

Nanomateriales (de carbono) que limpian

Covadonga Pevida

*Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR-CSIC
C/ Francisco Pintado Fe, 26, 33011, Oviedo (España)*

Resumen

El desarrollo de la nanotecnología ha sido exponencial en las últimas décadas, abarcando sectores que van desde las telecomunicaciones a la medicina, pasando por la alimentación o la construcción. La nanotecnología medioambiental ha centrado gran parte de sus esfuerzos en la remediación de aguas; sin embargo, recientemente, comienzan a crecer sus aplicaciones en la descontaminación del aire y, más concretamente, en la reducción de emisiones de CO₂.

En esta comunicación se repasan algunas de las principales aplicaciones medioambientales de los nanomateriales y se recogen algunas iniciativas de investigación relevantes en el ámbito europeo, con especial interés hacia los nanomateriales de carbono.

Abstract

The development of nanotechnology has been exponential in recent decades, spanning sectors ranging from telecommunications to medicine, through food or construction. Environmental nanotechnology has focused much of its efforts on water remediation; However, recently, its applications in air decontamination begin to grow particularly to reducing CO₂ emissions.

This communication reviews some of the main environmental applications of nanomaterials and includes some relevant research initiatives in Europe, with special emphasis on carbon nanomaterials.

Introducción

Los nanomateriales, con miles de productos ya en el mercado, representan el motor de la innovación tecnológica para la mayor parte de los sectores industriales actuales, con un mercado superior a 2,5 billones de euros y una previsión superior al trillón de euros para los próximos 10 años.

La nanotecnología ha ganado en las últimas décadas un auge particular en el ámbito medioambiental gracias a las propiedades únicas que presentan los materiales en la nanoescala. Su reactividad mejorada debido a su mayor relación superficie/volumen ofrece la posibilidad de aprovechar una química superficial única para ser funcionalizados y mejorar su capacidad selectiva de eliminación de contaminantes.

Además, la capacidad de ajustar las propiedades físicas de los nanomateriales (como el tamaño, la morfología, la porosidad y la composición química) a medida puede conferirles características singulares para la eliminación de contaminantes, frente a las

técnicas convencionales desarrolladas en el ámbito de la contaminación ambiental.

El primer desafío medioambiental global para la nanotecnología es la remediación del agua, que podría ser utilizada por las redes de suministro de agua para eliminar trazas no deseadas, o por hospitales y plantas de fabricación para filtrar sus propias aguas residuales. Otro gran desafío es monitorear mediante sensores la contaminación en aire, agua y suelos. La captura de emisiones de CO₂, se ha planteado más recientemente como desafío para la nanotecnología, donde el CO₂ capturado, con la ayuda de nanocatalizadores, podría transformarse en un combustible líquido. A pesar de estar inmersos en la descarbonización del sector energético, los combustibles fósiles seguirán conviviendo por bastante tiempo, por lo que el interés en este campo sigue creciendo.

Aplicaciones medioambientales de los nanomateriales [1,2]

Muchos estudios recientes en remediación medioambiental han puesto su atención en los nanomateriales, con miras al desarrollo de nuevas tecnologías de descontaminación. Es importante que los materiales no sean, en sí mismos, potenciales contaminantes por lo que el desarrollo de materiales biodegradables es particularmente interesante en aplicaciones medioambientales de nanotecnología.

Se pueden distinguir tres campos principales de aplicación medioambiental de la nanotecnología y los nanomateriales:

1. Productos medioambientalmente benignos y/o sostenibles (ej., química verde o prevención de la contaminación).
2. Remediación de medios contaminados con sustancias peligrosas.
3. Sensores para agentes contaminantes ambientales.

Entre las posibles vías de actuación de los nanomateriales en descontaminación se distinguen los procesos de absorción, adsorción, reacción química, fotocatalisis y filtración que se esquematizan en la Figura 1. Así, por ejemplo, la nanotecnología puede hacer que el reciclado de baterías sea económicamente viable y puede hacer posible el desarrollo de equipos portátiles para desalinizar agua de mar o para producir agua limpia.

