



INVESTIGA I+D+i 2013/2014

GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE "EL GRAFENO"

Texto de D. Pedro Serena

Octubre de 2013

Introducción

En las anteriores ediciones del Programa Investiga IDI (<http://www.programainvestiga.org/>) la temática que engloba a la nanociencia, la nanotecnología y los nuevos materiales ha sido una de las cinco líneas estratégicas de dicho Programa. La elección de esta línea no es casualidad ya que es una de las seis temáticas estratégicas de investigación que actualmente se encuentran en los programas de los países más avanzados del mundo o de la propia Unión Europea. La nanotecnología es una temática muy amplia y de carácter transversal, por lo que en cada edición del Programa Investiga IDI se ha tratado un tema concreto: la nanotecnología en general, la nanotecnología y su aplicación en los deportes, el impacto de la nanotecnología en agricultura, alimentación y cosmética, y, en la última edición, el sorprendente tema de los nano-robots.

Este documento propone un nuevo aspecto de la nanotecnología que completa las temáticas que se han ido tratando en las anteriores ediciones: el grafeno. La elección de este tema tiene como finalidad lograr que los participantes se adentren en el fascinante mundo de la nanotecnología, identificando sus peculiaridades, mostrando su enorme potencial para generar nuevos materiales y dispositivos que, sin duda, propiciarán una verdadera revolución económica y social. Otro objetivo no menos importante es mostrar la posible existencia de riesgos para la salud y el medioambiente y cómo se está abordando este problema para lograr que la nanotecnología no sea

percibida como una amenaza por la sociedad. En resumen, se trata de aprovechar la fascinación que produce lo diminuto para fomentar la curiosidad por la ciencia, aumentar los conocimientos sobre la tecnología que nos va a rodear a medio-largo plazo y fomentar un espíritu crítico de los participantes, los futuros ciudadanos, emprendedores y líderes de nuestro país.

En la siguiente sección se repasan los principales aspectos que caracterizan a la nanotecnología. La tercera sección se dedica a esbozar unas cuantas ideas sobre el tema planteado en esta edición del Programa Investiga IDI. La cuarta sección muestra una serie de preguntas y temas particulares que pueden ser el punto de partida para las indagaciones de los participantes, para su posterior debate en las aulas y en el Foro abierto del Programa Investiga IDI. Las ideas que se crucen entre los participantes serán la semilla de los trabajos que los alumnos desarrollen. Se termina este documento con un conjunto de referencias con las que iniciar esta nueva andadura.

Nanociencia y Nanotecnología: aspectos claves.

La "nanociencia", de forma sencilla, se puede definir como la acumulación de conocimientos interconectados que permiten entender cómo funciona la naturaleza cuando es observada a una escala muy pequeña, la denominada "nanoescala", es decir, cuando se observan objetos con un tamaño de unos cuantos nanómetros y se estudian sus propiedades. Por cierto ¿qué es un nanómetro? Se trata de una unidad de longitud realmente pequeña: 1 nanómetro equivale a 0,001 micrómetros o micras, a 0,000001 milímetros, o a 0,000000001 metros. Se puede escribir la misma cadena de equivalencias usando notación científica: $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$. Es evidente que el prefijo "nano" (del griego "nanos", diminuto) trata de las cosas muy, muy pequeñas. Por su parte la "nanotecnología" pretende convertir los conocimientos básicos que la nanociencia proporciona en materiales y dispositivos con propiedades espectaculares con los que mejorar los bienes y los productos actuales o proponer otros radicalmente nuevos.

La nanociencia y la nanotecnología no son algo totalmente novedoso ya que llevan fraguándose en los laboratorios de investigación durante casi cincuenta años. Ya en el año 1959, el Premio Nobel de Física Richard Feynman anticipó muchos de los conceptos e instrumentos que se manejan actualmente en esta fascinante disciplina. Sin embargo ha sido durante los últimos 15-20 años cuando la nanociencia y la nanotecnología han experimentado un espectacular impulso por parte de gobiernos, instituciones y empresas, que se han percatado de sus enormes posibilidades. Este interés se ha plasmado en enormes inversiones con las que se han puesto en marcha nuevos laboratorios y se han formado científicos e ingenieros expertos en estas temáticas. Dado que el término "nanotecnología" es el que más ha impactado en los medios de comunicación y en la sociedad, a partir de este momento será el que se use en este documento tanto para referirse a los aspectos básicos como más aplicados.

