

Nanociencia y Nanotecnología

J. Ricardo Arias González

Laboratorio de Nanomanipulación Óptica

Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia y

Centro Nacional de Biotecnología, CSIC

Cantoblanco, 28049 Madrid

ricardo.arias@imdea.org

www.cnb.csic.es/~jrarias/index.html

Sumario

1. El sueño de la nanotecnología
2. El nuevo punto de vista de la tecnología
3. Aplicaciones
4. Nanopartículas
5. Riesgos: causas y efectos

Resumen

La Nanociencia es un campo interdisciplinar de investigación que ha emergido en los últimos años del siglo pasado y que irrumpe con fuerza en el presente. Su avance es inexorable, de manera que se hace necesario un debate práctico y ético en el que no sólo se evalúen los riesgos personales y medioambientales, sino que también pueda permitir prevenir el consumo de recursos en nuestro hábitat. Aunque la Nanotecnología, por su carácter interdisciplinar, representa una revolución tecnológica de consecuencias mayores que las que fueron generadas por la microelectrónica, su estado actual sólo constituye la prehistoria de su ciclo de desarrollo. Es decir, a día de hoy, estamos asistiendo todavía a una evolución de nuestra tecnología con las nuevas ideas aportadas por la investigación de la ciencia en la nanoescala. Sin embargo, los riesgos que se pueden derivar en el futuro podrían ser comparables a los de otras áreas científicas como son la generación de energía nuclear o la manipulación genética de organismos. En las siguientes líneas nos adentraremos en el mundo de la Nanotecnología para entender cuál es el nuevo enfoque en la generación de tecnología, discutir los riesgos que conllevaría y evaluar los riesgos presentes.

***I Congreso sobre las Nuevas Tecnologías y sus repercusiones en el seguro:
Internet, Biotecnología y Nanotecnología. Madrid, 15 y 16 de abril de 2010***

**AIDA - Asociación Internacional de Derechos de Seguros
SECCION ESPAÑOLA**



1. El sueño de la Nanotecnología

Consiste en hacer ingeniería ensamblando pieza a pieza, desde los componentes más pequeños de la materia. Con esta estrategia se pretende conseguir materiales y dispositivos que tengan propiedades a la carta. Para la consecución de un sueño de este calibre debemos lograrlo antes en diferentes niveles:

- **Conocimiento:** hemos de entender cómo se ensamblan las piezas (ciencia).
- **Técnica:** hemos de tener herramientas que nos permitan ensamblarlas (tecnología).
- **Ideas:** hemos de generar nuevas ideas que permitan aprovechar la física –Mecánica Cuántica– que tiene lugar en esta escala (invención).

Los actores del nanomundo

Son objetos cuyo tamaño está comprendido entre 0.1 y 100 nanómetros (nm). Básicamente, átomos y moléculas. Para situarnos, un cabello humano tiene un ancho de unos ochenta mil nanómetros y contiene unos 125 átomos por nanómetro cúbico. Típicamente, un cabello puede tener unos 10^{18} átomos. Aunque parecen cantidades inimaginables, la escala nanométrica es tan natural como la métrica, es decir, tiene una realidad física aunque ésta no sea tan intuitiva como la que manejamos cotidianamente. En esta escala, un balón de fútbol tiene una circunferencia de 7×10^8 nm; una neurona, que es una célula del cerebro, tiene un tamaño de unos 10^4 nm; una bacteria, que es un organismo unicelular procariota, tiene un tamaño de unos 10^3 nm; un virus tiene un calibre de varias decenas de nanómetros; el ADN, que es la molécula que almacena la información genética en nuestras células, es como un alambre de unos 2 nm de diámetro; por último, una molécula de agua tiene un tamaño de unos 0.1 nm.

Fechas importantes

- 1927 Quinta conferencia Solvay. Establecimiento de la Mecánica Cuántica.
- 1947 Descubrimiento del transistor¹.
- 1959 R. Feynman: Discurso “Hay mucho espacio al fondo” [1] en el Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- 1965 G. Moore establece que la densidad de transistores en un dispositivo de estado sólido se doblaría cada 18 meses (ley de Moore).
- 1974 N. Taniguchi: Artículo “Sobre el concepto básico de Nanotecnología” [2] en la Universidad de Tokio. Se habla de una tecnología que nos permitirá separar, consolidar y deformar materiales átomo a átomo o molécula a molécula.
- 1981 G. Binnig y H. Rohrer: Invención del Microscopio de Efecto Túnel (STM). Se hace posible ver y mover átomos y moléculas. Recibieron el premio Nobel de física en 1986.

