

AGUA

- **Nanomateriales y fotocátalisis para descontaminarla**
- **Cátodos multifuncionales para mejorar su calidad**
- **Nanotecnología, investigación, financiamiento y regulación en México**



REVISTA INTERDISCIPLINARIA EN

Nanociencias y Nanotecnología

Vol. 8, No. 14, enero-junio, 2015

www.mundonano.unam.mx

DIRECTORIO

Universidad
Nacional
Autónoma
de México

Dr. José Narro Robles
Rector
Dr. Eduardo Bárzana García
Secretario General
Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica
Dra. Estela Morales Campos
Coordinadora de Humanidades

Mtro. Juan Manuel Romero Ortega
Coordinador de Innovación y Desarrollo
Dra. Norma Blazquez Graf
Directora CEIICH
Dr. Oscar Edel Contreras López
Director CNYn
Dr. Rodolfo Zanella Specia
Director CCADET

Mundo Nano • <http://www.mundonano.unam.mx>

Editores

Dr. Gian Carlo Delgado Ramos • giandelgado@unam.mx • Dr. Rodolfo Zanella Specia • rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx
Dr. Fernando Rojas Íñiguez • frojas@cnyun.unam.mx

Editor Asociado

M. en C. Mario Rogelio López Torres • mrlt@unam.mx

COMITÉ EDITORIAL

Física (teoría)

Dr. Sergio Ulloa
• ulloa@ohio.edu
Departamento de Física y Astronomía, Universidad de Ohio. Estados Unidos
Dr. Luis Mochán Backal
• mochan@em.fis.unam.mx
Instituto de Ciencias Físicas, UNAM. México
Dr. Noboru Takeuchi Tan
• takeuchi@cnyun.unam.mx
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM

Física (experimental)

Dr. Isaac Hernández Calderón
• Isaac.Hernandez@fs.cinvestav.mx
Departamento de Física, Cinvestav. México

Ingeniería

Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro
• SALcocerM@ingen.unam.mx
Instituto de Ingeniería, UNAM. México

Microscopía

Dr. Miguel José Yacamán
• miguel.yacamán@utsa.edu
Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos

Catálisis

Dr. Sergio Fuentes Moyado
• fuentes@cnyun.unam.mx
Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM. México
Dr. Rodolfo Zanella Specia
• rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM. México
Dra. Gabriela Díaz Guerrero
• diaz@fisica.unam.mx
Instituto de Física, UNAM. México

Materiales

Dr. José Saniger Blesa
• jose.saniger@ccadet.unam.mx
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM. México
Dr. Roberto Escudero Deraf
• escu@unam.mx
Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. México

Ciencia, tecnología y género

Dra. Norma Blazquez Graf
• blazquez@unam.mx
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. México

Filosofía de la ciencia

Dr. León Olivé Morett
• olive@unam.mx
Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM. México

Complejidad de las ciencias

Dr. José Antonio Amozurrutia
• amoz@labcomplex.net
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. México
Dr. Ricardo Mansilla Corona
• mansy@unam.mx
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. México

Medio ambiente, ciencia y tecnología

Dra. Elena Álvarez-Buyllá
• eabuylla@gmail.com
Instituto de Ecología, UNAM. México

Aspectos éticos, sociales y ambientales de la nanociencia y la nanotecnología

Dra. Fern Wickson
GenØk Center for Biosafety, Tromsø, Noruega

Dr. Roger Strand

• roger.strand@svt.uib.no
Centro para el Estudio de las Ciencias y las Humanidades, Universidad de Bergen. Noruega
Dr. Pedro Serena Domingo
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid-CSIC. España
Ciencia, tecnología y sociedad
• Louis.Lemkow@uab.es
Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental, Universidad Autónoma de Barcelona. España

Dra. Sofia Liberman Shkolnikoff

Psicología-UNAM, México
Dr. Paulo Martins
• marpaulo@ipt.br
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil
Mtra. Kamilla Kjolberg
• kamilla.kjolberg@svt.uib.no
Centro para el Estudio de las Ciencias y las Humanidades, Universidad de Bergen. Noruega

Divulgación

Dra. Julia Tagüeña Parga
CIE-UNAM, México
Dr. Aquiles Negrete Yankelevich
CEIICH-UNAM, México
Dr. Joaquín Tutor Sánchez
ETSI-ICAI, Universidad Pontificia Comillas, España

Cuidado de la edición:

Concepción Alida Casale Núñez, CEIICH, UNAM
Isauro Uribe Pineda, CEIICH, UNAM
Formación y administración de Open Journal Systems: Arturo Villegas Rodríguez, CEIICH, UNAM



Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 8, No. 14, enero-junio 2015, es una publicación semestral, en versión electrónica, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F., a través del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades y el Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Torre II de Humanidades 4º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F., <http://www.mundonano.unam.mx>, mundonanonam@gmail.com. Editores responsables: Gian Carlo Delgado Ramos, Rodolfo Zanella Specia y Fernando Rojas Íñiguez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2009-010713303600-102, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN en trámite. Responsable de la última actualización de este número: Arturo Villegas Rodríguez, Torre II de Humanidades 5º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. Fecha de la última actualización: 11 de septiembre de 2015. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores. Prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización por escrito de los editores responsables.

CONTENIDO

Vol. 8, No. 14, enero-junio, 2015

4 EDITORIAL

ARTÍCULOS

- 6 Evaluación electroquímica de nanoestructuras Fe/MWCNT-Pt y Fe/MWCNT-Pt-Pd como materiales de cátodos multifuncionales con potencial aplicación en el mejoramiento de la calidad de agua tratada
Brenda Borbón Jara, Alejandro Medel, Zaira Bedolla Valdez, Gabriel Alonso Núñez, Mercedes T. Oropeza Guzmán
- 17 Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos
Juan Carlos Durán-Álvarez, Edwin Avella, Rodolfo Zanella
- 40 Nanotecnología, una alternativa para mejorar la calidad del agua
Silvia Lucila Gelover Santiago
- 53 Nanotecnología para el tratamiento de agua. Claves sobre la investigación en México
Laura Saldivar y Casey Walsh
- 70 Nanotecnología en procesos ambientales y remediación de la contaminación
Rafael Vazquez-Duhalt
- 81 Autorganización de nanoestructuras luminiscentes: sus formas y dimensiones
Elsi Violeta Mejía-Urriarte, Héctor Octavio Murrieta S.

REPORTAJE

- 92 Agua-n&n, y salud pública
Elena León Magaña

NOTICIAS

- 104 Nanodispositivo para el eventual desarrollo de prótesis retinales
- 105 Hacia un nuevo y eficiente diodo de una sola molécula
- 106 Nanoframbuesas para aplicaciones en celdas de combustible
- 107 Sensores fluorescentes para detección de nanopartículas nocivas
- 108 Nanopartículas de hierro para descontaminar agua

- 109 Una nueva mirada a la estructura atómica de las superficies de los materiales
- 110 Nanohilos de carbono de bajo peso y ultrarresistentes
- 111 Nanopartículas de carbono para aplicaciones biomédicas
- 112 Andamios celulares para reparar tejidos dañados
- 112 Desarrolla física aplicada hueso sintético biocompatible
- 113 Novedoso fotocatalizador basado en óxido de bismuto
- 113 Se obtuvieron 79 patentes en seis años
- 114 Sintetizan en Química polímero de origen natural
- 114 Premio de la UNESCO para Noboru Takeuchi
- 115 Declaratoria de vigencia de normas mexicanas en nanotecnología en el *DOF*

LIBROS

- 116 *Application of nanotechnology in water research.* Ajay Kumar Mishra (ed.). Wiley. 2014.
- 117 *Detection of pathogens in water using micro and nanotechnology.* Giampaolo Zuccheri y Nikolaos Asproulis. International Water Association. 2012.
- 118 *Green processes for nanotechnology. From inorganic to bioinspired nanomaterials* Vladimir A. Basiuk y Elena V. Basiuk (eds.). Springer. 2015.
- 118 *Commercializing nanomedicine: Industrial applications, patents and ethics.* Luca Escoffier, Mario Ganau y Julielynn Wong. Pan Stanford. 2015.
- 119 *Micro and nano fabrication: Tools and processes.* Hans H. Gatzert, Volker Saile y Jürg Leuthold. Springer. 2015.
- 120 *Responsible nanotechnology development.* Simone Arnaldi, Arianna Ferrari, Paolo Magudda y Francesca Marin (eds.). Springer. 2014.

121 EVENTOS

123 INSTRUCTIVO PARA AUTORES

Correspondencia:

Mundo Nano

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades
Torre II de Humanidades, 4º piso
Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F., México.
Correo-e: mundonanounam@gmail.com



Composición de
Angeles Alegre Schettino



Editorial

La sustentabilidad del mundo y por tanto la calidad de vida en el planeta está siendo puesta en peligro debido a toda una serie de procesos antropogénicos que están alterando el equilibrio de la naturaleza. Las amenazas inmediatas a la humanidad incluyen no sólo eventos climatológicos extremos asociados al cambio climático, sino también el grado y toxicidad de la contaminación, la pérdida de biodiversidad, y la perturbación de la integridad del uso del suelo, del agua superficial y subterránea y de la atmósfera. La contaminación que genera el ser humano puede desatar consecuencias aún desconocidas en el mediano y largo plazo.

Mundo Nano dedica este número a las aportaciones que pueden hacer las nanociencias y la nanotecnología en la resolución de los problemas ambientales, sin ignorar los posibles problemas que por sí mismos pudieran generar los nanomateriales, al ser introducidos al medio ambiente. Las contribuciones están enfocadas principalmente a las aportaciones de la nanotecnología en la solución de algunos problemas relacionados con la gestión y calidad del agua.

En el primero de los artículos de este número se discute el uso de nanomateriales como cátodos multifuncionales compuestos por Pt y combinaciones de Pt-Pd soportados en nanotubos de carbono, para incrementar la capacidad de degradación y mineralización de compuestos orgánicos recalcitrantes en agua tratada por vía electroquímica.

Dos contribuciones más discuten la descontaminación de agua utilizando procesos fotocatalíticos, capaces de eliminar eficientemente un amplio grupo de agentes contaminantes de carácter orgánico, inorgánico y microbiológico presentes en agua. En dichos trabajos se describen los principios más relevantes de la fotocatalisis, así como el desarrollo de diferentes materiales nanoestructurados que han logrado degradar los contaminantes orgánicos convencionales y emergentes hasta sus componentes minerales, así como reacciones de oxidación o de reducción de compuestos inorgánicos. Asimismo, se discuten las posibilidades de aplicación de los nanomateriales como alternativa para mejorar la calidad del agua.

Del mismo modo, en otro de los trabajos se presentan los resultados de una encuesta aplicada en México a investigadores en nanotecnología aplicada al tratamiento de agua, se analizan las respuestas de los participantes en diferentes aspectos como las redes de colaboración, el financiamiento, los riesgos relacionados con el uso de nanomateriales para el tratamiento de aguas, la postura y la opinión del público y la regulación. Con base en los resultados de la encuesta y el análisis de los mismos, los autores presentan una serie de conclusiones y recomendaciones sobre las líneas de investigación y desarrollo que sería deseable fortalecer en este campo de estudio.

Otro de los artículos revisa las aplicaciones de la nanotecnología en

procesos ambientales y remediación de la contaminación mencionando la importancia de conservar la calidad de los suelos, las aguas y el aire, así como los cuatro retos más importantes de las ciencias ambientales (prevención de la contaminación, métodos de remediación y restauración, predicción con anticipación de los impactos de nuevos productos y métodos de detección de contaminantes con alta sensibilidad). Se muestra cómo la nanotecnología puede incidir en la reducción de la contaminación, principalmente a través de tecnologías catalíticas y fotocatalíticas, procesos de adsorción y bionanotecnología. Se mencionan los nuevos sistemas de detección de sustancias tóxicas basados en nanoestructuras, además, se discute un tema de vital importancia a nivel ambiental, la toxicología de los nanomateriales, que, si bien es un tema poco explorado es urgente llevar a cabo estudios de ciclo de vida de estos materiales, así como de las implicaciones ecológicas de su presencia en el medio ambiente.

Este número presenta también un trabajo sobre la autorganización de nanoestructuras luminiscentes y se muestra cómo la forma y el tamaño de las nanoestructuras tienen una fuerte influencia en el fenómeno de luminiscencia. Los materiales nanométricos estudiados en dicha contribución son los halogenuros alcalinos dopados, con potenciales aplicaciones como sensores, emisores de luz y nanocomponentes electrónicos.

Adicionalmente, se presenta un extenso e interesante reportaje sobre la situación actual del recurso hídrico en México, el panorama de las nanociencias y la nanotecnología desde el punto de vista gubernamental; se presentan los compendios de algunas entrevistas con funcionarios de instituciones gubernamentales, así como con investigadores y profesores en los que se abarcan diferentes aspectos, entre los que destacan el uso de nanomateriales en el tratamiento del agua. Finalmente, como en cada número, se presenta la sección de noticias relacionadas con el mundo nano, así como la sección de libros e informes aparecidos recientemente.

El equipo editorial de *Mundo Nano* espera que este nuevo número sea del interés de nuestros lectores y les apoye en la profundización de los temas “nano” relacionados con el medio ambiente.



Evaluación electroquímica de nanoestructuras Fe/MWCNT-Pt y Fe/MWCNT-Pt-Pd como materiales de cátodos multifuncionales con potencial aplicación en el mejoramiento de la calidad de agua tratada

Brenda Borbón Jara,* Alejandro Medel,* Zaira Bedolla Valdez,*
Gabriel Alonso Núñez,* Mercedes T. Oropeza Guzmán*

RESUMEN: En este artículo se presenta una estrategia de evaluación electroquímica para materiales nanoestructurados con potencial uso en cátodos multifuncionales, con el fin de incrementar la capacidad de degradación y eliminación de materia orgánica recalcitrante en agua tratada por vía electroquímica. El principal objeto de estudio es la producción de radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), que es identificado como un agente altamente oxidante (2.8 V vs. ENH), únicamente superado por el flúor (3.03 v vs. ENH). Este radical suele formarse en la superficie de un ánodo catalítico o por reacciones tipo Fenton; sin embargo, en este artículo se demuestra que es factible su formación en un cátodo, asemejando el proceso de oxidación avanzada (AOP), conocido como electro-Fenton. La elevada reactividad del $\cdot\text{OH}$ para llevar a cabo la destrucción de compuestos biorrefractarios y recalcitrantes está plenamente probada y justifica la propuesta de ensayar materiales nanoestructurados para multiplicar su producción en una celda electroquímica. La evaluación de cátodos de tipo multifuncional, conteniendo Pt y Pt-Pd, soportados sobre nanotubos de carbón multipared (MWCNT) se realizó por voltamperometría cíclica, para determinar la producción *in-situ* del radical $\cdot\text{OH}$. De esta manera, el desarrollo de un nuevo proceso de reducción electroquímica de tipo multifuncional (O_2 a H_2O_2 y H_2O_2 a $\cdot\text{OH}$) tiene una potencial aplicación en celdas electroquímicas ya concebidas para mejorar la calidad de agua tratada.

PALABRAS CLAVE: radical hidroxilo, Pt/MWCNT, calidad de agua tratada, proceso electro-Fenton.

ABSTRACT: This paper presents an electrochemical strategy to evaluate nanostructured materials with high potential to be used as multifunctional cathodes. The goal is to increase the capability of an electrochemical process to degrade and eliminate recalcitrant organic compounds in treated water. The object under study is the production of hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$), also identified as a powerful oxidant (2.8 V vs. ENH), only overcome by Fluorine (3.03 V vs. ENH). This radical is commonly formed on the surface of catalytic anodes or by Fenton reactions; however, this paper shows that it is also possible to form the radical on a cathode, simulating the advanced oxidation mechanism known as electro-Fenton. The high reactivity of $\cdot\text{OH}$ to destroy persistent compounds is plentifully proved and justify the use of electrocatalytic nanostructured materials to multiply its effectiveness in an electrochemical cell. The evaluation of multifunctional

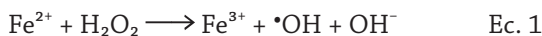
* Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Unidad Tijuana, carretera libre Tijuana-Tecate km 26.5, esq. Blvd Nogales Parque Ind. El Florido CP 22444, Tijuana, B.C., México, Tel. (664) 6453278. Correspondencia: (moropeza@cideteq.mx).

cathodes containing Pt y Pt-Pd, supported on raw multiwalled carbon nanotubes, MWCNT, was done by cyclic voltammetry to validate the in-situ formation of $\cdot\text{OH}$ radical. At this point, authors visualize the feasibility to develop a new electrochemical process using a multifunctional electrodes, with Fe species in the electrode surface and supported electrocatalysts, to transform O_2 into H_2O_2 and H_2O_2 into $\cdot\text{OH}$, accordingly to improve the quality of treated water without extra chemicals.

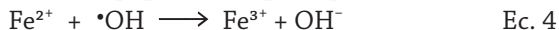
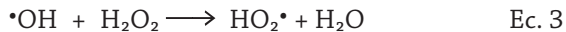
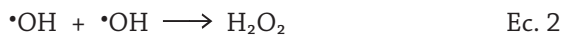
KEYWORDS: hydroxyl radical, Pt/MWCNT, quality of treated water, electro-Fenton process.

Introducción

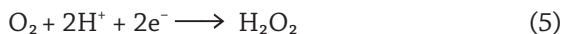
El radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) es un agente altamente oxidante, con potencial aplicación en electrosíntesis, industria farmacéutica, limpieza de superficies y tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con lo anterior, la producción de esta especie y la mejora en los procesos que dan lugar a su formación es de creciente interés para la investigación en ciencia de materiales, fisicoquímica y medio ambiente. En el área de tratamiento de aguas residuales, el uso de procesos de oxidación avanzada (AOPs, *advanced oxidation processes*), que son procesos basados en la producción del $\cdot\text{OH}$, ha demostrado superioridad en comparación al uso de procesos convencionales tales como ozonificación y coagulación (Ongen *et al.*, 2012, Baig y Liechti, 2001), oxidación química y adsorción física (Ahn *et al.*, 1999), y sistemas biológicos (Jothimani *et al.*, 2003, Chengalroyen, 2012), para la destrucción de compuestos orgánicos de naturaleza recalcitrante. En general, los AOPs son preferidos sobre procesos convencionales por permitir la destrucción de contaminantes altamente tóxicos hasta CO_2 y agua. Dentro de los AOPs, más representativos, se encuentran aquellos de tipo químico (fenton, fotofenton, ozonización en medio alcalino, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV , $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$), fotocatalisis heterogénea, electroquímicos (electrofenton, fotoelectrofenton y oxidación electroquímica), haciendo uso de luz solar o asistida. Entre éstos, el proceso Fenton (Fenton, 1894), basado en la producción del $\cdot\text{OH}$ (Ec. 1) es potencialmente aplicable en tratamiento de aguas residuales; sin embargo, parámetros como pH, relación $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$, composición fisicoquímica y naturaleza de la muestra a tratar deben ser consideradas (Peralta *et al.* 2005).



De acuerdo con lo anterior, si el proceso no es debidamente optimizado, los $\cdot\text{OH}$ s pueden reaccionar entre sí, dando lugar a especies con un potencial de oxidación menor, como el peróxido de hidrógeno, H_2O_2 . El H_2O_2 , también posee la capacidad de actuar como secuestrador del radical $\cdot\text{OH}$ (Ec. 2), dando lugar a especies con menor potencial de oxidación como el radical perhidroxilo (Ec. 3). Si la dosis del ion Fe^{2+} no es la adecuada, puede reaccionar con el radical $\cdot\text{OH}$, dando lugar a iones hidroxilo y Fe^{3+} (Ec. 4), afectando la eficiencia de la reacción.



Aunque las reacciones (2-4) pueden ser controladas, la principal limitante del proceso vía química es el uso de H_2O_2 comercial, representando altos costos y el peligro latente de accidentes debido su transporte en altas cantidades. Considerando lo anterior, una mejora del proceso fue obtenida mediante el uso de la electroquímica, dando lugar al proceso Electro-Fenton, EF, en el cual el H_2O_2 , necesario para llevar a cabo la reacción Fenton (1) (Fenton y col., 1894), es generado electroquímicamente, a través del proceso de reducción de oxígeno vía 2e^- (5).



A su vez, y a pesar de las mejoras en el proceso EF, la formación eventual de complejos (ácido oxálico- Fe^{3+}) ocurre (Oturán y Brillas, 2007), y el uso de luz UV-A, de manera asistida, es aplicada, dando lugar al proceso conocido como FEF. A pesar de las ventajas que el uso de luz UV-A y la producción *in situ* del H_2O_2 ofrecen en un proceso EF, los retos actuales que enfrenta dicho proceso pueden agruparse en dos principales enfoques, i) uso de soportes del ion hierro, ii) síntesis de materiales con elevada producción H_2O_2 . Con respecto al primer enfoque, el uso de membranas de nafion y resinas de intercambio iónico (Ramírez y *et al.*, 2010) ha demostrado ser una alternativa; sin embargo, el costo de los materiales empleados pudiera ser una limitante para su escalamiento a nivel industrial. Con respecto al segundo enfoque, especial atención debe ser dirigida en la selección del material de cátodo, siendo los materiales de carbón de mayor importancia en comparación al uso de electrodo metálicos, debido a sus propiedades electro-catalíticas. Los materiales de carbón han sido ampliamente utilizados en distintas aplicaciones electroquímicas como electrodos en baterías y celdas de combustible (Arenas *et al.*, 2014; Morales *et al.*, 2010), debido a características como baja toxicidad, resistencia química, alta conductividad eléctrica y baja actividad catalítica para la descomposición de H_2O_2 . Particularmente en sistemas de EF, materiales como el grafito (Forti *et al.*, 2007), carbón vítreo reticulado, fibras de carbón activado (7,8), nanotubos de carbón (Zhihui *et al.*, 2007), telas de carbón/grafito y electrodos compuestos de tela de carbón/PTFE (Chavez *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Zhihui *et al.*, 2007; Mahnoud *et al.*, 2009) han sido evaluados como electrodos. A su vez, entre los principales requisitos que debe cumplir el material de cátodo en un sistema EF es poseer una excelente actividad electrocatalítica hacia la reducción de O_2 , para dar lugar a la formación de H_2O_2 (Ec. 5). De acuerdo con lo anterior, el uso de cátodos utilizando MWCNT representa una excelente opción (Forti *et al.*, 2007; Chavez *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Zhihui *et al.*, 2007). A su vez, ha

sido demostrado que el pH y el dopaje de los MWCNT con nanopartículas metálicas y bimetálicas como Pt-Pd aumentan su actividad catalítica favoreciendo la producción de H_2O_2 (Zhihui *et al.*, 2007). Considerando los trabajos anteriores en esta comunicación presentamos la evaluación de cátodos de tipo multifuncional, conteniendo nanopartículas Pt y Pt-Pd, soportados sobre nanotubos de carbón (MWCNT) sin purificar (con Fe residual en la superficie) para favorecer la producción catódica *in situ* del $\bullet OH$, eliminando de ésta manera el uso de soportes adicionales y disminuyendo los costos en la posible implementación de un prototipo de tipo EF, con potencial para la aplicación en el tratamiento electroquímico de agua residual tratada.

Materiales y métodos

Reactivos

Ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 97.90%), cumarina ($C_9H_6O_2$, 99.99%), Nafion 117 (5%), isopropanol (C_3H_8O , 99%) fueron obtenidos de Aldrich. Peróxido (H_2O_2 , 30%) fue obtenido de J. T. Baker. Todas las soluciones fueron preparadas con agua Milli Q, (resistividad, $r = > 18 MW\ cm$ a $25^\circ C$). Los MWCNTs fueron preparados por métodos previamente reportados (Alonso-Núñez *et al.*, (2006)) con la salvedad de que no pasaron por la etapa de purificación para eliminar el Fe residual de su síntesis.

Procedimiento experimental

Preparación del cátodo

Los diferentes materiales utilizados como cátodo fueron preparados con tintas que contienen MWCNT con Fe superficial y modificados con nanopartículas de Pt y Pt-Pd. El área geoméricamente activa de cada material evaluado fue de $0.125\ mm^2$. Las tintas también contienen Nafión 117 al 5% e Isopropanol. Toda la mezcla se somete una agitación ultrasónica con una sonda Sonics and Materials, VCX750, 20 kHz, previa a su uso como material de recubrimiento en una barra de grafito puro.

Caracterización estructural y análisis elemental

Los electrodos preparados fueron caracterizados mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, *Scanning Electron Mycroscopy*) empleando un equipo marca JEOL 5300 acoplado a una sonda de Dispersión de Rayos X (EDX, *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*), marca EDAX para análisis elemental.

Caracterización electroquímica

Los perfiles electroquímicos de cada material de cátodo fueron obtenidos mediante voltamperometría cíclica, empleando un potenciostato/galvanostato marca AUTOLAB controlado por programa NOVA. El análisis fue realizado utilizando una celda convencional de tres electrodos, utilizando como contra-electrodo Pt y Ag/AgCl como electrodo de referencia. El análisis fue realizado en H₂SO₄ 0.5 M, aplicando una velocidad de barrido de 100 mV/s. El rango de potencial evaluado fue fijado entre -0.6 V y 1 V. Antes de cada medición, el sistema fue desoxigenado, mediante el uso de N₂.

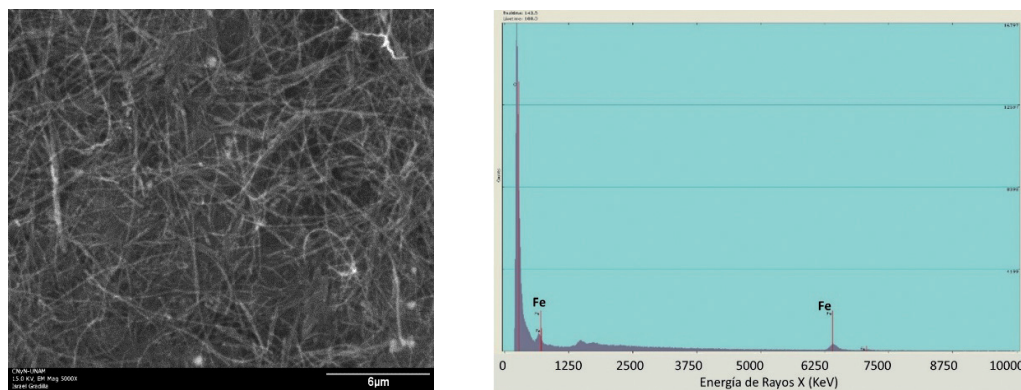
Resultados y discusión

Caracterización estructural y análisis elemental

La figura 1 muestra la micrografía obtenida de los MWCNT en ausencia de nanopartículas de Pt o Pt-Pd (electrocatalizadores) y su respectivo análisis elemental, mediante EDX, mostrando claramente la presencia de Fe superficial, mismo que de aquí en adelante será identificado como Fe/MWCNT. Como antes se mencionó el Fe es un elemento indispensable para llevar a cabo la producción del *OH y en este caso en particular asegura la expectativa de producirlo sobre un cátodo por su presencia.

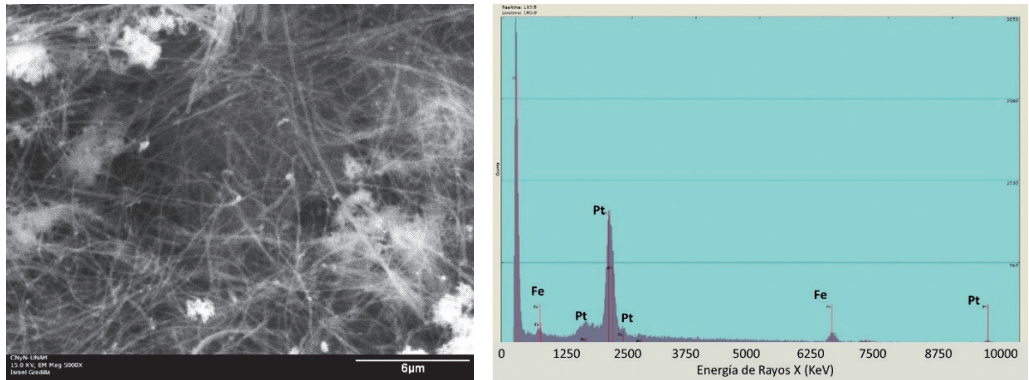
La figura 2 muestra la micrografía y su respectivo análisis elemental, para el material de electrodo que contiene nanopartículas de Pt. El análisis EDX muestra la presencia tanto de Fe como de Pt, este material se denotará como Fe/MWCNT-Pt. La micrografía permite apreciar las siluetas de los MWCNT y algunas zonas brillantes atribuidas a la presencia de cúmulos de

FIGURA 1. SEM de los MWCNT sin purificar, en ausencia de electrocatalizadores.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. SEM del material identificado como Fe/MWCNT-Pt.



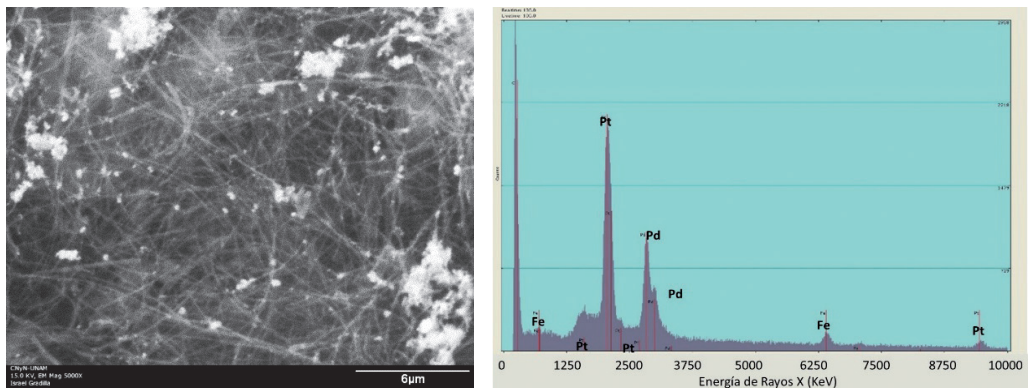
Fuente: Elaboración propia.

las nanopartículas de Pt, además de una especie de recubrimiento translucido sobre todos los MWCNT.

La figura 3 muestra las micrografías y el análisis elemental de los MWCNT con nanopartículas bimetálicas de Pt-Pd. De forma similar a la figura 2, se detectaron zonas brillantes atribuidas a la presencia de electrocatalizador bimetálico (Pt-Pd). A este material se le identificará ahora como Fe/MWCNT-Pt-Pd. En esta imagen SEM también se distingue un recubrimiento translucido que hace pensar en una alta densidad de nanopartículas repartidas alrededor de todos los nanotubos.

El análisis SEM y EDX permitió confirmar claramente que el cátodo a

FIGURA 3. SEM del material identificado como Fe/MWCNT-Pt-Pd.



Fuente: Elaboración propia.

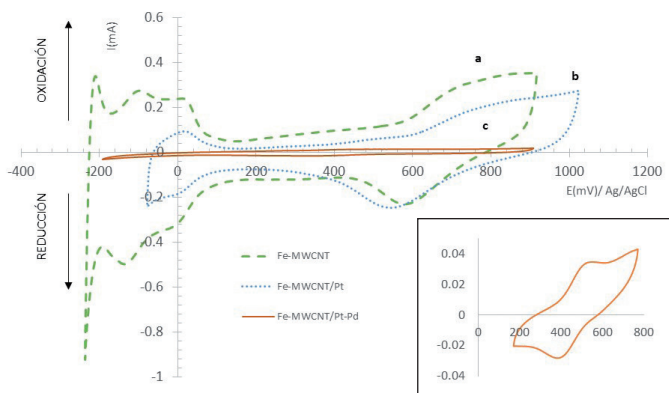
evaluar contiene los materiales electrocatalizadores para la reacción de reducción de O_2 (Pt, Pt-Pd) y el Fe para la formación de los radicales hidroxilos sobre su superficie. Si bien con esta caracterización no es factible distinguir el estado de oxidación del Fe, se infiere que debe estar en forma de óxido por la exposición al ambiente y las condiciones de alta temperatura a las que es sometido durante la síntesis de los MWCNT.

Caracterización electroquímica y análisis del radical hidroxilo

Una vez realizada la caracterización morfológica y elemental de los diferentes materiales de cátodo a evaluar, se procedió a la caracterización electroquímica. La figura 4 muestra los perfiles voltamperométricos de cada electrodo preparado. En este análisis, las señales de oxidación/reducción de protones y oxígeno son distinguibles en los dos cátodos que contienen electrocatalizadores (Fe/MWCNT-Pt y Fe/MWCNT-Pt-Pd), así como la óxido/reducción de Fe superficial del electrodo denominado Fe/MWCNT (ver recuadro en la figura 4).

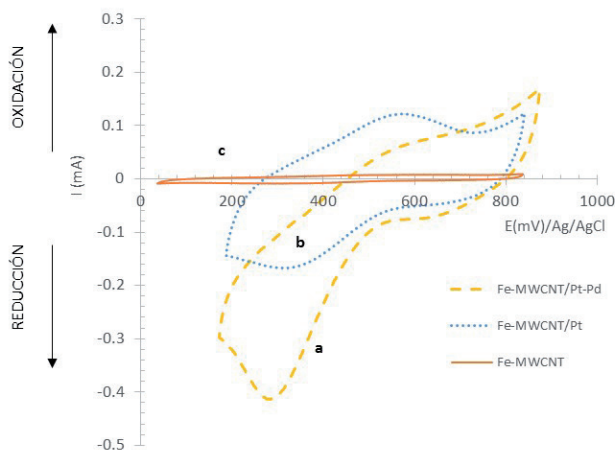
La respuesta electroquímica de cada material preparado en un electrolito como el 0.5 M de H_2SO_4 es una prueba de calidad ya que se valida la electroactividad de los materiales preparados en ausencia de oxígeno y se puede distinguir la exposición de diferentes planos cristalinos en los materiales electrocatalizadores por el número de señales óxido/reducción atribuibles a los protones (región donde $E \in (0, -200)$ mV). De esta manera, se cuenta con la evidencia de que los MWCNT son adecuados para soportar electrocatalizadores activos para la adsorción y reducción de protones, con su consecuente oxidación al invertir el barrido (región donde $E \in (0, -200)$ mV), y la

FIGURA 4. Voltamperometría cíclica en H_2SO_4 0.5 M a una velocidad de barrido de 100 mV/s, utilizando un electrodo de referencia de Ag/AgCl y contraelectrodo de Pt, en celdas separadas, burbujeo constante con N_2 .



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 5. Voltamperometría cíclica en 0.5 M H_2SO_4 a una velocidad de barrido de 100 mV/s, utilizando un electrodo de referencia de Ag/AgCl y contraelectrodo de Pt, en celda con división, burbujeo constante con O_2 .



Fuente: Elaboración propia.

adsorción y oxidación de oxígeno con su consecuente reducción y formación de H_2O_2 en la superficie (región donde $E \in (400, 900)$ mV). El gráfico (a) corresponde al electrodo Fe/MWCNT-Pt-Pd, observando la señal de óxido-reducción del Pt entre 600 y 800 mV, además, en potenciales de reducción alrededor de -100 mV fueron observadas señales redox atribuidas a la presencia del Pd. El gráfico (b) es el electrodo de Fe/MWCNT-Pt y se observa que a 800 mV se presenta la formación de un óxido de Pt y a 600 mV su reducción, en la zona de reducción de protones no se manifiesta la exposición de diferentes planos cristalinos como en el caso de la curva (a). El gráfico (c) corresponde al electrodo Fe/MWCNT, que comparado con los que contienen catalizadores nanoparticulados no tiene electroactividad. Por otra parte, en el análisis comparativo (figura 4), las señales de óxido-reducción del hierro no alcanzan a apreciarse debido a la alta actividad catalítica de los electrodos modificados con MWCNTs-Pt y Pt-Pd. Sin embargo, los potenciales redox del Fe pueden ser claramente apreciados en un rango de 400 y 500 mV (recuadro de la figura 4). Con el fin de identificar los potenciales de reducción de O_2 en cada material de cátodo, y proceder a la evaluación de la producción de H_2O_2 , se trazaron curvas de voltamperometría cíclica en medio ácido y presencia de O_2 . La figura 5 muestra el análisis comparativo de los diferentes perfiles voltamperométricos de cada material evaluado en el mismo electrolito de 0.5M de H_2SO_4 , pero esta vez bajo una atmósfera saturada de oxígeno, para contar con el reactivo principal de la producción de H_2O_2 .