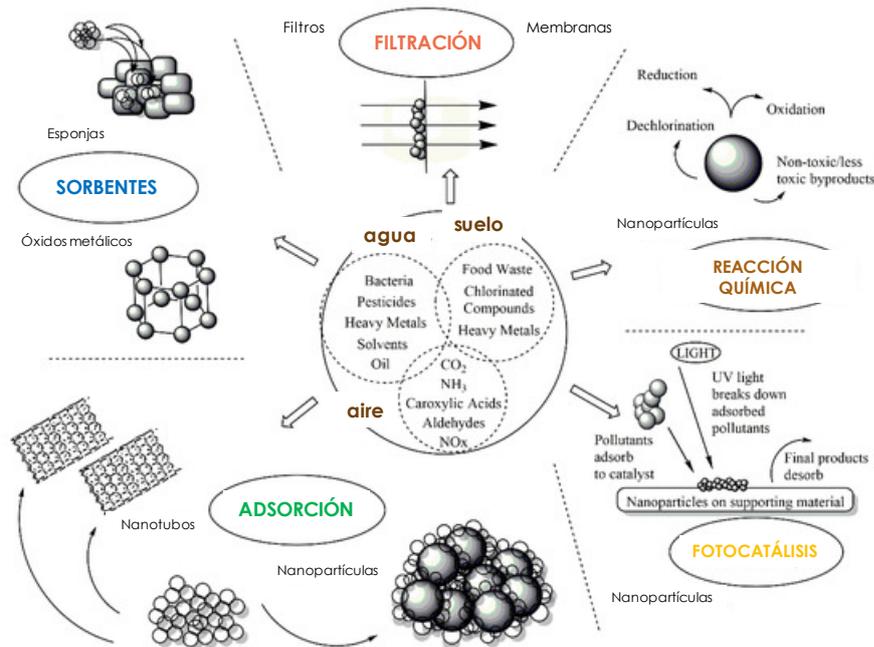


Figura 1. ¿Cómo limpian los nanomateriales? (adaptado de [2]).

Esta comunicación sobre los nanomateriales que limpian se centrará en la adsorción (sorción) y la filtración (nanofiltración), principalmente. La adsorción es la técnica más frecuentemente estudiada para purificación de agua. Básicamente, la adsorción es un proceso de transferencia de masa mediante el cual una sustancia se transfiere de la fase líquida a la superficie de un sólido y queda unida por interacciones físicas y/o químicas. La nanofiltración, como tecnología prometedora en el campo de las membranas, permite eliminar solutos de bajo peso molecular, como sales, glucosa, lactosa y microcontaminantes, de aguas contaminadas.

El papel de los nanomateriales de carbono [3-5]

Los nanomateriales de carbono son singulares debido a su naturaleza no tóxica, su gran área superficial o su fácil biodegradabilidad, que los hacen particularmente útiles en aplicaciones de remediación ambiental. La composición estructural del carbono y sus estados de hibridación variable explican la singularidad de las propiedades físicas, químicas y electrónicas de los nanomateriales de carbono frente a los nanomateriales de base metálica. Cabe destacar las propiedades fotocatalíticas de los nanomateriales de carbono, que serán objeto de otra de las comunicaciones de esta serie 10alamos9.

Numerosas investigaciones sobre la aplicación de nanotubos de carbono y grafeno en remediación ambiental han concluido la necesidad de pre-tratamientos de activación o funcionalización del nanomaterial de carbono prístino. Destacan los estudios sobre nanomateriales de carbono de pared múltiple y simple (MWCNT y SWCNT) que presentan unas propiedades de adsorción particularmente adecuadas para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos del aire y de grandes volúmenes de solución acuosa. Los óxidos de grafeno, por su parte, han sido aplicados

a la adsorción de una variedad de contaminantes gaseosos y acuosos, tales como SO_x, H₂S, NH₃, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, pesticidas y productos farmacéuticos.

Los nanotubos de carbono, los fullerenos, el grafeno, el óxido de grafeno y el carbón activado, tienen un gran potencial para la eliminación de metales pesados del agua debido a su gran área superficial, tamaño de nanoescala y facilidad de funcionalización, regeneración y reciclado. Además, poseen una elevada biocompatibilidad con los organismos vivos y el medio ambiente. Dadas sus elevadas superficies específicas, los nanotubos de carbono han mostrado una capacidad y eficiencia de adsorción excepcional hacia contaminantes orgánicos como benceno, 1,2-diclorobenceno y etilbenceno, y han reducido notablemente los tiempos de residencia respecto a otros adsorbentes convencionales, como los carbones activados. En el tratamiento de aguas, nanotubos de carbono pre-tratados han mostrado mejores capacidades de retención de metales (ej., Zn), pero también una mayor estabilidad en ciclos de sorción-desorción. Además, los nanotubos de carbono han sido uno de los adsorbentes ampliamente utilizados en la eliminación de colorantes de efluentes acuosos. Recientemente, nanomateriales de la familia del grafeno como el óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reducido (rGO) y nanoesferas de grafeno también han mostrado ser prometedores adsorbentes para la eliminación de contaminantes de efluentes acuosos (ej., Sb, Pb, Cr, Cu). Adsorbentes carbonosos nanoporosos de bajo coste, derivados de residuos agrícolas, subproductos industriales, materiales naturales, o biopolímeros modificados, han sido desarrollados y aplicados a la eliminación de metales pesados del agua residual contaminada con metales. Las nanofibras de carbono, además de la adsorción de compuestos orgánicos (ej. VOCs), han encontrado un nicho de aplicación como filtros en procesos de nanofiltración de aguas.