¹ El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. Se encuentran por millones prácticamente en todos los aparatos electrónicos, incluyendo los de uso doméstico. Su aparición en la fecha indicada revolucionó la tecnología.

1986 Eric Drexler publica su libro “Motores de la Creación” [3] que popularizó los potenciales de la Nanotecnología. Este libro generó gran controversia pues supone una visión de la era nanotecnológica que aún está por venir.

Hay mucho espacio al fondo

El cómo se cimentó la estrategia que dio lugar al enfoque nanotecnológico de construir tecnología puede entenderse de los siguientes fragmentos del discurso seminal de Feynman [1]:

[...] Me gustaría describir un campo en el que se ha hecho muy poco, pero en el que se puede hacer una enormidad en principio. Este campo no es como otros porque no nos dirá mucho más sobre física fundamental.

De este párrafo se desprende que la revolución de la Nanotecnología no va a implicar una nueva revolución de la física. Ésta ya había ocurrido a principios del siglo XX con la formulación de la Teoría Cuántica.

[...] Quiero hablar sobre el problema de manipular y controlar cosas en una escala muy pequeña.

En este párrafo, el conferenciante se centra en la idea en sí de la Nanotecnología. Es importante entender que la física que se da en esa escala es muy diferente de la de los sucesos de escala humana –que se corresponde con la mecánica clásica, o de Newton– y que la técnica que permita manipular estas cosas muy pequeñas tendrá que obedecer a esta física.

[...] Lo que quiero señalar es que hay mucho espacio al fondo. No voy discutir sobre cómo lo vamos a hacer, sólo de lo que es posible en principio. En otras palabras: lo que es posible de acuerdo a las leyes de la física. No pretendo inventar la anti-gravedad, que pudiera ser posible algún día sólo si las leyes [de la física] no fueran las que pensamos. Os estoy hablando de lo que se podría hacer si las leyes son las que pensamos.

La tecnología está fundamentada en la ciencia. Esto quiere decir que no puede existir tecnología si previamente no se tiene el conocimiento científico que contextualice dicha tecnología. Si la ciencia básica no precede a la tecnología, la tecnología sólo puede dar, por así decirlo, ‘palos de ciego’². En este párrafo, el conferenciante hizo hincapié en el hecho de que la física permite la manipulación en la nanoescala y que por tanto, una tecnología basada en tales ideas era posible.

2. El nuevo punto de vista de la tecnología

Tecnologías *top-down* y *bottom-up*: El albañil frente al escultor

Existen dos estrategias en el diseño de la tecnología: *top-down* o descendente y *bottom-up* o ascendente. La primera estrategia la utilizaba, por ejemplo, el hombre primitivo en la Edad de Piedra para tallar útiles a partir de sílex. También es la que usa el escultor para construir un objeto, aunque sea en este caso con fines artísticos. Si quisiéramos usar esta estrategia para esculpir

² Ésta es la estrategia de la *Evolución* en biología, pero nosotros no podemos esperar millones de años para generar un producto.

objetos en la nanoescala, potenciando unas propiedades deseadas, necesitaríamos un cincel cada vez más pequeño y dependeríamos de una habilidad, tecnológicamente hablando, difícil de definir y alcanzar. La segunda estrategia es la que emplea, por ejemplo, el albañil para construir una casa. En esta estrategia la ventaja es que los ladrillos que se usan ya existen en la naturaleza (átomos y moléculas) y las interacciones entre ellos ya se conocen, de manera que todo nuestro esfuerzo ha de centrarse en el aprovechamiento óptimo de la física existente. Tenemos, además, ejemplos de diseño ascendente en la biología, donde las proteínas y ácidos nucleicos han sido contruidos a partir de repeticiones de unas cuantas subunidades moleculares (aminoácidos y nucleótidos, respectivamente). El diseño biológico de las moléculas de la vida se ha realizado respetando las leyes de la física y mediante ensayo y error en un proceso que se conoce como *Evolución*.

Tecnología inspirada en la naturaleza: el pájaro frente al avión

Con todo lo que hemos visto en las anteriores líneas podríamos definir la Nanotecnología de la siguiente manera:

Nanotecnología: es el campo de la ciencia y la tecnología aplicadas cuya perspectiva y objetivo es el control de la materia en la escala atómica y molecular, y la fabricación de instrumentos en dicha escala.

Como hemos argumentado antes, la tecnología ha de venir precedida y fundamentada por la ciencia básica. En esta línea argumental, ¿podríamos, por ejemplo, hacer volar a una persona sin conocer los principios físicos necesarios? Volar implica crear diferencias de presión; ésta es la ciencia básica que se necesita conocer. Así que imitar a un pájaro para generar una tecnología que nos permita volar sin más, sin entender la física, puede llevarnos y nos llevó a estrepitosos fracasos en la antigüedad.