La nanoescala, que también suele denominarse "nanomundo", es un escenario habitado por diferentes tipos de "nanoobjetos" y "nanoestructuras", entre los que podemos incluir átomos, moléculas, nanopartículas, nanotubos de carbono, cadenas de ADN, etc. Esta "nanofauna" es interesante porque manifiesta una serie de interesantes fenómenos que no se pondría de manifiesto si su tamaño fuese mucho mayor. Esto es lo que da a todo lo "nano" un gran valor añadido con respecto a los "micro" o lo "macro" y por eso se dice que lo "nano" es diferente. Pero ¿por qué aparecen estas nuevas propiedades? Hay varias razones. Por un lado se sabe que los átomos de las superficies se comportan de una forma diferente a la de los que están en el interior del objeto, ya que unos y otros tienen diferentes entornos. A medida que un objeto o una estructura se hacen más y más pequeños se observa como la proporción de átomos de la superficie aumenta más y más, por ejemplo una nanopartícula de 100 nm de diámetro un 1-2% de sus átomos están en la superficie, mientras que en una nanopartícula de 3 nm ese porcentaje crece hasta aproximadamente el 60%. Entonces a medida que un objeto se hace más pequeño se puede decir que las propiedades de la superficie empiezan a ser más y más importantes y el papel de los átomos del interior es menos relevante.

Sin embargo no sólo se trata de la importancia de las superficies, sino que además, a medida que el tamaño de los objetos se hace más y más pequeño, aparecen otros fenómenos que sólo la intrigante Mecánica Cuántica puede explicar. La Mecánica Cuántica deben entenderse como el "manual de instrucciones" de la naturaleza, la que establece las reglas y leyes que explican cómo se forman las moléculas y otros objetos más y más complejos, y cómo estos objetos reaccionan frente a campos eléctricos y magnéticos o la luz. Pero no hay que alarmarse ya que los participantes del Programa Investiga IDI no van a tener que aprender los fundamentos de esta apasionante disciplina. Por ahora deben saber que aparecen una serie de efectos "cuánticos" que proporcionan interesantes propiedades a los protagonistas del nanomundo: los nanoobjetos. Por ejemplo, los efectos cuánticos hacen que los electrones que se mueven dentro de una nanopartícula únicamente puedan poseer ciertas energías. Además, a medida que el nanoobjeto se hace pequeño los valores permitidos para estas energías van cambiando. Como consecuencia muchas propiedades eléctricas, magnéticas u ópticas también cambian a medida que cambia el tamaño.

Los efectos que se han mencionado anteriormente se denominan "efectos de tamaño" y resultan bastante perturbadores, ya que para cada tamaño y forma que de un nanoobjeto éste muestra propiedades diferentes. Esto, que parece un descontrol, en realidad es la gran fuerza de la nanotecnología: si se controla el tamaño y la forma de un nanoobjeto, puedo controlar sus propiedades y sacar algún provecho de ellas. La idea es fascinante. Por eso, el objetivo último de la nanotecnología es controlar, mediante metodologías físicas y químicas, la forma, tamaño y orden de los nanoobjetos y nanoestructuras para modificar a voluntad sus propiedades. Por ejemplo, controlando el tamaño y forma de los nanoobjetos se puede modificar su conductividad eléctrica, su color, su reactividad química, su elasticidad, etc. Se dice que podemos fabricar "materiales a medida" o que podemos "sintonizar" las propiedades de los materiales a nuestra voluntad. Este control de la materia a escala nanométrica se está mejorando continuamente gracias a poderosas herramientas físicas y reacciones químicas, y a sofisticados instrumentos que nos permiten observar el nanomundo. Entre estos instrumentos podemos destacar los nuevos microscopios electrónicos de transmisión, el microscopio de efecto túnel (STM), el microscopio

de fuerzas atómicas (AFM) o los poderosos microscopios electrónicos de última generación. Estas herramientas permiten la observación e incluso, en algunos casos, la manipulación directa de átomos y moléculas.