Se observa que en presencia de Pt-Pd (Fe/MWCNT-Pt-Pd) la reducción de oxígeno es altamente catalizada, decreciendo dicha actividad, para los electrodos de Fe/MWCNT-Pt y totalmente nulo para Fe/MWCNT. Este

análisis comprueba que las propiedades catalíticas de las partículas de Pt-Pd favorecen la reducción de O_2 y, por lo tanto, la subsecuente formación de H_2O_2 , lo cual fue evidenciado mediante UV-vis mediante el uso de oxisulfato de titanio (Brillas *et al.* 2009). De acuerdo con lo anterior, una mayor generación de H_2O_2 , con sitios de Fe contiguos significaría una mayor producción del $\bullet OH$, lo cual también fue verificado mediante espectroscopía de UV-vis y fluorescencia. La proyección de esta nueva forma de producir radicales $\bullet OH$ en un cátodo tiene gran potencial de aplicación en el área ambiental y de la electrocatálisis, por lo que el grupo de investigación continua realizando pruebas de desempeño ya con agua tratada que contiene contaminantes recalcitrantes y difíciles de eliminar.

Conclusiones

Los resultados de la evaluación electroquímica del desempeño de cátodos multifuncionales para producir radicales $\bullet OH$ dieron resultados prometedores, dado que la presencia de ellos fue corroborada por espectroscopías de UV-vis y espectroscopía de fluorescencia de cumarina. Es así que se pone de manifiesto que los cátodos diseñados con materiales nanoestructurados, Fe/MWCNT-Pt y Fe/MWCNT-Pt-Pd, son multifuncionales ya que pueden conjuntar las condiciones para formar los radicales $\bullet OH$ como se hace en procesos electrofenton mediante la reducción electroquímica de O_2 a H_2O_2 y de H_2O_2 a $\bullet OH$ en presencia de Fe superficial. Estos materiales demuestran tener potencial aplicación en el tratamiento de agua residual y específicamente en el agua residual tratada, para aumentar su calidad.

Referencias

- A. Aguilar-Elguézabal, W. Antúnez, G. Alonso-Núñez, F. Paraguay Delgado, F. Espinoza, M. Miki-Yoshida. (2006). Study of carbon nanotubes synthesis by spray pyrolysis and model of growth. *Diamond and Related Materials*, vol. 15: 1329.
- A. M. Oturan, E. Brillas (2007). Electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs) for environmental applications. *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 25: 1.
- A. Ongen. Y. Gunes, I. Talinli (2012). Treatability of pesticide industry effluent by ozonation and coagulation. A real effluent investigation. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 13: 23.
- A. Zhihui, T. Mei, J. Liu, J. Li, F. Jia, L. Zhang, J. Qiu (2007). Fe@Fe₂O₃ Core-Shell nanowires as an iron reagent. Their combination with CNTs as an effective oxygen-fed gas diffusion electrode in a neutral electro-Fenton system. *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 111, núm. 40: 14799.
- D. H. Ahn., W. S. Chang, T. I. Yoon (1999). Dye stuff wastewater treatment using chemical oxidation, physical adsorption and fixed bed biofilm process. *Process Biochemistry*, 34: 429-439.

- D. Morales-Acosta, J. Ledesma-García, L. A. Godínez, H. G. Rodríguez (2010). Development of Pd and Pd-Co catalysts supported on multi-walled carbon nanotubes for formic acid oxidation. *Journal of Power Sources*, vol. 195, núm. 2: 461.
- E. Brillas, I. Sirés, M. A. Oturan (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical Reviews*, vol. 109: 6670.
- E. Isarain-Chavez, C. Arias, P.L. Cabot, F. Centellas, R. M. Rodríguez, J. A. Garrido, E. Brillas (2010). Mineralization of the drug β -blocker atenolol by electro-Fenton and photoelectro-Fenton using an air-diffusion cathode for H_2O_2 electrogeneration combined with a carbon-felt cathode for Fe^{2+} regeneration. *Applied Catalysis, B: Environmental*, vol. 96, núm. 3-4: 361.
- H. J. H. Fenton (1894). Oxidation of tartaric acid in the presence of iron. *Journal of chemical society*, vol. 65: 899.
- I. Muñoz, S. Malato, A. Rodríguez, X. Domènech (2008). Integration of environmental and economic performance of processes. Case study on advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, vol. 11, núm. 2: 270.
- J. C. Forti, R. S. Rocha, M. R. V. Lanza, R. Bertazzoli (2007). Electrochemical synthesis of hydrogen peroxide on oxygen-fed graphite/PTFE electrodes modified by 2-ethylanthraquinone. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 601, núm. 1: 63.
- J. M. Peralta, S. Mejía, L. A. Godínez, Y. Meas (2005). Applications of analytical chemistry in environmental research. Fenton an electrochemical approaches for water purification technologies. *Research Signpost. Trivandrum, Kerala, India*, 101.
- J. Ramírez, L. A. Godínez, M. Méndez, Y. Meas, F. J. Rodríguez (2010). Heterogeneous photo-electro-Fenton process using different iron supporting materials. *Journal Applied. Electrochemistry*, vol. 40: 1729.
- M. D. Chengalroyen, E. R Dabbs (2012). *The microbial degradation of azo dyes: mini-review*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 29, núm. 3, 389.
- P. Jothimani, G. Kalaiselvan, A. Baskaran, S. D. Augustine, K. Ramaswamy (2003). Anaerobic biodegradation of aromatic compounds. *Indian Journal of Experimental Biology*, vol. 141: 1046.
- R. Arenas-Carmona, D. Morales-Acosta, A. Martinez-Luevanos, F.J. Rodríguez-Varela (2014). Comparative study of the electrocatalytic oxidation of glycerol on Pd-Au/CMO and Pd-Au/MWCNT nanocatalysts prepared by the polyol method in alkaline media. *ECS Transactions*, vol. 64, núm. 3: 1061.
- R. G. Zepp, B. C. Faust, J. Hoigne (1992). Hydroxyl radical formation in aqueous reactions (pH 3-8) of iron (II) with hydrogen peroxide: the photo-Fenton reaction. *Environmental Science Technology*, vol. 26: 6670.
- S. Baig, P. A. Liechti (2001). Ozone treatment for bio-refractory COD removal. *Water Science and Technology*, vol. 43, núm. 2: 97.

- W. Chih-Ta, C. Wei-Lug, C. Mei-Hui, K. Yi-Ming (2010). COD removal from real dyeing wastewater by electro-Fenton technology using an activated carbon fiber cathode. *Desalination*, vol. 253, núm. 1-3: 129.
- Z. Mahnoud, D. Salari, A. Niaei, A. Khataee (2009). Peroxi-coagulation degradation of C.I. Basic yellow 2 based on carbon-PTFE and carbon nanotube-PTFE electrodes as cathode. *Electrochimica Acta*, vol. 54, núm. 1-2: 6651.

Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos

Juan Carlos Durán-Álvarez,* Edwin Avella,* Rodolfo Zanella*

RESUMEN: La efectiva eliminación de agentes contaminantes en el agua es un tema de prioridad en todo el mundo. Muchas de estas sustancias contaminantes son recalcitrantes en los sistemas convencionales de tratamiento de agua, por lo que un importante número de sistemas de tratamiento avanzado ha sido desarrollado. Los procesos de oxidación avanzada, como la fotocatalisis heterogénea, han demostrado eliminar eficientemente un amplio grupo de agentes contaminantes de carácter orgánico, inorgánico y microbiológico presentes en el agua contaminada. En este artículo, se revisan los principios básicos del proceso de fotocatalisis heterogénea, así como los mecanismos involucrados en la degradación de contaminantes de diferente tipo en el agua. Adicionalmente, se hace una revisión del impacto que puede tener la modificación en superficie de semiconductores sobre la eficiencia de los procesos fotocatalíticos.

PALABRAS CLAVE: contaminantes, fotocatalisis, nanopartículas metálicas, óxidos metálicos, semiconductores.

ABSTRACT: The removal of water pollutants is a priority issue worldwide. Many of these contaminants are recalcitrant in conventional water and wastewater treatment systems; due to this, a significant number of advanced treatment systems have been developed in order to efficiently remove such substances from water. Advanced oxidation processes such as heterogeneous catalysis have shown to efficiently remove a large group of organic and inorganic pollutants as well as microbiological agents. In this article, the principles of heterogeneous photocatalysis process are reviewed as well as the mechanisms involved in the degradation of contaminants in the water. Additionally, a brief review of the impact that surface modification of semiconductors have on the performance of the photocatalytic process is given.

KEYWORDS: metallic nanoparticles, metallic oxides, photocatalysis, pollutants, semiconductors.

Introducción

La presencia de contaminantes en el agua es un tema de prioridad internacional, pues no sólo se relaciona con la salud de los ecosistemas, sino con el abastecimiento de agua para los individuos y el desarrollo de diversas actividades económicas. Por lo anterior, preservar la buena calidad del agua se ha

* Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México D. F., México A. P. 70-186. Correspondencia: Rodolfo Zanella, Tel.: +52 55 5622-8601, Fax. +52 55 5550-0654 (rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx).

Los autores agradecen el financiamiento de CONACYT-México a través de los proyectos 130407 y 163098, así como de la DGAPA-UNAM por el financiamiento otorgado a través del proyecto 103513.

convertido en un tema tanto de seguridad nacional, en algunos países, como en una de las metas del milenio establecidas por la Organización de las Naciones Unidas. Los agentes contaminantes del agua pueden ser de carácter orgánico, inorgánico o microbiológico, y éstos pueden tener un origen natural o antropogénico. Por ejemplo, la disolución de los minerales contenidos en el material del acuífero puede contaminar los cuerpos de agua subterránea con metales pesados, tales como el arsénico o el cromo, mientras que las descargas de agua residual de las ciudades son la principal fuente de contaminación de ríos y lagos. Debido a la continua entrada de los contaminantes a los cuerpos de agua y a que algunos de ellos pueden ser persistentes, se ha desarrollado una amplia variedad de sistemas de tratamiento, los cuales pueden ser aplicados de manera individual o en conjunto para alcanzar la calidad deseada en el agua tratada. La selección del sistema de tratamiento depende, en gran medida, del propósito definido para el agua tratada; de ahí que los procesos biológicos sean comúnmente seleccionados para remover la mayor cantidad de material orgánico de las aguas residuales, mientras otros procesos como la coagulación–floculación–filtración–desinfección sean los de uso típico para potabilizar el agua subterránea. Aun cuando existe una larga lista de sistemas de tratamiento de agua, cada uno basado en procesos como la filtración, la biodegradación, la oxidación y la adsorción, existe un importante número de agentes contaminantes recalcitrantes a los diferentes procesos de tratamiento, ya que son poco biodegradables, afines a los lodos residuales o resistentes a los procesos de desinfección. Para estos casos se han desarrollado procesos avanzados de tratamiento, lo suficientemente agresivos para transformar, degradar o inactivar los agentes contaminantes de mayor recalcitrancia.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son más efectivos para la eliminación de contaminantes recalcitrantes que los sistemas convencionales de tratamiento de agua (Malato *et al.*, 2009). Estos métodos están basados en la formación de especies químicas altamente reactivas y de baja selectividad, tales como los radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) y superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$) o el peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Los POA han mostrado ser eficientes para la remoción de sustancias recalcitrantes presentes en el agua a muy bajas concentraciones (Comniellis *et al.*, 2008; Oller *et al.*, 2011). En la mayoría de los casos, estos procesos consumen cantidades mínimas de energía y son capaces de mineralizar ciertos contaminantes orgánicos refractarios (Lastre *et al.*, 2012). Entre los procesos de oxidación avanzada, la fotocatalisis heterogénea ha mostrado ser muy efectiva en el tratamiento del agua. Este proceso consiste en reducir la energía de activación de una reacción fotoquímica mediante el uso de un fotocatalizador en estado sólido; es decir, el proceso se lleva a cabo en la interfase sólido–líquido. El agente fotocatalizador es capaz de producir transformaciones químicas de los reactivos mediante interacciones repetidas entre ellos, para regenerarse después de cada ciclo de interacciones. Las ventajas de este proceso estriban en: a) eliminar los agentes

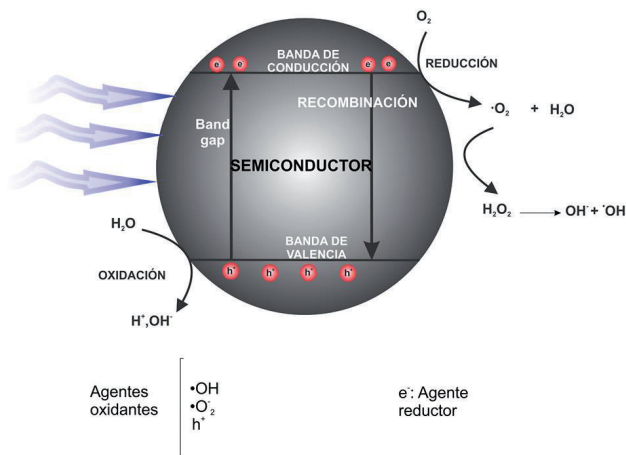
contaminantes del agua en periodos cortos con mínima generación de residuos (por ejemplo, lodos) y baja generación de subproductos de degradación; b) alcanzar altas tasas de desinfección en poco tiempo, junto con bajos índices de recrecimiento de los agentes microbianos; c) requieren bajas cantidades de reactivo para llevar a cabo el proceso de fotocatalisis, y en la mayoría de los casos es posible recuperar y reusar al catalizador; d) es posible modificar al fotocatalizador para ser activado con luz solar, y, e) es posible conjugar varios procesos de oxidación avanzada para obtener sistemas híbridos que trabajen más eficientemente por medio de la sinergia de sus componentes individuales. En las últimas dos décadas, se ha trabajado de manera intensiva en la modificación de los materiales fotocatalíticos, con el fin de incrementar su actividad en el espectro de luz visible. Esto traería como resultado el potencial uso de los fotocatalizadores en plantas solares de tratamiento de agua, lo cual sería favorecedor para la implementación de esta clase de sistemas en zonas con alta irradiación solar, como es el caso de la mayor parte de los países latinoamericanos.

En este artículo se exploran los aspectos más relevantes acerca de los principios de la fotocatalisis heterogénea, así como el desarrollo e implementación de materiales nanoestructurados para la eliminación fotocatalítica de agentes contaminantes en el agua. Se describirán algunas de las modificaciones estructurales realizadas a los nanomateriales fotocatalíticos para: a) incrementar su actividad como fotocatalizador; b) favorecer su actividad fotocatalítica en el espectro de luz visible o luz solar, y, c) reducir su desactivación.

Uso de materiales nanoestructurados en fotocatalisis heterogénea

A principios del siglo XX, Ostwald definió un catalizador como “una sustancia que incrementa la velocidad a la cual un sistema químico se aproxima al equilibrio, sin ser consumida en el proceso” (Polshettiwar y Asefa, 2013). Un fotocatalizador es aquella sustancia que se activa químicamente al ser irradiada con luz a una cierta longitud de onda o en un rango de longitudes de onda. Tradicionalmente, los fotocatalizadores se dividen en dos grandes grupos: los fotocatalizadores homogéneos y los heterogéneos. Los primeros son aquellos que existen en la misma fase que los reactivos, por ejemplo, sales metálicas y complejos orgánicos u organometálicos; estos fotocatalizadores son generalmente difíciles de separar de la mezcla de reacción para su reuso. Por otra parte, los fotocatalizadores heterogéneos son sólidos insolubles, como la ceria, la alúmina o la titania, y, debido a ello, son fácilmente separables y reusables al final del proceso fotocatalítico en agua. Los materiales nanométricos, tales como las nanopartículas metálicas y los semiconductores, son capaces de actuar como fotocatalizadores heterogéneos de alta actividad y estabilidad, pero también como soportes de fases aún más activas, o bien

FIGURA 1. Representación esquemática del proceso fotocatalítico empleando un semiconductor.



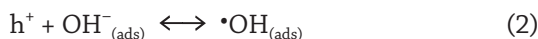
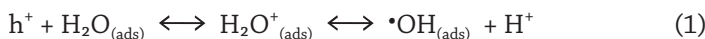
Fuente: Elaboración propia.

como cocatalizadores (Astruc, 2008). Cuando los fotocatalizadores son de tamaño nanométrico pueden ser considerados como materiales intermedios entre lo homogéneo y lo heterogéneo debido a sus dimensiones diminutas. Estos materiales presentan altas áreas específicas y un elevado número de sitios activos expuestos —por tanto, existe una mayor área de contacto con los reactantes—, esto los hace parecidos en cierta medida a los catalizadores homogéneos. Al mismo tiempo, los fotocatalizadores nanoestructurados son efectivamente catalizadores heterogéneos al estar en una fase diferente al medio de reacción (en este caso, el agua) y por ello tienen el potencial de ser separados y reusados en varios ciclos. La dualidad presentada por estos nanomateriales permite diseñar fotocatalizadores con mayor actividad, estabilidad y selectividad mediante la manipulación de su síntesis, logrando la modificación de su tamaño, estructura y morfología (Hashmi y Hutchings, 2006; Polshettiwar y Asefa, 2013).

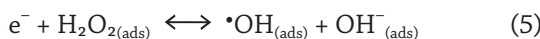
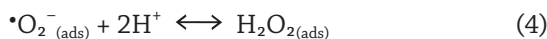
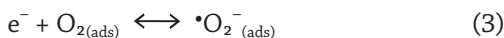
De manera general, se puede decir que el proceso de fotocatalisis en fase heterogénea está basado en reacciones de oxidación-reducción, las cuales ocurren en la superficie del fotocatalizador. Cuando se emplean semiconductores como fotocatalizador, el paso inicial del proceso consiste en la absorción de energía lumínica por parte del material nanoestructurado; esta energía deberá ser suficiente para excitar a los electrones en la banda de valencia, promoviéndolos hacia la banda de conducción (figura 1). Ello genera el par hueco-electrón, término que se refiere a la deficiencia de electrones en la banda de menor energía (banda de valencia) y la presencia simultánea de un electrón excitado en la banda de conducción. Al mantenerse la separación de cargas, el hueco (h^+) y el electrón (e^-) pueden migrar a la superficie del catalizador, en donde inician una cascada de reacciones de oxidación y reduc-

ción, en las cuales participan las especies químicas adsorbidas en la superficie del catalizador (Muneer *et al.*, 2005).

Los huecos foto-formados en la superficie del semiconductor presentan carga positiva y pueden oxidar a las moléculas de agua o a cualquier otro componente adsorbido en el catalizador, y con ello generar especies altamente oxidantes, tal y como se muestra en las ecuaciones 1 y 2:



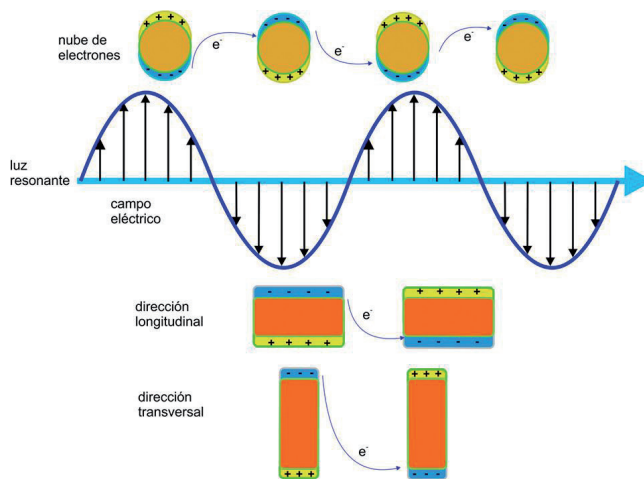
Una vez formados, los radicales hidroxilo activados ($\cdot OH$) actúan como agentes oxidantes fuertes. Por otro lado, los electrones promovidos hacia la banda de conducción del semiconductor reaccionan con las moléculas de oxígeno adsorbidas para producir el radical superóxido ($\cdot O_2^-$), como se muestra en la ecuación 3. Estos radicales son rápidamente convertidos en peróxido de hidrógeno (ecuación 4) y, posteriormente, en radicales hidroxilo activados (ecuación 5).



La eficiencia de las reacciones arriba descritas depende de cuatro procesos, a saber: a) la absorción de luz por el semiconductor; b) la separación del par hueco-electrón; c) la migración de los pares foto-producidos hacia la superficie del catalizador, y, d) la velocidad de recombinación de los pares hueco-electrón que se hayan foto-formado (Cushing *et al.*, 2012).

La eficiencia del transporte del electrón entre las bandas de valencia y de conducción se ve fuertemente afectada por la estructura cristalina y el tamaño de partícula del fotocatalizador. Por ejemplo, un material cristalino que contiene únicamente pequeñas cantidades de defectos estructurales —esto es, deficiencias en la red de átomos que conforman el cristal— puede suprimir la recombinación de los pares hueco-electrón y, consecuentemente, aumentar el tiempo de vida de las especies foto-generadas (Osterloh, 2008). Una de las ventajas de usar fotocatalizadores nanométricos es que los electrones deben migrar una distancia muy pequeña hacia la superficie del semiconductor, factor que, se estima, también contribuye a disminuir la probabilidad de recombinación. De hecho, se sabe que la energía de banda prohibida —esto es, la diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción— y otras propiedades fisicoquímicas del semiconductor pueden cambiar si se disminuye el tamaño de partícula o se modifica la forma de las

FIGURA 2. Representación esquemática de la resonancia superficial del plasmón en nanopartículas de metales nobles (esquema superior), direccionalidad de la transferencia de electrones en nanopartículas metálicas con diferente morfología (esquema inferior).



Fuente: Elaboración propia.

partículas nanométricas (Lin *et al.*, 2009). Debido a que los diferentes semiconductores requieren un nivel específico de energía para alcanzar la transferencia entre bandas del electrón, éstos pueden ser catalogados en dos grupos: los que pueden ser activados sólo con luz UV (por ejemplo, TiO₂, ZnO, SiO₂ y Al₂O₃), y los que son activos en el espectro de luz UV-visible (por ejemplo, WO₃, CeO₂, Fe₂O₃, Bi₂O₃, BiVO₄ y CdS) debido a su bajo valor de energía de banda prohibida. A este respecto, es importante destacar que aun cuando algunos fotocatalizadores pueden activarse con luz visible, ello no necesariamente se traduce en una alta actividad fotocatalítica en esta zona del espectro, pues algunos de estos materiales presentan un alto grado de recombinación del par hueco-electrón, inactivándose antes de generar radicales libres y especies oxidantes en la superficie del semiconductor.

Por otra parte, cuando en la fotocatalisis heterogénea se emplean nanopartículas de metales nobles —por ejemplo, Au, Ag, Pt, Pd, Ir—, la cascada de reacciones de oxidación-reducción se inicia con la absorción de luz por las nanopartículas metálicas a una longitud de onda determinada. Los electrones en la banda de conducción de las nanopartículas del metal conductor son excitados por acción de la resonancia superficial del plasmón; fenómeno descrito como los movimientos oscilatorios de los electrones en la banda de conducción de un metal noble por acción de la incidencia de luz visible (figura 2). Posteriormente, las nanopartículas metálicas generan un campo eléctrico muy intenso cerca de su superficie. Se ha demostrado que la intensidad del campo eléctrico localizado en los “puntos calientes” plasmónicos puede ser hasta 1,000 veces superior a la del campo eléctrico incidente (Hou

Tabla 1. Longitudes de onda de banda del plasmón reportadas para algunos metales.

METAL	LONGITUD DE ONDA (nm)	REFERENCIA
Oro	552	Eustis y El-Sayed (2006)
Plata	480	You <i>et al.</i> (2009)
Cobre	578	Gwak <i>et al.</i> (1998)
Platino	420	You <i>et al.</i> (2009)
Níquel	400	Chen <i>et al.</i> (2011)

Fuente: Elaboración propia.

y Cronin, 2013; Le *et al.*, 2008; Zou y Schatz, 2005). Debido a ello, la velocidad de generación de los pares hueco-electrón en estos “puntos calientes” es 1,000 veces superior a lo observado en otras regiones de la nanopartícula (Hou y Cronin, 2013). Dado que el campo está confinado a unos cuantos nanómetros en la superficie de las nanopartículas, la mayoría de los pares hueco-electrón inducidos por el plasmón participan en el proceso fotocatalítico a través de las reacciones de oxidación-reducción arriba descritas (Hou y Cronin, 2013). La longitud de onda a la cual se expresa la resonancia plasmónica depende fuertemente del tipo y tamaño de las nanopartículas, así como de las propiedades dieléctricas del medio. Un caso excepcional son las nanopartículas de oro, las cuales presentan absorción tanto en el espectro visible como en el ultravioleta; esto último debido a las transiciones electrónicas de las bandas *5d* hacia las bandas *6sp* (Zhu *et al.*, 2009). En la tabla 1, se muestran las longitudes de onda de la banda para las cuales algunos metales presentan resonancia superficial del plasmón.

La aplicación de la resonancia superficial del plasmón en los procesos de degradación de contaminantes en agua ha sido ampliamente estudiada durante las últimas tres décadas (Pradeep, 2009), siendo el oro el metal noble que presenta la resonancia plasmónica más intensa en comparación con otros metales nobles como plata, cobre o níquel (Primo *et al.*, 2011). Es importante tomar en consideración que la intensidad de la resonancia superficial del plasmón puede variar en función de propiedades físicas de la nanopartícula metálica, tales como su tamaño o morfología. El efecto de resonancia del plasmón puede ser longitudinal o transversal, dependiendo de la longitud y orientación de la nanopartícula metálica (ver figura 2). Por esta razón, continuamente se están desarrollando técnicas de síntesis que permitan manipular las propiedades morfológicas de las nanopartículas metálicas y con ello lograr diferentes efectos en la resonancia superficial del plasmón.

El uso de materiales fotocatalíticos conjugados en el proceso de fotocatálisis heterogénea ha mostrado tener resultados prometedores en la depuración del agua. Un ejemplo de materiales nanométricos conjugados son los semiconductores modificados en superficie por el depósito de nanopartículas de metales nobles. Esta modificación puede resultar en un incremento de la

fotoactividad del material híbrido con relación a sus componentes individuales; ello ocurrirá siempre y cuando las nanopartículas metálicas presenten propiedades plasmónicas (Cao *et al.*, 2011). Otro ejemplo de estos sistemas son los semiconductores modificados en superficie por la adsorción de moléculas orgánicas con propiedades fotoquímicas, las cuales pueden alcanzar el estado de triplete a una longitud de onda similar a la del semiconductor y favorecer la activación del fotocatalizador mediante la transferencia de electrones desde la molécula excitada hacia la banda de conducción del semiconductor (Chong *et al.*, 2010). En tercer lugar, se pueden mencionar los sistemas binarios o ternarios, los cuales se componen de dos semiconductores con diferente energía de banda prohibida, o bien, dos semiconductores modificados en superficie con nanopartículas metálicas. Estos compositos requieren menor energía de activación que sus componentes individuales, por lo cual son más eficientes.

Para que los materiales fotocatalíticos sean duraderos, éstos deben ser químicamente inertes, poco corrosibles y resistentes a la fotooxidación. Por esta razón, los óxidos metálicos y los metales nobles son los más adecuados para ser usados como fotocatalizadores en procesos de depuración de agua (Li *et al.*, 2008). El dióxido de titanio, por ejemplo, tiene un muy bajo potencial de corrosión durante los procesos fotocatalíticos en matrices acuosas, además de tener bajo potencial de toxicidad y ser de bajo costo. Es por ello que es hasta ahora uno de los materiales más empleados en los sistemas de tratamiento de agua por fotocatálisis heterogénea.

Fotocatálisis heterogénea usando nanomateriales para la depuración del agua

Como se mencionó anteriormente, la fotocatálisis heterogénea se basa en una cascada de reacciones de oxidación-reducción, iniciada por la excitación y transferencia interbanda de electrones en un material sólido. Uno de los campos de mayor desarrollo para este proceso en los últimos años es el aprovechamiento y potenciación de dichas reacciones para la degradación de contaminantes en el agua. Esto entraña una serie de prerrogativas tales como: a) el incremento en la eficiencia de degradación o inactivación de agentes contaminantes en comparación con el proceso de fotólisis (Malato *et al.*, 2009); b) la completa degradación de los contaminantes orgánicos hasta sus componentes minerales (Oller *et al.*, 2011), y, c) el potencial de combinar a las reacciones de oxidación-reducción en procesos mixtos que involucren la degradación de contaminantes de diferente naturaleza (por ejemplo, oxidación de compuestos orgánicos acoplado a la reducción de metales pesados) junto con la generación de productos de muy alto valor energético (producción de hidrógeno por el rompimiento de la molécula de agua) (Patsoura *et al.*, 2007; Jungwon y Choi, 2010).

La mayor parte de los estudios que reportan la eliminación de contami-

nantes en el agua se han llevado a cabo bajo condiciones ideales, empleando agua destilada en un sistema de reacción discontinuo o semicontinuo y con una fuente de luz artificial. Esto se debe a que al trabajar con agua no ideal, tal como agua de lago, agua potable o agua residual tratada, se introducen en el proceso una serie de variables que dificultan el estudio cinético y el escalamiento del proceso desde las condiciones ideales hasta llegar a un sistema lo más cercano posible a una planta piloto. Los estudios más recientes reportan el tratamiento fotocatalítico de aguas naturales o de agua residual sintética enriquecidas con el contaminante objetivo (Soares *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015). Más aún, Wang *et al.* (2015) reportan el desempeño de un fotocatalizador de ZnO modificado en superficie con nanopartículas de plata para la degradación de hormonas sexuales en agua residual no sintética; estos autores tratan de explicar el efecto que algunos de los componentes de la matriz tienen sobre la reacción de fotocatalisis. Así pues, es importante destacar que una serie de estudios previos bajo condiciones ideales tuvieron que realizarse para llegar a trabajar con matrices acuosas no ideales.

A continuación se describen a grandes rasgos los procesos que ocurren en la eliminación de diferentes clases de contaminantes durante la fotocatalisis heterogénea.

Degradación de contaminantes orgánicos del agua

La degradación de contaminantes orgánicos en el agua es uno de los temas más estudiados en el campo de la fotocatalisis heterogénea. Ello se debe, por un lado, a la enorme variedad de sustancias orgánicas que llegan a los cuerpos de agua y que son de relevancia ambiental debido a los efectos nocivos que causan a los organismos expuestos. Asimismo, la degradación de compuestos orgánicos en agua es uno de los métodos más empleados para probar el desempeño de los nuevos fotocatalizadores.

La degradación de compuestos orgánicos coloridos, como los colorantes azo, ha sido ampliamente reportada para diferentes fotocatalizadores (Akpan y Hameed, 2009; Rauf y Ashraf, 2009); éste es un sistema de prueba sencillo y fiable, la no requerir de métodos de análisis sofisticados. En el caso de los contaminantes orgánicos no coloridos, los estudios más recientes se han enfocado en la degradación fotocatalítica de los llamados contaminantes emergentes, definidos como sustancias químicas contenidas en productos de uso común, tales como los medicamentos, los productos de aseo personal, los aditivos que dan flexibilidad a los plásticos o aquellos que son precursores del teflón, las fragancias, los anticonceptivos, los tensoactivos, entre muchos otros (Daughton, 2004). Debido a su modo de uso, estas sustancias químicas son desechadas principalmente a través del drenaje y por ello son ubicuos en el agua residual, en los ríos y lagos, y hasta en el agua subterránea (Pal *et al.*, 2010; Deblonde *et al.*, 2011; Lapworth *et al.*, 2012). Aun cuando las concentraciones de contaminantes emergentes están en niveles de trazas,

éstos pueden causar efectos sutiles y crónicos en las especies acuáticas expuestas (Farré *et al.*, 2008), tales como la feminización de poblaciones de peces y anfibios (Nagahama *et al.*, 2003), o el desarrollo de resistencia a antibióticos por parte de organismos patógenos (Rodríguez-Mozaz *et al.*, 2015). Es por ello que la remoción de los contaminantes emergentes del agua es una prioridad a todos los niveles.

En términos generales, la degradación fotocatalítica de los contaminantes orgánicos es un proceso de oxidación, producido por los radicales libres ($\cdot\text{OH}$ y $\cdot\text{O}_2^-$), así como por los huecos en la banda de valencia del fotocatalizador (Chong *et al.*, 2010). No obstante, debido a la amplia variedad de moléculas orgánicas, el desempeño y el mecanismo de la fotodegradación dependerá de varios factores tales como:

1. **La especiación del contaminante.** Debido a que la fotocatálisis heterogénea es un proceso llevado a cabo en la superficie del fotocatalizador, es prioritario que el contaminante orgánico sea adsorbido en la superficie del sólido. La adsorción del compuesto sobre el catalizador (un óxido metálico o una nanopartícula metálica) ocurrirá mediante interacciones electrostáticas entre los grupos funcionales de la molécula orgánica y las cargas presentes en la superficie del fotocatalizador. Por ello, las moléculas orgánicas no polares serán pobremente adsorbidas en la superficie del sólido, mientras que ésta se maximizará en caso de probar moléculas polares o semipolares con grupos funcionales ionizables, como carboxilo, hidroxilo o amino.
2. **El pH del medio.** Dado que este parámetro define tanto el estado de ionización de las moléculas orgánicas como la carga en la superficie del fotocatalizador, el mejor desempeño en la reacción fotocatalítica podrá ser alcanzado cuando el catalizador y la molécula orgánica presenten cargas opuestas, o bien, cuando por lo menos uno de ellos esté en su punto de carga cero (Van Doorslaer *et al.*, 2012).
3. **La presencia de oxígeno disuelto en el agua.** Debido a que la degradación fotocatalítica de los contaminantes orgánicos es un proceso de oxidación, llevado a cabo tanto por el hueco foto-formado, como por los radicales libres producidos en la banda de valencia, es necesario evitar la recombinación del par hueco-electrón. Una vía para evitar la recombinación es neutralizar el electrón foto-formado en la banda de conducción mediante la adición de un agente electrófilo. El oxígeno disuelto en el agua, además de secuestrar al electrón de la banda de conducción, es capaz de generar otras especies oxidantes como el peróxido de hidrógeno y radicales libres, tales como $\cdot\text{O}_2^-$ y $\cdot\text{OH}$. Se ha reportado un considerable incremento de la actividad fotocatalítica cuando la suspensión se satura con oxígeno disuelto, mientras que su ausencia lleva al detrimento en el rendimiento de la reacción (Van Doorslaer *et al.*, 2012).
4. **La composición química del agua.** Diversos componentes disueltos en

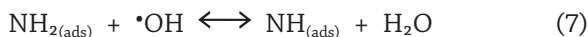
el agua tienen efecto en el proceso de fotocatalisis, algunos de ellos pueden acelerar la reacción, tales como la presencia del ion nitrato. Otros componentes pueden impactar negativamente en la fotocatalisis, como el ion carbonato, el cual secuestra a los radicales libres fotoformados, o a la materia orgánica, que impide la dispersión de la luz a través del agua (Wang *et al.*, 2015).

5. **La presencia concomitante de otros compuestos orgánicos.** Cuando están presentes varios compuestos orgánicos al mismo tiempo en el sistema de reacción fotocatalítica, se pueden presentar fenómenos de competencia por los sitios de adsorción en la superficie del catalizador, o por las especies oxidantes formadas durante el proceso. La presencia de otras sustancias orgánicas en concentraciones más altas que el contaminante objetivo es un obstáculo importante en la reacción de fotocatalisis; esto ocurre especialmente cuando se trata agua con alto contenido de material orgánico, como el agua residual (Wang *et al.*, 2015).