Podemos trasladar la pregunta anterior a la nanoescala: ¿podemos fabricar cosas “nano” sin entender la Mecánica Cuántica? Desde esta necesidad podemos definir la Nanociencia de la siguiente manera:

Nanociencia: conocimiento interdisciplinar de la ciencia en la escala de átomos y moléculas.

Ciencia inter- y multi-disciplinar: la vuelta al sabio renacentista

El sabio renacentista, además del afán por recuperar todo el conocimiento del mundo clásico y medieval, perseguía entenderlo e interrelacionarlo. Ya Galileo, con su famoso *principio de relatividad*, hizo un esfuerzo increíble para la época: conectar conceptos dentro de la física, que era la ciencia natural más desarrollada de aquel tiempo. Fue una época en la que la mentalidad científica empezaba a asumir la idea de continuidad en el saber: todo debe de estar relacionado, aunque de momento no entendamos cómo. Los científicos hoy seguimos suscribiendo esta idea. Un ejemplo que refleja esta mentalidad es el de la Mecánica Cuántica y la Mecánica Clásica. Muchos esfuerzos de científicos teóricos han estado dirigidos a poder relacionar ambas áreas de la física, y a día de hoy no han sido suficientes. La ciencia está hoy altamente especializada, lo cual implica que es muy difícil tener, por ejemplo,

conocimientos altamente detallados de biología molecular y de física cuántica. Pero las fronteras se están empezando a desdibujar, de tal manera que el científico de hoy necesita volver al ideal del sabio renacentista [4].

El nanocientífico y nanotecnólogo ha de pensar y actuar, respectivamente, como un físico, un químico, un ingeniero y un biólogo. Cuando disminuimos la escala de tamaños, las fronteras disciplinares se hacen difusas. Es importante darse cuenta, no obstante, de que no podemos hacer nanociencia con conocimientos aislados de las diferentes disciplinas implicadas: la contribución ha de ser integradora.

3. Aplicaciones

El discurso seminal de Feynman llegó a profundizar lo suficiente en su época como para inspirar muchas de las aplicaciones que se persiguen hoy. Es por eso que comentamos aquí otros párrafos de esta fuente [1]:

Hay mucho espacio al fondo (cont.)

Muchas de las aplicaciones que Feynman plateó tuvieron su inspiración en los sistemas biológicos. Nuestras células son microfactorías compuestas por nanomáquinas moleculares (proteínas) coordinadas, precisas y con tareas altamente especializadas. El 'software' está almacenado en el ADN:

[...] ... la información está contenida en una diminuta fracción de la célula en el ADN, que son largas moléculas en forma de cadena. En ellas, un bit de información sobre la célula ocupa sólo unos 50 átomos.

En cada una de nuestras células tenemos toda la información relativa a nosotros mismos. Esta información está contenida en un "rollo" molecular de tan sólo 2 nm de espesor y del orden de varios metros de longitud. Este rollo ocupa en su forma condensada unas pocas micras. Es además flexible y fácilmente replicable por nanomáquinas llamadas polimerasas. El proceso de copia (replicación) de este disco duro, cada vez que una de nuestras células se divide, es altamente fiel³: la tasa de error puede llegar a ser tan baja como 1:10⁹, esto es, 1 bit erróneo de cada 10⁹ bits transmitidos (la línea telefónica, por ejemplo, tiene una tasa de error de 1:10⁵, diez mil veces peor). Si este hardware existe ya en la naturaleza es que se puede hacer desde un punto de vista tecnológico; se puede reducir la información de toda una enciclopedia a la cabeza de un alfiler, como plantea Feynman en otro punto de esta charla, y además copiarla con alta fidelidad.

Refiriéndose a los sistemas biológicos, argumentó:

[...] Un sistema biológico puede ser increíblemente pequeño. Muchas células son extremadamente diminutas, pero muy activas; fabrican sustancias; caminan, fluctúan; y hacen todas estas cosas maravillosas en una escala muy pequeña. También almacenan información. Imaginad la posibilidad de que también nosotros pudiéramos hacer una cosa muy pequeña que realizase lo que nosotros quisiésemos, ¡que pudiésemos fabricar un objeto que maniobrara en ese nivel!

³ Aunque en los sistemas artificiales de copia se persigue no cometer errores, se ha de notar que la tasa de error en la replicación biológica no conviene que sea cero puesto que la existencia de errores en la transmisión genética es un canal que posibilita un cierto nivel de mutación para la evolución de las especies.