Recientemente, un equipo del MIT (Massachusetts Institute of Technology) ha desarrollado un nanofiltro de grafeno para potabilizar agua salada.

La adsorción se ha postulado como una tecnología prometedora para la reducción de emisiones de CO₂ de gases efluentes, dado que la regeneración del adsorbente consume menos energía que la regeneración de disoluciones de aminas, tecnología de referencia en procesos de captura de CO₂. Los carbones nanoporosos dada su gran superficie, bajo coste, disponibilidad, hidrofobicidad, y resistencia a condiciones ácidas y básicas, constituyen unos materiales muy atractivos para esta aplicación. La aplicación de la nanotecnología a la captura de CO₂ está experimentando un importante interés en campos como la captura directa de CO₂ del aire o la generación de membranas dopadas con nanomateriales.

Investigación en nanotecnología medioambiental en el ámbito europeo

En la Unión Europea (UE), la investigación sobre nanotecnología ocupa un lugar destacado, en la medida en que la información, la comunicación y el fomento del debate social sobre la investigación en nanotecnología ya se han convertido en un elemento esencial de muchas iniciativas políticas europeas.

A continuación, se describen brevemente algunos proyectos interesantes que se han desarrollado al amparo de los Programas Marco FP7 y H2020, por consorcios público-privados de entidades de distintos países europeos, en el ámbito de la nanotecnología medioambiental, haciendo especial énfasis en el papel de los nanomateriales de carbono.

MONACAT (<http://www.monacat.eu>):

Reactores monolíticos nano y micro estructurados para purificación catalítica de agua

El objetivo del proyecto fue el desarrollo de un proceso catalítico para destruir o eliminar contaminantes persistentes, como los productos farmacéuticos, disruptores endocrinos, percloratos y bromatos, y convertir materia orgánica en CO₂. El uso de nanomateriales de carbono (nanofibras y nanotubos) y nanoestructuras permite un control de proceso a diferentes escalas. La principal ventaja del proceso propuesto es la no generación de residuos por lo que se trata de un proceso sostenible. La tecnología MONACAT se presenta como de muy bajo coste. El proyecto utiliza hidrógeno o gas ozono como reactivos y el reactor estructurado resultante es robusto, compacto y fácil de transportar, características muy adecuadas si se extiende su aplicación a países en desarrollo.

WATERMIM (<http://pre.cperi.certh.gr/watermim>):

Tratamiento de agua por materiales impresos molecularmente

El proyecto se orientó hacia la producción de polímeros impresos molecularmente (MIP), prometedores

materiales adsorbentes con alta selectividad para el tratamiento de agua, y la detección y monitoreo de contaminantes a concentraciones muy bajas (por debajo de 0.1 ppb). La falta de selectividad de los métodos convencionales de eliminación de contaminantes puede dar lugar a contaminación secundaria. WATERMIN, a través de la impresión molecular, trata de eliminar la distribución aleatoria y heterogénea de los sitios receptores, generando una nueva clase de membranas y filtros “a medida” con alta selectividad y estabilidad a largo plazo, capaces de reconocer y separar compuestos orgánicos tales como pesticidas, compuestos farmacéuticos activos y disruptores endocrinos.

NEW ED (<http://www.new-ed.eu>):

Electrodialisis de membrana bipolar para la remediación de corrientes residuales de alta salinidad

El principal objetivo de este proyecto ha sido cerrar el ciclo del agua industrial para lo cual se plantearon reducir las aguas residuales industriales transformando los residuos salinos en productos con valor. Este objetivo debía lograrse desarrollando nuevas membranas bipolares para electrodialisis (DE), un nuevo concepto de módulo de membrana e integrando esta nueva tecnología en procesos de productivos relevantes. La característica clave de las nuevas e innovadoras membranas bipolares es una capa intermedia nanoporosa y conductora de iones, a través de la cual el agua se transporta por convección. Esta técnica desacopla el requisito de que las capas conductoras de iones tengan alta selectividad y alta permeabilidad al agua al mismo tiempo. También permite que las membranas bipolares traten salmueras industriales alta. NEW ED esperaba reducir la producción de residuos y el consumo de energía en varios procesos de producción industrial, lo que tendría un impacto positivo directo en la utilización del agua y la reducción de las emisiones CO₂.

