

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>.

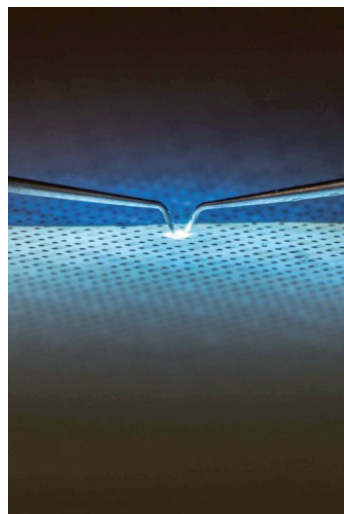
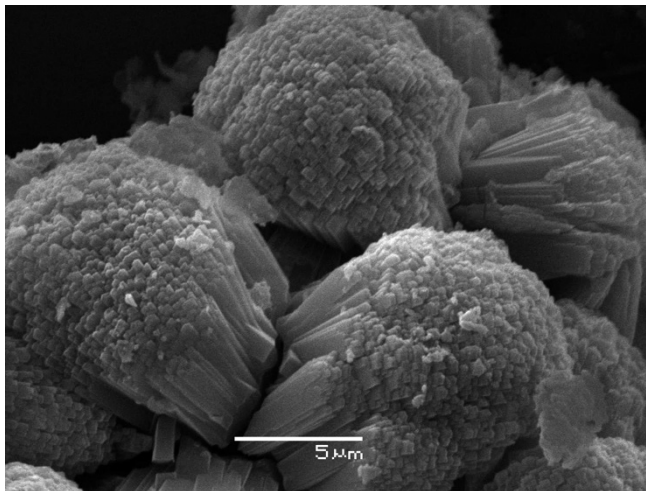


FIGURA 2. Microfotografía TEM de una zeolita.

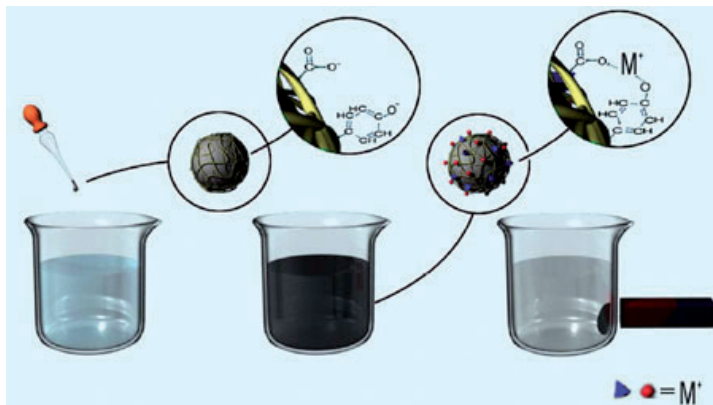


Fuente: <<http://www.institutogea.cl/patentes/>>.

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.

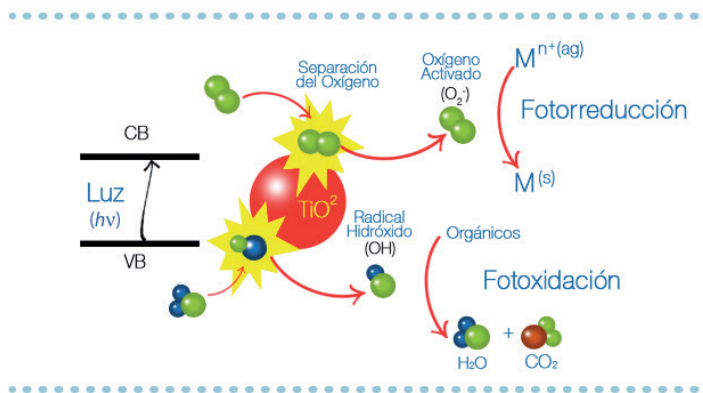


Figura 4. Fuente: <<http://www.nanocapas.es/faq-page#n110>>.

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.

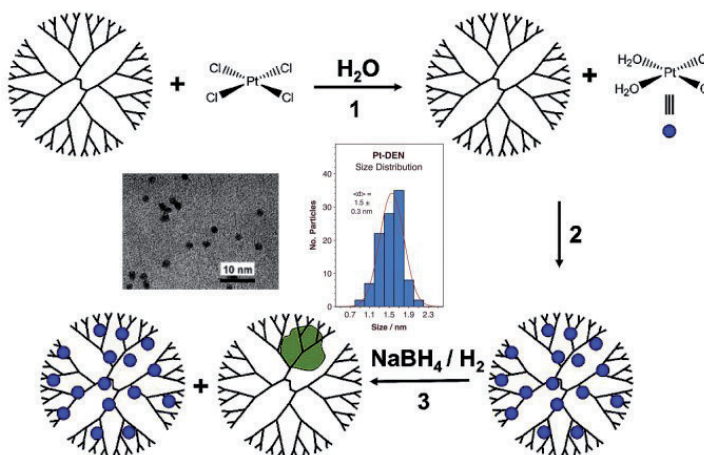
Los materiales nanoestructurados, como los nanotubos de carbón, han sido propuestos como excelentes adsorbentes de contaminantes como en el caso de las peligrosas dioxinas. Las dioxinas son consideradas como las sustancias más tóxicas jamás sintetizadas por el hombre. La absorción de las dioxinas por 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 $1.5 \text{ \AA} \pm 0.3 \text{ nm}$.



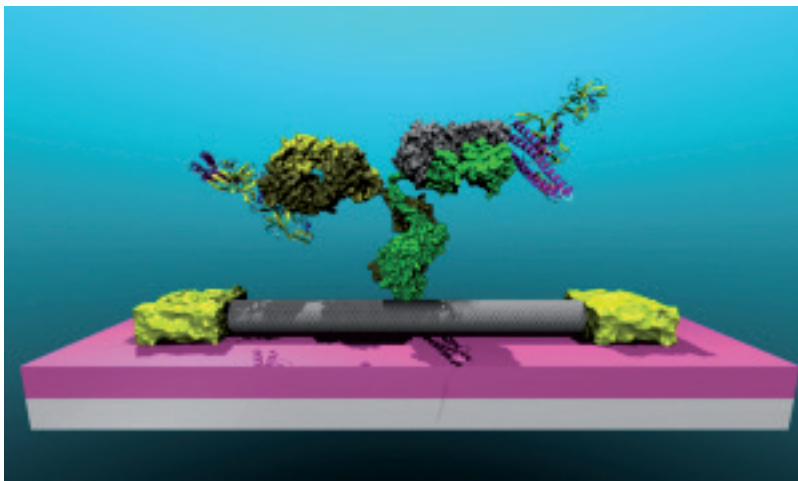
Fuente: <<http://research.chem.ucr.edu/groups/zaera/ongoingproject3.html>>.

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., Hemmingsen, 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.