Las ideas y herramientas que se usan en nanotecnología evolucionan imparablemente mediante las aportaciones de biólogos, químicos, físicos, ingenieros y médicos. La nanotecnología es un campo absolutamente multidisciplinar. Esto es así porque los componentes de la materia, átomos y moléculas, son los mismos para todas estas especialidades científicas. En la nanoescala todos hablamos de lo mismo: átomos y moléculas. A dicha fusión de disciplinas se le denomina "convergencia tecnológica". Por otro lado no se debe olvidar que la biología juega un papel clave dentro de la nanotecnología, ya que la vida en sí misma es nanotecnología pura. No hace falta más que observar el interior de una célula para darse cuenta que realiza todas sus funciones gracias a "máquinas nanométricas", que funcionan a la perfección gracias a larguísimo proceso evolutivo. Además, la biología nos presenta ante nuestros ojos un gran arsenal de soluciones y estrategias que nos permiten resolver problemas concretos.

Para terminar esta larga introducción no se debe olvidar mencionar que los "nanoproductos" concebidos a partir de la nanotecnología están invadiendo poco a poco la totalidad de los sectores económicos: materiales, electrónica, informática y comunicaciones, energía y medioambiente, transporte, construcción, sector textil, biotecnología, salud, agricultura, alimentación, etc. La nanotecnología ya comienza a ser un gran negocio y se puede afirmar que el futuro será "nano".

El papel del carbono en la nanotecnología: del grafeno a los fullerenos.

La nanotecnología abre la posibilidad de usar átomos y moléculas como elementos de un gran juego de construcción que permite la elaboración de estructuras cada vez más y más complejas. Las reglas de este diminuto juego de construcción las proporciona la Mecánica Cuántica, algo sorprendentes pero conocidas desde principios del

siglo pasado. Entre los diferentes tipos de átomos que podemos tener en cuenta para pensar en construir diferentes tipos de nanoobjetos quizás el carbono es uno de los más versátiles. El carbono, cuyo símbolo es C, es capaz de enlazarse de maneras distintas con otros átomos de carbono u otros elementos químicos, dando lugar a diferentes tipos de configuraciones y estructuras. Esta gran versatilidad hace del carbono el protagonista de toda una rama de la química, la química orgánica, que incluye millones de compuestos basados en el carbono. Además todas las moléculas que forman parte de las estructuras y procesos que caracterizan la vida están basadas en el carbono.

El carbono se puede encontrar en diferentes formas. Una de ellas es el grafito, material formado por apilamiento de láminas de átomos carbono. Cada una de estas láminas está formada por átomos que forman una malla hexagonal. El grafito es de color negro, muy blando, se rompe con cierta facilidad y conduce la electricidad de forma razonable. El grafito se utiliza para hacer lapiceros, en materiales de construcción, como lubricante, para hacer electrodos, en centrales nucleares, etc. etc. Otra de las formas del carbono es el diamante, donde los átomos de carbono se ordenan de manera diferente: cada átomo de carbono está rodeado de otros cuatro, que forman un tetraedro. El diamante es transparente, aislante eléctrico, conduce muy bien el calor y es uno de los materiales más duros de la naturaleza. Es bien conocido que el diamante se usa en joyería pero también tiene otros usos industriales en la fabricación de herramientas de corte, perforación y de pulido. Es impresionante que los mismos átomos puedan dar lugar a materiales tan distintos por el mero hecho de cambiar la manera en la que están ordenados. Sin embargo, el carbono guarda más sorpresas y muchas de ellas están relacionadas con la nanotecnología.

Ya se ha mencionado que la estructura del grafito está formada por el apilamiento de láminas formadas por átomos formando mallas hexagonales, similar a un panal de abejas. Los átomos de dichas mallas bidimensionales (2D) se encuentran fuertemente enlazados los unos a los otros por lo que dichas láminas son muy resistentes. Sin embargo las láminas no están fuertemente enlazadas entre sí por lo que es relativamente fácil separarlas. Dicha separación es lo que se

conoce como exfoliación del grafito. En realidad una de estas láminas es lo que se denomina grafeno. Aunque el grafeno está descrito desde los años 30 del siglo pasado, el interés por este material era meramente teórico porque se pensaba que sería un material inestable. La palabra "grafeno" fue oficialmente adoptada en 1994. En el año 2003, los científicos rusos K. Novoselov y A. Geim lograron aislar, a temperatura ambiente, el grafeno de una manera sorprendentemente simple. Sus hallazgos fueron merecedores del Premio Nobel de Física 2010. En estos últimos diez años se ha asistido a una frenética carrera por caracterizar y entender las propiedades de este material, a medida que se iban descubriendo sus propiedades se han ido proponiendo más y más aplicaciones. Entre las propiedades principales podemos destacar su ligereza (un metro cuadrado solo pesa 0,77 mg), su elevada relación superficie/volumen, su gran flexibilidad, su transparencia, una elevada conductividad térmica, una elevada conductividad eléctrica (mejor que la del cobre), una elasticidad muy elevada, una gran dureza, su efecto barrera para otras moléculas, etc.