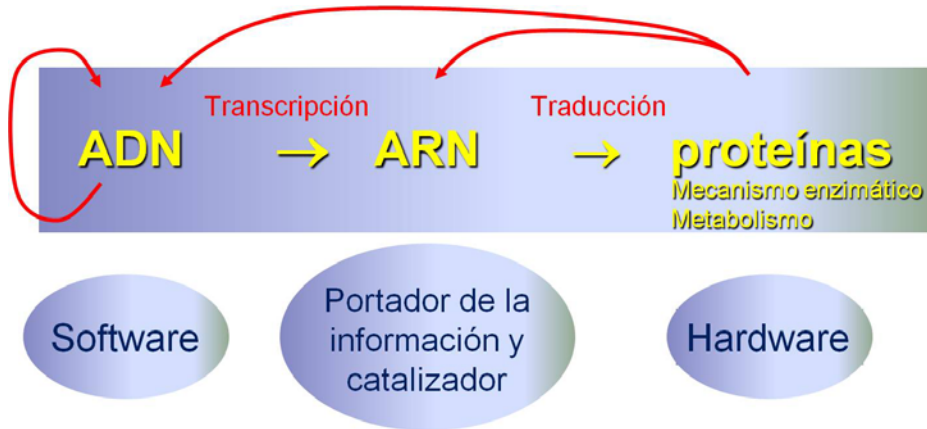


Fig. 1: Paralelismo entre el paso de la información para la construcción de nanomáquinas (proteínas), según el Dogma Central de la Biología, y el procesamiento de información que tiene lugar en un ordenador.

En este sentido, otra forma de ver la microfactoría que constituyen nuestras células es compararla con el hardware y el software de un ordenador. Esto se puede hacer a través del conocido como *Dogma Central de la Biología*, que propone una relación direccional entre ADN, ARN y proteínas (véase Fig. 1).

Construir computadores rápidos, pequeños y eficientes en la gestión de la información también es objetivo de la Nanotecnología. Existen ideas basadas en efectos puramente cuánticos que todavía no eran conocidos en el año del discurso de Feynman. Sin embargo él, en otro sentido, se refirió elocuentemente a la gestión de información que ocurre en la mente humana:

[...] El número de elementos en esta caja de huesos [ref. su cabeza] es enormemente mayor que el número de elementos en nuestros "maravillosos ordenadores". Pero nuestros ordenadores mecánicos son demasiado grandes; los elementos en esta caja son microscópicos.

Como vemos, la comprensión física de la biología en la nanoescala, o *biofísica molecular*, es un aspecto fundamental que se integra de manera natural en el desarrollo nanotecnológico que los científicos perseguimos [5].

Nanomundo natural vs. Nanomundo artificial

Una pregunta inquietante, más filosófica que científica, es la que se deriva de la posibilidad de construir sistemas artificiales (creados por el hombre) inspirados en la nanotecnología natural que albergan nuestras células. Ésta es: ¿estamos vivos o somos tecnología puramente? Esta pregunta no es nueva pero toma cuerpo cuando se discuten estos temas. Existen ya nanomáquinas artificiales, es decir, construidas bajo la tutela del hombre, pero la comparación con las creadas por la naturaleza –bajo la tutela de la Evolución– es altamente dispar. La kinesina, una proteína de transporte en el interior de nuestras células que consume una molécula conocida como ATP (*adenosín trifosfato*) como fuente de energía, es unas 100 veces inferior en tamaño e increíblemente más compleja que el motor de rotación más pequeño que se fabricó hasta el año 2003 [6]. Este motor artificial era un actuador sintético de movimiento rotatorio compuesto por un nanotubo de carbono, que actuaba como eje, y una pequeña chapa de metal que actuaba como rotor mediante una corriente electrostática.

Esta comparación nos indica que nuestra tecnología prácticamente acaba de empezar a fabricar máquinas nanoscópicas y nos muestra una vía de hacer ingeniería en esta escala tan pequeña. Pero ya el propio análisis de nuestras proteínas como máquinas de tecnología altamente avanzada nos hace cuestionarnos hasta qué punto es posible distinguir la materia viva de la inerte. Una discusión muy imaginativa y estimuladora sobre estos dos tipos de materia se encuentra en el primer capítulo del conocido libro “El azar y la necesidad” de Monod [7]. En él, este premio Nobel de fisiología y medicina de 1965 discute qué señales permitirían distinguir si existe vida en nuestro planeta, y si ésta sería inteligente, a unos extraterrestres que se acercaran.