Transformación de iones inorgánicos tóxicos en especies inocuas

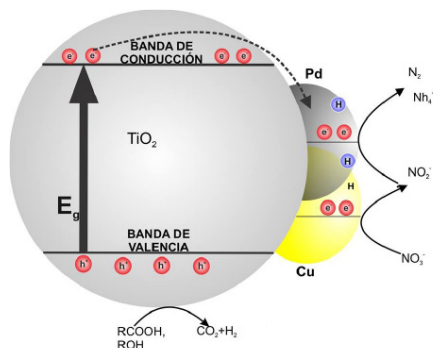
Entre los contaminantes de carácter inorgánico en el agua se pueden mencionar los compuestos nitrogenados, tales como el amonio y el nitrato, y los metales pesados. La conversión fotocatalítica del amonio (NH_4^+) en nitrógeno molecular (N_2) entraña el reto de establecer una ruta selectiva para evitar la producción de nitrato (NO_3^-). La reducción del amonio es una reacción llevada a cabo en medio alcalino, a través de la transformación del amonio en amoniaco (NH_3) y su posterior reducción a nitrógeno molecular. Debido a que las nanopartículas de metales de Pt, Pd y Rh tienen energía de adsorción de nitrógeno alta afinidad por el amoniaco, éstas son comúnmente usadas para llevar a cabo el proceso de reducción fotocatalítica (De Vooy *et al.*, 2001).

La transformación del amoniaco en nitrógeno molecular ocurre a través de una serie de reacciones de oxidación en presencia tanto de los huecos fotoformados en la banda de valencia del semiconductor como por radicales $\cdot\text{OH}$, tal y como se muestra en las ecuaciones 6, 7 y 8.

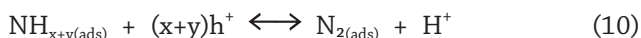
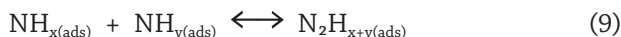


Posteriormente, se produce el nitrógeno molecular sobre la superficie de las nanopartículas metálicas por la unión de los átomos de nitrógeno mediante reacciones con el hueco fotoformado (ecuaciones 9 y 10).

FIGURA 3. Conversión fotocatalítica de NO_3^- en N_2 empleando TiO_2 modificado en superficie con nanopartículas bimetálicas de aleación de Pd-Cu.



Fuente: Elaboración propia.

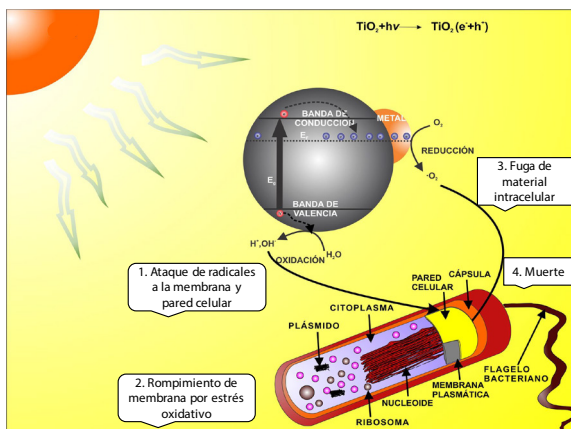


Esta ruta de degradación ha sido reportada por Altomare y Selli (2013), quienes sostienen que la transformación del ion amonio en N_2 tiene alta selectividad al probar TiO_2 modificado en superficie con nanopartículas de Pd. Debido a la alta selectividad de la reacción cuando se emplea este fotocatalizador se observa una baja producción de intermediarios, tales como los iones nitrato y nitrito, lo cual le confiere un valor agregado desde el punto de vista ambiental.

En lo que respecta a la reducción fotocatalítica del ion NO_3^- hacia N_2 los estudios hasta ahora reportados señalan que esta reacción de fotocatálisis puede llevarse a cabo empleando TiO_2 modificado en superficie con nanopartículas de Pd o nanopartículas bi-metálicas de Pt-Cu, Pd-Cu y Ni-Cu (Gao *et al.*, 2004). En particular, el uso de nanopartículas de Pd-Cu sobre TiO_2 ha mostrado incrementar en casi un 100% la selectividad de la reacción de conversión de NO_3^- y NO_2^- en N_2 , sin la producción de NH_4^+ (Soares *et al.*, 2014). En la figura 3 se muestran los mecanismos de reacción seguidos en la reducción fotocatalítica de NO_3^- al emplear semiconductores modificados en superficie con nanopartículas mono-metálicas y bi-metálicas.

La reducción fotocatalítica de las especies de nitrógeno precisa de la presencia simultánea de una molécula orgánica en la solución para consumir los huecos foto-formados y con ello evitar la reoxidación de los intermediarios; este componente orgánico se conoce como agente de sacrificio. Diferentes moléculas orgánicas han sido empleadas como agentes de sacrificio para la reducción fotocatalítica del NO_3^- , tales como el oxalato de sodio, el benceno (Li *et al.*, 2010), el ácido fórmico, el ácido acético y otras moléculas orgánicas (Zhang *et al.*, 2005).

FIGURA 4. Inactivación y muerte de una célula bacteriana mediante fotocatalisis heterogénea empleando un semiconductor modificado en superficie con nanopartículas metálicas.



Fuente: Elaboración propia.

La remoción de metales pesados (Pb^{2+} , Cr^{6+} , As^{3+} , etc.) en agua puede lograrse por medios fotocatalíticos a través del fotodepósito reductivo de los metales pesados sobre la superficie de TiO_2 . Este proceso implica que durante la irradiación con luz UV, los metales pesados son depositados e inmovilizados en la superficie del semiconductor. Para este sistema de tratamiento, se reportan tasas de remoción de hasta 41% de Pb, tras 17 horas de irradiación (Kabra *et al.*, 2008). Otros metales pesados como el arsénico trivalente puede ser oxidado hacia su especie inocua As^{5+} mediante fotocatalisis heterogénea empleando TiO_2 (Ryu y Choi, 2004).

Desinfección del agua

La fotocatalisis heterogénea ha sido también empleada para inactivar y aniquilar diferentes tipos de microorganismos patógenos en el agua, desde bacterias relativamente inocuas como *E. coli*, la cual es parte de la flora intestinal, hasta organismos de alta patogenicidad como el *Vibrio cholerae*, el cual es el causante del cólera (Das *et al.*, 2015). Al igual que para la degradación de contaminantes orgánicos, la desinfección fotocatalítica del agua ocurre mediante reacciones de oxidación. Tres mecanismos han sido propuestos para la inactivación de los microorganismos durante el proceso fotocatalítico, estos son: a) la interrupción de la replicación celular por daño en el ADN bacteriano causado por radicales $\cdot\text{OH}$ (Hirakawa *et al.*, 2004); b) daño estructural en la membrana y la pared celular por estrés oxidativo (Saito *et al.*, 1992), lo cual lleva a la fuga de material intracelular (Wu *et al.*, 2010), y, c) el decaimiento de la respiración celular por la oxidación intracelular de la acetil coenzima A (Matsunaga *et al.*, 1985). En la figura 4, se muestran de manera

esquemática estos mecanismos. Aun cuando existe poca evidencia acerca de cuál de estos procesos es el que lleva a la efectiva muerte celular, una buena parte de la literatura apunta a los daños en la membrana y la pared celular como la causa más plausible (Lu *et al.*, 2003). Los fotocatalizadores más empleados en los procesos de desinfección son el TiO_2 y las nanopartículas de plata. La plata, como metal noble, es un agente bactericida empleado para la desinfección de agua a nivel comercial, debido a su amplio espectro de acción contra bacterias, hongos y virus y a su baja toxicidad en mamíferos. Las nanopartículas de plata pueden ligarse a la membrana y a la pared celular y causar oquedades que desestabilizan el funcionamiento celular y llevan a la inactivación del patógeno (Rai *et al.*, 2009). Adicionalmente, las nanopartículas de plata pueden dañar la estructura del ADN bacteriano impidiendo la replicación celular (Jung *et al.*, 2008). Adicionalmente, otros metales como el oro y el platino también se han empleado como catalizadores en procesos de desinfección fotocatalítica, aunque con menores rendimientos que las nanopartículas de plata (Chen *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2012).

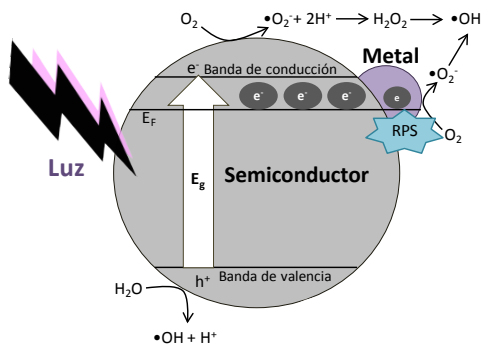
Modificación de los materiales nanoestructurados para la eliminación de contaminantes en agua

Muchos semiconductores en forma nanométrica (tales como TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , CdS , MoS_2 , Fe_2O_3 , WO_3 , etc.) han sido examinados y usados como fotocatalizadores para la degradación de contaminantes en agua (Auglugiaro *et al.*, 2010; Durán-Álvarez *et al.*, 2014; Hou y Cronin, 2013; Pan *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012). De estos semiconductores, el TiO_2 ha sido el más ampliamente utilizado. Sin embargo, este semiconductor presenta la desventaja de activarse principalmente con luz ultravioleta, lo cual lo hace inadecuado para el tratamiento de agua con luz solar, pues sólo 4% del total de la radiación solar troposférica está en el espectro UV. Lo anterior plantea la necesidad de modificar el fotocatalizador para ser activo en el espectro de luz visible, así como mejorar su desempeño fotocatalítico en la zona UV del espectro. Diferentes modificaciones estructurales de los nanomateriales fotocatalíticos se han propuesto para lograr tales mejoras, a continuación se mencionan algunas de ellas.

Modificación superficial de semiconductores con nanopartículas metálicas

El depósito de pequeñas cantidades de metales nobles en forma de nanopartículas sobre la superficie de un semiconductor puede incrementar de manera importante su fotoactividad, siempre y cuando estas nanoestructuras presenten propiedades plasmónicas (Cao *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2012; Hou y Cronin, 2013). Cuando los semiconductores modificados con nanopartículas metálicas se irradian con luz de longitud de onda correspondiente a la banda

FIGURA 5. Esquema de migración de electrones y producción de radicales libres en el proceso fotocatalítico usando semiconductores modificados en superficie con nanopartículas metálicas.

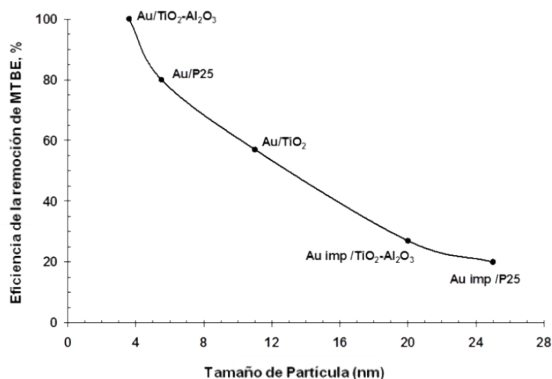


Fuente: Elaboración propia.

del plasmón, los electrones en la banda de conducción de la nanopartícula metálica son excitados y pueden migrar hacia la banda de conducción del semiconductor, o bien, reducir a las especies químicas adsorbidas en la superficie de la nanopartícula (Li *et al.*, 2008). La presencia de nanopartículas metálicas en la superficie de un semiconductor ayuda también a evitar la recombinación del par hueco–electrón, debido a que las nanopartículas metálicas actúan como una trampa eficiente de electrones, la cual secuestra a los electrones presentes en la banda de valencia, promoviendo la eficiente separación de cargas, incrementando el tiempo de actividad del fotocatalizador y aumentando con ello la eficiencia de la reacción de fotocatalisis. En la figura 5 se muestra de manera esquemática la transferencia de electrones y la producción de radicales libres en el sistema semiconductor-nanopartícula metálica.

Las propiedades morfológicas tanto de la nanopartícula metálica como del semiconductor impactan en el desempeño fotocatalítico del material conjunto. Como se mencionó previamente, el tamaño de las nanopartículas del metal noble es de gran relevancia en el desempeño fotocatalítico del material modificado, ya que el incremento en el tamaño de las nanopartículas metálicas disminuye la expresión de la resonancia superficial del plasmón. La figura 6 muestra la eficiencia de mineralización del metil tert–butil éter, un aditivo empleado para incrementar el octanaje de la gasolina sin plomo, utilizando TiO_2 modificado en superficie con nanopartículas de oro. Se observa que un incremento en el tamaño de las nanopartículas de oro resulta en el decaimiento en la tasa de degradación del compuesto orgánico (Rodríguez-González *et al.*, 2008). Al igual que el tamaño de las nanopartículas metálicas, otros parámetros como la forma o la dispersión de las nanopartículas metálicas en la superficie del semiconductor tienen un efecto importante en el desempeño del fotocatalizador para la degradación de contaminantes en agua.

FIGURA 6. Eficiencia de la remoción de metil tert-butil éter, medido por determinación de carbono orgánico total (TOC) en función del tamaño de partícula de oro soportado en semiconductores basados en TiO_2 .

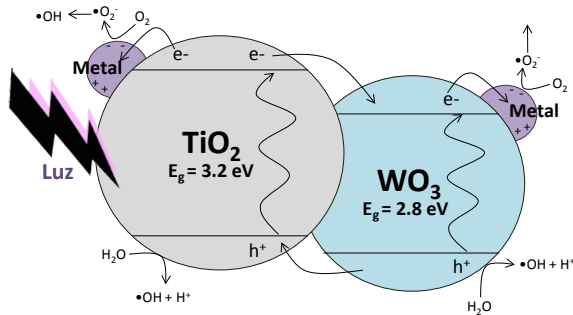


Fuente: Rodríguez-González *et al.*, (2008).

En términos generales, la eficiencia de remoción de contaminantes en agua es significativamente mayor al emplear los semiconductores modificados en superficie con nanopartículas metálicas que los materiales sin modificar. Para la remoción de contaminantes orgánicos en agua, los semiconductores modificados en superficie con nanopartículas de oro han mostrado ser una de las mejores opciones, al reportar incrementos en la velocidad de degradación de diversas moléculas en un factor de 10 en comparación con el material sin modificar. Adicionalmente, es posible alcanzar la completa mineralización de moléculas recalcitrantes como los polifenoles en la mitad del tiempo que requieren los semiconductores sin modificar (Durán-Álvarez *et al.*, 2014).

En el caso de los contaminantes inorgánicos, las reducciones selectivas de especies del nitrógeno, como el amonio, son rápidamente alcanzadas al emplear TiO_2 modificado en superficie con nanopartículas de Pd o con nanopartículas bi-metálicas de Au-Pd (Altomare y Selli, 2013). La baja producción de intermediarios, como los iones nitrato y nitrito, le dan a este catalizador un valor agregado desde el punto de vista ambiental. Estos niveles de conversión con altas tasas de selectividad no pueden ser alcanzados con semiconductores no modificados.

Como se mencionó previamente, la fotocatalisis heterogénea usando nanopartículas de plata resulta en altas tasas de desinfección del agua. Al depositar estas nanopartículas sobre semiconductores como el TiO_2 se obtienen tasas de desinfección tan altas como de un 100% tras sólo 2 horas de irradiación solar (Mirkhani *et al.*, 2009). Semiconductores modificados en superficie con diferentes metales han sido empleados en el proceso de desinfección fotocatalítica de agua, aunque con resultados menos alentadores que lo reportado para TiO_2 con depósito de plata. Por ejemplo, Chen *et al.* (2010)

FIGURA 7. Esquema del proceso de fotocatalisis en un compuesto ternario Au/TiO₂/WO₃.

Fuente: Elaboración propia.

encontraron que al emplear Au/TiO₂ en la desinfección fotocatalítica de *E. coli*, un 50% de inhibición puede ser alcanzado tras 6 horas de irradiación con luz visible. Suri *et al.* (2012) probaron TiO₂ nanoparticulado y modificado en superficie con Pt y Ag para la inactivación de la bacteria *E. coli* en agua potable, agua de río y agua residual tratada. Los autores reportan que tras 120 minutos de irradiación solar sólo se logró inactivar una tercera parte de la población microbiana en las muestras de agua. El TiO₂ modificado con plata resultó más eficiente en la inactivación de la bacteria que el semiconductor platinizado.

Compositos binarios o ternarios

Una forma de promover una mayor separación del par hueco–electrón es la síntesis de compositos binarios, es decir, combinando dos semiconductores, tales como CdS y TiO₂ (Serpone *et al.*, 1995) o WO₃ y WS₂ (Di–Paola *et al.*, 1999). Los compositos binarios son modificados por el depósito de nanopartículas metálicas para crear compositos ternarios. La combinación de dos semiconductores con diferentes energías de banda prohibida permite la transferencia vectorial de los electrones y los huecos foto–formados entre los óxidos metálicos, lo cual reduce la recombinación del par hueco–electrón y acelera las reacciones de degradación en la superficie del compuesto. El funcionamiento de esta clase de compositos múltiples, usando como ejemplo el material Au/TiO₂/WO₃ se muestra de manera esquemática en la figura 7. Esta clase de compositos ternarios ha mostrado ser más eficiente en la mineralización de contaminantes orgánicos recalcitrantes, como el plastificante bisfenol A, empleando luz solar que los componentes individuales (Kovacs *et al.*, 2014). En el caso de la eliminación de bacterias, el compuesto ternario Ag–AgBr–Bi₂WO₆ ha mostrado muy altas tasas de inactivación de la bacteria *E. coli* K-12. La completa inactivación de la bacteria (a una concentración inicial de 5×10^7 unidades formadoras de colonias/mL) se alcanzó tras apenas

15 minutos de irradiación con luz visible. La completa destrucción de las células bacterias se atribuyó a la elevada producción de radicales $\cdot\text{OH}$ y huecos foto-formados en la superficie del composito (Zhang *et al.*, 2009).

Comentarios finales

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada que ha sido implementado de manera exitosa en la mayoría de los casos para la eliminación de contaminantes en el agua. Este proceso puede degradar contaminantes orgánicos hasta sus componentes minerales en periodos cortos de tiempo; también puede llevar a cabo reacciones selectivas de oxidación o reducción de contaminantes inorgánicos con altos niveles de selectividad, así como inactivar y eliminar microorganismos patógenos en el agua, desinfectándola eficientemente. Las reacciones de oxidación y reducción en las que se basa el proceso fotocatalítico pueden ser potenciadas al modificar la estructura y morfología de los nanomateriales empleados como fotocatalizadores. El empleo de nanopartículas con alta área superficial, así como la modificación en superficie de semiconductores con nanopartículas metálicas han mostrado excelentes resultados para la activación del fotocatalizador en el espectro de luz solar. Debido al fenómeno de resonancia de plasmón de superficie es posible llevar a cabo reacciones fotocatalíticas de descontaminación de agua con luz solar y empleando semiconductores de baja toxicidad y amplio valor de banda prohibida como el TiO_2 . El depósito de nanopartículas metálicas sobre semiconductores incrementa efectivamente la rapidez de las reacciones fotocatalíticas de interés ambiental, como la inactivación de microorganismos patógenos, la transformación de agentes inorgánicos tóxicos en especies inocuas y la degradación de contaminantes orgánicos.

Al emplear diferentes arreglos de semiconductores modificados en superficie con nanopartículas metálicas es posible dar un mayor aprovechamiento a las reacciones de oxidación-reducción que ocurren en la superficie del catalizador. Ello puede llevarse a cabo a través del acoplamiento de reacciones como: a) la reducción de especies iónicas como nitratos y la oxidación de moléculas orgánicas, y, b) la inactivación de microorganismos patógenos y la remoción de algunos subproductos de desinfección —como los trihalometanos. Los estudios futuros deberán enfocarse en el desarrollo de sistemas fotocatalíticos para la depuración efectiva de aguas residuales tratadas o agua para consumo humano en volúmenes ambientalmente relevantes. Para ello será necesario desarrollar reactores en donde se traten en un solo paso, o de manera continua, grandes volúmenes de agua con luz solar, empleando tiempos de reacción cortos.

Referencias

- Akpan, U. G., y B. H. Hameed (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: A review. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, núm. 2: 520-529.
- Altomare, M., Selli, E. (2013). Effects of metal nanoparticles deposition on the photocatalytic oxidation of ammonia in TiO₂ aqueous suspensions. *Catalysis Today*, vol. 209: 127.
- Astruc, D. (2008). *Nanoparticles and catalysis*. NJ, USA: Wiley.
- Augugliaro, V., Loddo, V., Pagliaro, M., Palmisano, G., Palmisano, L. (2010). *Clean by light irradiation. Practical applications of supported TiO₂*. Cambridge, UK: RSC.
- Cao, S. W., Yin, Z., Barber, J., Boey, F. Y. C., Loo, S. C. J., Xue, C. (2011). Preparation of Au-BiVO₄ heterogeneous nanostructures as highly efficient visible-light photocatalysts. *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 4, núm. 1: 418.
- Chen, J., Albella, P., Pirzadeh, Z., Alonso-González, P., Huth, F., Bonetti, S., Bonanni, V., Akerman, J., Nogués, J., Vavassori, P., Dmitriev, A., Aizpurua, J., Hillenbrand, R. (2011). Plasmonic nickel nanoantennas. *Small*, vol. 7, núm. 16: 2341.
- Chen, S. F., Li, J. P., Qian, K., Xu, W. P., Lu, Y., Huang, W. X., Yu, S. H. (2010). Large scale photochemical synthesis of M@TiO₂ nanocomposites (M = Ag, Pd, Au, Pt) and their optical properties, CO oxidation performance, and antibacterial effect. *Nano Research*, vol. 3, núm. 4: 244.
- Chong, M. N., Bo J., Chow C. W. K., Saint C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Research*, vol. 44, núm. 10: 2997.
- Comninellis, C., Kapalka, A., Malato, S., Parsons, S. A., Poullos, I., Mantzavinos D. (2008). Advanced oxidation processes for water treatment: Advances and trends for R&D. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 83, núm. 6: 769.
- Cushing, S. K., Li, J., Meng, F., Sentry, T. R., Suri, S., Zhi, M. (2012). Photocatalytic activity enhanced by plasmonic resonant energy transfer from metal to semiconductor. *The Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, núm. 36, 2: 15033.
- Das, S., Sinha, S., Suar, M., Yun, S. I., Mishra, A., Tripathy, S. K. (2015). Solar-photocatalytic disinfection of *Vibrio cholerae* by using Ag@ZnO core-shell structure nanocomposites. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 142: 68.
- Daughton, C. G. (2004). Non-regulated water contaminants: Emerging research. *Environmental Impact Assessment Research*, vol. 24, núm. 7: 711.
- De Vooy, A. C. A., Koper, M. T. M., van Santen, R. A., van Veen, J. A. R. (2001). The role of adsorbates in the electrochemical oxidation of ammonia on noble and transition metal electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 506, núm. 2: 127.
- Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 214, núm. 6: 442.

- Di-Paola, A., Palmisano, L., Venezia, A. M., Augugliaro, V. (1999). Preparation and characterization of polycrystalline mixed WO_3/WS_2 powders. *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 103, núm. 39: 8236.
- Durán-Álvarez, J. C., Zanella, R., Oros-Ruiz, S. (2014). *Heterogeneous gold catalysts and catalysis*, cap. 7. Londres: The Royal Society of Chemistry.
- Eustis, S., El-Sayed, M. A. (2006). Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: Noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical Society Reviews*, vol. 35: 209.
- Farré, M., Pérez, S., Kantiani, L., Barceló, D. (2008). Fate and toxicity emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 27, núm. 11: 991.
- Gao, W., Jin, R., Chen, J., Guan, X., Zeng, H., Zhang, F., Guan, N. (2004). Titania-supported bimetallic catalysts for photocatalytic reduction of nitrate. *Catalysis Today*, vol. 3, núm. 90: 331.
- Gwak, J. H., Kim, S. J., Lee, M. (1998). Sol-gel preparation of AuCu and Au_4Cu nanocluster alloys in silica thin films. *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102, núm. 40: 7699.
- Hashmi, A. S. K., Hutchings, G. J. (2006). *Gold catalysis. Angewandte Chemie International Edition*, vol. 45, núm. 47: 7896.
- Hirakawa, K., Mori, M., Yoshida, M., Oikawa, S., Kawanishi, S. (2004). Photo-irradiated titanium dioxide catalyzes site specific DNA damage via generation of hydrogen peroxide. *Free Radical Research*, vol. 38, núm. 5: 439.
- Hou, W., Cronin, S. B. (2013). A review of surface plasmon resonance-enhanced photocatalysis. *Advanced Functional Materials*, vol. 23, núm. 13: 1612.
- Jung, W. K., Koo, H. C., Kim, K. W., Shin, S., Kim, S. H., Park, Y. H. (2008). Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*". *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 74, núm. 7: 2171.
- Kabra, K., Chaudhary, R., Sawhney, R. L. (2008). Solar photocatalytic removal of Cu (II), Ni (II), Zn (II) and Pb (II): Speciation modeling of metal-citric acid complexes. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 155, núm. 3: 424.
- Jungwon, K. Choi, W. (2010). Hydrogen producing water treatment through solar photocatalysis. *Energy & Environmental Science*, vol. 3, núm. 8: 1042.
- Kovács, G., Baia, L., Vulpoi, A., Radu, T., Karácsonyi, E., Dombi, A., Hernádi, K., Danciu, V., Simon, S., Pap, Z. (2014). $\text{TiO}_2/\text{WO}_3/\text{Au}$ nanoarchitectures' photocatalytic activity, from degradation intermediates to catalysts' structural peculiarities", Part I: Aeroxide P25 based composites. *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 147: 508.
- Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, vol. 163: 287.
- Lastre, Acosta, A. M., Cruz-González, G., Nuevas-Paz, L., Jáuregui-Haza, N. J., Teixeira, A. C. S. C. (2014). Ultrasonic degradation of sulfadiazine in aqueous

- solutions. *Environmental Science Pollution Research*, vol. 22, núm 2 : 918.
- Le, F., Brandl, D. W., Urzhumov, Y. A., Wang, H., Kundu, J., Halas, N. J. (2008). Metallic nanoparticle arrays: A common substrate for both surface-enhanced Raman scattering and surface-enhanced infrared absorption. *ACS Nano*, vol. 2, núm. 4: 707.
- Li, L., Xu, Z., Liu, F., Shao, Y., Wang, J., Wan, H., Zheng, S. (2010). Photocatalytic nitrate reduction over Pt-Cu/TiO₂ catalysts with benzene as hole scavenger. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 212, núm. 2: 113.
- Li, M., Zhou, S., Zhang, Y., Chen, G., Hong, Z. (2008). One-step solvothermal preparation of TiO₂/C composites and their visible-light photocatalytic activities. *Applied Surface Science*, vol. 254, núm. 13: 3762.
- Lin, W. C., Yang, W. D., Huang, I. L., Wu, T. S., Chung, Z. J. (2009). Hydrogen production from methanol/water photocatalytic decomposition using Pt/TiO_{2-x}N_x Catalyst. *Energy & Fuels*, vol. 23, núm. 4: 2192.
- Lu, Z. X., Zhou, L., Zhang, Z. L., Shi, W. L., Xie, Z. X., Xie, H. Y., Pang, D. W., Shen, P. (2003). Cell damage induced by photocatalysis of TiO₂ thin films. *Langmuir*, vol. 19, núm. 21: 876.
- Malato, S., Fernández-Ibañez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today*, vol. 147, núm. 1: 108.
- Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., Wake, H. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiology Letters*, vol. 29, núm. 1-2: 211.
- Mirkhani, V., Tangestaninejad, S., Moghadam, M., Habibi, M. H., Vartooni, A. R. (2009). Photodegradation of aromatic amines by Ag-TiO₂ photocatalyst. *Journal of the Iranian Chemical Society*, vol. 6, núm. 4: 800.
- Muneer, M., Bahnemann, D., Qamar, M., Tariq, M. A., Faisal M. (2005). Photocatalysed reaction of few selected organic systems in presence of titanium dioxide. *Applied Catalysis A: General*, vol. 289, núm. 2: 224.
- Nagahama, Y., Nakamura, M., Kitano, T., Tokumoto, T. (2003). Sexual plasticity in fish: possible target of endocrine disruption action. *Environmental Sciences: An International Journal of Environmental Physiology and Toxicology*, vol. 11, núm. 1: 73.
- Oller, I., Malato, S., Sánchez-Pérez J. A. (2011). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination—a review. *Science of the Total Environment*, vol. 409, núm. 20: 4141.
- Osterloh, F. E. (2008). Inorganic materials as catalysts for photochemical splitting of water. *Chemistry of Materials*, vol. 20, núm. 1: 35-54.
- Pal, A., Gin, K. Y. H., Lin, A. Y. C., Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: A review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*, vol. 408, núm. 24: 6062.
- Pan, Y., Deng, S., Polavarapu, L., Gao, N., Yuan, P., Sow, C. H. (2012). Plasmon-

- enhanced photocatalytic properties of Cu₂O nanowire au nanoparticle assemblies. *Langmuir*, vol. 28, núm. 33: 12304.
- Patsoura, A., Kondarides, D. I., Verykios X. E. (2007). Photocatalytic degradation of organic pollutants with simultaneous production of hydrogen. *Catalysis Today*, vol. 124, núm. 3: 94.
- Polshettiwar, V., Asefa, T. (2013). *Nanocatalysis: Synthesis and Applications*. NJ, USA: Wiley.
- Pradeep, T. (2009). Noble metal nanoparticles for water purification: a critical review. *Thin Solid Films*, vol. 517, núm. 24: 6441.
- Primo, A., Corma, A., García, H. (2011). Titania supported gold nanoparticles as photocatalyst. *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, núm. 3: 886.
- Rai, M., Yadav, A., Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, vol. 27, núm. 1: 76.
- Rauf, M. A., Ashraf S. S. (2009). Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution. *Chemical Engineering Journal*, vol. 151, núm. 1: 10.
- Rodríguez-González, V., Zanella, R., del-Ángel, G., Gómez, R. (2008). MTBE visible-light photocatalytic decomposition over Au/TiO₂ and Au/TiO₂-Al₂O₃ sol-gel prepared catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A*, vol. 281, núm. 1: 93.
- Rodríguez-Mozaz, S., Chamorro, S., Marti, E., Huerta, B., Gros, M., Sánchez-Melisió, A., Borrego, C. M., Barceló, D., Balcázar, J. L. (2015). Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river. *Water Research*, vol. 69: 234.
- Ryu, J., Choi, W. (2004). Effects of TiO₂ surface modifications on photocatalytic oxidation of arsenite: The role of superoxide radicals. *Environmental Science and Technology*, vol. 38, núm. 10: 2928.
- Saito, T., Iwase, T., Horie, J, Morioka, T. (1992). Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO₂ on mutants Streptococci. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 14, núm. 4: 369.
- Serpone, N., Maruthamuthu, P., Pichat, P., Pelizzetti, E., Hidaka, H. (1995). Exploiting the interparticle electron transfer process in the photocatalysed oxidation of phenol, 2-chlorophenol and pentachlorophenol: Chemical evidence for electron and hole transfer between coupled semiconductors. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 85, núm. 3: 247.
- Soares, O. S. G. P., Pereira, M. F. R., Örfao, J. M. M., Faria, J. L., Silva, C. G. (2014). Photocatalytic nitrate reduction over Pd-Cu/TiO₂. *Chemical Engineering Journal*, vol. 251: 123.
- Su, R., Tiruvalam, R., He, Q., Dimitratos, N., Kesavan, L., Hammond, C., López-Sánchez, J. A., Bechstein, R., Kiely, C. J., Hutchings, G. J., Besenbacher, F. (2012). Promotion of phenol photodecomposition over TiO₂ using Au, Pd and Au-Pd nanoparticles. *ACS Nano*, vol. 6, núm. 7: 6284.
- Suri, R. P., Thornton, H. M., Muruganandham, M. (2012). Disinfection of water using Pt- and Ag-doped TiO₂ photocatalysts. *Environmental Technology*, vol. 33, núm. 14: 1651.

- Van Doorslaer, X., Heynderickx, P. M., Demeestere, K., Debevere, K., Van Langenhove, H., Dewulf, J. (2012). TiO₂ mediated heterogeneous photocatalytic degradation of moxifloxacin: operational variables and scavenger study. *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 111: 150.
- Wang, D., Li, Y., LiPuma, G., Wang, C., Wang, P., Zhang, W., Wan, Q. (2015). Mechanism and experimental study on the photocatalytic performance of Ag/AgCl @ chiral TiO₂ nanofibers photocatalyst: The impact of wastewater components. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 285: 277.
- Wu, P. G., Imlay, J. A., Shang, J. K. (2010). Mechanism of Escherichia coli inactivation on palladium-modified nitrogen-doped titanium dioxide. *Biomaterials*, vol. 31, núm. 29: 7526.
- You, J. B., Zhang, X. W., Dong, J. J., Song, X. M., Yin, Z. G., Chen, N. F., Yan, H. (2009). Localized-surface-plasmon enhanced the 357 nm forward emission from ZnMgO films capped by Pt nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, vol. 4, núm. 10: 1121.
- Zhang, F., Jin, R., Chen, J., Shao, C., Gao, W., Li, L., Guan, N. (2005). High photocatalytic activity and selectivity for nitrogen in nitrate reduction on Ag/TiO₂ catalyst with fine silver clusters. *Journal of Catalysis*, vol. 232, núm. 2: 424.
- Zhang, H., Chen, G. (2009). Potent antibacterial activities of Ag/TiO₂ nanocomposite powders synthesized by a one-pot sol-gel method. *Environmental Science and Technology*, vol. 43, núm. 8: 2905.
- Zhou, X., Liu, G., Yu, J., Fan, W. (2012). Surface plasmon resonance-mediated photocatalysis by noble metal-based composites under visible light. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, núm. 40: 21337.
- Zhu, H., Chen, X., Zheng, Z., Ke, X., Jaatinen, E., Zhao, J., Guo, C., Xie, T., Wang, D. (2009). Mechanism of supported gold nanoparticles as photocatalysts under ultraviolet and visible light irradiation. *Chemical Communications*, vol. 48: 7524.
- Zou, S. I., Schatz, G. C. (2005). Silver nanoparticle array structures that produce giant enhancements in electromagnetic fields. *Chemical Physics Letters*, vol. 403, núm. 1-3: 62.

Nanotecnología, una alternativa para mejorar la calidad del agua

Silvia Lucila Gelover Santiago*

RESUMEN: La curiosidad, creatividad e ingenio, característicos de la especie humana, encuentran un paraíso al explorar mundos inimaginables, tal y como es el nanomundo. Tamaños microscópicos, formas exóticas y sobre todo fenómenos y mecanismos que sólo suceden a ese nivel constituyen un universo que ofrece nuevas posibilidades en cuanto a la aplicación de nanomateriales como posibles soluciones a los problemas de contaminación que cotidianamente enfrentamos. En este artículo se presenta una visión sobre las posibilidades de aplicación de nanomateriales como alternativa para mejorar la calidad del agua, especialmente cuando están presentes contaminantes orgánicos y microbiológicos.

PALABRAS CLAVE: nanocatalizadores, TiO_2 , fotocatalisis solar, tratamiento del agua con nanomateriales, desinfección fotocatalítica.

ABSTRACT: Curiosity, creativity and human wit, characteristics of mankind, find a paradise exploring unimaginable worlds, as is the nanoworld. Microscopic sizes, shapes and especially exotic phenomena and mechanisms that only happen at this level constitute a universe that offers new possibilities for the application of nanomaterials as alternative solutions to pollution problems that we face daily. This article presents a vision of the possibilities of application of nanomaterials as an alternative to improve water quality, especially when organic and microbiological contaminants are present.

KEY WORDS: Nanocatalysts, TiO_2 , solar photocatalysis, nanomaterials water treatment, photocatalytic disinfection.

El agua, un tesoro en riesgo

La nanotecnología es una nueva opción científica y tecnológica para mejorar nuestro ambiente.

En lo que respecta al agua, es bien sabido que este maravilloso recurso se encuentra con preocupantes limitantes para el uso del ser humano.

Las propiedades del agua hacen de ella una sustancia maravillosa, su poder disolvente representa a la vez una ventaja y una desventaja. Sus inusuales propiedades físicas, químicas y esa, tan especial, capacidad de formación de puentes de hidrógeno la hacen sumamente especial. Representa el crisol en donde se gestó la vida, el hogar de especies que regulan importantes ciclos biogeoquímicos. Receptáculo natural de infinidad de sustancia, se ha convertido, también, en el destino final de muchos de nuestros desechos.

* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso, Jiutepec, Morelos México. 62550. Correspondencia: (sgelover@tlaloc.imta.mx).

El ciclo del agua hace de ella el medio para el transporte de nutrientes, sales, gases y detritus. Y también, un medio de propagación de enfermedades: ha representado un vector de padecimientos, como el cólera y diversas afecciones gastrointestinales causadas por virus, bacterias y otros microorganismos patógenos que, aún hoy, son la causa de muchas muertes, sobre todo infantiles. Esto es particularmente doloroso en países como el nuestro en donde, debido a la pobreza y aislamiento en que aún viven millones de personas, resulta muy difícil el acceso a agua de buena calidad, situación que se agrava para las zona de alta sequía (como el norte del país) en donde, incluso el acceso a este recurso es muy limitado, sin importar su calidad.

La pequeña fracción de agua dulce de que disponemos para nuestras necesidades, se ve amenazado por situaciones de muy diversa naturaleza, como son el cambio climático que incrementa los problemas de intrusión salina, y la contaminación causada por las actividades humanas.

Son tres las grandes necesidades de nuestra actual sociedad: comida, agua y energía. Y visto de otra manera éstas tres son agua: 1) para la agricultura, ganadería e industria alimentaria; 2) agua como recurso en sí mismo, y, 3) agua como un insumo para obtener las crecientes cantidades de energía de las fuentes convencionales.

El progreso y la sofisticación de los productos químicos que hemos incorporado al ambiente es tal que impide el funcionamiento de los sistemas naturales de depuración así como de nuestros mismos sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales. Ha llegado el momento en que los sistemas de depuración tradicionales, basados en sistemas biológicos, resultan insuficientes.

Los nanomateriales, una opción de tratamiento

Así que nos hemos visto obligados a emplear métodos alternativos, los llamados procesos avanzados de oxidación son quizá el ejemplo más evidente. En adición a esto, los tratamientos de purificación y desinfección del agua han encontrado en los nanomateriales alternativas no previstas hasta hace poco tiempo. Y el uso de materiales nanoparticulados, iniciado en la década de los años 70 se ha desarrollado a un ritmo exponencial.

En su artículo sobre nanotecnología, Theron y colaboradores (2008) dicen de la misma que “es la ingeniería y el arte de manipular la materia a nanoescala, es decir, entre 1 y 100 nanómetros”, y presentan un panorama del potencial de utilizar nuevos materiales para el tratamiento de agua (superficial, subterránea o bien de aguas subterráneas que se hallen contaminadas), para la detección de sustancias disueltas en muy baja concentración, o bien para la desinfección.

El tratamiento del agua se puede visualizar en dos grandes esferas, el tratamiento del agua para su potabilización y el tratamiento de las aguas

residuales. Los contaminantes que es necesario remover del agua son de manera genérica metales, agentes inorgánicos, agentes orgánicos y microorganismos patógenos.

Metales y metaloides disueltos, riesgos y alternativas de tratamiento

En relación al tratamiento del agua potable, eliminar la presencia de metales como el cromo, cadmio, cobalto, mercurio, zinc y cobre, tiene relevancia por la toxicidad que tienen. Lo mismo sucede con el arsénico, metaloide que, a diferencia de los metales mencionados se encuentra en las fuentes de abastecimiento de agua potable, de manera muy importante, debido a una contaminación natural, es decir, a que el agua subterránea adquiere esta sustancia al estar en contacto con minerales que lo contienen. Países en todo el mundo enfrentan el reto de eliminar arsénico de sus aguas subterráneas pues la ingesta de este metaloide causa problemas de salud afectando varios órganos en diferentes niveles (piel, glóbulos rojos, médula, hígado, puede causar cáncer en piel, riñones y vejiga) alterando así el bienestar de la población. En su revisión, Sharma *et al.*, (2009) presentan un panorama acerca de los avances que se tienen en la aplicación de —como ellos llaman a los nanomateriales—, “estos exóticos materiales” en la remediación de agua.

La técnica tradicional para remover metales del agua es la adsorción. El adsorbente por excelencia es el carbón activado. Este material encuentra su símil en el mundo microscópico en los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés). Estas nanoestructuras fueron reportadas inicialmente en 1991, hace poco más de veinte años. Ya sea en forma de nanotubos de una sola o múltiples paredes, estos materiales presentan propiedades únicas tales como su alta estabilidad química y gran área superficial, por lo que múltiples trabajos han tenido como objetivo investigar su aplicación en el tratamiento de aguas residuales conteniendo iones metálicos. Los nanotubos de carbono además de adsorbentes pueden ser soportes para otros materiales adsorbentes.

El empleo de nanopartículas de hierro zerovalente (nZVI, por sus siglas en inglés) en la remediación de sitios contaminados con cromo, nitratos, percloratos o con disolventes organoclorados es otro ejemplo de la aplicación de estos materiales para remediar el agua subterránea. Durante los últimos 15 años, se ha investigado el uso de hierro metálico nanoparticulado como una nueva herramienta para el tratamiento de agua y suelo contaminados. La tecnología ha alcanzado un estatus comercial en muchos países alrededor del mundo; sin embargo, aún debe obtener una aceptación más amplia (Crane y Scott, 2012). Los factores clave a atender incluyen: la preocupación por su destino a largo plazo, la transformación y la ecotoxicidad de nZVI en sistemas ecológicos, la falta de estudios comparables para diferentes materiales nZVI y estrategias de implementación. Algunas investigaciones han

puesto de relieve nuevas preocupaciones, como la posibilidad de la recuperación de la movilidad de los metales pesados y radionúclidos después de periodos prolongados, así como la importancia fundamental de ser capaces de predecir, con exactitud, los procesos a largo plazo en los aspectos físicos, químicos y en el destino biológico de los sitios contaminados tras el tratamiento con nZVI.

Contaminantes orgánicos

Con respecto a la presencia de contaminantes orgánicos, el abanico es muy amplio pues se pueden encontrar en el agua desde plaguicidas, producto de las actividades agrícolas y domésticas; residuos de fármacos y productos de cuidado personal, algunos de los cuales causan alteraciones en el sistema endocrino, por lo que son llamados disruptores endocrinos. También es posible encontrar una amplia variedad de productos químicos empleados en la industria: disolventes, plastificantes, colorantes, subproductos de la combustión, subproductos de la cloración; en fin, un mar de compuestos que contaminan nuestras aguas.

Tradicionalmente, las metodologías utilizadas en el tratamiento del agua incluyen procesos como coagulación, floculación, sedimentación, filtración, adsorción y oxidación. Sin embargo, en ocasiones estas tecnologías resultan insuficientes para lograr la remoción de los contaminantes orgánicos, por lo que aún en los efluentes de plantas de tratamiento es posible detectar la presencia de estos compuestos.

Nanomateriales, características, funciones y mecanismos

La variedad de nanomateriales ahora disponible cubre diversas posibilidades de tratamiento. Muchos de los tratamientos convencionales se han visto mejorados por la incorporación del uso de nanomateriales. Los tratamientos convencionales de adsorción, oxidación y separación se ven hoy potenciados y han sido transformados por el uso de nanosorbentes, nanocatalizadores y nanopartículas bioactivas, gracias a las características únicas que les imparte su tamaño, como son una gran área superficial por unidad de volumen, significativas propiedades físicas y químicas y efectos cuánticos que ocurren sólo a nanoescala. La disminución en el tamaño de partícula tiene dos beneficios significativos. Por un lado la alta densidad superficial de sitios activos disponibles para la adsorción de sustratos, consistente con la alta relación área superficial/volumen típica de las nanopartículas, hace posible incrementar la velocidad de las fotorreacciones. Por otro lado, para el caso de los semiconductores la energía de brecha depende de efectos cuánticos, lo que permite el diseño de materiales con energías de brecha seleccionadas, y con ello de propiedades redox específicas. A través de la síntesis de nanocristales de alta calidad también se logra una máxima separación del par hueco-electrón.

De los nanocatalizadores empleados en el tratamiento de agua, el más utilizado es y ha sido el dióxido de titanio, también conocido como titania. La titania existe en tres formas cristalinas: anatasa, rutilo y brookita, además de su fase amorfa. Sólo las dos primeras tienen utilidad como fotocatalizadores.

Los trabajos en cuanto al uso del dióxido de titanio para la eliminación de contaminantes tanto biológicos como químicos crece día con día y la variedad de sustancias y entes biológicos que son abordados por estas metodologías también crece.

Nanomateriales y fotocátalisis solar

Una de las vertientes es el uso de dióxido de titanio nanoparticulado en combinación con energía solar, en donde se aprovecha un recurso natural, inagotable para fines prácticos y disponible para una amplia zona del planeta, con una novedosa variedad de materiales denominados nanocatalizadores. El dióxido de titanio presenta propiedades que lo hacen un material ciertamente relevante. Es un material relativamente abundante, por lo que su costo resulta conveniente, no es tóxico, presenta baja reactividad química, tiene buena fotoestabilidad y es estable en un amplio intervalo de pH, es decir, puede trabajar bien en medios ácidos, pero también en medios básicos. Al activarse con energía UV, genera especies altamente reactivas que son las responsables de su alto poder oxidante, mismo que es aprovechado para realizar la transformación de moléculas que de otra manera sería muy difícil oxidar. Al ser un catalizador, el dióxido de titanio sirve solamente como mediador en las reacciones químicas, sin transformarse, lo que representa una ventaja pues en general se puede reutilizar una y otra vez.

Una de las desventajas, sin embargo, es que la proporción realmente útil del espectro solar para activar a este fotocatalizador es apenas del 5% en el mejor de los casos, por lo que existe una gran cantidad de esfuerzo encaminado a la modificación del semiconductor de tal suerte que sea posible aprovechar una mayor fracción de la radiación solar.

Al ser un semiconductor, éste requiere de energía mayor que su energía de brecha para generar el par electrón-hueco, base de su funcionalidad. Bajo la radiación adecuada, el dióxido de titanio experimenta el salto de uno de sus electrones del nivel de valencia al nivel de conducción, dando origen al par hueco-electrón. El hueco captura un electrón de las especies cercanas; probabilísticamente es más posible su reacción con agua al hallarse en un medio acuoso, con lo que se genera una especie denominada radical hidroxilo, es decir, una molécula de agua a la que se le ha abstraído un electrón y que simultáneamente libera un protón (el protón se asocia fácilmente con otras moléculas de agua del medio), en tanto que el radical formado, con un potencial de oxidación muy alto (2.8 eV), apenas por debajo del flúor (3.03 eV), tiende a reaccionar con cualquier especie oxidable presente. Para

nuestra ventaja muchos de los contaminantes son oxidables por el radical hidroxilo, o bien son oxidados directamente por los huecos cuando estas especies se encuentran adsorbidas sobre el catalizador. En el otro extremo, el electrón, ahora en la capa de valencia, puede dar lugar, al reaccionar con oxígeno, a la formación del radical superóxido ($O_2\cdot$), y en presencia de peróxido de hidrógeno al radical perhidroxilo ($HOO\cdot$). Los radicales así formados reaccionan con moléculas adsorbidas a la superficie del catalizador resultando en la hidroxilación, dechloración, oxidación e incluso mineralización de las moléculas orgánicas.

Mecanismo de la fotocatalisis

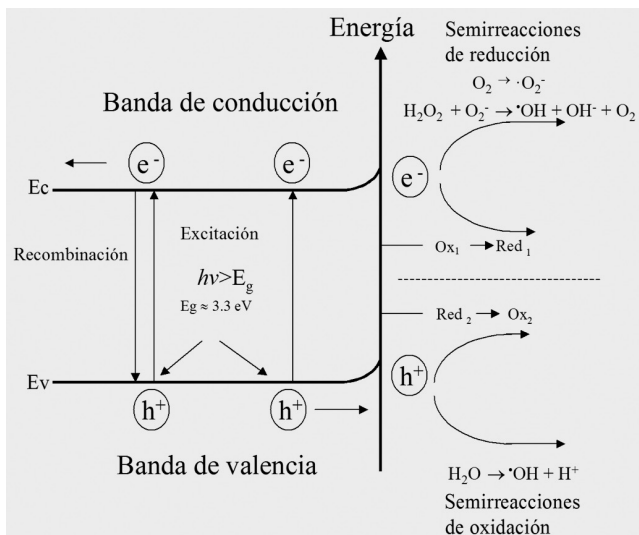
De acuerdo con Kamat (1996), los procesos fotoinducidos que siguen a la excitación a través de la brecha energética de un semiconductor se pueden escribir de la siguiente manera: Después de la excitación, los portadores de carga inicialmente libres quedan atrapados en sitios denominados defectos, estos portadores de carga pueden sufrir recombinación radiativa y no radiativa. La acumulación de carga en el diminuto espacio de un semiconductor coloidal es importante porque mejora la eficiencia de las reacciones redox interfaciales. Estudios especializados han mostrado que en la anatasa, los electrones fotogenerados son atrapados en Ti^{4+} dentro de la masa del semiconductor, en tanto que los grupos hidroxilo básicos sobre la superficie del TiO_2 , pueden ser considerados trampas profundas para los huecos de la banda de valencia. El hueco queda en los grupos hidroxilo superficiales, por lo que puede reaccionar con las sustancias orgánicas presentes en el medio.

La separación efectiva de las cargas fotogeneradas puede conseguirse, por ejemplo, por medio de la deposición de metales en la superficie del semiconductor (Pradeep, 2009; Tada *et al.*, 2009). La presencia de depósitos metálicos sobre la superficie del semiconductor altera las propiedades eléctricas de éste, puesto que se crean nuevas interfaces de tipo metal-semiconductor.

El uso de fotocatalizadores soportados, con aplicación de potenciales eléctricos permite separar las reacciones anódicas y catódicas, y reducir drásticamente la recombinación electrón-hueco (Jiang *et al.*, 2007). A pesar de sus limitaciones, los procesos fotocatalíticos basados en dióxido de titanio han alcanzado un elevado grado de madurez tecnológica. Si bien el rendimiento cuántico (número de eventos producidos por fotón absorbido) suele ser bajo en términos de conversión química, los rendimientos obtenidos, en términos de conversión en función del tiempo, aprovechando luz solar o iluminación con lámparas, son adecuadamente elevados.

La fotocatalisis solar está fundamentada en la absorción de luz por compuestos semiconductores como el dióxido de titanio, que causan cambios energéticos a nivel molecular, mismos que promueven la generación del radical hidroxilo, la generación de ésta y otras especies relevantes en el proceso de oxidación, se ilustra en la figura 1.

FIGURA 1. Esquema de los procesos fundamentales en fotocatalisis heterogénea.



Fuente: Elaboración propia.

Las principales reacciones que ocurren en el sistema son:

Foto-excitación: $\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow e^- + h^+$ (generación del par electrón-hueco)

Atrapamiento de portadores de carga (electrones): $e^-_{\text{CB}} \rightarrow e^-_{\text{TR}}$

Atrapamiento de portadores de carga (huecos): $h^+_{\text{VB}} \rightarrow h^+_{\text{TR}}$

Recombinación electrón-hueco: $e^-_{\text{TR}} + h^+_{\text{VB}} (h^+_{\text{TR}}) \rightarrow e^-_{\text{CB}} + \text{calor}$

Captura de especies fotoexcitadas: $(\text{O}_2)_{\text{ads}} + e^- \rightarrow \text{O}_2^{\bullet -}$

Oxidación de hidroxilos: $\text{OH}^- + h^+ \rightarrow \cdot\text{OH}$

Fotodegradación de orgánicos (acción de radicales hidroxilo):



Fotodegradación de orgánicos (acción de foto-huecos):



Protonación de superóxidos: $\text{O}_2^{\bullet -} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{HOO}^{\bullet}$

Captura de e^- fotogenerados: $\text{HOO}^{\bullet} + e^- \rightarrow \text{HO}_2^-$

Formación de H_2O_2 : $\text{HOO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$

donde e^-_{TR} y h^+_{TR} representan al electrón atrapado en la superficie de la banda de valencia y al hueco atrapado en la superficie de la banda de conducción, respectivamente.

Evitar la recombinación del par electrón hueco constituye un área de investigación importante en fotocatalisis heterogénea y también para otras

aplicaciones de semiconductores. La disminución de la recombinación se ha conseguido de diversas maneras: mediante iluminación periódica controlada —dando tiempo a que ocurran procesos limitantes de la velocidad antes de introducir más fotones en el sistema—, a través de la degradación de compuestos orgánicos asistida electroquímicamente (Jiang *et al.*, 2007) en la cual se extraen los electrones fotogenerados del TiO_2 mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, aumentando de esta manera el tiempo de vida de los huecos o dopando el TiO_2 con metales como Ag, Au, Cu, Fe, Pt, Sn, Zn, Fe, o especies con nitrógeno, azufre o carbono, dado que según sus características y concentración, pueden actuar como mediadores de la transferencia de carga interfacial o como centros de recombinación de las cargas fotogeneradas (Choi *et al.*, 1994; Sunada *et al.*, 2003; Zaleska, 2008). Otra aproximación consiste en el uso de materiales mixtos (compositos), como $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ o TiO_2/ZnO , que permiten una separación eficiente de las cargas fotogeneradas, mediante la acumulación de los electrones en uno de los materiales, y de los huecos en el otro.

De manera alterna, parte de la investigación actual se encamina a modificar el catalizador de tal manera que absorba la radiación visible. Una posibilidad es la fotosensibilización con especies inorgánicas, como el cloruro de platino IV (Tada *et al.*, 2009), o el nitrógeno, el cual ocupa sitios intersticiales y disminuye el salto de banda del TiO_2 . También es posible modificar la superficie del TiO_2 por adsorción de moléculas orgánicas capaces de absorber luz de la región visible del espectro, a este proceso se denomina sensibilización.

Preparación y ejemplo de uso de fotocatalizadores

Las nanopartículas de la forma comercial más utilizada de TiO_2 , hasta hace poco Degussa P-25, ahora Evonik, son difíciles de separar una vez que se han utilizado. Con un tamaño de partícula de aproximadamente 30 nm, no se pueden separar del agua por métodos simples como decantación. Se requiere emplear energía, es decir, es necesario centrifugar o realizar una filtración utilizando un tamaño de poro cerrado. Esto justifica que se busque la posibilidad de inmovilizar a las nanopartículas.

Numerosas técnicas han sido desarrolladas para lograr el depósito de películas uniforme y firmemente adheridas a diversas superficies. Entre ellas están: el rocío pirolítico (Martínez *et al.*, 2003), el bombardeo iónico por magnetron de Radio Frecuencia en inglés RF *magnetron sputtering*, el depósito por centrifugación (*spin coating*), el depósito sol-gel por inmersión o *dip coating*, el depósito electroforético, y el depósito en capa atómica (*Atomic Layer Deposition*), entre otros. Varias de estas técnicas requieren de equipos sofisticados: cámaras de vacío, aceleradores electromagnéticos y otros que implican altos costos y personal altamente capacitado para la preparación de estos materiales.

El sistema *dip coating* ofrece un alternativa relativamente simple y económica para preparar películas por inmersión. Para ello, se prepara un sol con un precursor orgánico de titanio, generalmente un alcóxido, que es hidrolizado para generar una mezcla susceptible de ser depositada en una superficie conveniente, tal como un vidrio de borosilicato tipo Pyrex® con bajo contenido de hierro, que resulta ventajoso al ser un material transparente a buena parte de la radiación solar (Gelover *et al.*, 2004). Para el depósito se utiliza un sistema que pueda retirar el sustrato a depositar a una rapidez constante y controlada. La velocidad con que se retira el sustrato del sol determina el espesor de la película formada. El espesor es una función de la raíz cuadrada de la velocidad de extracción de la película por lo que se recomienda utilizar una velocidad baja de extracción de los sustratos, para obtener películas delgadas.

Una desventaja de trabajar con TiO₂ inmovilizado es que se encuentran restringidas, hasta cierto punto, las cantidades del catalizador que se pueden manejar en un sistema determinado. Sin embargo, lo práctico que resulta el manejo del material inmovilizado debe ser valorado en su justa dimensión, pues de esta manera el sistema no genera lodos o residuos que después requieran algún tratamiento y el sistema fotocatalítico puede en principio trabajar de manera continua o al menos semicontinua.

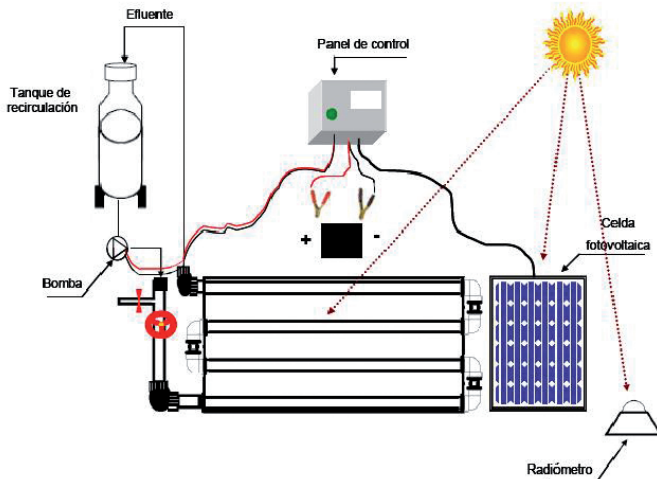
A continuación se muestra el esquema típico de un sistema fotocatalítico en el que se emplea luz solar para el tratamiento de agua contaminada con sustancias no biodegradables. En este caso dentro del fotorreactor se ha colocado el fotocatalizador inmovilizado, de otra manera dentro de él se tendría una suspensión, típicamente lechosa del catalizador Degusa-P25, o alguna otra forma inmovilizada del fotocatalizador.

El sistema consta de un circuito hidráulico que permite el tratamiento de lotes de 20 L de agua. Es un sistema autónomo (figura 2), provisto de una celda solar que provee la energía necesaria para bombear el fluido desde el depósito que contiene el agua a tratar hacia los tubos fotorreactores. En este caso se empleó una forma inmovilizada de dióxido de titanio sobre pequeños cilindros de tubo Pyrex® (figura 3). Dentro de los tubos se colocó una varilla de vidrio sobre la cual se sujetaron los cilindritos de vidrio recubiertos con el catalizador, esto fue necesario ya que el agua podía arrastrar los cilindritos provocando su acumulación hacia los extremos de los tubos.

Los tubos se encuentran colocados en el centro de una involuta construida con aluminio. La superficie metálica refleja los rayos del sol incidentes. La apertura de la involuta permite tener una concentración solar de uno cuando se coloca inclinada en dirección norte-sur tantos grados como sea la latitud del sitio en que se trabaja.

Como ya se expuso, para la aplicación práctica del dióxido de titanio en el tratamiento de agua, se requiere algo más que el nanocatalizador, se requiere de un colector solar o fotorreactor y ello implica la selección o preparación de materiales reflejantes adecuados para la colección de fotones,

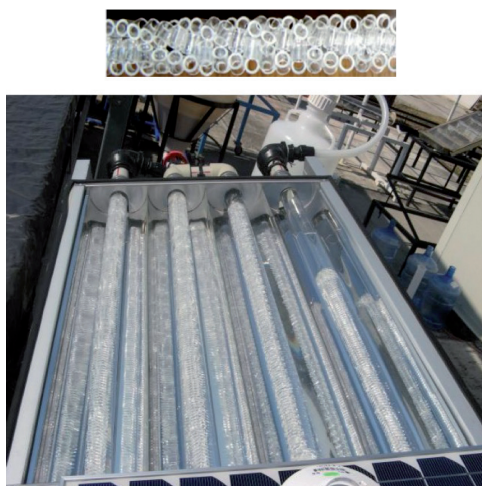
FIGURA 2. Esquema de un sistema fotocatalítico empleado durante pruebas de degradación de compuestos no biodegradables (por ejemplo fármacos o plaguicidas).



Fuente: Elaboración propia.

materiales suficientemente transparentes que permitan pocas pérdidas para el máximo aprovechamiento de la energía solar, además de resolver el problema de la recuperación del nanocatalizador. Como se ve, hay muchos aspectos prácticos que deben resolverse y aunque hay muchos grupos alrededor del mundo en la búsqueda de soluciones, lo cierto es que esta opción

FIGURA 3. Fotografía de los tubos fotorreactores, se aprecian en el interior los anillos de vidrio, soporte del catalizador. Arriba detalle del arreglo de los anillos.



Fuente: Elaboración propia.

tecnológica aún presenta retos que no serán superados fácilmente en el corto plazo. Esto debe ser una motivación para las jóvenes generaciones que en poco tiempo enfrentarán problemas más agudos que los actuales.

De manera resumida se puede afirmar que las principales limitaciones para el uso generalizado del dióxido de titanio en el tratamiento de agua son:

1. La baja porción de luz UV en el espectro solar de la luz que llega a la superficie de la Tierra.
2. La dificultad operativa del uso del fotocatalizador en forma de polvo, ya que no es fácil de separar del líquido.
3. La alta tendencia de los electrones fotoexcitados de regresar a su estado basal conocida como recombinación.
4. Los altos costos que aún tiene esta opción tecnológica para su aplicación cotidiana.

Desinfección fotocatalítica

Otra relevante aplicación de los nanomateriales es la desinfección. Métodos tradicionales como la cloración conllevan la formación de subproductos tóxicos, por lo que es deseable hallar métodos de desinfección alternos. En nuestro laboratorio se tuvo una experiencia exitosa cuando se aplicó un material inmovilizado para la desinfección de agua proveniente de un manantial contaminada con microorganismos coliformes fecales y totales (Gelover *et al.*, 2006).

En la literatura se pueden encontrar trabajos sobre la destrucción de diversos microorganismos mediante nanomateriales. Se ha abordado la destrucción de bacterias como *E. coli* y *Enterobacter cloacae* (Ede *et al.*, 2012), protozoarios (Huevos de helminto; Leal *et al.*, 2006. Esporas de *Clostridium perfringens*, Dunlop *et al.*, 2008), y otros microorganismos incluyendo hongos microscópicos, quistes (Lonen *et al.*, 2005) e incluso virus (Sang *et al.*, 2007, Liga *et al.*, 2013).

Pero éste es sólo un pequeño ejemplo de los múltiples trabajos que se han publicado, en donde se han realizado pruebas para inactivar virus, bacterias, y otros organismos patógenos presentes en el agua (Theron *et al.*, 2008).

Como comentario final se puede decir que basta revisar la literatura para darnos cuenta de la variedad de estudios que se desarrollan empleando nanomateriales como alternativas ya sea para la detección, mejorando el monitoreo de la calidad del agua, o su tratamiento (desinfección o eliminación de sustancias tóxicas). Las ventajas del uso de estos materiales parecen superar sus posibles riesgos, aunque será muy importante dar seguimiento a la evolución del conocimiento alrededor de los usos y riesgos de su aplicación a mayor escala. A pesar de que ya se cuenta con algunas aplicaciones comerciales, los retos que se tienen son aún importantes y nuevas aportaciones nos irán permitiendo aprovechar al máximo las extraordinarias propiedades que nos ofrece esta vertiente científicotecnológica.

Conclusiones

El surgimiento de los nanomateriales ofrece una alternativa para enfrentar los retos que representa la contaminación de nuestro ambiente. Este artículo resume, de manera muy breve, información sobre algunos nanomateriales aplicados al tratamiento de agua, muestra el mecanismo que explica el funcionamiento de los nanocatalizadores fotocatalíticos y algunos ejemplos de su aplicación.

El uso a gran escala de estos últimos materiales, aún no es posible debido a diversas limitaciones que aún existen en el ámbito del aprovechamiento de la energía solar, en el campo de desarrollo de reactores y algunos otros aspectos como son encontrar la manera de manejarlos y reutilizarlos fácilmente. No hay que olvidar que paralelamente a sus beneficios, es posible que su uso represente un riesgo, por lo que la investigación sobre la aplicación de estos materiales es un tema que estará vigente en las próximas décadas.

Bibliografía

- Brame J., Li Q, Alvarez P. J.J. (2011). Nanotechnology-enabled water treatment and reuse: emerging opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11): 618-624.
- Choi W., Termin A. y Hoffmann M. R. (1994). The role of metal ion dopants in quantum-sized TiO₂: Correlation between photoreactivity and charge carrier recombination dynamics. *J. Phys. Chem.* 98: 13669-13679.
- Crane R.A., Scott T.B. (2012). Nanoscale zero-valent iron: Future prospects for an emerging water treatment technology. *Journal of Hazardous Materials*, vols. 211-212: 112-125.
- Dunlop P. S. M., McMurray T. A., Hamilton J. W. J. y Byrne J. A. (2008). Photocatalytic inactivation of *Clostridium perfringens* spores on TiO₂ electrodes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, vol. 196, núm. 1: 113-119.
- Ede S., Hafner L., Dunlop P., Byrne J. y Will G. (2012). Photocatalytic disinfection of bacterial pollutants using suspended and immobilized TiO₂ powders. *Photochemistry and Photobiology*, vol. 88, núm. 3: 728-735.
- Gelover S., Gómez L. A., Reyes K. y Leal Ma. T. (2006). Practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight. *Water Research*, 40: 3274-3280.
- Gelover S., Mondragón P. y Jiménez G. A. (2004). Titanium dioxide sol-gel deposited over glass and its application as a photocatalyst for water decontamination. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem*, 165 (1-3): 241-246.
- Jiang D., Zhang S., Zhao H. (2007). Photocatalytic degradation characteristics of different organic compounds at TiO₂ nanoporous film electrodes with mixed anatase/rutile phases. *Environ Sci Technol*, enero 1; 41(1): 303-8.

- Kamat P. V. (1997). Composite semiconductor nanoclusters. *Semiconductor Nanoclusters - Physical*, Prashant V. Kamat and Dan Meisel (eds.) *Chemical, and Catalytic Aspects*. Studies in Surface Science and Catalysis. Series, vol. 103: 1-474.
- Liga M. V., Maguire-Boyle S. J., Jafry H. R., Barron A. R., Li Q. (2013). Silica decorated TiO₂ for virus inactivation in drinking water-simple synthesis method and mechanisms of enhanced inactivation kinetics. *Environ Sci Technol*, junio 18; 47(12): 6463-70.
- Lonnen J., Kilvington S., Kehoe S. C., Al-Touati F., McGuigan K. G. (2005). Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. *Water Res*, 39(5): 877-83.
- Martínez A. I., Acosta D. López A. (2003). Efecto del contenido de Sn sobre las propiedades físicas de películas delgadas de TiO₂. *Superficies y Vacío*, 16(1): 5-9, marzo.
- Pradeep T. (2009). Noble metal nanoparticles for water purification: A critical review. *Thin Solid Films*, 517(24): 6441-6478.
- Sang X., Phan T. G., Sugihara S., Yagyu F., Okitsu S., Maneekarn N., Müller W. E., Ushijima H. (2007). Photocatalytic inactivation of diarrheal viruses by visible-light-catalytic titanium dioxide. *Clin Lab.*, 53(7-8): 413-21.
- Sharma Y. C., Srivastava V., Singh V. K., Kaul S. N. y Wen C. H. (2009). Nano-adsorbents for the removal of metallic pollutants from water and wastewater. *Environmental Technology*, 30(6): 583-609.
- Sunada, K., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2003). Bactericidal activity of copper-deposited TiO₂ thin film under weak UV light illumination. *Environ. Sci. Technol*, 37: 4785-4789.
- Tada, H., Kiyonaga, T., Naya, S. (2009). Rational design and applications of highly efficient reaction systems photocatalyzed by noble metal nanoparticle-loaded titanium (IV) dioxide. *Chem. Soc. Rev.*, 38, 1849-1858.
- Theron J., Walker J. A. y Cloete T. E. (2008). Nanotechnology and water treatment: applications and emerging opportunities. *Critical Reviews in Microbiology*, 34(1): 43-69.
- Yang D., Sarina S., Zhu H., Liu H., Zheng Z., Xie M., Smith S. V. y Komarneni S. (2011). Capture of radioactive cesium and iodide ions from water by using titanate nanofibers and nanotubes. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(45): 10594-10598.
- Zaleska A. (2008). Doped-TiO₂: A Review. *Recent Patents on Engineering*, 2: 157-164.

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.

Nanotecnología en procesos ambientales y remediación de la contaminación

Rafael Vazquez-Duhalt*

RESUMEN: El desarrollo de la nanotecnología ha abierto muchas oportunidades para la transformación de los procesos productivos. Sabiendo que los grandes retos de la humanidad son el de tener procesos productivos amigables al ambiente y energéticamente económicos, es de esperarse que la introducción de la nanotecnología contribuirá al cumplimiento de estas dos metas. Sin embargo, en la actualidad la sociedad sigue contaminando el ambiente poniendo en riesgo los diferentes ecosistemas y su misma salud. Existe la imperiosa necesidad de reducir, ver eliminar, el daño al ambiente y de limpiar y restaurar los sitios ya contaminados. En esta impostergable tarea, la nanotecnología tiene aún algo que decir y sobre todo hacer.

PALABRAS CLAVE: Ambiente, biorremediación, contaminación, remediación, nanopáticas.

ABSTRACT: Nanotechnology development has opened new opportunities for the transformation of production processes. It is well known that the main challenge of human kind is the design new productive processes that should be environment friendly and energetically efficient. Doubtless, nanotechnology will contribute to reach these goals. Nevertheless, the human activities are still polluting the environment, increasing the risk for several ecosystems and the public health. There is the urgent need to reduce and stop the environmental damage and to clean up the polluted sites as well. Nanotechnology could and should be applied for this important task.

KEYWORDS: Environment, pollution, bioremediation, decontamination, nanoparticles.

La conservación de los suelos, aguas y calidad de aire es uno de los retos más importantes del siglo XXI. La sociedad se ha caracterizado, especialmente en los últimos 200 años en alterar los ecosistemas con la dispersión de grandes cantidades de contaminantes derivados de las actividades industriales, del transporte, así como de cada uno de los aspectos de la actividad humana. Los cuatro retos más importantes de las ciencias ambientales son: 1) prevenir la contaminación con la puesta en marcha de nuevos procesos industriales menos o no contaminantes; 2) encontrar métodos de remediación y restauración de los sitios contaminados eficientes y de bajo costo; 3) predecir con anticipación el impacto ambiental de los nuevos productos lanzados al mercado, y, 4) contar con métodos de detección de los contaminantes con alta sensibilidad y poder detectar tempranamente las fuentes de contaminación

* Grupo de Bionanotecnología, Centro de Nanociencias y Nanotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México. Km 107 carretera Tijuana-Ensenada. Ensenada, Baja California 22860. Correspondencia: (rvd@cryn.unam.mx).

para evitar un daño. Paradójicamente, la solución a estos grandes desafíos se pudiera encontrar en la tecnología de materiales extremadamente diminutos: la nanotecnología.

La nanotecnología es la revolucionaria ciencia de manipulación de los materiales a su nivel molecular o atómico que ha impactado ya a todas las disciplinas, como la química, la física, la biología y la ingeniería. Sin duda, la nanotecnología podrá participar en la mejora de los procesos ambientales. Sin embargo, como toda nueva tecnología, existe el riesgo fundamentado de que también podrá crear nuevos problemas ambientales.

Prevención de la contaminación

La prevención de la contaminación se refiere a la reducción o eliminación de las fuentes que originan los contaminantes. Las estrategias de reducción incluyen y usan materia prima renovable y menos tóxica, y el diseño de nuevos productos con procesos de producción amigables al ambiente. La “ecología industrial” es una nueva rama de la ingeniería que pretende rediseñar y sustituir todos los procesos productivos que actualmente utilizamos, para producir la gran diversidad de satisfactores, por procesos limpios, sustentables y de bajo o nulo impacto ambiental.

La nanotecnología ya ha demostrado que puede incidir en la reducción de la contaminación. Por ejemplo, la tecnología basada en nanotecnología de las lámparas de luz caseras ha disminuido en 10% el consumo de energía en Estados Unidos, con ahorros de más de 100 mil millones de dólares anuales y sobre todo reduciendo las emisiones de carbón en 200 millones de toneladas cada año (National Nanotechnology Initiative, 2001).

FIGURA 1. Investigadores de la empresa OSRAM han realizado nano LED de luz blanca en tres dimensiones. Dos pequeñas agujas energizadas son presionadas en contra de la superficie del chip.

Fuente:

<http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/innovation/innovation-news-greater-productivity-and-luminous-efficacy-with-nanotechnology/index.jsp>.