NANOGLOWA (<http://www.nanoglowa.com>):

Nanomembranas contra el calentamiento global

Este proyecto planteaba un modo nuevo de capturar las emisiones de CO₂ de las centrales térmicas con ayuda de la nanotecnología. El desarrollo de membranas nanoestructuradas se planteaba como una alternativa atractiva, respecto a la tecnología existente, la absorción con aminas, y con potencial para reducir el consumo energético y los costes que acarrea el proceso de captura de CO₂. NANOGLOWA plantea el desarrollo simultáneo de cinco tipos distintos de nanomembranas, desde poliméricas hasta cerámicas y, por supuesto, de carbono. Además, contempla la posibilidad de escalar las membranas que hubieran mostrado mejores resultados en el laboratorio para su evaluación en condiciones reales a escala piloto.

CARMOF (<https://carmof.eu>):

Nuevo proceso para la captura eficiente de CO₂ mediante adsorbentes innovadores basados en nanotubos de carbono modificados y MOFs

El proyecto tiene como objetivo construir un demostrador completo de un nuevo proceso para la captura y separación de CO₂ basado en el uso de nanomateriales (grafeno, nanotubos de carbono y MOFs) en combinación con membranas. Diseñadas a medida y fabricadas mediante tecnologías de impresión 3D, estas innovadoras estructuras se instalarán en los puntos de emisión de industrias cerámicas, petroquímicas y siderúrgicas. Desde el punto de vista del desarrollo de materiales, las innovaciones previstas se relacionan con un aumento del área de adsorción, mientras que la recuperación del CO₂ capturado se llevará a cabo mediante nuevas tecnologías avanzadas de calentamiento altamente eficiente, como las que hace posible la aplicación del efecto Joule.

Perspectivas de la nanotecnología medioambiental

La contaminación ambiental se ha convertido en un tema crítico en los últimos tiempos, debido al crecimiento de la población y a la rápida industrialización de las regiones en desarrollo. La contaminación del agua causa aproximadamente 14.000 muertes por día en los países en desarrollo, principalmente debido a la contaminación del agua potable.

Han surgido contaminantes que no pueden eliminarse mediante procesos convencionales aplicados al tratamiento de aguas y que están causando problemáticas serias. Entre ellos se encuentran químicos disruptores endocrinos y efluentes farmacéuticos. Ante ello, se han realizado enormes esfuerzos científicos y tecnológicos para aportar soluciones y cabe destacar el papel que las tecnologías basadas en nanomateriales están desempeñando.

Algunas aplicaciones de nanomateriales en remediación ambiental se encuentran en fase de investigación, pero otras están progresando rápidamente de escala piloto a comercial. Una de las aplicaciones de nanomateriales con enorme potencial es la detección y monitoreo de contaminantes ambientales, aunque todavía está en fase de investigación y desarrollo.

Por otro lado, todavía hay muchas preguntas sin respuesta sobre la nanotecnología. Se necesita más investigación para comprender qué ocurre con los nanomateriales una vez son liberados en el medio ambiente, si son persistentes, si tienen efectos toxicológicos en sistemas biológicos o si los beneficios teóricos de los nanomateriales se trasladan al amplio abanico de usos comerciales. El diseño racional y un mejor uso de los nanomateriales en procesos de remediación ambiental deberán encontrar el equilibrio entre actividad, reactividad y estabilidad. El compromiso y los esfuerzos que se realicen en

el desarrollo de la nanotecnología medioambiental contribuirían a la sostenibilidad futura.

Referencias

- [1] Khin M.M., Sreekumaran Nair A., Jagadeesh Babu V. et al. A review on nanomaterials for environmental remediation. *Energy & Environmental Science* 2012; 5: 8075-8109.
- [2] Guerra F.D., Attia M.F., Whitehead D.C., Alexis F. Nanotechnology for environmental remediation: Materials and applications. *Molecules* 2018; 23: 1760.
- [3] Bergmann C.P., Machado Machado F., editors of Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications. In: *Carbon Nanostructures*. Springer International Publishing Switzerland 2015.
- [4] Wang Y., Pan C., Chu W., Vipin A.K., Sun L. Environmental remediation applications of carbon nanotubes and graphene oxide: Adsorption and catalysis. *Nanomaterials* 2019; 9(3): 439.
- [5] Ravi S., Vadukumpully S. Sustainable carbon nanomaterials: Recent advances and its applications in energy and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2016; 4: 835-856.