En realidad el grafeno forma parte de una familia mucho más amplia de nanoobjetos basados en el carbono. Si ahora se piensa en una larga tira de grafeno que se cierra sobre si misma se obtiene una estructura cilíndrica denominada nanotubo de carbono. Si una parte de un fragmento de grafeno con la forma adecuada y se cierra sobre si mismo se pueden formar estructuras denominadas fullerenos. Las interesantes propiedades de los nanotubos y los fullerenos están conectadas con las del grafeno. Aunque pueda pensarse que el descubrimiento de los nanotubos de carbono y de los fullerenos ha sido posterior al del grafeno, lo cierto es que fueron descubiertos con anterioridad. R. Smalley, R. Curl y H. Kroto, descubrieron el fullereno más importante de todos el C₆₀ en 1985, hallazgo que les valió el Premio Nobel de Química en 1996. El japonés S. Iijima descubrió un poco más tarde los nanotubos de carbono, en 1991. En cualquier caso, estos tres nanoobjetos, el fullereno, los nanotubos de carbono y el grafeno son tres de los principales protagonistas del nanomundo. Las aplicaciones propuestas para estos materiales han sido tantas que es imposible enumerarlas todas, ahora el difícil reto es pasar las ideas y prototipos que se proponen en los laboratorios a las fábricas y, de ahí a las tiendas.

Potenciales temas de discusión

El grafeno, junto con sus otros "hermanos" los nanotubos de carbono o los fullerenos, es un tema candente en la ciencia que se hace hoy en día en los laboratorios de todo el mundo. La gran cantidad de aplicaciones propuestas para el grafeno hace que nos encontremos con él en muchas noticias y sobre todo, en internet. Los trabajos que deben desarrollar los participantes de esta edición del Programa Investiga IDI deben basarse en indagaciones y consultas en cientos de páginas web que tratan sobre el grafeno, y en la reflexión y el debate de las informaciones encontradas. Los trabajos deben tratar aspectos como los que se plantean en esta lista:

1. ¿Qué es el grafeno? ¿Por qué se forman mallas hexagonales y no mallas repletas de cuadrados o triangulos?
2. ¿Cómo se obtuvo el grafeno por primera vez? ¿Es fácil reproducir el experimento en una clase del instituto o del colegio?
3. ¿Qué propiedades más importantes tiene el grafeno y cuál es el origen de estas propiedades?
4. ¿Qué diferencias hay entre el grafeno y el grafito? ¿Y entre el grafeno y el diamante?
5. ¿Qué parecido tiene el grafeno con los nanotubos de carbono?
6. ¿Es fácil obtener el grafeno en grandes cantidades? ¿Qué métodos se utilizan?
7. ¿Qué aplicaciones tiene en sectores como la electrónica, los materiales estructurales, la medicina, la energía, etc?
8. ¿Qué países o qué empresas lideran la investigación en grafeno? ¿Qué posición tiene España en esta investigación?
9. ¿Conoces a investigadores españoles que trabajen en el tema del grafeno?
10. ¿Qué es la iniciativa Graphene Flagship de la Unión Europea?
11. ¿Qué empresas españolas son líderes mundiales en la fabricación de grafeno?
12. ¿El grafeno puede representar algún peligro? ¿Qué se sabe de la toxicidad del grafeno?
13. ¿Qué aplicaciones nuevas para el grafeno proponen los participantes?

Evidentemente, además de los anteriores aspectos, los participantes encontrarán nuevas preguntas y nuevas respuestas, que serán bienvenidas.

