temas recurrentes:

Redes

Si bien en México existen algunas redes temáticas abocadas a las nanociencias y la NT es interesante notar que siete encuestados —casi un 30%— no mencionan tener colaboración con otras instituciones. Esto puede explicarse por la aún incipiente investigación en esta área específica, como lo expresa el siguiente comentario:

En México se han hecho esfuerzos importantes, pero los grupos de trabajo son jóvenes desde el punto de vista de sus inicios en esta temática de investigación, por lo que se debe promover su crecimiento y consolidación. Es importante mantener el contacto con países a la vanguardia en el tema mediante proyectos de colaboración, intercambio académico, redes temáticas, etcétera.

Otro factor puede ser la diversidad de tecnologías posibles, lo cual hace que no necesariamente exista confluencia. De hecho, en la mayoría de los casos donde sí hay colaboración con otras instituciones suele ser en otros aspectos de la investigación que no esté relacionada con la NT en sí. Por ejemplo, para resolver problemas de electroquímica, fuentes de energía, modelos matemáticos, diseño de materiales no nanotecnológicos, etc. Esta relación multi e interdisciplinaria y su necesidad se refleja en los siguientes testimonios:

El trabajo multidisciplinario sobre el tema de tratamiento de agua, puede ser altamente promisorio, como lo es en algunas regiones de la India. Sin embargo, debe ser abordado seriamente, tanto por expertos en NTs como por las diferentes áreas técnicas en el caso de aplicaciones como el tratamiento de agua, también en lo referente a los aspectos sociales así como de salud, para poder llevar este tema del nivel de

laboratorio al de desarrollo de procesos tecnológicos sustentables (viabiles técnica, económica y socialmente) que den respuesta a las problemáticas actuales que se tienen en el tratamiento de agua, y el manejo adecuado de los residuos generados en dichos procesos, así como sus ventajas y limitaciones del uso de los nano materiales como de las NTs.

La nanociencia y la NT podría ser parte de una solución a grandes problemas que aquejan hoy a una sociedad, sin embargo, hay que hacerlo con responsabilidad; algunos estudios colaterales podrían ser efectuados para estudiar el efecto a la flora, fauna y el contacto directo con materiales de tipo nanométrico.

Financiamiento

De acuerdo con las respuestas al menos 66% de los entrevistados reciben financiamiento del Conacyt para llevar a cabo su investigación y al ser todos los consultados investigadores de centros públicos, su financiamiento es público. Sin embargo, en algunos casos que no fueron referidos en el estudio, parece que comienza una incipiente inversión de empresas privadas, para hacer investigación en sistemas que incluyan NTs para el tratamiento de sus efluentes industriales, como sucede con otros sectores y aplicaciones de la industria. Lo que indica que en México el fuerte de la investigación se realiza en centros públicos y es financiada con dinero público. Hecho que se refleja en los siguientes testimonios respecto a la inversión privada:

En México no se tiene la cultura, no hay financiamiento para investigación o desarrollo de tecnología. Generalmente la tecnología se compra... porque los vendedores de equipo siempre llevan la ventaja pues ya llegan con un producto terminado, mientras que la investigación requiere de más tiempo.

La industria no quiere invertir en investigación, los industriales nacionales quieren que se desarrolle el producto con tiempos muy cortos y con financiamiento público. Por eso existen los proyectos de coinversión.

Riesgos

Este tema si bien merece una amplia discusión, aquí sólo se abordará a partir de lo expresado por los encuestados y entrevistados. Partiendo de que un riesgo es la cuantificación de la posibilidad de que ocurra un daño (The Royal Society, 2004) y de que tanto a nivel mundial, como nacional “no hay suficientes estudios sobre la toxicidad y riesgos a la salud y el ambiente”, que tampoco “hay suficientes análisis de ciclo de vida, ni de costo beneficioso”, ni “hay estudios del impacto social y económico de la implementación de estas tecnologías.” No podemos cumplir la siguiente afirmación: “...cualquier aplicación de NT debe garantizar un nivel de seguridad ante la exposición de los

seres vivos...” y más bien existe una alta posibilidad de padecer “riesgos de enfermedad al realizar un manejo inadecuado de NPs altamente reactivas”.

De forma que si bien “existen muchas investigaciones y trabajos relacionados con NT en el tratamiento de agua... aún falta mucho por hacer para llegar a aplicarla en sistemas reales. Una de las grandes preguntas es el efecto toxicológico de los NMs” una vez liberados en los distintos medios (aire, agua, suelo).