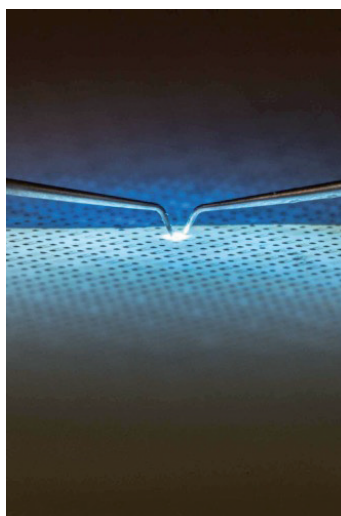
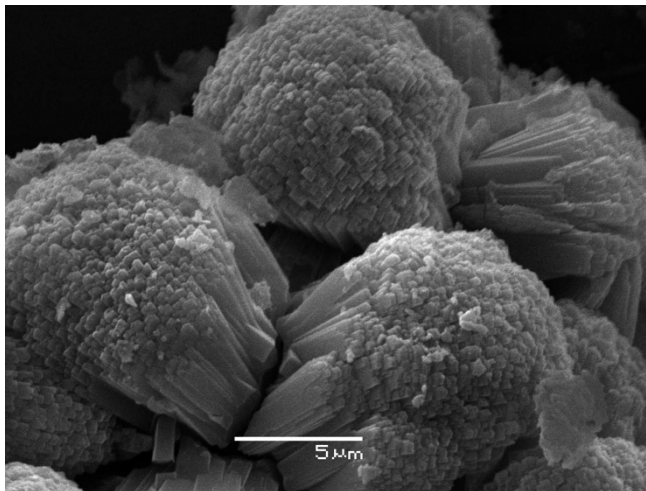


FIGURA 2. Microfotografía TEM de una zeolita.

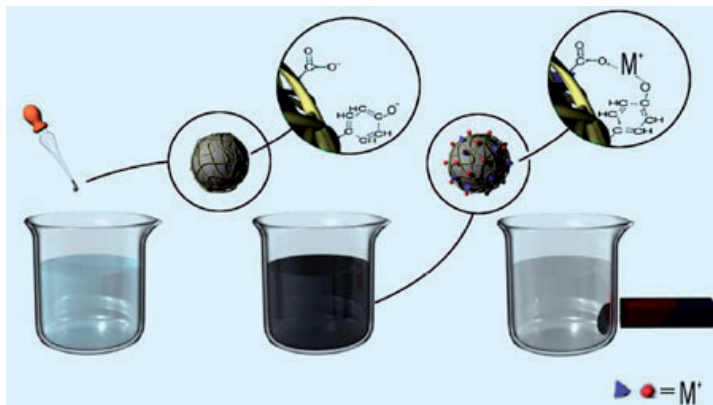


Fuente: <<http://www.institutogea.cl/patentes/>>.

Los catalizadores nanoestructurados pueden hacer que los procesos de síntesis sean más eficientes, reduciendo subproductos contaminantes y el consumo de energía. Un ejemplo es el uso para separación y catálisis de las zeolitas (aluminosilicatos nano y microporosos). Estas zeolitas han sido usadas para oxidar hidrocarburos aromáticos, como el tolueno para producir benzaldehído (Panov *et al.*, 2000). La reacción de oxidación se inicia con la presencia de luz visible, reduciendo el consumo de energía para la catálisis y se eliminan reacciones secundarias indeseables incrementando el rendimiento del producto deseado. El uso de las zeolitas nanoestructuradas presentó una conversión del 85% a benzaldehído, comparado con sólo un 35% cuando se usaron zeolitas convencionales.

Por otro lado, el surgimiento de la bionanotecnología, que combina las propiedades de los materiales biológicos con las propiedades de los materiales nanoestructurados, ha abierto nuevos horizontes y aplicaciones de la nanotecnología. La producción de nanomateriales con biopolímeros o materiales inspirados en los sistemas biológicos es un ejemplo en la fabricación de dispositivos microelectrónicos ambientalmente amigables. Se estima que para fabricar un microchip de 32 megabytes y que sólo pesa 2 g se requiere 1.7 kg de petróleo y productos químicos y 32 litros de agua (Williams *et al.*, 2002). Usando la nanolitografía biomolecular puede sustituir la forma de fabricar chips semiconductores. Usando esta técnica se produjeron arquitecturas de chip bien definidas sobre un templado de biopolímero (polilisina) en donde nanopartículas metálicas fueron esparcidas en líneas y mallas a

FIGURA 3. Nuevo concepto para remoción de metales pesados con nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 cubiertas de ácido húmico.



Fuente: <<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=6810.php>>.

temperatura ambiente. Estos chips semiconductores son totalmente biodegradables (Wybourne *et al.*, 1999).

La nanotecnología también se puede usar para remplazar materiales tóxicos de uso masivo actualmente. Por ejemplo, con anterioridad los monitores de computadora estaban hechos de tubos de rayos catódicos (CRT) y contenían muchos materiales tóxicos. La fabricación de nuevos monitores de cristal líquido, que son más pequeños, consumen menos energía y no contienen plomo (Socolof *et al.*, 2001). El uso de los nanotubos de carbono en los monitores para computadora podrían, en un futuro, reducir el impacto ambiental al eliminar los compuestos tóxicos y reduciendo la necesidad de materias primas y de energía, además de mejorar el desempeño. Los monitores de emisión de campo (FED), que usan nanotubos de carbono (Choi *et al.*, 1999), son el último desarrollo de la tecnología de monitores y pantallas, y ya están disponibles comercialmente. A pesar de que la toxicidad de los nanotubos de carbono es aún una controversia, la cantidad de nanotubos en un monitor FED es muy pequeña de alrededor de 0.5 g por monitor, comparado con los kilogramos de plomo que tiene un monitor CRT (Socolof *et al.*, 2001).

Tratamiento y remediación de sitios contaminados

Desde sus inicios, la nanotecnología ha sido propuesta como posible solución al tratamiento de aguas residuales y a la remediación de sitios contaminados. La capacidad oxidante o reductora de los nanomateriales, o como nutrientes, ha sido sugerida como alternativa para la transformación de contaminantes y sustancias tóxicas, así como para estimular el crecimiento microbiano. Debido a su tamaño pequeño y gran superficie específica, los nanomateriales son más reactivos y pueden dispersarse más fácilmente. Por

FIGURA 4. La fotocatalisis es un proceso de oxidación avanzada generado al irradiar una superficie recubierta por nano TiO_2 (dióxido de titanio) con fotones en las longitudes de onda adecuadas. La luz ultravioleta excita el TiO_2 provocando la generación de radicales libres, hidroxilo y superóxido, provenientes de la hidrólisis del agua y del oxígeno del aire.

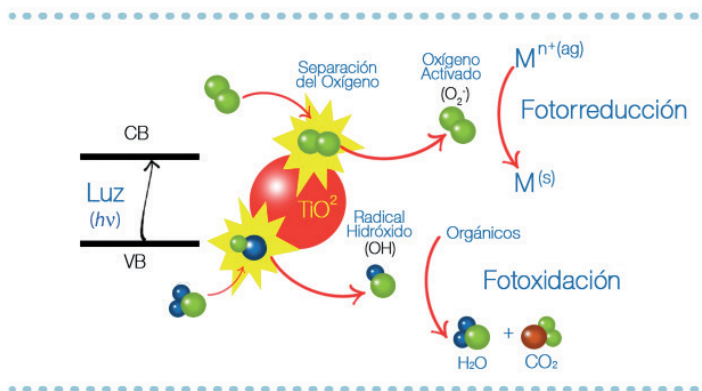


Figura 4. Fuente: <<http://www.nanocapas.es/faq-page#n110>>.

ejemplo, los métodos convencionales de oxidación de contaminantes usando el reactivo de Fenton o hierro valencia cero para la remediación de sitios contaminados con solventes, como el tricloroetano u otros solventes clorados, resulta en subproductos indeseables como los son los dicloroetanos y el cloruro de vinilo. El uso de nanopartículas bimetálicas elimina casi completamente la producción de estos subproductos indeseables (Wang *et al.*, 1997).

Las nanopartículas que son activadas por la luz como el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de cinc (ZnO), que son semiconductores con una amplia banda prohibida, siguen siendo muy estudiados para la remoción de sustancias contaminantes. Estas partículas son baratas y pueden ser producidas en grandes cantidades, además de ser poco tóxicas (Fujishima *et al.*, 2000). Por ejemplo, las nanopartículas de ZnO son capaces de por un lado sensor y por el otro fotocatalizar la destrucción de los peligrosos fenoles policlorados (Kamat *et al.*, 2002). Existe un interés muy grande en manipular la superficie de estas partículas con pigmentos o colorantes orgánicos e inorgánicos para tener no sólo respuesta en el UV sino también en el espectro visible y, de esta manera, hacer mas eficiente la fotocatalisis para la transformación de contaminantes en el ambiente (Subramainian *et al.*, 2001). Hay que tener presente que sólo el 5% de la irradiación solar que llega a la superficie de la tierra está en rango UV.

La nanotecnología también tiene un uso potencial en la remediación de sitios contaminados *in situ*. Por ejemplo, estas nanopartículas pueden fácilmente ser adicionadas y esparcidas en reactores para el tratamiento de suelos, sedimentos y desperdicios sólidos. También pueden ser inmovilizadas en matrices sólidas como el carbón, zeolitas o membranas para el tratamiento de efluentes gaseosos (Ponder *et al.*, 2000). Existen reportes que

muestran que la inyección al subsuelo de nanopartículas de hierro estimula la degradación de compuestos contaminantes organoclorados, como el tricloroetano. Con esta tecnología se reduce la toxicidad de los contaminantes en el suelo.

Por otro lado, se ha demostrado que nanopartículas bimetálicas de hierro/paladio, hierro/plata o cinc/paladio son potentes reductores y catalizan la transformación de una gran variedad de contaminantes, como los ascarelos o bifenilos policlorados, los cuales son altamente recalcitrantes a la degradación microbiana y son considerados fuertes carcinogénicos. También son capaces de transformar otros compuestos halogenados como solventes y plaguicidas (Zhang *et al.*, 1998), reduciendo casi a todos los halogenados ensayados a hidrocarburo las cuales son sustancias fáciles de ser degradadas por la microflora natural del sitio. Además, estas nanopartículas basadas en hierro han sido capaces de reducir una gran diversidad de compuestos contaminantes como percloratos, nitratos, dicromatos, níquel, mercurio y dióxido de uranio.

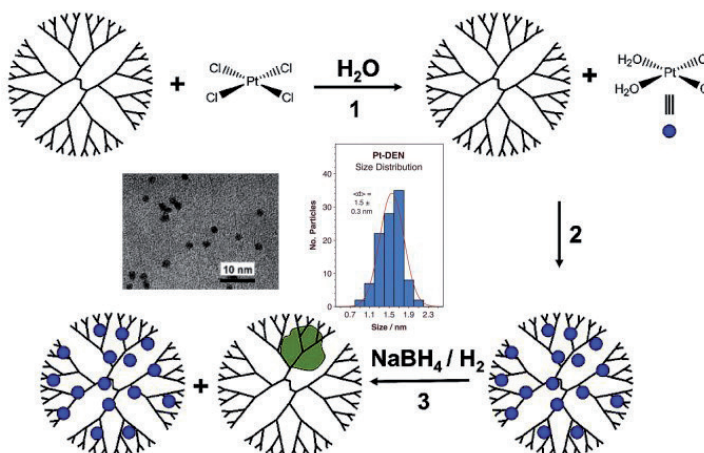
Los materiales nanoestructurados, como los nanotubos de carbón, han sido propuestos como excelentes adsorbentes de contaminantes como en el caso de las peligrosas dioxinas. Las dioxinas son consideradas como las sustancias más tóxicas jamás sintetizadas por el hombre. La absorción de las dioxinas por los nanotubos de carbón es al menos 3 veces más alta que la del carbón activado (Long *et al.*, 2001), siendo la constante de Langmuir de los nanotubos ordenes de magnitud más grande que la del carbón activado. Esta propiedad de los nanomateriales los hace candidatos potenciales para el tratamiento de decontaminación del aire o aguas.

Otro ejemplo de los usos en procesos ambientales de los materiales nanoestructurados son los dendrímeros. Estas partículas nanoestructuradas son polímeros altamente ramificados con composición y arquitectura controladas. Los dendrímeros a la escala nanométrica pueden ser usados como agentes quelantes en sistemas de ultrafiltración en membranas poliméricas (PSUF) (Diallo *et al.*, 1999). Los dendrímeros pueden ser diseñados para encapsular metales con valencia cero y así poder “disolverlos” en medios específicos o adsorberlos en ciertas superficies.

Detección de contaminantes

Como lo mencionamos anteriormente, uno de los grandes retos de las ciencias ambientales es el poder detectar la presencia de contaminantes en los diferentes ecosistemas e incluso en el cuerpo humano. Los nuevos sistemas de detección de sustancias tóxicas debe hacerse cada vez más con niveles de detección más bajos para poder anticiparse a los daños o al impacto ambiental. La detección no es una tarea fácil, especialmente en sistemas tan complejos y con tantas interacciones entre las diferentes fases como los ecosistemas. Es de mucho interés contar sistemas de monitoreo de contaminantes

FIGURA 5. Etapas en la síntesis de nanopartículas de platino encapsuladas en un dendrímero (DENs) de poliamidoamina. Las partículas obtenidas muestran una distribución de tamaños esbelta y el tamaño de las nanopartículas de Pt es de $1.5 \text{ \AA} \pm 0.3 \text{ nm}$.



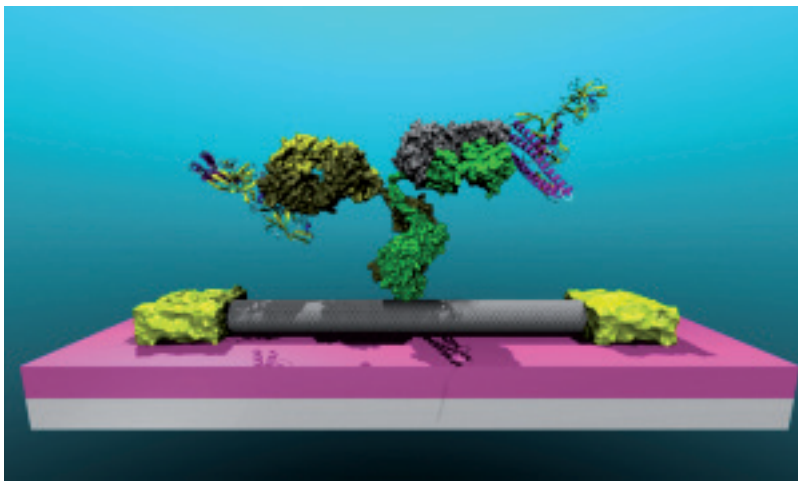
Fuente: <<http://research.chem.ucr.edu/groups/zaera/ongoingproject3.html>>.

en tiempo real que puedan transmitir los datos desde una zona remota al centro de toma de decisiones.

Los nanotubos de carbón de pared simple se han usado como sensores químicos gracias a la cambio de resistencia eléctrica que sufren estos semiconductores en presencia de sustancias gaseosas como el dióxido de nitrógeno o amoníaco (Kong *et al.*, 2000). Estos sensores presentan una respuesta más rápida a temperatura ambiente a estos gases que los sensores convencionales. Por otro lado, nanoalambres de silicio dopados con Boro (SiNWs) se han usado en sensores ultra sensibles y en tiempo real para la detección de compuestos químicos y biológicos (Cui *et al.*, 2001). Estos nanoalambres pueden ser funcionalizados con aminos y ser usados para detectar cambios de pH, mientras que los nanoalambres funcionalizados con biotina pueden detectar concentraciones en el rango de picomolar de estreptavidina, una proteína con alta afinidad a la biotina. Como casi todos los nanomateriales, estos nanoalambres pueden ser funcionalizados con anticuerpos o antígenos y ser reconocidos por su contrapartes con muy alta afinidad. También se pueden detectar en tiempo real indicadores metabólicos como el calcio. Estas propiedades también pueden usarse para detectar patógenos u otros agentes químicos o biológicos en las aguas, aire o en los alimentos.

Tanto en medicina como en el diagnóstico del estado de salud de los ecosistemas, los nanomateriales pueden usarse como indicadores de la exposición a contaminantes, en tiempo y concentración. Esto permitiría detectar las fuentes de contaminación y evaluar tempranamente la importancia del impacto ambiental o a la salud.

FIGURA 6. Ilustración de un anticuerpo unido covalentemente sobre la superficie de un nanotubo de carbón para la detección de patógenos.



Fuente: <<http://phys.org/news/2013-03-lyme-disease-antibodies-nanotubes-paving.html>>.

Nanotoxicología

Como se mencionó anteriormente, la nanotecnología está originando una nueva revolución en la tecnología de los materiales con numerosas aplicaciones. El uso de materiales nanoestructurados se ha más que cuadruplicado en los últimos 5 años. Se estima que hay más de 1,000 productos comerciales nanoestructurados (Papp *et al.*, 2008; McIntrye, 2012). Las nanopartículas pueden ser fabricadas de casi cualquier tipo de material, y hasta ahora las más utilizadas están hechas de carbón, silicio, titanio y otros materiales similares. Muchas de las nanopartículas son también fabricadas de metales y óxidos metálicos, conteniendo elementos como cadmio, cerio, cobre, germanio, oro, hierro, plomo, selenio, plata, cinc o zirconio. En general, las principales clases de nanopartículas con uso comercial son los fullerenos, nanotubos de carbón de pared simple o múltiple, puntos cuánticos, óxidos metálicos y polímeros (Powell y Kanarek, 2006).

Entre los numerosos usos comerciales de las nanopartículas están las preparaciones antimicrobianas, materiales y artefactos médicos, diagnóstico médico, cosméticos, alimentos, textiles antiolor, electrónica, superficies autolimpiables, cubiertas resistentes a UV, pinturas y lubricantes. Así como se espera que el uso de las nanopartículas se siga incrementando, se espera que su presencia en el medio ambiente también se incremente de manera significativa. Además, las nanopartículas se pueden formar por procesos naturales bióticos y abióticos y originados por la actividad humana (Delay y Frimmel, 2012; Wigginton *et al.*, 2007).

La importancia ecológica de la presencia de las nanopartículas en el medio ambiente ha sido reportada y discutida (Delay y Frimmel, 2012; Baun *et al.*, 2008) y es claro que el comportamiento de las nanopartículas en el ambiente es muy complejo. Además, la información sobre los efectos y mecanismos tóxicos en los ecosistemas y organismos es aún muy escaso y la toxicidad específica de las nanopartículas y sus efectos a largo plazo en el ambiente y en la salud pública es todavía desconocido (Papp *et al.*, 2008). Existen temas importantes que deben ser estudiados y abordados para entender y quizás predecir los riesgos reales que los nanomateriales pueden tener para el ambiente y para la salud humana (Wiesner y Botero, 2012).

El estado del conocimiento referente a los efectos biológicos y sobre la salud de las nanopartículas ha sido publicado (Papp *et al.*, 2008; Stark, 2011; Sharifi *et al.*, 2012; Pattan y Kaul, 2012). Una diversidad de mecanismos diferentes de toxicidad de las nanopartículas han sido reportados. El incremento de la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) inducidas por la presencia de nanopartículas, parece ser un mecanismo importante de la toxicidad en células animales (Nel *et al.*, 2006; Unfried *et al.*, 2007; Moller *et al.*, 2010). Estas especies reactivas de oxígeno incluyen entre otras a radicales hidroxilo, lipidoxilo y peroxilo, oxígeno singlete y peroxinitritos formados por el óxido de nitrógeno (NO). La modulación de varios eventos celulares, incluyendo la transducción de señales, respuestas proliferativas, expresión de genes y regulación de proteínas redox, requiere de cantidades moderadas de ROS. Sin embargo, altos niveles de ROS inducen un estrés oxidativo que puede dañar las células por medio de una peroxidación de los lípidos, oxidación de proteínas, alteración de ADN, interferencia de la señalización, alteración de la modulación de la transcripción de genes y, finalmente, induciendo cáncer, enfermedades renales, neurodegeneración y enfermedades pulmonares y cardíacas.

Conclusiones

Del análisis de la información existente hasta ahora, la nanotecnología es una gran oportunidad para mejorar los procesos productivos haciéndolos menos contaminantes, más sustentables y de menor consumo de energía. También los nanomateriales podrán ayudarnos a restaurar los sitios contaminados, eliminando las sustancias tóxicas. Podremos detectar por medio de dispositivos, basados en la nanotecnología, los niveles de contaminación y de presencia de sustancias tóxicas en nuestro cuerpo. Sin embargo, todas estas ventajas también pueden venir acompañadas del peligro de una dispersión masiva e indiscriminada de nanomateriales. Como en el caso de todas las nuevas tecnologías, se deben realizar estudios profundos sobre el posible impacto que podrá tener la implementación de estas nuevas tecnologías antes de ser comercializadas.

Referencias

- Baun, A., Hartmann, N. B., Grieger, K., Kusk, K. O. (2008). Ecotoxicity of engineered nanoparticles to aquatic invertebrates, a brief review and recommendations for future toxicity testing. *Ecotoxicology*, 17: 387.
- Choi, W. B., Chung D. S., Kang J. H., Kim H. Y., Jin Y. W., han I. T., Lee Y. H., Jung J. E., Lee N. S., park G. S., Kim J. M. (1999). Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display. *Applied Physical Letters*, 75: 3129.
- Cui, Y., Wei, Q., Park, H., Lieber, C. M. (2001). Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species. *Science*, 293: 1289.
- Delay, M., Frimmel, F. H. (2012). Nanoparticles in aquatic systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402: 583.
- Diallo, M. S., Balogh, L., Shafagati, A., Johnson, J. H., Jr., Goddard III, W. A., Tomalia, D. A. (1999). Poly(amidoamine) dendrimers: A new class of high capacity chelating agents for Cu(II) ions. *Environmental Science and Technology*, 33: 820.
- Fujishima, A.; Rao, T. N.; Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1, 1.
- Kamat, P. V.; Huehn, R.; Nicolaescu, R. (2002). A "Sense and shoot" approach for photocatalytic degradation of organic contaminants in water. *Journal of Physical Chemistry B*, 106: 788.
- Kong, J. Franklin N. R., Zhou C., Chapline M. G., Peng S., Cho K., Dai H. (2000). Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287: 622.
- Long, R. Q.; Yang, R. T. J. (2001). Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin Removal. *Journal of the American Chemistry Society*, 123: 2058.
- McIntyre, R. (2012). Common nano-materials and their use in real world applications. *Science Progress*, 95: 1.
- Moller, P., Jacobsen, N. R., Folkmann, J. K., Danielsen, P. H., Mikkelsen, L., Hemmingen, J. G., Vesterdal, L. K., Forchhammer, L., Wallin, H., Loft, S. (2010). Role of oxidative damage in toxicity of particulates. *Free Radical Research*, 44: 1.
- National Nanotechnology Initiative (2001). The initiative and its implementation plan; NSTC/NSET report, marzo 2001, Washington D. C. <www.nano.gov/nsetrpts.htm>.
- Nel, A., Xia, T., Madler, L., Li, N. (2006). Toxic potential of materials at the nano-level. *Science*, 311: 622.
- Papp, T., Schiffmann, D., Weiss, D., Castranova, V., Vallyathan, V., Rahman, Q. (2008). Human health implications of nanomaterial exposure. *Nanotoxicology*, 2: 9.
- Panov, A. G.; Larson, R. G.; Totah, N. I.; Larsen, S. C.; Grassian, V. H. (2000). Photooxidation of toluene and p-xylene in cation-exchanged zeolites X, Y, ZSM-5, and Beta: The role of zeolite physicochemical properties in product yield and selectivity. *Journal of Physical Chemistry B*, 104: 5706.
- Pattan, G., Kaul, G. (2014). Health hazards associated with nanomaterials. *Toxicology and Industrial Health*, 30: 499.
- Ponder, S. M.; Darab, J. G.; Mallouk, T. E. (2000). Remediation of Cr(VI) and Pb(II)

- aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. *Environmental Science and Technology*, 34: 2564.
- Powell, M. C., Kanarek, M. S. (2006). Nanomaterial health effects. Part 1: Background and current knowledge. *Wisconsin Medical Journal*, 105: 16.
- Project. U.S. Environmental Protection Agency (2001). (www.epa.gov/oppt/dfe/pubs/comp-dic/lca).
- Sharifi, S., Behzadi, S., Laurent, S., Laird Forrest, L., Stroevee, P., Mahmoudi, M. (2012). Toxicity of nanomaterials. *Chemical Society Reviews*, 41: 2323.
- Stark, W. J. (2011). Nanoparticles in biological systems. *Angewandte Chemie International Edition*, 50: 1242.
- Subramanian, V.; Wolf, E.; Kamat, P. V. (2001). Semiconductor-metal composite nanostructures. To what extent do metal nanoparticles improve the photocatalytic activity of TiO₂ films? *Journal of Physical Chemistry B.*, 105: 11439.
- Unfried, K., Albrecht C, Klotz LO, Von Mikecz A, Grether-Beck S, Schins RPF. (2007). Cellular responses to nanoparticles: Target structures and mechanisms. *Nanotoxicology*, 1: 52.
- Wang, C.; Zhang, W. (1997). Synthesizing nanoscale iron particles for rapid and complete dechlorination of TCE and PCBs. *Environmental Science and Technology*, 31: 2154.
- Wiesner, M. R., Bottero, J-Y. (2007). *Environmental nanotechnology - applications and impacts of nanomaterials*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Wigginton, N. S., Haus, K. L., Hochella, M. F. Jr. (2007). Aquatic environmental nanoparticles. *Journal of Environmental Monitoring*, 9: 1306.
- Williams, E. D.; Ayers, R. U.; Heller, M. (2002). The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental Science and Technology*, 36: 5504.
- Wybourne, M. N.; Hutchison, J. E.; Clarke, L.; Brown, L. O.; Mooster, J. L. (1999). Fabrication and electrical transport characteristics of low-dimensional nanoparticle arrays organized by biomolecular scaffolds. *Microelectronic Engineering*, 47: 55.
- Zhang, W. X.; Wang, C. B.; Lien, H. L. 1998. Treatment of chlorinated organic contaminants with nanoscale bimetallic particles. *Catalysis Today*, 40: 387.

Autorganización de nanoestructuras luminiscentes: sus formas y dimensiones*

Elsi Violeta Mejía-Uriarte** y Héctor Octavio Murrieta S.***

RESUMEN: El autoensamble es el proceso por el cual los elementos participantes se agrupan en estructuras ordenadas y funcionales. Por las propiedades intrínsecas de los componentes y condiciones del medio, estas nuevas estructuras sólo pueden crecer hasta cierto tamaño, siendo del orden nanométrico, se conocen como nanoestructuras (NS), y, en consecuencia, pueden configurarse en diferentes formas geométricas bi y tridimensionales como: esferas, anillos, cubos, prismas, barras y otras formas más. Los halogenuros alcalinos son materiales que permiten la difusión de los iones en su estructura, por ello los utilizamos como matriz para la formación de NS luminiscentes, las cuales se han formado por la impurificación con impurezas divalentes como los iones de europio (Eu^{2+}) o manganeso (Mn^{2+}), por ejemplo. La forma y el tamaño de las NS influyen fuertemente en la longitud de onda de absorción, emisión y excitación. Siendo de este modo muy importante el estudio sobre el tipo de impureza y las condiciones en la que se autorganizan para formar diferentes NS, las cuales pueden ser utilizadas como sensores o emisores de luz para potenciales dispositivos en nanoptoelectrónica.

PALABRAS CLAVE: Autorganización, nanoestructuras luminiscentes, halogenuros alcalinos, impurezas divalentes.

ABSTRACT: Self-organization is the process by which the participating elements are grouped in ordered and functional structures. By the intrinsic properties of the components and the environmental conditions these new structures can only grow to some size being of the nanometric order, they are known as nanostructures (NS), and, consequently, can be configured in different bi and three-dimensional geometric forms such as: Spheres, rings, cubes, prisms, rods and other forms. The alkali halides are materials that allow the diffusion of ions in its structure, for this we use them as host for luminescent NS formation, which have been formed by the impurification with divalent impurities such as europium (Eu^{2+}) or manganese (Mn^{2+}) ions, for example. The shape and size of the NS influence strongly on the wavelength of absorption, emission and excitation. Being very important so the study on the impurity type and the conditions in which they organize to form different NS, which can be used as sensor and/or light-emitting for potential devices at nano-optoelectronic.

KEYWORDS: Self-organization, luminescent nanostructures, alkali halides, divalent impurities.

* Este trabajo ha sido financiado por PAPIIT (IN-113512), los autores agradecen a la Dra. América Vázquez por las facilidades del equipo de fluorescencia. Asimismo, se agradece el uso de los equipos e instalaciones del Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) del CCADET-UNAM.

** Laboratorio de Fotónica de Microondas, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, AP 70-186 C.P. 04510, DF, México. Correspondencia: (elsi.mejia@ccadet.unam.mx). Tel.: +52 55 5622 8602, extensión: 1143. Fax: +52 55 5622 8651.

*** Instituto de Física, AP 20-364, C.P. 01000, México, DF, México. Correspondencia: (murrieta@fisica.unam.mx). Tel.: +52 55 5622 5118. Fax: +52 55 5622 5011.

Halogenuros alcalinos dopados

Los halogenuros alcalinos tienen una estructura cristalina simple, por eso son candidatos ideales para probar diversas teorías. Su estabilidad y crecimiento en monocristales son una buena fuente para el ensayo de experimentos, así son útiles tanto para fines científicos como tecnológicos. Los halogenuros alcalinos son compuestos iónicos con fórmula química simple: X^+Y^- , donde X es un átomo de metal alcalino y Y es un átomo de halógeno. Cuando los halogenuros alcalinos son dopados con cationes simples o dobles de metales de transición o tierras raras como el Mn^{2+} , Mg^{2+} , Cd^{2+} , Ag^+ , Au^+ , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^+ , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Eu^{2+} , entre otros, estas impurezas entran a la red cristalina en forma sustitucional y tienden a formar dipolos: impureza–vacancia, como primeros compuestos para posteriormente formar múltiplos y dar paso a nuevas estructuras nanométricas. La concentración y tipo de impureza influyen fuertemente en la forma y el tamaño de las nanoestructuras (NS), así como los factores externos a los que está sometida la muestra durante el crecimiento o almacenamiento, los parámetros externos que más efecto producen en la muestra son la temperatura, presión y tiempo de almacenaje. Experimentalmente, los procesos de agregación han sido estudiados a través de cambios cinéticos en la concentración de dipolos observados (Norwich, 1972). Por lo general se indica la formación de dímeros, trímeros y tetrámeros como iniciación del proceso de precipitación, pero estos estudios no daban información sobre la forma de las estructuras (Bannon *et al.*, 1985). Así, durante los últimos años se ha investigado sobre la geometría y las dimensiones de las estructuras formadas por efecto de la precipitación de las impurezas (Barth y Henry, 2008; Barth y Henry, 2009; Mejía-Urriarte *et al.*, 2009a, 2009b y 2015).

La autorganización

La autorganización o autoensamble de átomos, iones o moléculas se debe a que estos elementos siempre buscarán los niveles más bajos de energía, uniéndose rápidamente a su vecino más próximo, iniciando de este modo la formación de una “semilla” que dará lugar a una nanoestructura (NS) o nanopartícula. Este proceso puede ser comprendido mediante la analogía de una brújula, así como ésta se alinea de sur a norte porque minimiza su energía respecto al campo magnético de la Tierra, los primeros elementos que forman una NS se alinean para mantenerse o alojarse en posiciones de menor energía, lo cual no les cuesta ningún trabajo extra de manera similar a una brújula que siempre busca el norte. Así, los elementos participantes se autorganizan con geometrías diferentes con tal de mantener su mínima energía; debido a ello tenemos, esferas, discos, anillos, cubos, pirámides, alambres, barras y muchas más geometrías a escala nanométrica. Las energías de cohesión que se requieren para formar las NS son de menor orden

que la energía que mantiene unida a los compuestos iónicos o moléculas, por ello éstas pueden ser modificadas con la aplicación de factores externos como temperatura, alta presión y el tiempo de almacenaje.

Observando la luminiscencia y la geometría de las nanoestructuras

Durante muchos años, hemos investigado sobre las propiedades ópticas por la impurificación con iones divalentes en matrices tipo halogenuro alcalino como: NaCl, KBr, KCl y CsCl, conociendo cómo el tipo de impureza, la concentración de impurezas, y los tratamientos térmicos afectan la respuesta óptica. Con cada tratamiento térmico y dependiendo de la cantidad de impurezas, observamos que se presentaban desplazamientos en las bandas de emisión de la impureza, pero estos desplazamientos no eran exactamente los mismos en el mismo tipo de muestra; es decir, en algunas muestras con baja concentración de impurezas, la posición del pico de emisión estaba centrada alrededor de un valor, pero para muestras altamente dopadas este valor cambiaba; de esos resultados se podía intuir que había una relación entre la concentración de unas impurezas y el desplazamiento del pico de emisión. Usando microscopía de fuerza atómica (AFM), observamos diferentes muestras y pudimos ver por primera vez que esas pequeñas diferencias (desplazamiento del pico de emisión) estaban relacionadas con el tamaño de lo que usualmente se conocía como “precipitados” (Aguilar *et al.* 1982). Apoyados por la técnica de AFM, al medir las muestras pudimos darnos cuenta que son de tamaño nanométrico del orden de 20 a 250 nm y que su geometría cambia según el tipo de impureza y de los parámetros externos aplicados. De este modo, encontramos la respuesta a las interrogantes: ¿por qué había luminiscencia de diferente color aun cuando la impureza era la misma?, y, ¿por qué había pequeños desplazamientos al variar la concentración de la impureza? La respuesta se dio naturalmente, todas esas diferencias están en relación directa con la geometría y dimensiones de las NS formadas. Con este conocimiento, ahora es posible investigar cómo controlar el tamaño y forma de las NS que deseamos obtener para aplicaciones particulares en dispositivos nanoelectrónicos como nanosensores o emisores de luz.

La influencia del tamaño de las nanoestructuras de europio divalente

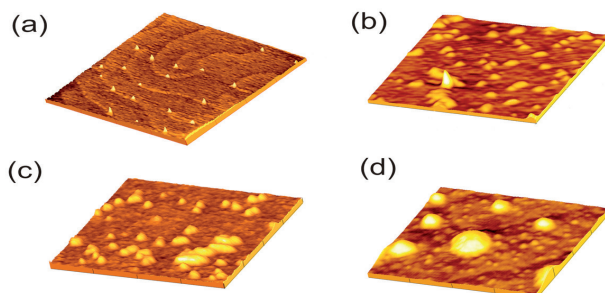
La forma y el tamaño de las NS formadas por la precipitación de los iones de europio en la matriz de bromuro de potasio (KBr:Eu²⁺) fueron caracterizados por su longitud de onda de emisión y las imágenes de AFM. De este estudio, se pudo ver la relación que existe entre los picos de las bandas de emisión, el tamaño de las nanoestructuras y la cantidad de impurezas de europio. Las imágenes de AFM muestran que las nanoestructuras tienen forma circular o

esférica con altura de unos pocos nanómetros y cuyos diámetros son de ~ 20 a 400 nm, la posición en longitud de onda varia de 420 a 433 nm. La técnica de AFM nos permitió relacionar el diámetro de las nanoestructuras con su longitud de onda de emisión. Esta información no había sido observada anteriormente en este tipo de muestras (Mejía-Uriarte *et al.*, 2009a).