Bibliografía

Antes de pasar a enumerar algunas referencias de posible utilidad, hay que mencionar que un buscador en internet encuentra decenas de millones de sitios relacionados con la nanotecnología y millones de páginas webs que mencionan al grafeno. En éste como en otros temas lo que sobra es información y, por tanto, se debe ser cauto a la hora de seleccionar las fuentes de información más adecuadas, siendo esta fase de gran importancia para la correcta realización del trabajo de investigación. Las referencias se han agrupado en dos listas, por un lado, unas cuantas referencias referidas a la nanotecnología en general y por otro, otras referencias más concretas sobre el tema del grafeno. Estas referencias deben entenderse como el punto de partida del largo camino, plagado de hallazgos y preguntas, que aguarda a los participantes en el Programa Investiga IDI. ¡Buen viaje!

Generales

Las guías elaboradas en ediciones pasadas del Programa Investiga IDI para la temática de Nanotecnología, junto a algunas de las presentaciones efectuadas por los alumnos finalistas, se pueden descargar en:

1. <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/Guiananociencia.pdf>
2. <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/guias2011/GUIANANOTECNOLOGIAPARALAALIMENTACIONYELCONSUMO.pdf>
3. http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/guias2012/GUIA_NANO-ROBOTS.pdf
4. <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/nuevosmaterialesparaeldeporte.ppt>,
<http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/PresentacionNanotecnologia.ppt>,
5. <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/LINEA%204%20-%20NANO.ppt>
6. “Unidad Didáctica de Nanociencia y Nanotecnología” (J.A. Martín-Gago, E. Casero, C. Briones y P. A. Serena, FECYT, 2008). Disponible de manera gratuita en versión digital en la página web <http://www.fecyt.es> o en la dirección <http://www.oei.es/salactsi/udnano.pdf>

7. "¿Qué sabemos de la Nanotecnología?" (P. A. Serena, Editorial La Catarata y el CSIC, Madrid, 2010).
8. La Unión Europea ha puesto en marcha varias iniciativas relacionadas con la divulgación de la Nanotecnología. Una de las más importantes es NANOYOU, donde se pueden encontrar con recursos en inglés y en español para el profesorado y los alumnos de educación secundaria (<http://nanoyou.eu/>
9. Existe un inventario de productos de la Nanotecnología (proyecto PEN) en el que ya se mencionan más de un millar de productos con algún tipo de nanocomponente en su interior. El repositorio está en la página web: <http://www.nanotechproject.org/inventories/> (en inglés).
10. La belleza del nanomundo puede observarse en la galería de imágenes finalistas del concurso internacional SMPAGE, coorganizado por el CSIC y la Universidad Autónoma de Madrid (<http://www.icmm.csic.es/spmage>). Estas galerías son de libre uso y pueden usarse para ilustrar trabajos o en clase.
11. "Nanotecnología explicada a niños". C. Woodfort. <http://www.explainthatstuff.com/nanotechnologyforkids.html>
12. La Red "José Roberto Leite" de Divulgación y Formación en Nanotecnología (NANODYF) posee una interesante página web con muchos documentos (<http://nanodyf.org/publicaciones.php>).
13. El diario "El Mundo" tiene una sección completa dedicada a la nanotecnología llena de noticias, artículos y entrevistas. <http://www.elmundo.es/elmundo/nanotecnologia.html>
14. En España, una gran parte de los grupos de investigación que trabajan en la temática de la nanotecnología se encuentran agrupados en la Red Española de Nanotecnología (NANOSPAIN) (<http://www.nanospain.org>).

Específicas sobre el grafeno

15. <http://grafeno.com/>
16. <http://www.graphenetracker.com>
17. <http://www.graphene-info.com/>
18. <http://graphenetimes.com/>
19. Think Big de la Fundación Telefónica (<http://blogthinkbig.com/tag/grafeno/>)
20. versión digital de la Revista Muy Interesante (<http://www.muyinteresante.es/tag/grafeno>)

21. Revista Extremetech
(<http://www.extremetech.com/tag/graphene>)
22. Página web del MIT
(<http://web.mit.edu/newsoffice/topic/graphene.html>).
23. El gran proyecto de la Unión Europea Graphene Flagship proporciona información a través de su página web (<http://www.graphene-flagship.eu/>) de los avances sobre el grafeno en los países de la UE.
24. Empresas españolas trabajando en grafeno:
 - Avanzare (<http://www.avanzare.es/>)
 - Grafenano (<http://www.graphenano.com/>)
 - NanoGraph (<http://www.nanograph.org/>)
 - Graphenea (<http://www.graphenea.com/>)
 - Granph Nanotech (<http://www.granphnanotech.com/>)
 - NanoInnova (<http://www.nanoinnova.com/>)