Finalmente, las respuestas de más del 80% se condensan en que existe “un gran número de riesgos, no sabemos cuáles porque falta inversión para realizar estudios que arrojen información al respecto”. Considerando estos posibles riesgos, y para reducirlo en el caso del tratamiento de aguas, uno de los investigadores propone “el uso de estos materiales en forma de superficies que contienen estas NPs adheridas a alguna matriz que hace más difícil la contaminación del agua tratada con estos materiales”. Recomendación que coincide con aquella otra hecha por The Royal Society (2004: 47) de no usar NPs libres (no fijas a una matriz) para remediación.

Postura/opinión del público

Si bien nueve de los encuestados consideran que el público estaría de acuerdo con el uso de NTs para el tratamiento de aguas, varios de ellos reconocen que sería una opinión poco informada y al menos otro 36% considera que el público mexicano no cuenta con información suficiente y adecuada para opinar al respecto. Es por esto que “hay que difundir un poco más en los medios masivos de comunicación el concepto de NT, tanto los impactos positivos como los impactos negativos”. Por otro, dado las seguras repercusiones económicas, sociales y ambientales es importante considerar la siguiente opinión: “en la toma de decisiones se debería hacer una consulta pública, previamente informando a la gente de los beneficios, riesgos, costos reales; sin embargo, tenemos un gran desconocimiento, entonces ¿cómo podemos decidir si usarla o no?”

Regulación

El tema de la regulación es otro punto complicado de abordar. Por un lado, como sabemos y vimos en los comentarios, contamos apenas con un nascente marco regulatorio que norma la NT¹⁰ que para el tema de agua, calidad, tratamiento, etc, aún no tiene relevancia. Con las normas existentes “en el caso del agua, la norma [NOM 001] sólo se preocupa por el cumplimiento de la calidad del efluente, no se preocupa por el proceso, método o tecnología que se use”. Con el esquema actual “normar las NPs no tendría sentido

10 Unos lineamientos y 5 normas mexicanas.

porque lo que se norma son las concentraciones totales” sin importar el tamaño de éstas. Por eso “se requieren legislaciones para controlar los desechos de agua [con NMs] a los drenajes y ríos”. Pero además, aun si se normaran las descargas respecto a NMs y NPs, seguramente tendremos el problema de la imposibilidad de probarlo ya que actualmente “no existen los sistemas ni métodos de medición suficientemente robustas que pudieran evaluar la conformidad con especificaciones al respecto”.

Por otro lado está el asunto de la no aplicación de la ley como lo expresan dos entrevistados:

[...] en cuestiones ambientales no se quiere invertir porque sale más barato pagar la multa y como la ley no se aplica.

[...] en algunos casos a la industria le sale más barato seguir pagando la multa o mordida que invertir en las plantas de tratamiento. A pesar de que usando esta tecnología podrían hacer un ahorro en su consumo de agua y recuperar materiales valiosos (cromo y otros metales).

Finalmente existe otro nivel de regulación que sería el de los laboratorios, centros de investigación e industrias que manejan NPs y NMs. “Como éste es un campo emergente, aun no hay protocolos ni reglamentación.” Salvo en contadas excepciones. Y ni hablar de la autorregulación respecto a si debemos o no hacer cierta investigación, “la responsabilidad de la academia llega hasta el límite que establezca la ley/norma”, aunque “existe la ética profesional”. En el caso de la nanociencia y NT, ya existe la nanoética que, de acuerdo con Linares (2013: 8): “aplicada a los problemas sociales y ambientales” de las nanotecnociencias, que con una “racionalidad colectiva prudential” y en “vista del alcance omniabarcador de las nanotecnologías, tiene que ser construida a partir de principios éticos de alcance global.”

Mientras todo lo anterior sucede y en Europa ya se regula el uso de ciertos NMs, “la regulación de México y América Latina tiene un vacío sobre el uso de NPs, por lo tanto aquí es más fácil usarlas y que no se diga nada” (Linares, 2013: 8). De manera que el desarrollo de esta tecnociencia en México parece responder a ciertos intereses y presiones mundiales así como a decisiones tecnocráticas.

Conclusión

Si bien en México ya existe un número considerable de investigadores trabajando sobre el tema de la NT y sus aplicaciones para el tratamiento de aguas, proporcionalmente son aún muy pocos, sobre todo si consideramos que el problema de la contaminación del agua es muy grave en nuestro país y con grandes consecuencias sociales (a la salud), económicas y ambientales. Como hemos visto, el grueso de la investigación en NT con aplicaciones para el

tratamiento de agua no se realiza en México ni en otros países en “desarrollo”, salvo quizá la India y más bien Estados Unidos y algunos países europeos son quienes llevan la batuta.