Debido al alto grado hidrocópico de las muestras, para realizar los estudios por AFM, las muestras son clivadas cada vez que se debe realizar el experimento y son mantenidas en un recipiente con flujo de nitrógeno. Así, siempre se tendrá una superficie libre de humedad. Los experimentos fueron realizados a temperatura ambiente y los equipos usados en luminiscencia tienen una incertidumbre experimental de 0.1 nm. Se conoce que cuando las muestras son sometidas a un tratamiento térmico específico como un almacenaje a ~80 °C por periodos de 12 semanas, a temperatura ambiente por mucho tiempo o durante el crecimiento del cristal (como en este caso) se forma una fase conocida como fase de Suzuki (Suzuki, 1960), cuya característica principal es que su parámetro de red es el doble de la celda de la matriz que lo contiene, por espectroscopía óptica se observa que la presencia de un pico de emisión ubicado alrededor de los 430 nm (Hernández *et al.*, 1980, Aguilar *et al.*, 1982) es referencia de que la fase de Suzuki está presente, de este modo los nanodiscos observados están en fase Suzuki, es decir, son nanoestructuras bien definidas. Para poder hacer un análisis del fenómeno a estudiar es necesario empezar por disolver las posibles nanoestructuras formadas en los cristales durante su crecimiento, de este modo se garantiza que las impurezas estén disueltas en el cristal, este procedimiento se conoce como *quenching* térmico, el cual consiste en calentar la muestra a 500 °C y enfriarlo rápidamente en nitrógeno líquido con el objetivo de congelar ese estado, el pico de emisión para estas muestras es reportado en 420 nm. Lo que se observaba al obtener los espectros de emisión del KBr:Eu²⁺, eran picos de emisión con posiciones diferentes desde 428 hasta 433 nm. Por lo tanto, existía la necesidad de saber cuál era el motivo de este desplazamiento. Por ello se tomaron muestras de cada tipo, de acuerdo con su posición de longitud de onda de emisión y se midió la concentración de impurezas de europio divalente.

En la figura 1, podemos observar el tamaño promedio de las NS formadas para: a) con 100 ppm de concentración de europio y longitud de onda de emisión en 428 nm, las NS tienen ~ 20-40 nm de diámetro; b) 431 nm (170 ppm), NS de ~ 55-90 nm de diámetro, c) 432 nm (250 ppm), con NS de 67-115 nm de diámetro, y, d) 433 nm (400 ppm), con NS mucho más grandes de 110-400 nm de diámetro. La altura de estas NS no está bien definida, porque al estar en solución sólida están inmersas en la matriz y se relevan cuando son clivadas. Cuando se cliva, se rompe en alguno de sus planos cristalinos, se muestra una parte de la NS, quedando la otra parte inmersa en la parte opuesta del cristal. Se conoce que las NS cambian las propiedades mecánicas de la muestra y posee mayor dureza que la matriz, por ello, al clivarse

FIGURA 1. Imágenes de AFM del KBr:Eu²⁺ con valor de longitud de onda de emisión: (a) 4 μm^2 , (428 nm); (b) 2 μm^2 , (431 nm); (c) 2 μm^2 , (432 nm); (d) 2 μm^2 , (433 nm).



Fuente: Elaboración propia.

la matriz no se rompe la NS. Durante los experimentos realizados no se han observado alturas superiores a ~ 10 nm, comparando su altura con sus diámetros podemos decir que las NS observadas son de tipo laminar. La literatura menciona que los precipitados o nanoestructuras son tipo *platelets*, es decir, tienen poca altura, se pueden considerar como estructura laminar, nanodiscos (Itoh *et al.*, 1988). Así, las imágenes mostradas reportan la formación de discos de diferente diámetro con alturas del orden de unos pocos nanómetros, coincidiendo con los reportes previos. Una característica importante de las muestras es que las nanoestructuras nuclean y crecen preferentemente a lo largo de las dislocaciones y defectos de la red cristalina (Ossipyan *et al.*, 2004). Un resumen sobre la posición en longitud de onda de emisión y su relación con el tamaño de las NS es mostrado en la tabla 1, donde podemos apreciar que las muestras con posición de longitud de onda de emisión a 433 nm son las que tienen mayor cantidad de impurezas y los diámetros de la NS son los más grandes del orden de ~ 400 nm.

Tabla 1.

Posición de longitud de onda (nm)	Tamaño de nanoestructuras (nm)	Cantidad de impurezas (ppm)
420	Sin NS, disueltas por el <i>quenching</i>	120-400
428	$\sim 20-40$	100
429	NS en mayor proporción de 40 nm de diámetro	120
430	53-90	130
431	55-90	170
432	67-115	250
433	110-400	400

Fuente: Elaboración propia.

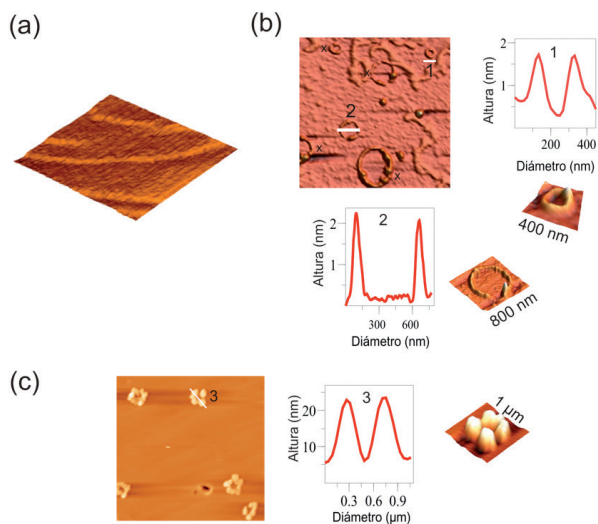
Autorganización de anillos de EuBr_2

Aparte de los nanodiscos presentados en la sección previa, en el mismo cristal de $\text{KBr}:\text{Eu}^{2+}$ se observa que existen muestras con pico de emisión centrado en 435 nm, que no habían sido reportados previamente (Mejía-Urriarte *et al.*, 2009b). Entonces, salta la curiosidad de conocer a qué tipo de estructura pertenece esa longitud de onda y qué forma geométrica tiene la NS. Así, al observar por AFM se revelan estructuras en forma de anillos que van de ~ 190 a 2500 nm de diámetro; estos anillos, al igual que los nanodiscos, están presentes en la superficie [100].

Una característica particular es que el espectro de emisión de los nanoanillos formados de bromuro de europio, EuBr_2 , es más angosto en su ancho medio, comparado con las muestras que tienen NS sin forma de anillos. Los resultados obtenidos indican que este tipo de impurezas no solamente se configura en nanodiscos sino que también lo hace en nanoanillos, esto fue un resultado muy interesante porque se conoce que este tipo de estructuras son formadas principalmente en películas delgadas y en particular en películas de GaAs, pero no habían sido reportadas en una matriz sólida de tipo halogenuro alcalino.

En la figura 2(a) se observan los planos cristalinos como terrazas planas separadas por pasos de 0.33 nm, equivalente a la mitad del parámetro de red

FIGURA 2. Imágenes de AFM del KBr y del $\text{KBr}:\text{Eu}^{2+}$.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: a) $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, KBr sin impurezas; b) $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, $\text{KBr}:\text{Eu}^{2+}$ con anillos: (1) y (2) de ~ 190 y 585 nm de diámetro, respectivamente; c) $5.4 \times 5.6 \mu\text{m}^2$, imagen de la muestra con anillos formados por nanoestructuras separadas, 3) anillo de 460 nm de diámetro.

de la celda cúbica FCC del KBr, cuyo parámetro es 0.6578 nm, este valor coincide con el reportado en la literatura. La figura 2(b) presenta a la muestra de KBr:Eu²⁺ con anillos, como se puede observar en (1) las NS que conforman el anillo están uniformemente unidas, es decir, forman un anillo sólido. En (2) de la figura 2(b) el anillo aun está incompleto, por la teoría de difusión en sólidos, las impurezas cercanas tenderán a irse a las posiciones de menor energía, completando de ese modo el anillo observado. En la figura 2(c) los anillos mostrados son formados por nanoestructuras esféricas alineadas alrededor de un círculo, como se observa, estas NS forman un anillo de 460 nm de diámetro. Los anillos están formados dentro de la matriz, sobre los planos cristalinos y las NS están perfectamente colocadas alrededor de una circunferencia, estos nanoanillos son observados cuando el cristal es clivado.

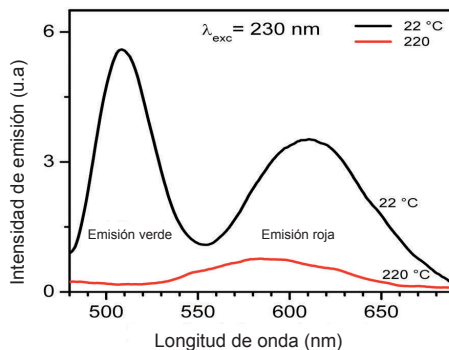
Su altura no está definida, igual a lo mencionado en la sección anterior, no conocemos qué porción del mismo está bajo los planos cristalinos (Mejía-Uriarte *et al.*, 2009b). El pico de emisión centrado en 435 nm indica la presencia de anillos de EuBr₂, esta nueva morfología de las NS en este tipo de muestra puede ser usada para dispositivos optoelectrónicos por la alta eficiencia óptica de los iones de europio.

Efecto en la forma de las nanoestructuras del NaCl:Mn²⁺ sobre la luminiscencia

Como se mencionó antes, la fase de Suzuki forma NS que se configuran geoméricamente de acuerdo con el tipo de impureza y parámetros externos, su presencia es reconocida en el NaCl:Mn²⁺ porque emite en dos longitudes de onda. Las dos bandas de emisión no están siempre presentes en las muestras de NaCl:Mn²⁺, sólo lo tienen las muestras cuyas NS están formadas de acuerdo con la fase de Suzuki. Nuevamente regresa la pregunta: ¿qué forma deben tener las NS de la misma impureza para presentar dos bandas de emisión? Para responder, fue necesario realizar los experimentos en función de la temperatura y a su vez obtener imágenes de AFM. Los espectros de emisión con doble respuesta son mostrados en la figura 3. Los picos de emisión están centrados en: 508 nm (emisión verde) banda de emisión angosta y en 610 nm (emisión roja), con una banda de emisión más ancha. Como se observa, a 22 °C están presentes las dos bandas de emisión, pero a 220 °C la emisión verde desaparece y la roja decrece fuertemente desplazándose a menores longitudes de onda. Para conocer cuáles son los sitios de emisión que participan para cada banda, fue necesario obtener los espectros de excitación en función de la temperatura, ver figura 4; este espectro nos dice cuál es la longitud de onda donde la excitación es mayor, para la emisión verde la posición es a 227 nm y para la emisión roja es a 232 nm (Mejía-Uriarte *et al.*, 2015).

El pico de excitación en 227 nm es el responsable de la emisión verde (508 nm), el cual decrece rápidamente cuando se incrementa la temperatura,

Figura 3. Espectro de emisión del NaCl:Mn²⁺ en fase de Suzuki en función de la temperatura.



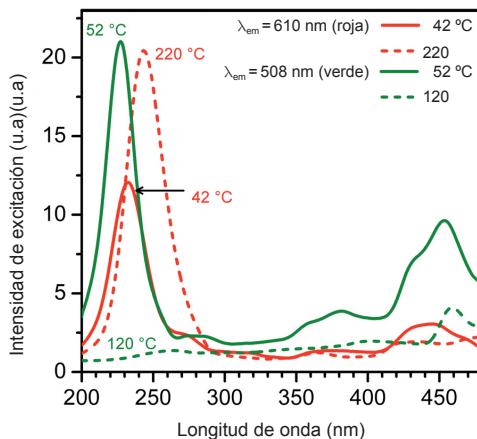
Fuente: Elaboración propia.

Nota: A temperatura ambiente (22 °C) están presentes dos bandas intensas de emisión en verde y rojo. A 220 °C, la emisión verde ha desaparecido y la roja ha disminuido fuertemente.

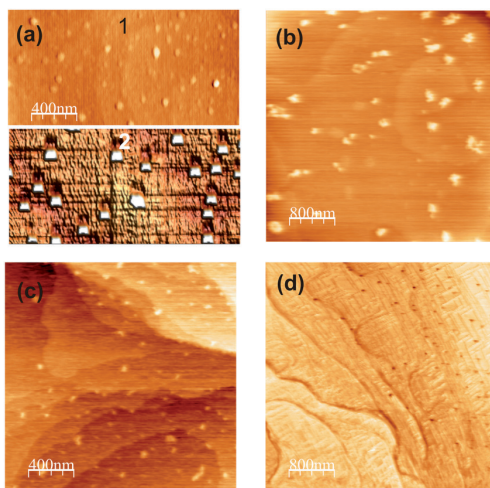
y a 120 °C la banda de excitación ha desaparecido por completo. El pico de excitación a 232 nm responsable de la emisión roja ha aumentado fuertemente y se ha desplazado hasta ~243 nm.

El comportamiento de estas bandas está relacionado con el proceso de disolución de las NS presentes en la muestra. De los resultados obtenidos en función de la temperatura, surgen las interrogantes: ¿qué paso con la banda de excitación responsable de la emisión verde?, y ¿por qué la banda de excitación roja se ha incrementado y desplazado en longitud de onda? Para responderlas fue necesario conocer la forma de las NS y cómo les afecta la

Figura 4. Espectro de excitación del NaCl:Mn²⁺ en función de la temperatura. $\lambda_{em} = 508$ nm (emisión verde), $\lambda_{em} = 610$ nm (emisión roja).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Imágenes de AFM del NaCl:Mn²⁺ en la superficie (100).

Nota: a) en: 1, $2 \times 1 \mu\text{m}^2$, superficie de una muestra sin emisión verde; en: 2, $6 \times 3 \mu\text{m}^2$, en la superficie de una muestra con emisión verde. b) a $80 \text{ }^\circ\text{C}$; c) a $120 \text{ }^\circ\text{C}$; d) a $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fuente: Elaboración propia.

temperatura. Así, las imágenes de AFM nos revelaron que en este tipo de muestra existen dos configuraciones diferentes de NS: cúbicas y esféricas. Ahora habría que descubrir cuál emisión correspondía a cada una de las NS observadas. Se tomaron las imágenes de AFM para las muestras que sólo tienen emisión en rojo, como se muestra en la figura 5(a), en (1) únicamente se observaban nanodiscos, cuyos diámetros están entre 20 y 40 nm. Luego se tomaron las muestras en fase de Suzuki que tenían emisión verde y roja. En (2) de la figura 5(a), las imágenes de AFM mostraron NS rectangulares y cuadradas con tamaños promedios $280 \times 160 \text{ nm}^2$ y $\sim 6 \text{ nm}$ de altura, en estas muestras predominaba la presencia de estructuras rectangulares y muy pocas NS en forma de discos. Una observación importante es que en las muestras con emisión sólo en rojo, no se observaba ninguna estructura rectangular. Para comprender lo que estaba pasando en los espectros de emisión y excitación en función de la temperatura, fue necesario obtener las imágenes en función de la temperatura. Las imágenes de AFM reportaron la desintegración y disolución de las NS rectangulares y cuadradas, lo primero que se observa es el rompimiento de sus aristas y a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ las NS rectangulares estaban en proceso de desintegración, como se muestra en la figura 5(b), y a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ las NS rectangulares han sido casi desintegradas, quedando fracciones de ellas como se ve la figura 5(c). A esta temperatura la banda verde de emisión se ha extinguido y en su espectro de excitación reporta la desaparición del pico de excitación que se encontraba en 227 nm . Los experimentos realizados a $220 \text{ }^\circ\text{C}$ se muestran en la figura 5(d), donde se observa que la mayoría de las NS, tanto cúbicas como esféricas se han disuelto. Debido a

la resolución del equipo, no pudimos observar estructuras menores de 10 nm, pero se conoce que para disolver totalmente las NS precipitadas es necesario calentar las muestras hasta los 550 °C.

Después de este experimento fue posible responder a la pregunta planteada con anterioridad: ¿qué pasó con la banda de excitación responsable de la emisión verde? Al estar la NS en la fase de Suzuki, su configuración generó una banda de excitación a 227 nm responsable de la emisión en 508 nm; de los experimentos se pudo ver que las NS rectangulares generaban la emisión verde que empieza a desaparecer cuando las NS se desintegran, predominando la emisión roja, ahora vamos a la respuesta de la otra pregunta, ¿por qué la banda de excitación roja se ha incrementado y desplazado en longitud de onda? Al incrementarse la temperatura, las NS rectangulares se desintegran y pasan a ser NS casi circulares cuya presencia refuerza la banda de excitación de 232 nm conjuntamente con los dipolos libres de impureza-vacancia que participaban en la configuración de la fase de Suzuki, por ello se incrementa la banda de excitación de 232 nm. Al disolverse las NS rectangulares y circulares, pasan a la forma dipolar, cuya banda de excitación está desplazada hacia el infrarrojo, así, la adición de las estructuras desintegradas más los dipolos libres impureza-vacancia contribuyen al desplazamiento del pico de excitación hasta 243 nm. El espectro de emisión en el NaCl:Mn²⁺ a 220 °C presenta menos intensidad de emisión que en la fase de Suzuki, debido a que las partes o fracciones de las NS inhiben la luminiscencia y el desplazamiento a 587 nm de la banda de emisión está relacionada con la posición de la banda en dipolos libres los cuales son abundantes a esta temperatura.

Conclusiones

De nuestras investigaciones realizadas a la fecha, podemos afirmar que la forma y tamaño de las nanoestructuras ejercen una fuerte influencia en la luminiscencia. En el caso de las NS de europio divalente; el tamaño y la forma de nanodiscos y nanoanillos afectan la posición del pico de emisión, llegando a desplazarse hasta ~7 nm hacia el infrarrojo. En el caso del ion manganeso, la doble emisión está relacionada con la forma de las nanoestructuras; la presencia de nanodiscos únicamente da la emisión roja y cuando las impurezas se configuran en NS rectangulares está presente la emisión verde. Así en una muestra con NS de los dos tipos, habrá doble emisión: verde y roja. Estas nanoestructuras pueden tener potenciales aplicaciones nanoptoelectrónica, usándolas tanto como sensores o emisores de luz y otra ventaja de estos materiales es que al estar en una matriz sólida y aislante los hace buenos candidatos para nanoelectrónica (Zhang *et al.*, 2003).

Bibliografía

- Aguilar, M. G., Rubio, J. O., López, F. J. *et al.* (1982). Optical absorption and fluorescence investigation of the precipitates phases of Eu^{2+} in KBr single crystals. *Solid State Communications*, 44(2): 141-144.
- Bannon, N. M., Corish J. y Jacobs, P. W. M. (1985). A theoretical study of the formation and aggregation of vacancy-impurity dipoles in divalently doped alkali halide crystals. *Philosophical Magazine A*, 51(6): 797-814.
- Barth, C. y Henry, C. R. (2008). Imaging Suzuki precipitates on $\text{NaCl}:\text{Mg}^{2+}$ (001) by scanning force microscopy. *Physical Review Letters*, 100: 096101-4.
- Barth, C. y Henry, C. R. (2009). $\text{NaCl}(001)$ Surfaces nanostructured by Suzuki precipitates: A scanning force microscopy study. *New Journal of Physics*, 11: 043003-18.
- Hernández, J. A., Cory, W. K. y Rubio, J., O. (1980). Optical investigation of divalent europium in the alkali chlorides and bromides. *Journal of Chemical Physics*, 72(1): 198-205.
- Itoh, T., Iwabuchi Y. y Kataoka M. (1988). Study on the size and shape of CuCl microcrystals embedded in alkali-chloride matrices and their correlation with exciton confinement. *Physica Status Solidi (b)*, 145(2): 567-577.
- Mejía-Urriarte, E. V., Bañuelos, J., Kolokoltsev, O. *et al.* (2009a). Influence of europium nanostructure size on the emission of $\text{KBr}:\text{Eu}^{2+}$. *Solid State Communications*, 149: 445-447.
- Mejía-Urriarte, E.V., Bañuelos, J., Kolokoltsev O. *et al.* (2009b). Self-assembled rings EuB_2 nanostructures. *Materials Letters*, 63(5): 554-556.
- Mejía-Urriarte, E.V., Kolokoltsev, O., Navarrete, M., *et al.* (2015). Study of $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ nanostructures in the Suzuki phase by optical spectroscopy and atomic force microscopy. *Journal of Luminescence*, 160: 293-298.
- Norwich, A.S. (1972). *Point defects in solids*, vol. I, Ed. J.S. Crawford, L.M. Slifkin, Plenum Press.
- Suzuki, K. (1960). X-ray Studies on precipitation of metastable centers in mixed crystals $\text{NaCl}-\text{CdCl}_2$. *Journal of the Physical Society of Japan*, 6(1): 67-78.
- Ossipyan, Y., A., Morgunov, R. B., Baskakov, A. A. *et al.* (2004). New luminescent induced by plastic deformation of $\text{NaCl}:\text{Eu}$ phosphors. *Physica Status Solidi (a)*, vol. 201, núm. 1: 148-156.
- Zhang, J., Zhong-Lin, W., Liu, J. *et al.* (2003). *Self-assembled nanostructures*, Nanostructures Science and Technology, Series, David J. Lockwood (ed.). Nueva York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Agua y salud pública

Elena León Magaña*

La gestión del agua toma relevancia en la opinión pública a partir de las propuestas de ley recientemente presentadas en nuestro país. En particular, la Ley Korenfeld fue señalada por poner en entredicho el derecho humano al agua al no garantizar el usufructo gratuito de por lo menos un mínimo vital, de calidad, a toda la población, ya de por sí cada vez más empobrecida. En cambio, se entendía que el derecho humano al agua sería producto de asegurar el acceso (oferta de infraestructura) a cambio de un pago. Además, presuponía candados a la investigación científica al establecer sanciones administrativas a quienes no obtuvieran el permiso correspondiente.

Lo que es un hecho, independientemente del debate nacional, pero también internacional en curso en materia del derecho humano al agua y por tanto de las modalidades de acceso, gestión y usufructo, es que a nivel mundial, según la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente 780 millones de personas carecen de acceso a fuentes de agua limpia y unos 2.5 mil millones carecen de servicio de saneamiento, de ahí que se presenten, por consumo de agua contaminada, unos 4 mil millones de casos de diarrea al año y unas 2.2 millones de muertes (la mayoría, niños menores de cinco años) (en Delgado, 2014). Tal situación, sin duda, se complica conforme se agudiza la crisis ambiental y climática (IPCC, 2014; PNUMA, 2012): unos 1,800 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua y dos terceras partes de la población vivirá en condiciones de estrés hídrico (Delgado, 2014).

En México, según información de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la demanda de agua aumentó seis veces en el último siglo, afectando la disponibilidad natural media anual por habitante en un 64 por ciento (Conagua, 2011). En este contexto, el abastecimiento de agua nacional proviene en un 38% de corrientes y cuerpos superficiales y el resto del subsuelo, es decir, de 653 acuíferos subterráneos, de los que entre 100 y 106 proporcionan el 55.2 por ciento del total del agua para todos los usos; de manera que dicha extracción proporciona el 60.4 por ciento del abastecimiento hídrico público y 59.2 por ciento para el sector industrial (Conagua, 2014). Esta sobreexplotación ha derivado en problemas de contaminación por liberación de químicos naturales altamente tóxicos como el arsénico, flúor y plomo; además, 15 fuentes de este líquido presentan intrusión marina y 31 un fenómeno de salinización; por lo cual casi un 70 por ciento de las

* Lic. en comunicación y periodismo. Mtra. en filosofía de la ciencia. Colabora con el Seminario de Filosofía de la Tecnología de la FFyL y con la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. Correspondencia: (leoneleanna@gmail.com).

cuencas hidrológicas de nuestro país presentan algún grado de contaminación (Conagua, 2014).

Actualmente, Conagua considera tres indicadores para la evaluación de la calidad del agua: demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), mientras que en los ríos de México se vierten o llegan de manera indirecta cientos de sustancias químicas, entre ellas nano partículas de las que aún no conocemos claramente su impacto ambiental y en la salud. Para 2013, más del 75.6 por ciento de la DBO generada por industrias y municipios llegó a los ríos directamente. Las descargas industriales generan 50.8 por ciento más contaminación (expresada en DBO) que las aguas residuales municipales (Conagua, 2014).

Mientras que la Unión Europea ha reglamentado miles de compuestos y prohibido varios, en México, se pueden descargar en los ríos sustancias altamente tóxicas como el non-lifenol o el benceno sin sanción alguna (Greenpeace, 2012).

Por otro lado, el consumo anual por persona en 2004, según la Organización de las Naciones Unidas, fue de 169 litros (Marañón, 2008), lo que colocó a nuestro país como el segundo consumidor, a nivel mundial, de este líquido. Para 2009, según la International Bottled Water Association, el consumo per cápita de agua embotellada ya era de unos 234 litros, alcanzando el mayor consumo per cápita de agua embotellada del planeta (Delgado, 2014). Este consumo representa la existencia de empresas embotelladoras de agua (y de bebidas en general; sobre todo refrescos), responsables de vender el 83 por ciento del agua que se consume para beber, disponiéndola en garrafones y el resto en envases personales; es decir, la hidratación de los mexicanos no es gratuita. El mercado mexicano de agua embotellada, esencialmente controlado por cuatro multinacionales, se estima para 2015 en unos 13 mil millones de dólares (Delgado, 2014).

En cuanto a los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales, desde 1989, los municipios tienen la responsabilidad de operarlos; sin embargo, de los dos mil 445 municipios sólo mil 200 cuentan con organismos operadores que brindan los servicios de abastecimiento y alcantarillado.

La falta de cobertura en el sistema de alcantarillado o drenaje es un factor crítico, pues incide en la falta de gestión integral de los recursos hídricos, es decir, el saneamiento de los mismos. Según el Censo de Población y Vivienda realizado en 2010, indicó que la cobertura de agua potable era de 90.9 por ciento en general —95.4 para zonas urbanas y 81.6 para zonas rurales— (Coagua, 2014); no obstante, estas cifras contemplan tanto aquellas viviendas conectadas al drenaje conectado a una red pública, como aquellas que desaguan en fosas sépticas, barrancas, grietas, ríos, lagos o hacia el mar, siendo que éstas últimas no resultan sustentables. Si las excluyésemos, tendríamos un total de 87.7 por ciento de viviendas con una cobertura adecuada de sistema de alcantarillado o drenaje. En cuanto al agua entubada,

sólo el 64 por ciento de los habitantes del área rural cuentan con este servicio. Los estados más afectados por esta carencia son Oaxaca, Guerrero, Chiapas y Veracruz.

La Conagua también informó que para 2011, de los 237 litros de aguas residuales generadas cada segundo, sólo se trató el 37 por ciento en alguna de las 2 mil 29 plantas en operación. La situación del uso no municipal es peor, incluyendo la industria, para 2009, las 2 mil 186 plantas en operación sólo trataron el 19.3 por ciento de las aguas generadas.

Estamos frente a un reto de gran calado en el que el avance científico y tecnológico es vital. En este sentido, es importante considerar el rol de la investigación nano, es decir el de las nanociencias y la nanotecnología (n&n), tanto en su potencial como en las controversias presentes. Y es que, por un lado, es notorio el potencial de la n&n para ofrecer diversas soluciones tecnológicas, pero también de la posibilidad de generar importantes daños a la salud y a los ecosistemas debido a la liberación de materiales nanoestructurados tóxicos. Por el otro lado, preocupa que la propiedad privada del conocimiento generado pueda derivar en un encarecimiento de las innovaciones nano para los ciudadanos, quienes, además, no cuentan hasta el momento con un canal robusto de información que les permita dimensionar el impacto, positivo y potencialmente indeseable del uso cotidiano de estas (nano) tecnologías.

Para indagar en estas cuestiones, se consultó a expertos en la materia. A continuación se presenta su posicionamiento.

Panorama n&n desde la perspectiva gubernamental

Víctor Bourguett, director del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) hasta el 17 de junio del 2015, expresó que si bien la potabilización y el tratamiento de las aguas residuales son temas prioritarios para el IMTA, no son prioridad el uso y regulación de las nanopartículas, ya sea para la prevención de riesgos o para el uso de las mismas en el tratamiento del agua.

Bourguett respondió que poder alcanzar una normatividad es un proceso largo que requiere una previa determinación del impacto que estas partículas pueden tener, y, en este momento, el instituto está en una fase de identificación bastante inicial. Agregó que desconoce que en el mundo haya una normatividad de esta naturaleza, y que la gran cantidad de urgencias de nuestro país en el tema del agua vuelven muy complicado poder enfocar esfuerzos al tema de nanociencia y nanotecnología.

Señaló que las prioridades del instituto están encauzadas a la sequía y al estudio de contaminantes emergentes, y sobre todo, la función del IMTA consiste en el uso de materiales de bajo costo para el tratamiento del agua. En este momento, puntualizó, están enfocados en el uso de cortezas de árbol, cintilla plástica y PET para el tratamiento de aguas residuales. La prioridad es reducir costos.

Sin embargo, reconoció que a las plantas de tratamiento llegan cada vez más cosas que no están siendo evaluadas y no están preparadas para eliminar estos compuestos del agua. Subrayó que el esquema consiste primero en identificar que dichas partículas son riesgosas y después buscar la manera de eliminarlas al más bajo costo posible. En cuanto al tema de riesgo, indicó que ahora están enfocados en temas como las inundaciones, por ejemplo, pero no en la toxicología de partículas nano.

Es importante la posición del IMTA toda vez que, según palabras de Bourguett, éste corresponde al brazo tecnológico de Conagua, de manera que gran cantidad de los problemas que enfrenta la comisión dependen del apoyo científico y tecnológico que reciba del IMTA. En este contexto, el problema del uso y regulación de las nanopartículas vertidas en el agua y utilizadas para el tratamiento de la misma exigen la atención de Conagua y el IMTA para promover normatividades y leyes que prevengan riesgos para la población.

Bourguett explica que el IMTA es una paraestatal que funciona como un centro público de investigación, son responsables de desarrollar patentes que más tarde ofertan a la industria privada, o bien desarrollan alianzas con empresas para comercializar y transferir el conocimiento que se genera en el instituto. En este sentido, dijo que el conocimiento producido no puede ser del dominio público y es obligación del IMTA protegerlo, puesto que ellos venden servicios tecnológicos tanto al sector privado como al sector público. Con el dinero obtenido pueden dar becas a estudiantes de posgrado. Considero que una de las funciones sociales más importantes del instituto consiste precisamente en formar recursos humanos y participar en comités para el desarrollo de normas y evaluaciones ambientales.

Víctor Bourguett agregó que actualmente tienen en puerta un proyecto importante con la UNESCO y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual será un centro tipo II dedicado al tema de la seguridad del agua. En un inicio estará financiado por Conagua, pero después será auspiciado por la UNESCO de manera directa, y estará enfocado al tema de la sequía y desastres naturales, por lo que trabajarán cercanamente con el Centro Nacional de Huracanes y el Servicio Meteorológico Nacional.

Finalmente, puntualizó la necesidad de tener cuotas de agua ajustadas a la realidad, ya que proporcionar el servicio de potabilización y tratamiento del agua es muy costoso, de manera que el acceso al agua no debería ser gratuito, porque llevar el agua a los hogares tiene un alto costo. Al respecto, agregó que el IMTA cuenta con un programa para la apropiación de tecnologías en zonas rurales, principalmente, donde enseñan a las poblaciones el uso de tecnologías del agua para que no tengan que cubrir los gastos que implicaría proporcionárselos.

Reglamentación nano y riesgos a la salud. Ecodiseño y ACV

En una postura distinta se encuentra la tarea de Pedro Joaquín Gutiérrez Yurrita, coordinador de los programas de doctorado del Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional (CIEMAD-IPN). Gutiérrez Yurrita tiene experiencia en ecología, especialmente en derecho ambiental, y encuentra sumamente preocupante la falta de legislación en el tema de nanociencias y nanotecnología.

Llegó al tema a partir de su experiencia en la gestión del uso del agua en el campo. Es el responsable de la primera maestría en gestión integral de cuencas hidrográficas en la que, junto con la Sagarpa y Semarnat, se capacitan estudiantes para el desarrollo sustentable de la sierra. Comenta que en aquel momento surgió la Ley de Aguas Nacionales; no obstante, señala que sólo fue un “refrito” de la ley anterior y que ésta no establece claramente para qué sirven los tipos de aguas y qué tratamiento deben tener, tampoco cómo se deben manejar, ni cuál es la dotación de agua que debe recibir cada uno de los sectores: social, industrial, agropecuario, menos aún pone énfasis en el tema ambiental, de vital importancia para el desarrollo sustentable.

Más tarde, encuentra que quienes vienen a México a capacitar sobre el manejo del agua no consideran un manejo adecuado de los desechos según los tipos de desechos; ejemplo de ello es el agua proveniente de los hospitales, de manera que esta agua se reúne con el resto y después del tratamiento en las plantas, lo mismo puede llegar a riego para el campo o a las ciudades u hospitales nuevamente. Esto llama su atención, toda vez que muchos de los medicamentos utilizados pueden estar hechos a base de nano partículas. A partir de este momento se enfoca en el tema de la legislación nano.

Una de sus principales preocupaciones es la industria nano, pues no hay una regulación específica que le impida un manejo peligroso de los desechos originados durante la producción; si bien nos basamos en algunas regulaciones internacionales para ciertas cuestiones de índole técnico internacional, no tenemos nada en concreto para el caso de México. Las leyes no sólo no resguardan el posible impacto del desecho de los residuos nano en las cuencas y ríos, sino que tampoco hay legislación alguna que proteja a los trabajadores que producen artículos elaborados con nanotecnología, que normalice la disposición de los productos nano que han cumplido su vida útil, que establezca cómo deben transportarse, y tampoco para el uso de medicamentos nano y el desecho de los mismos por los pacientes, o bien, la disposición de un cadáver que en vida fue sometido a tratamientos con medicamentos nano.

Gutiérrez Yurrita señala que el uso de nanotecnologías ya está contaminando en tres niveles: atmósfera, suelo y agua; debido a que el ciclo del agua permite que estas nanopartículas lleguen a cualquiera de éstos. Y tiene razón, pues según Keller y colegas (2013), actualmente, entre el 63 por

ciento y el 91 por ciento de los nanomateriales nanoestructurados son eventualmente dispuestos en basureros convencionales. En tal contexto, la disposición de nanomateriales en suelos representa un cuarto del total con unas 80 mil toneladas métricas al año; aquellos que terminan en cuerpos de agua entre el 0.4% y el 7% (con hasta 29 mil toneladas métricas al año) y los que ambulan en el aire, alrededor del 1.5 por ciento (con unas 4 mil 800 toneladas métricas); el resto o unas 204 mil toneladas métricas terminan en los basureros. Según la investigación de los autores, publicada en el *Journal of Nanoparticle Research*, las principales fuentes de origen de los materiales nanoestructurados por el ser humano son: las pinturas, pigmentos y recubrimientos (80 mil 500 toneladas métricas al año); los cosméticos (48 mil toneladas métricas al año); los electrónicos y ópticos (48 mil toneladas métricas al año) y las aplicaciones en energía y medioambientales (43 mil toneladas métricas anuales; entre otras como las aplicaciones médicas que ya suman más de 13 mil toneladas métricas anuales (*Ibid*).

Ante tal panorama, Pedro Gutiérrez enfatiza que la legislación nano no es algo que pueda esperar años, ya que podríamos apreciar las consecuencias inclusive a corto plazo, sobre todo en el área de salud pues las nanopartículas afectan un nivel aún más pequeño que los microbios mismos, de manera que la superficie de adsorción es mayor, pudiendo tener en el futuro la aparición de nanoenfermedades, debido a mayores grados de exposición a nanomateriales.

Agregó que no hay estudios en el país que nos permitan conocer qué sucede una vez que las nanopartículas llegan a los ríos. Es por ello que actualmente tiene una propuesta para muestrear fauna silvestre en ríos donde se juntan grandes afluentes de agua. Por ejemplo, en el río Tula, en la presa Zimapán, en el río Moctezuma, para hacer muestreos tanto de agua, sedimentos, fauna acuática, incluyendo peces y macroinvertebrados, de manera que puedan conocer cómo afectan los desechos y vertidos nano en la composición y la comunidad biológica de estos cauces de agua, así como en los mamíferos que bajan a beber agua.

Pedro Gutiérrez indicó la necesidad de poner énfasis en las legislaciones, así como en el análisis de ciclo de vida de los productos nano así como en las normas relacionadas con el ecodiseño. Señala que estas dos últimas normas existen, pero no se están aplicando. Otro aspecto es que las empresas no cuentan con un portafolio de gestión de riesgo de desastre.

Concluyó que la mejor forma de movilizar la legislación es presionando desde las leyes de salud, siempre que el impacto más severo podrá localizarse en esta área, así como hacer llegar a la población la información necesaria sobre las consecuencias de la producción y uso de nanoprodutos.

Tratamiento adecuado del agua y transferencia tecnológica

María Teresa Herrera Alarcón, directora del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Unidad Durango, es especialista en el tratamiento de agua y todo lo referente a la calidad del agua y sus diferentes usos. Explicó que parte de su gestión en el CIMAV está orientada a generar distintos procesos de tratamiento de agua para darle la calidad necesaria a partir del uso de tecnología nano. Ése es uno de los objetivos del Centro de Innovación y Competitividad en Energías Renovables y Medio Ambiente del estado de Durango, dependiente del CIMAV, y cuya misión es llevar a cabo investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos, en las temáticas de medio ambiente y energías renovables.

Considera que en lo referente al tratamiento de agua, los nanomateriales tienen mucha importancia ya que las características fisicoquímicas del comportamiento del nanomaterial es muy diferente de lo que ofrecen los mismos materiales de tamaño convencional. De manera que están poniendo especial atención en el uso de los mismos para el tratamiento de aguas residuales y de agua potable. Indicó que en cuanto a potabilización hay varios proyectos sobre el uso de nanomateriales, por ejemplo, para la remoción de arsénico y flúor.

Actualmente, el mencionado Centro está trabajando en el uso de fotocatalisis heterogénea a partir del uso del dióxido de titanio como catalizador. El objetivo es encontrar un nanocatalizador que mejore el proceso. Al respecto, señaló que si bien el factor de encontrar materiales de bajo costo es importante, es necesario contemplar, sobre todo, el riesgo ambiental y la exposición a la salud pública, así como la factibilidad técnica en el uso de nanomateriales.

Explicó que en el caso de la potabilización, infección, y desinfección, ya se está investigando el uso de nanomateriales como los óxidos de plata y otros materiales derivados de la plata pues se ha visto cómo éstos mejoran los procesos de catálisis. Sin embargo, comentó que la mayoría de las investigaciones se encuentran todavía a nivel piloto, intentando dar el salto hacia el análisis de planta piloto.

Uno de los objetivos de Teresa Herrera es el desarrollo de procesos de tratamiento adecuado del agua, pues según el uso que se le vaya a dar, corresponde uno u otro tratamiento particular; ya sea consumo humano, riego agrícola u otros procesos.

En Latinoamérica, abunda Herrera, uno de los temas en la mesa es el tratamiento de agua por medio de membranas, por ejemplo, las de ósmosis inversa, ello además de los procesos de adsorción y filtración; aseguró que en estos temas México se encuentra al mismo nivel que el resto de Latinoamérica.

En cuanto a la situación de las plantas de tratamiento en nuestro país, dijo que es todo un reto, pues hay una gran cantidad de contaminantes de

origen natural, como flúor y arsénico, y el proceso más utilizado, el de la ósmosis inversa, tiene la desventaja de generar una gran cantidad de residuos y por ende un alto costo, además de que la disposición de los mismos es inadecuada y la mayor parte de las veces regresa a los drenajes, representando un problema de contaminación a corto plazo. Es en este tipo de problemáticas donde dijo están enfocando el uso de nanomateriales, buscando que el agua verdaderamente sea potable, puesto que en muchos lugares se está tomando agua desinfectada pero no potable. Para tal fin, se explora el uso de dióxido de titanio nanoestructurado.

Subrayó que la parte social es de suma importancia porque el CIMAV trabaja para la población y es importante que el desarrollo de todas estas tecnologías no se quede almacenada, sino que se puedan transferir a la sociedad de una forma segura y responsable. Una vez que se haya probado que las tecnologías nano funcionan, afirmó Herrera, éstas se podrán aplicar a todos los niveles, ya sea pozo, planta de tratamiento o incluso a nivel de unidad familiar. En este sentido, la investigación tiene que tomar en cuenta las condiciones culturales y de infraestructura, por ejemplo, comunidades rurales e indígenas que no cuentan con agua entubada y quienes además no gustan del sabor a cloro. Aquí la desinfección del agua se convierte en un problema y demanda la búsqueda de alternativas como lo es el caso de la filtración ultravioleta con luz solar, lo cual resulta más sencillo que la fotocatalisis.

En el mismo tema, indicó que buscar estrategias para que las comunidades se apropien de la tecnología debe contemplar quién es el mejor canal de comunicación para llegar a dichas comunidades y fomentar la desinfección y remoción de contaminantes del agua que beben.

Otro problema, que Herrera Alarcón considera prioritario, es que las actuales plantas de tratamiento no son adecuadas para el tratamiento de contaminantes emergentes, los cuales pueden derivar en un problema de salud pública, entre ellos mencionó los fármacos, por lo cual considera necesario observar detalladamente el uso de nanomateriales para atender dicho reto.

Asimismo, Herrera subraya el papel de los investigadores, por un lado, como informantes de los tomadores de decisiones para llevar a cabo las medidas necesarias en materia de políticas públicas y administración de recursos, y por el otro, para que empujen dinámicas interdisciplinarias en la formación de los equipos de investigación con el objeto de no perder de vista la importancia de la comunicación adecuada de los descubrimientos a la población.

Mantener las nanopartículas fuera del agua

Sandra Rodil, investigadora del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, se encuentra evaluando el uso del óxido de bismuto como un fotocatalizador que permita retirar partículas nocivas del agua residual. La importancia de esta investigación parte del

riesgo que puede representar el uso de nanopulvos para el tratamiento de este líquido. La propuesta consiste en utilizar el óxido de bismuto soportado en un sustrato, evitando su contacto con el agua, de manera que no se pierda la nanopartícula y se pueda tener un control de la misma en todo momento.

Explica que se encuentran evaluando el óxido de bismuto como un fotocatalizador que pueda abarcar desde la descomposición denominada mineralización de moléculas orgánicas que pueden ser nocivas para la salud, hasta la propiedad antibacterial de este elemento. Hasta el momento han observado que puede funcionar como un catalizador para descomponer moléculas orgánicas, entre ellas los colorantes, principalmente, que son moléculas orgánicas que sí tienen efectos en la salud, aunque no son las principales. Considera que a largo plazo habría que probar medicamentos, insecticidas y otras partículas que se utilizan diariamente.

Aunque el óxido de bismuto está orientado a eliminar las partículas de los colorantes, Rodil insistió en que las legislaciones deben ser más cautas con la manera en que la industria se deshace de estos desechos. En este sentido, indicó que el óxido de bismuto también podría ser evaluado para los desechos de la industria del papel, textil y la farmacéutica; no obstante, actualmente están aún valorando las posibilidades de este material.

Una de las ventajas del óxido de bismuto, señaló, es que con la perspectiva de su brecha óptica, su adsorción de luz ocurre a longitudes de onda mucho menores que en el óxido de titanio, lo cual implica la posibilidad de hacer uso de la luz solar, de manera que el sistema sería la parte de fotocatalisis, pudiendo prescindir de una lámpara extra para tener el efecto de catalizador, como ocurre actualmente con el óxido de titanio que requiere de luz ultravioleta.

Explicó que en el laboratorio de la Dra. Montserrat Bizarro ya desarrollaron un sistema piloto donde se ha observado que el material funciona como se espera, y que es preciso ajustar la geometría de cómo se hace el material, cómo es colocado, y cuál es la mejor manera de hacerlo, lo que ha dado indicios de cómo se podría diseñar un sistema completo a una escala más grande, como una planta de tratamiento. Sin embargo, remarcó que aún se está en un periodo de prueba y observación del comportamiento del material ya que puede implicar un riesgo.

En esta fase, realizan películas delgadas de óxido de bismuto, las cuales están soportadas sobre un sustrato, donde el área superficial, el área activa en la cual se va a dar el proceso fotocatalizador debe optimizarse, maximizarlo de manera que el agua esté en contacto con esa superficie y pueda darse el proceso de degradación de las moléculas. Esto implica que quizá se deba colocar la película en diferentes sistemas para lograr maximizarla. Entonces, las pruebas también tienen que ver con encontrar el mejor diseño para llevar a cabo la fotocatalisis.

Una ventaja de las películas delgadas es que se ahorra el proceso de filtrado, pues al estar el material soportado en un sustrato, el agua fluye, se da

el proceso de degradación de las moléculas orgánicas, pero el agua no lleva ninguna partícula del fotocatalizador, a diferencia de muchos otros reactores que sí trabajan con nanopartículas, o partículas micrométricas, que hay que filtrar después del proceso de limpieza. Al estar soportado el fotocatalizador, ese proceso no es necesario, pero sí demanda un máximo contacto entre el agua y el catalizador. Ello implica que el diseño del reactor debe garantizar que se pueda tener el proceso de degradación de las moléculas lo más rápido posible y en el menor tiempo.

Asimismo, puso especial énfasis en que, si bien, las partículas de color ya no son visibles a simple vista, aún es necesario asegurarse que esa molécula queda totalmente descompuesta en CO_2 y que no queda ningún resto de otro tipo de molécula orgánica compleja que pueda también tener efectos a la salud.

En cuanto al tema de la patente y la propiedad del conocimiento, Rodil señaló que esta investigación se inició al interior de un consorcio cuyo objetivo era estudiar diferentes compuestos de bismuto, donde los derechos de la investigación serían para la institución que llevara a cabo el descubrimiento, pero una vez finalizado el periodo de trabajo, cada institución está por su cuenta. No obstante, han estado comparando resultados con el Politécnico de Torino, en Italia, con quienes tendrían que discutir, llegado el momento, la situación de la patente, pero hasta el momento, el conocimiento derivado de este trabajo lo están vislumbrando como dominio público, en cuanto al uso del material, pero en el caso de poder patentar un reactor, sí desean protegerlo. Señala que si el material funciona como se piensa, lo mejor es que sea de dominio público para que pueda ser explotado y utilizado, toda vez que éste abunda en el planeta, y que uno de los objetivos es que haya aplicaciones avanzadas y de gran escala, pues nuestro país es productor de este material.

Aunado a ello, Sandra Rodil agregó que el uso de este material es muy sostenible, puesto que actualmente se extrae como un subproducto de la explotación minera; es decir, la obtención del óxido de bismuto no significa un esfuerzo mayor.

Como es posible observar, el uso de las tecnologías nano es un hecho contundente. Ya es posible hablar de una industria nano y de contaminación nano. Por lo que la legislación en materia de n&n es urgente. Asimismo, es importante desarrollar capacidades científicas y tecnológicas en la población para que puedan tomar una postura crítica del uso y manejo de estos productos, a la vez que puedan sumar fuerzas para la normalización del uso de estas partículas y el desecho de las mismas.

Según la Agenda Ciudadana de Ciencia, Tecnología e Innovación (www.agendaciudadana.mx), uno de los retos más urgentes para nuestro país es dotar de agua en cantidad y calidad suficientes a todos los mexicanos, además de asegurar el saneamiento de este líquido, y poner énfasis en las políticas públicas que garanticen el acceso a este líquido, sin embargo, el tema del

desarrollo de tecnologías nano para la limpieza y tratamiento de los mismos, así como la contaminación por los productos de la industria nano ponen en peligro la garantía de acceso al líquido de calidad, sea por la posibilidad de un desastre ecológico o por la consolidación de tecnologías demasiado costosas que no puedan ser costeadas por los ciudadanos.

Ante este panorama, concluimos que se precisa estar vigilantes y empujar en cambio una innovación tecnológica sustentable pensada desde y para las distintas realidades de la población mexicana. En este papel quizá sea necesario poner sobre la mesa de debate el tema de la apropiación hacia la sustentabilidad en la actualización tecnológica de tratamiento; es decir, que la innovación de nuevas tecnologías enfocadas a la potabilización y tratamiento del agua no generen elevados costos que las conviertan en opciones inalcanzables para la mayoría de los contextos de la población mexicana, sino que puedan aspirar a ser tecnologías de bajo costo de operación y mantenimiento y apropiables por la población.

Bibliografía

- Conagua - Comisión Nacional del Agua (2014). *Estadística del agua en México*. Gobierno Federal. México.
- Conagua-Comisión Nacional del Agua (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. Gobierno Federal. México.
- Delgado Ramos, Gian Carlo (coord.) (2014). *Apropiación de agua, medio ambiente y obesidad. Los impactos del negocio de bebidas embotelladas en México*. CEIICH, UNAM. México. Disponible en: <<http://computo.ceiich.unam.mx/webceiich/docs/libro/Apropiacion%20de%20agua.pdf>>.
- Greenpeace México (2012). *Ríos Mexicanos, ríos tóxicos*. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/rios_toxicos.pdf>.
- IPCC, 2014: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido / Nueva York, EUA.
- Keller, A., cFerran, S., Lazareva, A., y Suh, S. (2013). Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*, 15: 1692.
- Marañón, B. (2008). *Los costos económicos en salud, asociados al deficiente servicio del agua potable: el caso de las enfermedades diarreicas en México*. México, Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua. Disponible en: <http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=7040:costos-economicos-en-salud-asociados-al-deficiente-servicio-potable&catid=1290:enfermedades&Itemid=100148>.
- PNUMA – Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2012). *GEO5. Perspectivas del medio ambiente mundial*. Nairobi, Kenya.
- Torregrosa, María —Coordinadora— (2013). *Agua*. México, Academia Mexicana de Ciencias.

Entrevistas

Bourguett, Víctor (junio, 2015). Director del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) hasta el 17 de junio de 2015.

Gutiérrez Yurrita, Pedro Joaquín (junio, 2015). Coordinador de los programas de doctorado del Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Politécnico Nacional (CIIEMAD-IPN).

Herrera Alarcón, María Teresa (junio, 2015). Directora del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Unidad Durango.

Rodil, Sandra (junio, 2015). Investigadora del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

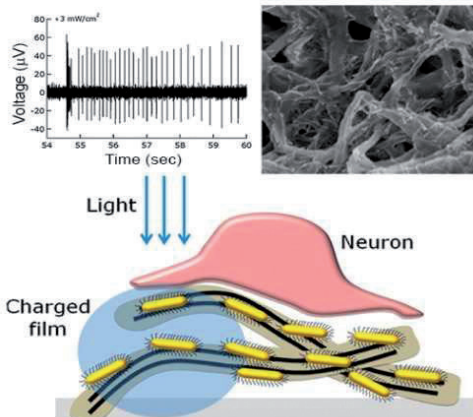
Nanodispositivo para el eventual desarrollo de prótesis retinales

► *Nanowerk*

3 DE DICIEMBRE, 2014 ► Investigadores de la Universidad Hebrea de Jerusalén, la Universidad de Tel Aviv y la Universidad de Newcastle desarrollaron una película sensible a la luz, que podría algún día ser la base de una prótesis de retina para personas que sufren de daño o degeneración. En EUA la degeneración retinal por vejez afecta hasta unos 15 millones de personas y cada año se suman 200 mil nuevos casos.

La retina es una capa delgada de tejido en la superficie interior del ojo compuesto de células nerviosas sensibles a la luz, que convierte las imágenes en impulsos eléctricos y los envía al cerebro. El dispositivo, desarrollado con base en nanovarillas de semiconductores y nanotubos de carbono, es flexible, implantable y fotosensible.

Según los investigadores, el nuevo dispositivo es compacto, capaz de una resolución más alta que los diseños anteriores, y también es más eficaz en la estimulación de las neuronas. Si bien aún queda mucho trabajo por hacer hasta que esto puede proporcionar una solución práctica, investigaciones adicionales podrían derivar en que el dispositivo en cuestión pueda eventualmente reemplazar retinas dañadas en los seres humanos.



Película de nanotubos de carbono y nanocristales semiconductores para la estimulación por luz de la retina. La absorción de luz por nanovarillas de semiconductores adheridos a una película de nanotubos de carbono (superior derecha) resultada en la estimulación de la retina (parte superior izquierda).

La investigación puede ser consultada en *Nano Letters*, 14 (11): 6685-6692:

<<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl5034304>>.

Fuente:

(www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=38321.php)

Hacia un nuevo y eficiente diodo de una sola molécula

27 DE MAYO, 2015 ▶ La idea de crear un diodo de una sola molécula fue propuesta por Arieh Aviram y Mark Ratner en 1974, cuando teorizaron que una molécula podría actuar como un rectificador; un conductor de corriente eléctrica en un único sentido. Muchos investigadores han estado explorando desde entonces las propiedades de transporte de carga de las moléculas, demostrando que moléculas individuales unidas a electrodos metálicos pueden llegar a actuar como componentes muy diversos de circuito, incluyendo resistores, interruptores, transistores y, efectivamente, diodos. También se ha corroborado que es posible ver efectos cuánticos, como la interferencia cuántica, manifestándose en las propiedades de conductancia de las uniones moleculares.

Dado que un diodo actúa como una válvula, su estructura necesita ser asimétrica de manera que la electricidad que fluye en una dirección experimente un entorno diferente que la que lo hace en el sentido contrario. Para poder desarrollar un diodo de una sola molécula, los investigadores han diseñado moléculas que tienen estructuras asimétricas en tanto que, efectivamente, muestran algunas propiedades parecidas a las de los diodos. No obstante, distan mucho de ser eficientes. Un diodo bien diseñado sólo permite que la corriente fluya en una dirección (la dirección “on”) y debería permitir que mucha corriente fluya en ella. Los diseños moleculares asimétricos han sufrido habitualmente de flujos de corriente muy bajos tanto en la dirección “on” como en la “off”, y la proporción de flujo de corriente en ambas ha sido

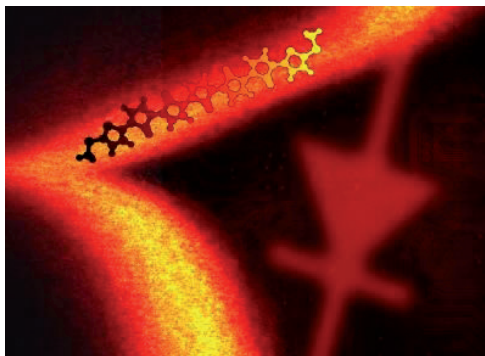


Ilustración de la molécula usada para crear el nuevo tipo de diodo de una sola molécula. (Imagen: Latha Venkataraman, Columbia Engineering).

normalmente baja. Lo deseable es que la proporción de la corriente “on” respecto a la corriente “off” sea muy alta.

Dicha limitación técnica está ahora cambiando gracias a un nuevo y prometedor avance en este campo.

Latha Venkataraman, Brian Capozzi y su equipo, de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Columbia, han diseñado una nueva técnica para crear un diodo de una sola molécula y, al hacerlo, han desarrollado diodos moleculares que se desempeñan 50 veces mejor que todos los diseños anteriores. El equipo es el primero en desarrollar un diodo de una sola molécula capaz de tener aplicaciones tecnológicas prácticas para dispositivos nanométricos.

La investigación puede ser consultada en *Nature Nanotechnology*:

www.nature.com/nnano/journal/vaop/ncurrent/full/nnano.2015.97.html.

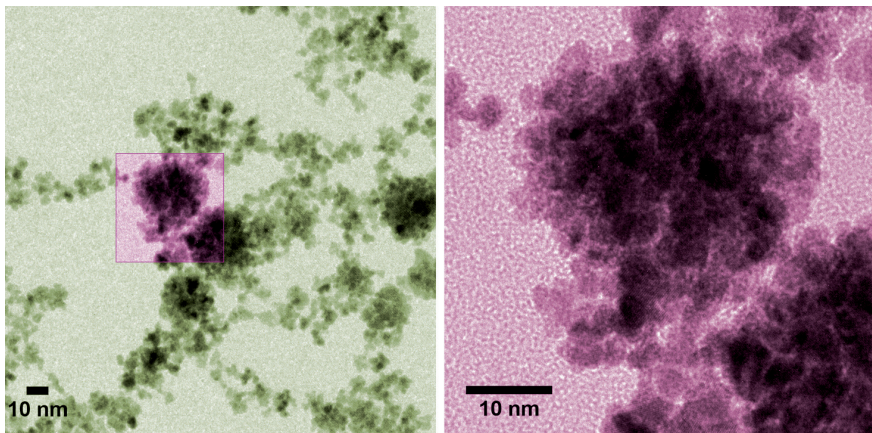
Nanoframbuesas para aplicaciones en celdas de combustible

9 DE JUNIO, 2015 ▶ Investigadores del Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología (NIST) han desarrollado un proceso rápido y simple para producir “nanoframbuesas” de platino, es decir, clústers microscópicos compuestos de nanopartículas de dicho metal. La forma tipo frambuesa es relevante porque habilita una gran área superficial que ayuda en el diseño de catálisis. Y, aún más, se ha logrado saber cuándo y por qué los clústers de bayas se agrupan en racimos más largos de “nanouvas”.

Las nanopartículas pueden actuar como catalizadores para ayudar a convertir el metanol en electricidad en celdas de combustible. El proceso desarrollado por el NIST de 40 minutos para producir las nanoframbuesas tiene diversas ventajas. La gran área superficial de las bayas estimula reacciones eficientes. Además, dado que el proceso usa

agua, ése se puede considerar como solvente “verde”. Los racimos catalizan reacciones de metanol de manera consistente y estable a temperatura ambiente durante al menos ocho semanas.

Considerando que el platino es un metal costoso, se exploran otros materiales alternativos para catálisis donde el comportamiento de la formación de grumos en disolventes es una cuestión clave. En las celdas de combustible, las nanopartículas usualmente son mezcladas con solventes para ligarlas a un electrodo. Para aprender cómo esas fórmulas afectan las propiedades de las nanopartículas los investigadores midieron la aglomeración de partículas con cuatro solventes diferentes. Para las aplicaciones como las de celdas de combustible de metanol, las partículas catalíticas deben permanecer separadas y dispersas en el líquido, no



Micrografías coloreadas de nanopartículas de platino realizadas en el NIST. El color frambuesa sugiere una forma ondulada de las partículas, lo que habilita una gran área superficial para catalizar reacciones en las celdas de combustible. Las partículas individuales son de 3-4 nm de diámetro, pero pueden agruparse en manojos de 100 nm o más en condiciones específicas descubiertas en el estudio del NIST.

Crédito: Curtin/NIST. National Institute of Standards and Technology (NIST), en: <www.nist.gov/mml/acmd/201506_nano-raspberries.cfm>.

aglomeradas. En tal sentido, se observó que la elección del solvente sí es una cuestión importante.

El equipo del NIST midió las condiciones en las que las partículas de platino, de entre 3 a 4 nanómetros (nm) de diámetro, se aglomeran en racimos de 100 nm de ancho o largo. Encontraron que la aglomeración depende de las propiedades eléctricas del solvente. Las frambuesas forman racimos más grandes de uvas en solventes que son menos “polares”, es decir, donde las moléculas de solvente carecen de regiones con cargas fuertemente positivas o negativas (el agua es una molécula fuertemente polar).

Los investigadores esperan lo anterior, pero lo que no esperaban es que la tendencia no se escala de manera predecible. Los cuatro solventes estudiados fueron agua, metanol, etanol e isopropanol, ordenados por la disminución de la polaridad. No se registró mucha

aglomeración en metanol; los racimos crecieron alrededor de 30% más que en el agua. Pero en el etanol y el isopropanol, los grumos consiguieron un tamaño 400% y 600% más grande, respectivamente. Ello es una muy mala calidad de la suspensión para efectos catalíticos.

Debido a que las nanopartículas se agruparon poco a poco y no demasiado en el metanol, los investigadores concluyeron que las partículas podrían ser transferidas a ese disolvente, suponiendo que iban a ser utilizadas dentro de unos cuantos días –efectivamente poniendo una fecha de caducidad en el catalizador.

La investigación, “Stability and phase transfer of catalytically active platinum nanoparticle suspensions” fue publicada en el *Journal of Nanoparticle Research* 17(5): 230:

<<http://link.springer.com/article/10.1007/s11051-015-3034-1>>.

Sensores fluorescentes para detección de nanopartículas nocivas

► *Universidad de Córdoba*

5 DE MAYO, 2015 ► Un equipo de científicos, del Departamento de Química Analítica de la Universidad de Córdoba y el Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario ceiA3, ha desarrollado una serie de sensores nanométricos inocuos y biocompatibles con los que se pueden determinar y cuantificar otras nanopartículas tóxicas acumuladas en los ecosistemas y organismos.

Se trata de un tipo de nanopartícula que, se asegura, no es nociva y por tanto es compatible con el medio ambiente: los *Carbon Dots*. Éstos funcionan como nanosensores fluorescentes selectivos a nanomateriales potencialmente nocivos. Para la Dra. Angelina Cayuela, investigadora de la UCO, el potencial de los *Carbon Dots* radica en que “...son necesarios nuevos métodos de detección y cuantificación de nanotubos de carbono de-

bido a que se producen actualmente miles de toneladas al año y, en un plazo de veinte o treinta años, su acumulación puede llegar a ser un riesgo severo para la salud y el medio ambiente”. Y agrega, “...estamos especialmente satisfechos con los resultados que arrojan estos sensores fluorescentes en agua de río, en mejillones y en cosméticos”. Estos sistemas podrían ser de utilidad para empresas dedicadas al tratamiento de aguas o a la creación de productos de belleza.

Los investigadores han publicado sus resultados de investigación en *Sensor and Actuators B: Chemical*:

<http://www.researchgate.net/profile/Angelina_Cayuela/publication/267450600_Photoluminescent_Carbon_dots_as_sensors_for_carboxylated_multiwalled_carbon_nanotube_detection_in_river_water/links/55092b80cf2d7a2812c1df6.pdf> y *Analytica Chimica Acta*: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267014001937>>.

Nanopartículas de hierro para descontaminar agua

27 DE ENERO, 2015 ▶ Utilizando nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI), investigadores del Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología (Cedenna) de Chile, liderados por el académico del Departamento de Física, el Dr. Samuel Baltazar, identificaron las características de la contaminación del agua con el arsénico, con miras a optimizar su proceso de limpieza.

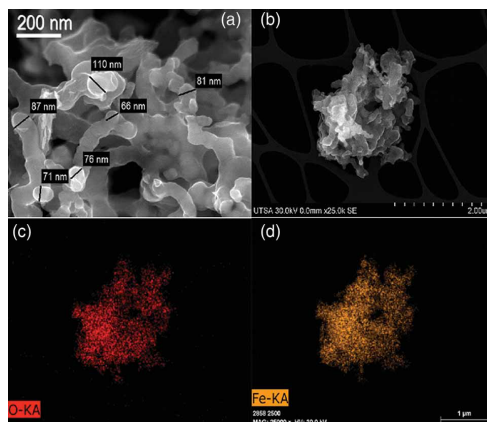
Los investigadores buscaron parámetros destinados a mejorar la eficiencia de la adsorción de diferentes elementos, tales como arsénico, a través de nanopartículas de hierro, en este caso, observando de manera particular el pH, el cual presenta una mayor capacidad de adsorción en condiciones ácidas (pH 4.0). Los investigadores replicaron en laboratorio cómo se presenta ese metaloide naturalmente en zonas de Chile, determinando la relación entre el pH del líquido contaminado con la concentración de arseniato As(V) , y el tiempo de contacto en que las nanopartículas de hierro absorben el arsénico. Los resultados han mostrado ser superiores a los obtenidos con otros productos comerciales actualmente disponibles.

En el marco de esta investigación, también se desarrolló un estudio del plomo como contaminante del agua, comprobándose que era posible su remoción usando hierro. A diferencia del arsénico, en el laboratorio replicaron agua contaminada con plomo como resultado de la intervención del ser humano. También se encontró una relación entre el pH y la remoción del metal pesado, cuyos resultados de capacidad de remoción fueron optimizados. El siguiente paso es conseguir apoyo de la industria para avanzar en la investigación aplicada.

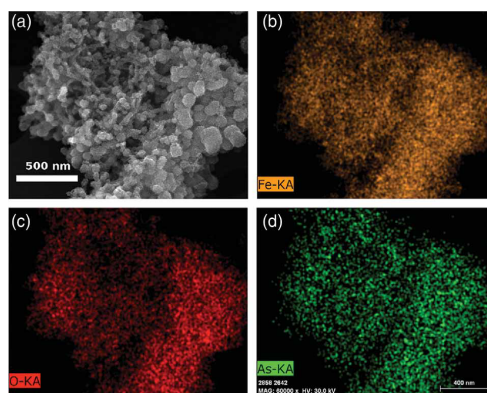
La investigación puede ser consultada en *Environmental Technology*, con el título “Surface rearrangement of nanoscale zerovalent iron: The role of pH and its implications in the kinetics of arsenate sorption”.

lent iron: The role of pH and its implications in the kinetics of arsenate sorption”.

<www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2014.904932>.



Imágenes SEM y EDX de nanopartículas de hierro. (a) nanopartículas de hierro de 50-110 nm. (b) nanopartículas agregadas y su correspondiente mapeo elemental asociado con oxígeno y hierro se representan en (c) y (d), respectivamente. Ambos elementos están homogéneamente distribuidos en la superficie.



Mapeo elemental de Fe con As a un PH4. Imagen SEM (a) muestra la formación de clúster apilados de hierro seguidos de una distribución concentrada de hierro (b), oxígeno (c) y arsénico (d).

Una nueva mirada a la estructura atómica de las superficies de los materiales

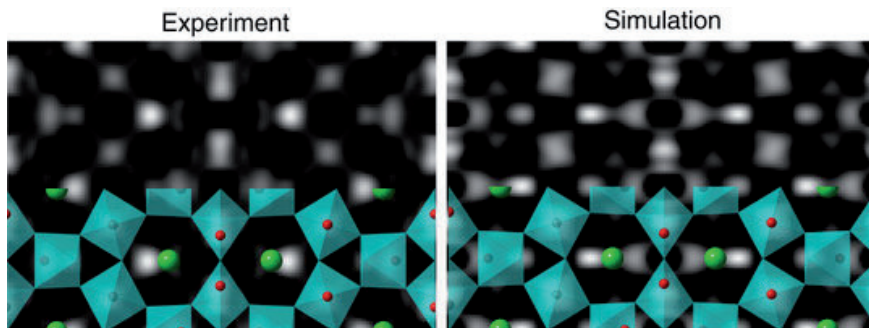
17 DE JUNIO, 2015 ▶ Por primera vez en la larga historia de la microscopía electrónica de barrido, la peculiar estructura atómica de la superficie de un material ha sido resuelta. Este acontecimiento en la ciencia de la generación de imágenes fue posible gracias a la nueva técnica analítica desarrollada por un grupo de investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, parte Departamento de la Energía de EUA. Ésta permite determinar la estructura atómica de una superficie al tiempo que da cuenta de las interfaces existentes. Y es que a pesar de que la superficie de los átomos representa una minúscula fracción del total de número de átomos de un material, estos átomos definen una muy buena porción de las interacciones químicas del material con su entorno.

El grueso de materiales interactúan con otros materiales a través de sus superficies las cuales por lo general son diferentes, tanto en estructura como químicamente en relación con el material en bulto. Muchos procesos relevantes se verifican en las superficies, desde la catálisis usada en la generación de energía hasta en cómo los puentes y los

aviones se oxidan. En esencia, la superficie de cada material puede ser vista como el propio revestimiento del nanomaterial que puede cambiar, de modo considerable, la química y el comportamiento del mismo. Para entender mejor estos procesos y mejorar el comportamiento de los materiales, es vital conocer cómo los átomos están arreglados en las superficies. Y si bien hay hoy día muchos métodos buenos para obtener información para superficies un tanto planas, cuando las superficies son arrugadas, el grueso de instrumentos están limitados en relación con lo que pueden revelar. El método que han desarrollado puede generar una imagen de la superficie de los átomos y de los átomos en bulto al mismo tiempo. Ninguno de los métodos previamente existentes podía hacerlo de manera simultánea.

Los detalles sobre la técnica se pueden consultar en *Nature Communications* bajo el título de “Surface Determination through Atomically Resolved Secondary Electron Imaging”:

<www.nature.com/ncomms/2015/150617/ncomms8358/abs/ncomms8358.html>.



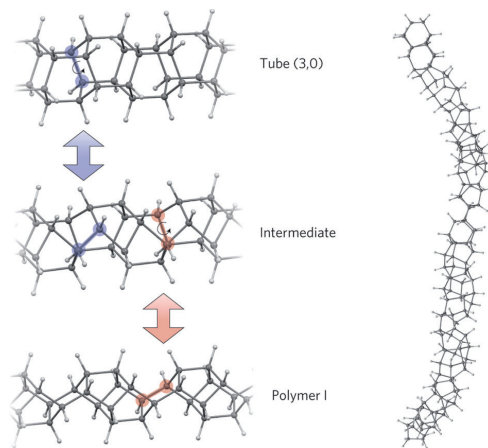
Imágenes HRTEM de la superficie reconstruida de SrTiO₃ (001) c(6 x 2) Sr₇ en una muestra de 5.3 nm de grosor a un desenfoque de 0.55 nm con sustracción mayor y corregida en el registro superficial de arriba-abajo.

Nanohilos de carbono de bajo peso y ultrarresistentes

26 DE MAYO, 2015 ▶ Un nuevo material de carbono, el hilo más pequeño posible de una dimensión que retiene una estructura similar a la del diamante, fue creado a partir de la compresión y descompresión lenta y controlada de benceno. El hilo consiste en aros hexagonales de átomos de carbono unidos en cadenas rodeadas de un halo de átomos de hidrógeno.

Con base en modelaciones computacionales, comparados con los nanotubos de carbono convencionales, los nanohilos producidos bajo este método tienen propiedades mecánicas y electrónicas mucho mejores. El método de síntesis desarrollado abre la posibilidad de variantes, tales como el entrecruzamiento o funcionalización (agregando átomos o pequeñas moléculas a los nanohilos de carbono para alterar su función). Dichas variaciones pueden llevar al diseño y preparación de materiales hoy día desconocidos o imposible de hacer con las técnicas existentes.

Los nanomateriales de base carbono como los fullerenos, nanotubos y el grafeno tienen propiedades físicas extraordinarias asociadas con su baja dimensionalidad y con el tipo de enlace químico tipo-grafito. El descubrimiento en cuestión es pues la síntesis de hilos de carbono de una dimensión con enlaces tipo-diamante de sólo 0.6 nm de diámetro. Estudios computacionales sugieren que estos nanohilos pueden ser altamente rígidos y mucho más fuertes que los nanotubos de carbono o que los polímeros convencionales de alta resistencia.



Modelo atómico y transformación Stone-Wales.

Es posible que se pueda sintetizar una familia completa de materiales de nanohilos diamantados, incluso con entrecruzamientos entre hilos o agregando funcionalidades químicas. Usando las técnicas de fabricación en cuestión, sería tal vez posible producir fibras de bajo peso y ultrarresistentes para el uso en varios materiales estructurales en sistemas de transporte u otras aplicaciones, incluyendo los semiconductores.

Para mayores detalles, léase “Benzene-derived carbon nanothreads” en *Nature Materials*, 2014; 14 (1):

<www.nature.com/nmat/journal/v14/n1/full/nmat4088.html>.

Fuente:

Departamento de Energía en Science Daily.

Nanopartículas de carbono para aplicaciones biomédicas

18 DE JUNIO, 2015 ▶ Investigadores de la Universidad de Illinois, EUA, han encontrado un método fácil para producir nanopartículas de carbono lo suficientemente pequeñas para evadir el sistema inmunológico, reflejar la luz cercana al infrarrojo para su fácil detección y para cargar medicamentos y dirigirlos a tejidos específicos.

A diferencia de otros métodos costosos, donde toman días los procesos de purificación, este nuevo método genera nanopartículas en unas cuantas horas y usa apenas unos cuantos insumos.

Las nanopartículas, de menos de 8 nm, están recubiertas de polímeros que pueden ajustar finamente sus propiedades ópticas y el ritmo de degradación en el cuerpo. Esos polímeros, a su vez, pueden cargarse de medicamento para ser liberado progresivamente.