Por otro lado, de usarse estas NTs para el tratamiento de aguas, queda la duda de si los efluentes o los lodos residuales de las plantas de tratamiento llevarán algunas NPs y cuáles son los efectos de éstas sobre la salud y el ambiente de nuestro país. Dado las prometedoras aplicaciones de la nanotecnología para la descontaminación, sobre todo de ciertos contaminantes difíciles de eliminar del agua, sería deseable que más investigación se llevara a cabo en este campo, acompañada de estudios sobre la posible remanencia de NPs en las aguas tratadas y sus efectos en la salud humana y ambiental.

Considerando que la presencia de NPs en los medios acuáticos es algo ya inevitable, es importante contar con herramientas para detectarlos, medir sus concentraciones y sus efectos. Para este fin la “evaluación del ciclo de vida” (*life cycle assesment*) (Klöpffer, 2007; Som, *et al.*, 2011) sería muy útil para definir la exposición, futuro y escenarios de riesgo; además de ayudar a identificar cómo las NPs pueden terminar en los cuerpos de agua, ya sea como resultado de procesos productivos, de desecho o de desgaste. Con estos datos podríamos definir escenarios de exposición que junto con información sobre toxicidad en humanos y otros seres vivos de las distintas NPs servirían para definir los efectos a la salud humana y el ambiente de los diferentes tipos de NPs (Farré *et al.*, 2011; Pérez, *et al.*, 2009; Farré *et al.*, 2008).

Un intento de crear espacios donde confluyan los diferentes aspectos no sólo los tecnológicos es la creación de la Red Nano-MAS, una red multi e interdisciplinaria sobre nanotecnología, medioambiente y salud. Cuyo objetivo sería el “análisis de los impactos y eventuales riesgos ambientales y a la salud del uso de nanobjetos o nanomateriales para la propuesta de política pública, regulatoria y el diálogo social” (Minuta, 1ª reunión propuesta de creación, junio 2014).

Adicionalmente, es fundamental contar con una legislación nacional adecuada que regule la producción, manejo y uso de NMs; el manejo de nanodesperdicios; así como las descargas en cuerpos de agua de este conjunto de nuevos contaminante emergentes. Una regulación prudente, y que mejor que considerar el principio precautorio. Es decir, que dado que no contamos con total certeza científica sobre los daños que las NPs o ciertas NTs pueden causar, se debe asumir que hay un peligro o riesgo potencial y es necesario entonces hacer una evaluación del riesgo a la exposición a dichas NPs en ambientes acuáticos (The Royal Society, 2004). Como lo expresa Clarence D. (2007):

La NT puede mejorar nuestra salud, aumentar el abasto de energía, facilitar la limpieza ambiental en países ricos y proveer de agua potable a los países pobres. Las posibilidades son difíciles de exagerar, pero se apoyan en una gran vulnerabilidad, la falta de sistemas adecuados de vigilancia/ supervisión que se ocupen de los efectos

potenciales a la salud y el ambiente. Necesitamos remediar esta vulnerabilidad para asegurar los beneficios de esta tecnología.¹¹

Finalmente, para un crecimiento racional de la ciencia, tecnología y economía de los nanomateriales es necesario, como lo señala Linares (2013: 2), tener un

Debate ético sobre las nanotecnociencias y nanotecnologías [que considere] ¿Cuáles son los beneficios ostensibles, las necesidades reales a qué responden, y cómo se distribuyen y a qué costo? ¿Cuáles son los riesgos y los efectos imprevisibles para la salud, para el medio ambiente, para la equidad socioeconómica; en qué medida son controlables? ¿Quién y cómo puede y debe regular las producciones nanotecnológicas? ¿Quiénes son los principales beneficiados, en el caso en el que se produzcan beneficios?

En esto se incluye de manera importante el área de las NTs para el tratamiento de aguas, que si bien son muy prometedoras en un nivel científico, tienen también muchas implicaciones más allá de la academia.