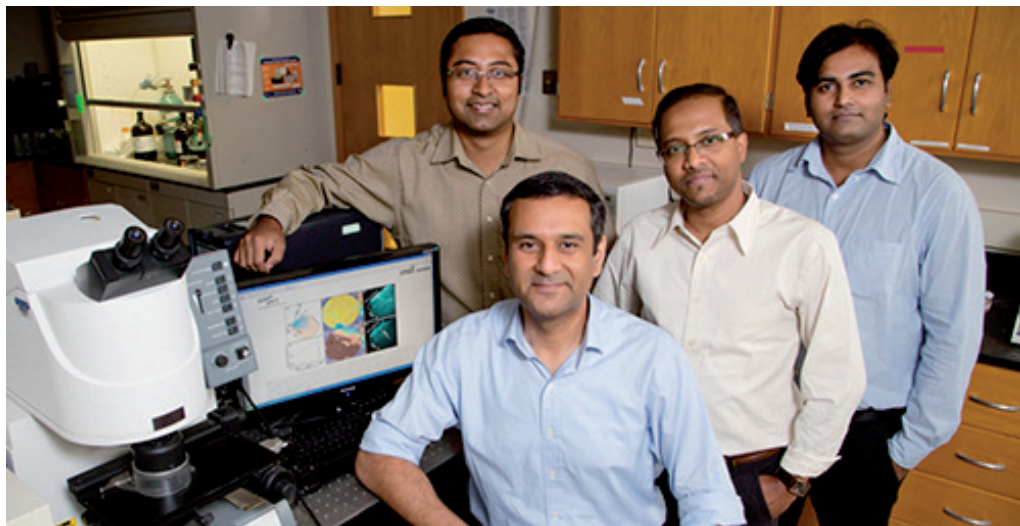
El equipo hizo pruebas *in vitro* para el tratamiento de cáncer de piel, usando técnicas de espectroscopía vibracional para identificar la estructura molecular de las nanopartículas y de las moléculas de medicamento. Las nanopartículas no liberan la droga a temperatura ambiente, pero sí a la temperatura del cuerpo.

Los resultados de la investigación fueron publicados bajo el título de “Tunable luminescent carbon nanospheres with well-defined nanoscale chemistry for synchronized imaging and therapy” en *Small*:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.201500728/abstract;jsessionid=FC41E7313D7AE7DF24185728C7CF5517.f03t02>>.

Fuente:

Universidad de Illinois en Urbana-Champaign en *ScienceDaily*: <www.sciencedaily.com/releases/2015/06/150618122233.htm>.



Investigador posdoctoral Prabuddha Mukherjee, izquierda, investigadores en bioingeniería Rohit Bhargava y Dipanjan Pan, e investigador posdoctoral Santosh Misra. Foto realizada por Brian Stauffer.

Andamios celulares para reparar tejidos dañados

► *Fernando Guzmán*

12 DE ENERO, 2015 ► En la UNAM, el grupo de Ricardo Graziano, del Instituto de Materiales, desarrolla membranas para usos médicos como la regeneración de piel, hueso, dientes, tejido cardíaco y venas. Se trata de membranas o andamios para crecimiento de células con biomateriales que mimetizan las funciones de tejidos nativos (matriz extracelular). Se pueden mencionar los andamios tubulares, de hasta de cuatro milímetros de diámetro, para el desarrollo de venas endoteliales para niños. También, con andamios de poliácido láctico-colágena, podría repararse tejido del corazón dañado por un infarto al miocardio. Lo anterior, indican pruebas *in vitro* realizadas. Igualmente, se desarrollan andamios para la regeneración de piel (para quemados), andamios con nanofibras de poliácido láctico (el polímero más empleado en membranas para usos biomédicos) y nanopartículas de hidroxiapatita para aplicación biocompatible en hueso y dientes. Se indaga, entre otras cuestiones, el potencial de andamios para la liberación controlada de fármacos (de polilactato-glicolida).

Véase:

<<http://www.gaceta.unam.mx/20150112/andamios-celulares-para-reparar-tejidos-danados/>>

Desarrolla física aplicada hueso sintético biocompatible

► *Patricia López*

9 DE MARZO, 2015 ► En el Departamento de Ingeniería Molecular de Materiales del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA), se desarrolla un material sintético implantable, semejante al hueso natural en su estructura química y porosa. Entre las aplicaciones destacan los sensores piezoeléctricos cerca del oído para transformar las señales de presión externa en eléctricas y enviarlas al cerebro. Otro uso será en cáncer. Rodríguez Talavera y colaboradores diseñaron marcadores direccionales, basados en hueso sintético y con porosidad controlada. Son materiales porosos, a los que añaden fármacos de liberación lenta. Con dos años de trabajo en este desarrollo tecnológico, el universitario cuenta con un hueso sintético, inorgánico y cristalino, en el que usan generadores de poros. La segunda parte es la prueba de los sensores de diversos tipos, según la aplicación.

Véase:

<<http://www.acervo.gaceta.unam.mx/index.php/gum10/article/view/72857/72149>>

Novedoso fotocatalizador basado en óxido de bismuto

► *Fernando Guzmán*

27 DE ABRIL, 2015 ► El bismuto, metal que México vende como materia prima y es utilizado en cosmetología y productos farmacéuticos, promete tener una mejor aplicación en fotocatalisis para tratamiento de aguas residuales, gracias a una película delgada o recubrimiento creado en la UNAM. Aunque el país produce 20% del bismuto a escala global (segundo lugar en el mundo), casi nada le reeditúa porque se vende como materia prima, a bajo precio, sin ninguna aplicación de valor agregado. En 2010, para dar ese valor a productos mineros por medio de la nanotecnología, se creó un consorcio multinacional de investigación y desarrollo tecnológico <www.bisnano.org>, integrado por universidades, centros de investigación y empresas. La UNAM participó en el estudio de diferentes opciones de compuestos de bismuto nanométrico con potencial aplicación de alta tecnología. Un producto de su quehacer científico es un óxido metálico basado en bismuto que compite con el óxido de titanio (TiO_2). Se trata de películas delgadas (creadas por un grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones en Materiales) que tienen igual o mejor eficacia que el TiO_2 . Otras aplicaciones serían implantarlo en un sistema de limpieza hospitalaria, en un quirófano, por ejemplo, o purificar el aire, tanto en interiores como exteriores.

Véase:

<<http://www.gaceta.unam.mx/20150427/2015/04/novedoso-fotocatalizador-basado-en-oxido-de-bismuto/>>

Se obtuvieron 79 patentes en seis años

► *Annel Alcántar*

25 DE MAYO, 2015 ► Entre 2008 y 2014, la Coordinación de Innovación y Desarrollo (CID) ha propiciado el otorgamiento, por parte de la autoridad respectiva, de 79 patentes. Desde su fundación, esta instancia ha sostenido que diversas rutas dan valor propio al conocimiento nuevo y cada una está dirigida a poner a disposición de la sociedad las capacidades de la universidad. La CID capacita y acompaña en la gestación de una empresa, al ayudar en la incubación y emprendimiento. Asimismo, respalda en la protección de inventos, diseños o creaciones al gestionar la futura patente o derechos como autor, agregó. Ésta no sólo facilita la formación de los proyectos, sino también su salvaguarda y comercialización, con el reto de propiciar que el quehacer universitario esté más comprometido con el área. Vinculación se divide en tres direcciones: la de servicios tecnológicos, la de transferencia de tecnología, y la de incubación y parques tecnológicos. Además, la CID cuenta con el laboratorio de innovación.

Véase:

<<http://www.gaceta.unam.mx/20150525/se-obtuvieron-79-patentes-en-seis-anos/>>

Sintetizan en Química polímero de origen natural

► Patricia López

11 DE JUNIO, 2015 ► A partir de ácido gálico, sustancia presente en manzanas, nueces, arándanos, hojas de té y corteza de roble, un grupo de científicos de la Facultad de Química sintetizó un polímero de origen natural soluble en agua, semiconductor, antioxidante y antimicrobiano. Con esas propiedades, la nueva molécula llamada poliácido gálico tiene aplicaciones potenciales en electrónica, biomedicina y alimentos. Se ensayan varias aplicaciones, entre ellas, como antimicrobiano para eliminar bacterias en llagas de pacientes con diabetes, como componente de celdas electrocrómicas con las que se elaboran ventanas inteligentes, y también de parches médicos que podrían ser útiles en estudios de regeneración de piel de personas con quemaduras graves. Otro aprovechamiento posible es como aditivo para empaques alimentarios libres de disrupción endócrina, biodegradables.

Véase:

<<http://www.gaceta.unam.mx/20150611/sintetizan-en-quimica-polimero-de-origen-natural/>

Premio de la UNESCO para Noboru Takeuchi

► Guadalupe Lugo

15 DE JUNIO, 2015 ► Por sus aportes a la divulgación y promoción de la ciencia en el área de la nanotecnología para niños y poblaciones indígenas, Noboru Takeuchi, físico e investigador del Centro de Nanociencias y Nanotecnología, recibió el Premio Latinoamericano a la Popularización de la Ciencia y la Tecnología en América Latina y el Caribe 2015, que otorga la REDPOP-UNESCO. Es el máximo reconocimiento que se concede a centros, programas o especialistas con una destacada trayectoria y proyección nacional y regional, con el objetivo de estimular las actividades de popularización de la ciencia y la tecnología en América Latina y el Caribe, así como para valorar los esfuerzos e iniciativas sobresalientes por su creatividad, rigor, impacto y contribuciones. Takeuchi cuenta con una larga trayectoria en la divulgación de la nanotecnología, mediante la publicación de libros para niños, la producción de programas de radio, charlas y conferencias en México y en otros países de la región, acciones que forman parte de Ciencia Pumita, programa de comunicación en la materia, dirigido a los pequeños, del que es fundador y responsable. Destaca su labor de divulgación en poblaciones indígenas, con la traducción de 15 de 22 libros infantiles sobre ciencia y tecnología a nueve lenguas originarias: mixteco, náhuatl, mixe, zapoteco, maya, yokot'an, mazateco, hñahñü y paipai.

Véase:

<<http://www.gaceta.unam.mx/20150615/premio-de-la-unesco-para-noboru-takeuchi/>

Declaratoria de vigencia de normas mexicanas en nanotecnología en el *Diario Oficial de la Federación*

El pasado 11 de agosto de 2015, la Secretaría de Economía, por conducto de la Dirección General de Normas, dio a conocer en el *Diario Oficial de la Federación (DOF)* la declaratoria de vigencia de la norma mexicana listada a continuación, misma que fue elaborada y aprobada por el Comité Técnico de Normalización Nacional de Nanotecnologías, lo que se hace del conocimiento de los productores, distribuidores, consumidores y del público en general. Esta norma entrará en vigor 60 días naturales después de la publicación de esta declaratoria de vigencia en el *DOF*.

NMX-R-13830-SCFI-2014

Nanotecnologías - Guía para el etiquetado de nano-objetos manufacturados y de productos que contengan nano-objetos manufacturados

Campo de aplicación

Esta Norma Mexicana proporciona orientación sobre el formato y contenido del etiquetado voluntario para nano-objetos manufacturados (n-OMs) y productos, preparaciones y mezclas que contengan nano-objetos manufacturados (PC-n-OMs).

También proporciona orientación sobre el uso del término “nano” en el etiquetado del producto.

Está diseñada para usarse por empresas y otras organizaciones que participan en la fabricación, distribución, suministro, manejo, uso y eliminación de n-OMs, PC-n-OMs, o productos que exhiben fenómenos a nano-

escala. También puede ser de utilidad para otras partes interesadas tales como autoridades, profesionales del cuidado de la salud, consumidores, organizaciones de consumidores, ONG's ambientales y sindicatos.

Esta Norma Mexicana no es aplicable a nano-objetos provenientes de procesos naturales (por ejemplo, volcánicos) que no son sometidos a un procesamiento adicional. Los nano-objetos incidentales (por ejemplo, derivados de la combustión de diésel y contaminantes ambientales similares) están fuera de su alcance.

Para los fines de esta Norma Mexicana, el término “manufacturado” incluye materiales naturales que han sido procesados.

Se hace referencia al etiquetado adecuado de productos que exhiban fenómenos en la nanoescala.

En vista de la rápida evolución de las tecnologías de nanoescala con respecto a la caracterización y efectos de n-OMs, el etiquetado correspondiente a esta Norma Mexicana no implica conocimiento o propiedades para los cuales los datos científicos sean limitados o no estén disponibles.

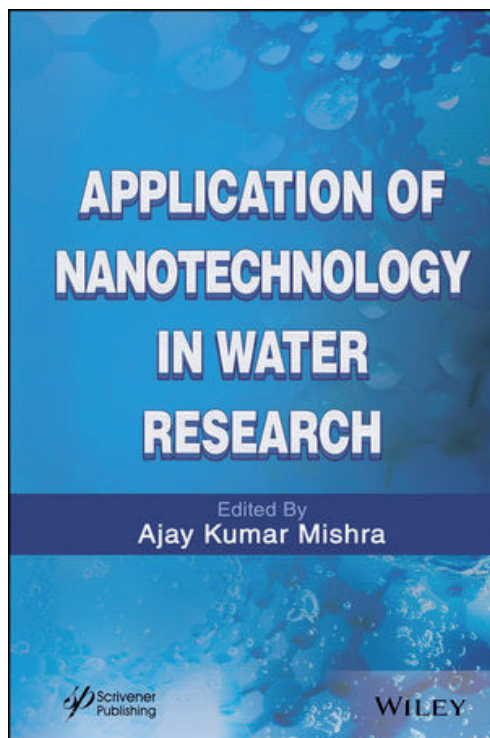
Se pretende que los usuarios de esta Norma Mexicana, en la medida de lo posible, puedan mantenerse al tanto de la investigación en las áreas de salud pública y ocupacional, seguridad y medio ambiente en relación con n-OMs y PC-n-OMs cuando se determine lo relevante para los fines de etiquetado.

**Application of nanotechnology
in water research**

Ajay Kumar Mishra (editor)

Wiley. 552 pp.

2014



Como resultado de las novedosas propiedades que pueden ofrecer los materiales diseñados a escala nano, se abre todo un abanico de aplicaciones en monitoreo de la calidad del agua, remediación, membranas y nanomateriales para el tratamiento de agua.

Las aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales tienen un promisorio impacto pues independientemente de su origen (municipal o industrial) su remediación mediante el uso de nanotecnologías puede permitir su reciclaje y desalinización, pero, además, la detección simultánea de contaminantes biológicos y químicos.

El libro ofrece resultados de investigaciones nanotecnológicas en aplicaciones de vanguardia para el tratamiento, remediación, monitoreo y prevención de la contaminación del agua. Describe procesos de nanofiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y membranas nanorreactivas, considerando que éstos son los componentes más avanzados en tecnologías de purificación y desalinización que remueven, reducen o neutralizan contaminantes del agua que pueden significar un riesgo para la salud humana o los ecosistemas. En ese sentido, se describen algunos materiales clave para la remediación de agua tales como zeolitas, nanotubos de carbono, soportes autoensamblados de una capa y mesoporosos, biopolímeros, nanopartículas de una sola enzima, nanopartículas bimetálicas, fotocatalisis por semiconductores, entre otros. También se revisan cuestiones relacionadas con enfermedades infecciosas y patógenos y microbios transmitidos por el agua, así como aspectos sobre toxicidad de los nanomateriales.

La obra consta de cuatro partes y 17 capítulos. La primera parte aborda la relación entre nanotecnología y agua, dando cuenta de consideraciones éticas y regulatorias, al tiempo que presenta al lector una argumentación sobre la liberación de nanomateriales en los sistemas de agua. La segunda parte se enfoca en la biorremediación de metales pesados con nanotubos de carbono, en la tecnología plasma para la remediación de agua purificada con o sin nanopartículas, y en la remediación a partir de nanosorbentes de polisacáridos. La tercera parte aborda las tecnologías de nanomembranas de carbono para la remoción de contaminantes orgánicos, los nanotubos de carbono para la remoción de iones de metales pesados, el uso de composites de polímeros con nanotubos de carbono y de híbridos de semiconductores y nanotubos de carbono en el tratamiento de

agua, y los avances nanotecnológicos en tecnologías de purificación en el punto de uso y en el punto de entrada. Finalmente, la cuarta parte se centra en una revisión del potencial de materiales específicos: materiales mesoporosos como absorbentes para la purificación de agua, nanomateriales inteligentes como adsorbente 285 para la remoción de flúor, nanosensores químicos para el monitoreo de contaminantes, reducción de 4-nitrofenol como modelo de reacción de nanocatalisis 333, electrodos diamantados dopados para el tratamiento de agua, nanopartículas multifuncionalizadas de plata, cobre y hierro cero-valente, materiales de óxido de hierro para la conversión de contaminantes por foto-fenton, y otros nanomateriales con composición uniforme para el tratamiento de aguas residuales.

Fuente: <<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118496302.html>>.

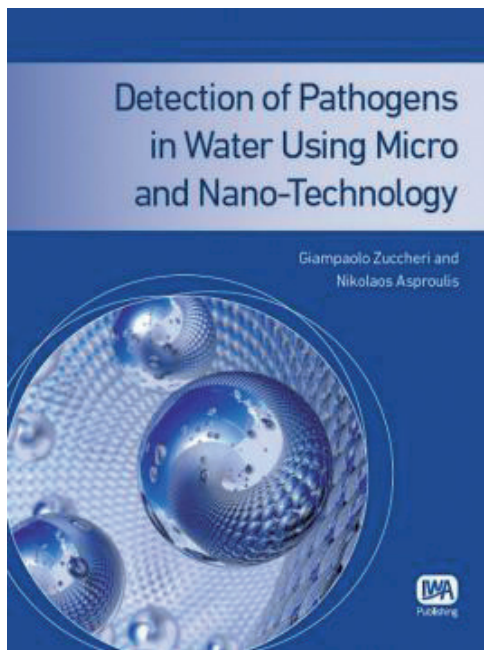
Detection of pathogens in water using micro and nano-technology

Giampaolo Zuccheri and Nikolaos Asproulis

International Water Association. 316 pp. 2012

El libro describe los esfuerzos coordinados de un proyecto de investigación Europeo y los logros alcanzados a partir de una visión integradora de diversas líneas de investigación y que incluyen desde el muestreo, la extracción de ADN / RNA, los microfluidos, nano y microsensores para la detección de hibridación de ADN, hasta el modelaje computacional, y la evaluación de impacto ambiental.

Lo dicho responde a que el desarrollo y la adopción de métodos moleculares está revolucionando el campo de la detección de patógenos en el agua, comúnmente realizado con métodos tradicionales que consumen mucho



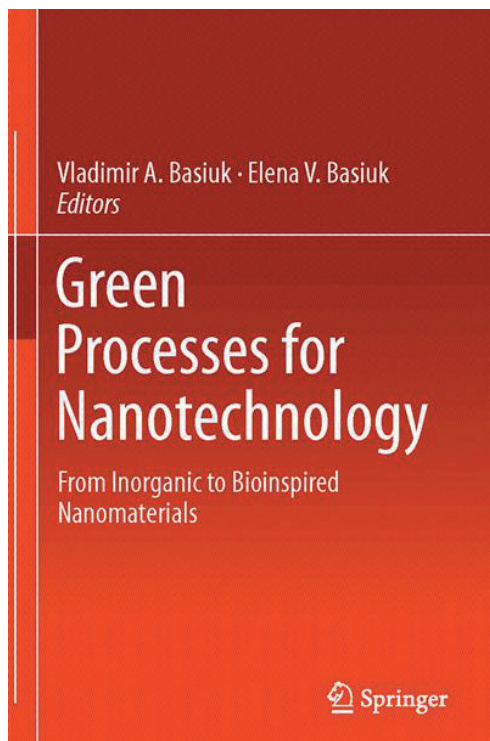
tiempo. Los métodos de detección molecular están permitiendo el desarrollo de instrumentos integrados basados en biosensores que en última instancia permitirán automatizar completamente el análisis microbiológico del agua.

El libro consta de 17 capítulos que cubren temas que van, desde la regulación y los estándares europeos en el análisis microbiológico, hasta el muestreo para procesos de monitoreo en línea, modelos computacionales de ambientes acuosos en micro y nanocanales, multidetección de patógenos en agua cruda y tratada mediante técnicas de ultrafiltración y chips de ADN, detección de bacterias y virus, sensores electroquímicos para la detección de patógenos, el análisis del riesgo de ataques bioterroristas en sistemas de agua potable, entre otras.

Fuente: <<http://www.iwapublishing.com/books/9781780401089/detection-pathogens-water-using-micro-and-nano-technology>>.

**Green processes for nanotechnology.
From inorganic to bioinspired
nanomaterials.**

Vladimir A. Basiuk y Elena V. Basiuk
(editores)
Springer. 446 pp.
2015



El libro es una compilación de trabajos que ofrecen una revisión sobre el diseño y fabricación de nanomateriales bioinspirados y de híbridos complejos bionano a partir de técnicas verdes y con énfasis en la obtención de nanomateriales a partir de recursos renovables.

Consta de 15 capítulos cubriendo temas como la síntesis de nanoestructuras cristalinas inorgánicas; técnicas verdes para la obtención de materiales metálicos de uso biomédico; novedosos avances catálisis de

nanopartículas metálicas y sus usos en hidrogenación de ácido levulínico obtenido a partir de biomasa; síntesis de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos y sus propiedades antibacteriales; propiedades y potenciales aplicaciones de nanomateriales y nanocompuestos de biomasa sintetizados con técnicas verdes; funcionalización de nanomateriales base carbono sin uso de solventes; síntesis verde y biológica de nanopartículas para uso biomédico; síntesis de nanopartículas a partir de un enfoque biogénico; síntesis verde de nanopartículas por plantas; nanomateriales biomiméticos de polímero suave para procesos químicos eficientes; entre otros temas como el ciclo de vida de los nanomateriales o la nanoformulación segura.

Fuente: <<http://www.springer.com/us/book/9783319154602>>.

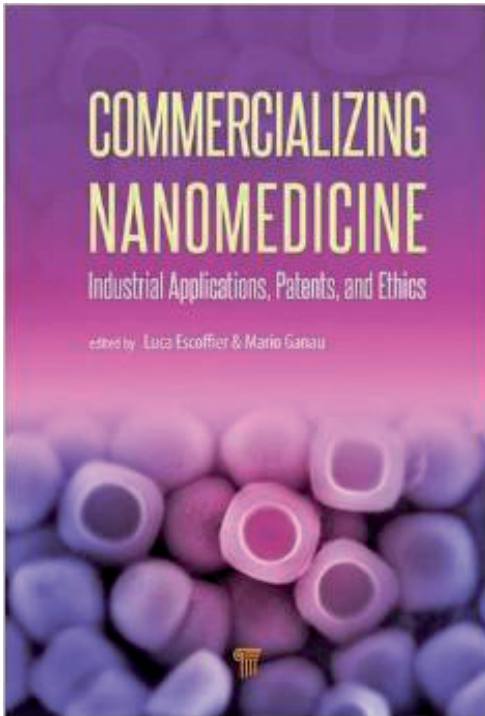
**Commercializing nanomedicine:
Industrial applications, patents
and ethics**

Luca Escoffier, Mario Ganau y
Julielynn Wong
Pan Stanford. 250 pp.
2015

Después de dos décadas de importantes avances en la investigación biomédica, la nanomedicina se ha expandido de los laboratorios a los hospitales y comienza ya a rediseñar el estado del arte de la práctica clínica.

Este libro indaga los avances más recientes en la medicina translacional impulsada por la nanotecnología al tiempo que provee a los lectores de un marco ético y legal de los factores que acompañan este cambio en la práctica médica.

El libro se divide en tres secciones. La primera presenta lo que denomina “el amanecer de una nueva era”, para luego abordar los retos de diagnóstico en la nanomedicina y perfilar la cirugía desde la perspectiva de lo



nano. La segunda sección se desarrolla alrededor de la ética y la nanoética, así como la política y la regulación de la nanomedicina. La tercera sección ofrece un análisis de los derechos de propiedad intelectual, la valoración de la propiedad intelectual en la industria nanotecnológica y su comercialización.

Fuente: <<http://www.tandf.net/books/details/9789814316149/>>

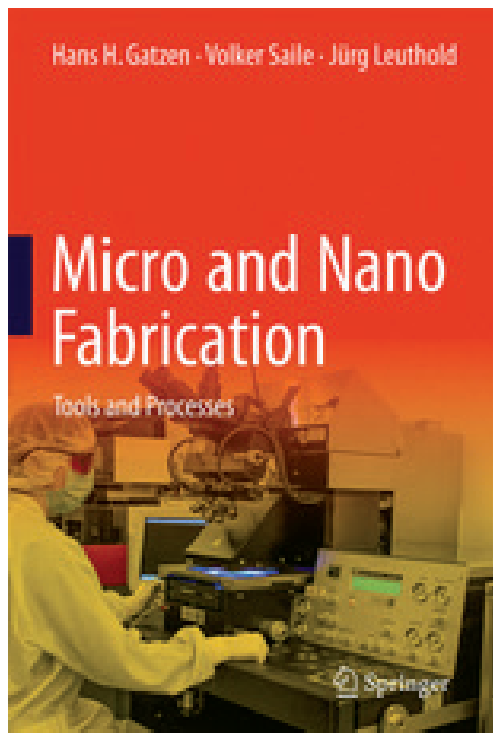
**Micro and nano fabrication:
Tools and processes**

Hans H. Gatzzen, Volker Saile y
Jürg Leuthold
Springer. 519 pp.
2015

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS) y los sistemas nanoelectromecánicos (NEMS) son dispositivos miniaturizados, usualmente con función transductora y con dimensiones

estructurales tan pequeñas como 100 micras o 100 nanómetros, respectivamente. Debido a las dimensiones de dichos sistemas, la producción es muy similar a la empleada en la industria de los semiconductores, aunque sin llegar a los grados de estandarización ya alcanzados por dicha industria.

El libro, escrito para estudiantes, técnicos, ingenieros e investigadores, ofrece una revisión detallada de las herramientas necesarias para fabricar MEMS / NEMS y los procesos tecnológicos empleados. Asimismo, describe las tecnologías que posibilitan tales avances tecnológicos y que son centrales para una producción exitosa como lo son, por ejemplo, el aplanado tipo oblea o el control de contaminantes. Una vez que se introduce al lector en algunos antecedentes históricos del desarrollo de los MEMS, a lo largo de los 10 capítulos subsiguientes, los autores



expone las técnicas de vacío, deposición, grabado, dopado y modificación de superficies, litografía, para la fabricación de partes de alto *ratio aspect* (LIGA); la nanofabricación por autoensamblado; para el aplanado tipo oblea y su enlace, para el control de contaminantes. Se concluye con un ejemplo de fabricación de un dispositivo, en este caso un sistema de levitación electromagnética.

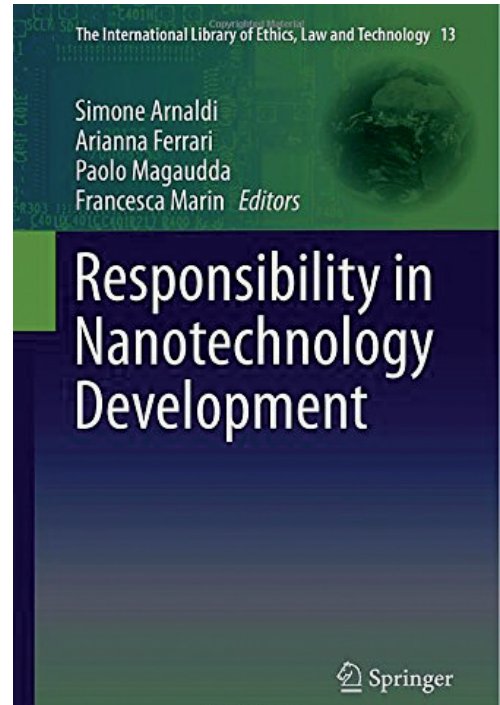
Fuente: <<http://www.springer.com/us/book/9783662443941>>.

Responsible nanotechnology development

Simone Arnaldi, Arianna Ferrari, Paolo Magudda y Francesca Marin (editores)
Springer. 208 pp.
2014

Este libro dilucida los complejos significados de la responsabilidad en el desarrollo de la nanotecnología al centrarse en sus dimensiones teóricas y empíricas. La noción de la responsabilidad es en extremo diversa en el discurso público de las tecnologías a la nanoescala. Por tanto, en la obra se da cuenta de las perspectivas disciplinarias más importantes trabajando en nanotecnología, como lo son la filosofía, la sociología y la ciencia política, así como las áreas multidisciplinares más relevantes en el proceso de innovación tales como la valoración tecnológica y la ética. Asimismo, se enfatiza la interacción entre tales experiencias, disciplinas y programas de investigación con el propósito de proveer un entendimiento multidisciplinar de la responsabilidad.

La obra consta de 11 capítulos, aborda temas como la responsabilidad y las visiones



en la era de las tecnologías emergentes, las características morales intergeneracionales en la era de las tecnologías emergentes, el rol de la responsabilidad en la nanotecnología y la biología sintética, la evaluación tecnológica más allá de la toxicología, los comités de ética en los protocolos de pruebas clínicas de aplicaciones nano, la gobernanza nanotecnológica y la participación pública, la cadena de valor de la responsabilidad en las tecnologías emergentes, las configuraciones de las responsabilidades y organizaciones de frontera, entre otras temáticas.

Fuente: <<http://www.springer.com/us/book/9789401791021>>.

► 7 al 11 de septiembre, 2015

Trends in Nanotechnology International Conference (TNT2015)

Diagora Congress Center. Toulouse, Francia.

<http://www.tntconf.org/2015/index.php?conf=15>

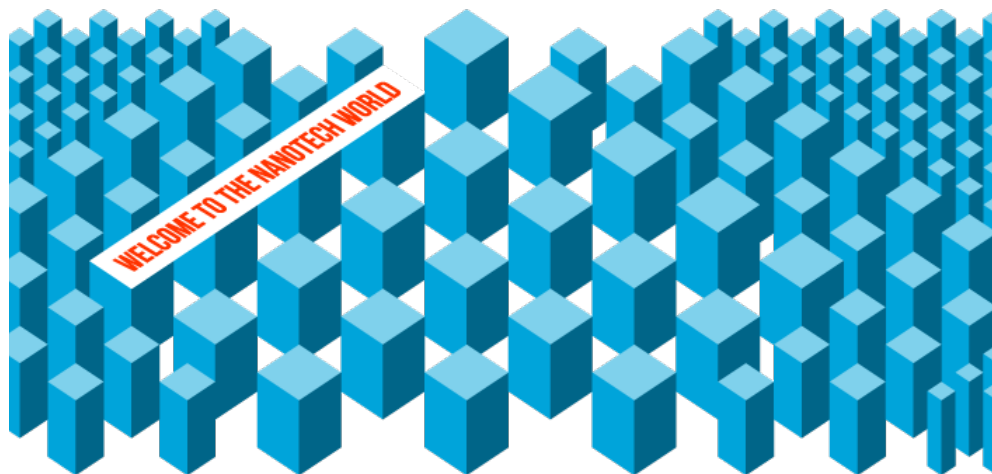


► 29 de septiembre al 2 de octubre, 2015

Nanoforum

Politécnico de Milano, Italia.

<http://www.nanoforum.it>



- ▶ 5 al 7 de noviembre, 2015

Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference

ESPACE Saint-Martin. París, Francia.

<<http://www.annic2015.org>>

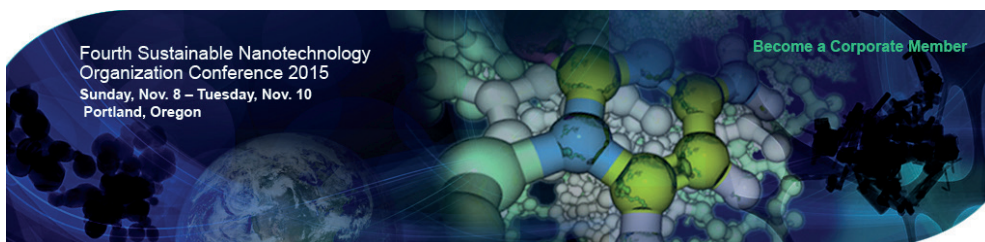


- ▶ 8 al 10 de noviembre, 2015

Fourth Sustainable Nanotechnology Organization Conference 2015

Portland, Oregon. EUA.

<<http://susnano.org>>



INSTRUCTIVO PARA AUTORES

Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología invita a enviar colaboraciones para su siguiente número.

Las colaboraciones deben ajustarse al objetivo principal de la revista, esto es, diseminar los avances y resultados del quehacer científico y humanístico en las áreas de la nanociencia y la nanotecnología por medio de artículos de divulgación escritos en español. Esta publicación está dirigida a un público interesado en aumentar sus conocimientos sobre la nanociencia y la nanotecnología. Deseamos incluir entre nuestros lectores tanto a profesionistas como a estudiantes. La revista está organizada en las siguientes secciones:

Cartas de los lectores

Cartas de los lectores con sugerencias, comentarios o críticas. Comentarios sobre artículos aparecidos en números anteriores de la revista.

Noticias

Notas breves que expliquen descubrimientos científicos, actos académicos, reconocimientos importantes otorgados.

Artículos

Artículos de divulgación sobre aspectos científicos y tecnológicos, político-económicos, éticos, sociales y ambientales de la nanociencia y la nanotecnología. Deben plantear aspectos actuales del tema escogido y dar toda la información necesaria para que un lector no especialista en el tema lo pueda entender. Se deberá hacer hincapié en las contribuciones de los autores y mantener una alta calidad de contenido y análisis. (Deberán iniciar con el resumen y palabras clave en español seguidos del respectivo abstract y keywords en inglés).

Reseñas de libros

Reseñas sobre libros publicados recientemente en el área de nanociencia y nanotecnología.

Imágenes

Se publicarán las mejores fotos o ilustraciones en nanociencia y nanotecnología, las cuales serán escogidas por el comité editorial.

MECANISMO EDITORIAL

I. Toda contribución será evaluada por expertos en la materia. Los criterios que se aplicarán para decidir sobre la publicación del manuscrito serán la calidad científica del trabajo, la precisión de la información, el interés general del tema y el lenguaje claro y comprensible utilizado en la redacción. Los trabajos aceptados serán revisados por un editor de estilo. La versión final del artículo deberá ser aprobada por el autor, sólo en caso de haber cambios sustanciales.

Los artículos deberán ser enviados por correo electrónico a ambos editores con copia al editor asociado de la revista más afín al tema del artículo y con copia a:
mundonanounam@gmail.com

II. Los manuscritos cumplirán con los siguientes lineamientos:

- a) Estar escritos en Microsoft Word, en página tamaño carta, y tipografía Times New Roman en 12 puntos, a espacio y medio. Tamaño máximo de las contribuciones: noticias, una página; cartas de los lectores, dos páginas; reseñas de libros, tres páginas; artículos completos, quince páginas.
- b) En la primera página deberá aparecer el título del artículo, el cual deberá ser corto y atractivo; el nombre del autor o autores; el de sus instituciones de adscripción con las direcciones postales y electrónicas, así como los números telefónicos y de fax.
- c) Enviar un breve anexo que contenga: resumen del artículo, importancia de su divulgación y un resumen curricular de cada autor que incluya: nombre, grado académico o experiencia profesional, número de publicaciones, distinciones y proyectos más relevantes.
- d) Las referencias, destinadas a ampliar la información que se proporciona al lector deberán ser citadas en el texto. Las fichas bibliográficas correspondientes serán agrupadas al final del artículo, en orden alfabético. Ejemplos:

1. Artículos en revistas (no se abrevien los títulos ni de los artículos ni de las revistas):

N. Takeuchi, N. 1998. "Cálculos de primeros principios: un método alternativo para el estudio de materiales". *Ciencia y Desarrollo*, vol. 26, núm. 142, 18.

2. Libros:

Delgado, G.C. 2008. *Guerra por lo invisible: negocio, implicaciones y riesgos de la nanotecnología*. CEIICH, UNAM. México.

3. Internet:

NobelPrice.org. 2007. The Nobel Prize in Physics 1986. En: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/pres.html>

4. En el cuerpo del texto, las referencias deberán ir como en el siguiente ejemplo:

"...y a los lenguajes comunes propuestos (Amozurrua, 2008a) como la epistemología..."

Si son varios autores, la referencia en el cuerpo del texto irá:

(García-Sánchez *et al.*, 2005; Smith, 2000).

5. Las notas serán sólo explicativas, o para ampliar cierta información.

e) Se recomienda la inclusión de gráficas y figuras. Éstas deberán ser enviadas por correo electrónico, en un archivo separado al del texto, en formatos tif o jpg, con un mínimo de resolución de 300 pixeles por pulgada, y estar acompañadas por su respectiva explicación o título y fuente.