Referencias

- Aschberger, Karin, Micheletti, C., Sokull-Klüttgen, B. y Christensenl, Frans M. (2011). Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health — Lessons learned from four case studies. *Environment International*, 37: 1143–1156. doi:10.1016/j.envint.2011.02.005.
- Clarence D. (2007). EPA and nanotechnology: Oversight for the 21st century. *PEN*, 9, mayo. 76.
- Delgado-Ramos, G. C. (2006). Nanotecnología y la disponibilidad de energía y agua en los países del Sur. En Gallina, Andrea; Nuñez J.; Vitorrio C; Montalvo L. F. *Innovaciones creativas y desarrollo humano*. Montevideo, Uruguay: 233-253.
- Faunce, T. y Watal A. (2010). Nanosilver and global public health: International regulatory issues. *Nanomedicine*, vol. 5, núm. 4: 617-632. doi 10.2217/nnm.10.33.
- Farré, M.; Pérez, S.; Kantiani, L.; Barceló D. (2008). Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 27, núm. 11: 991-1007. doi:10.1016/j.trac.2008.09.010.
- Farré M.; Sanchís, J.; Barceló D. (2011). Analysis and assessment of the occurrence, the fate and the behavior of nanomaterials in the environment. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, núm. 3: 517-527. doi:10.1016/j.trac.2010.11.014.
- GAO (United States Government Accountability Office) (2010). *Nanotechnology*

11 Traducción libre de los autores.

- nanomaterials are widely used in Commerce, but EPA faces challenges in regulating risk.* Report to the Chairman, Committee on Environment and Public Works, mayo. U.S. Senate.
- Greenpece (2007). *Nanotechnology. Policy & Position paper*. Paul Johnston, David Santillo, John Hepburn, Doug Parr.
- Hillie, T.; Munasinghe, M.; Hlope, M; Deraniyagala Y. (2006). *Nanotechnology, water development*. The Meridian Institute: 44.
- Keller, A.; Garner, K.; Miller, R. J.; Lenihan H. S. (2012). Toxicity of nano-zero valent iron to freshwater and marine organisms. *PLoS one*, agosto, vol. 7 , núm. 8, e43983: 10.
- Klöppfer, W. (coord.) (2007). *Nanotechnology and life cycle assessment*. Workshop organized by EPA. Woodrow Wilson International Center for Scholars & European Commission. Marzo: 37.
- Linares, J. E. (2013). Nanoética: un nuevo campo para viejos problemas del riesgo tecnológico. *Contrastes Revista Internacional de la Filosofía*, vol. XVIII; 339.352.
- Luoma, S. (2008). Silver nanotechnologies and the environmet: Old problems or new challenges? *PEN*. 15 septiembre: 72.
- Mahapatra, Alpana; F. Valli y K. Tijoriwala (2010). Nanotechnology for water purification. *Nuclear Desalination* 4: 49-57. <http://www.eurekalert.org/pub_releases/2010-07/ip-nfw072810.php>.
- Meridian Institute (2006). Global dialogue on nanotechnology and the poor: Opportunities and risks (GDNP). Organizado en octubre de 2006, en Chennai, India. Workshop summary.
- Mittal, T. (2012). Significant manipulations of nanotechnology in water purification. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, vol. 1, núm. 1, octubre, 7p.
- Pérez, S., Farre M., Barcelo, D. (2009). Analysis, behavior and ecotoxicity of carbon-based nanomaterials in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 28, núm. 6: 820:832.
- Project on Emerging Nanotechnologies (2007). *Nanofrontiers Developing Story: Nanotechnology and Low- Income Nations*, núm. 2, verano: 10.
- Rezic, I. (2011). Determination of engineered nanoparticles on textiles and in textile wastewaters. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, núm. 7: 1159- 1167.
- Schmidt, K. (2007). Green nanotechnology: Easier than you think. *PEN*, 8, abril: 36.
- Som, C., Wick, P., Drug, H., Nowack, B. (2011). Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environment International* 37: 1131-1142
- Suellen. K., (2008). Room at the bottom? Potential state and local strategies for managing the risk and benefits of nanotechnology. *PEN*, 11, marzo: 58.
- Theron, Jacques, J. A. Walker y T. E. Cloete (2010). Nanotechnology and water treatment: Applications and emerging opportunities. En Cloete *et al.* (eds.), *Nanotechnology in water treatment applications*. Caister Academic Press. Norfolk, UK: 1-30.

The Royal Society (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: Opportunities and uncertainties*. 116.

Watlington, Katherine – EPA (2005). *Emerging nanotechnologies for site remediation and waste treatment*. 55p.

Weinberg, H.; Galyean, A.; Leopold, L. (2001). Evaluating engineered nanoparticles in natural waters. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, núm. 1: 72-83. doi:10.1016/j.trac.2010.09.006.