Las nanomáquinas naturales son sistemas, típicamente, de tamaño molecular o compuestos por unas cuantas macromoléculas. Suelen ocupar unos cuantos nanómetros. Tienen altas eficiencias (60% para la kinesina [8]) en comparación con los motores macroscópicos (por ejemplo, en comparación con el de un coche, eficiencias del 25%) y funcionan en un ambiente altamente fluctuante, lo que implica un diseño radicalmente diferente al de nuestros aparatos cotidianos. Hoy nos encontramos lejos de poder diseñar nanomáquinas de esta eficiencia y calidad pero hemos iniciado la comprensión física de esta maquinaria gracias a las modernas técnicas de nanomanipulación [9]. En otras palabras, estamos en el punto de entender el funcionamiento del ‘pájaro’ en la nanoescala. En la Fig. 2 se representa un experimento de manipulación de una nanomáquina biológica *in vitro*. En estos experimentos la estrategia es aislar a la proteína del medio celular metiéndola en un ‘taller’ (el laboratorio), como si fuera un coche, y sometiéndola a diferentes ensayos físicos.

En el interior de nuestras células las simples variaciones rápidas de la temperatura (fluctuaciones térmicas) provocan movimientos aleatorios y bruscos de las moléculas de agua contra las proteínas o nanomáquinas moleculares (*ambiente estocástico*), dando lugar a un movimiento errático de las proteínas (*movimiento browniano*). Trasladado a nuestro mundo macroscópico, sería como si nosotros y nuestras máquinas cotidianas tuviéramos que adaptarnos a vivir sobre un seísmo. Aunque parece contrario a la razón, las proteínas, como máquinas que son, consiguen en ese nanomundo aprovechar mejor la energía (mayor eficiencia, es decir, menor tasa de disipación energética) que nuestras máquinas macroscópicas. Aunque la física que gobierna este nanomundo es conocida, no sabemos todavía como aprovecharla para construir y optimizar máquinas en esa escala pero está claro que el futuro de este campo de investigación es prometedor.

Ejemplos

La ventaja más evidente de trabajar con cosas nanoscópicas es la miniaturización. En términos generales, la miniaturización reduce el peso de la tecnología y el consumo energético. Esto, a su vez, reduce la producción de residuos tóxicos, aumenta la capacidad de integración entre diferentes dispositivos y procesos en paralelo y facilita la automatización. Todas estas ventajas obran por la optimización del funcionamiento de nuestra tecnología.

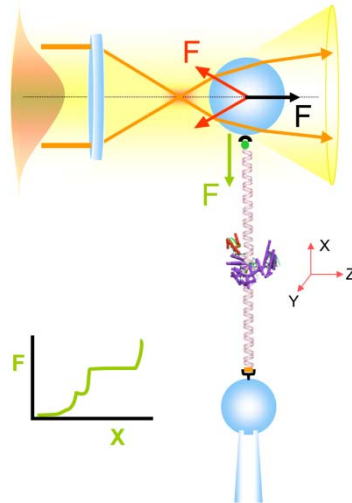


Fig. 2. Esquema del estudio de un motor molecular que opera sobre ADN, como puede ser una ADN-polimerasa (*Laboratorio de Nanomanipulación Óptica*, IMDEA Nanociencia). Los motores moleculares son nanomáquinas biológicas que realizan un trabajo mecánico consumiendo, típicamente, energía química y de las fluctuaciones térmicas. En el experimento representado, el ADN se engancha entre dos microesferas. La microesfera superior está sostenida por pinzas ópticas, que permiten medir en tiempo real las fuerzas ultrapequeñas que desarrollan estos motores así como los subsecuentes desplazamientos nanométricos (no hecho a escala).

Algunos ejemplos de tecnología miniaturizada y que ya están en la calle son los siguientes:

- *Lab-on-a-chip (laboratorio en un chip)*. Es un término usado para instrumentos que integran (múltiples) funciones de laboratorio en un chip individual de tamaño muy pequeño –en el rango que va desde milímetros cuadrados a unos cuantos centímetros cuadrados–, y que permiten manejar volúmenes de fluido muy pequeños –hasta inferiores al picolitro–. Existen ya a productos de uso individualizado, basados en el concepto lab-on-a-chip, que se usan para hacer diagnósticos con, por ejemplo, sangre humana. Se manejan pequeñas cantidades de muestra o reactivos, lo cual reduce el consumo de productos químicos caros o limitados. Se pueden además cuantificar dosis exactas. La miniaturización también permite la integración de múltiples sensores en un mismo dispositivo y análisis más rápidos.
- *Ordenadores*. El primer ordenador que se construyó fue el ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), en 1946. El ENIAC consumía una potencia de 150 kW y tenía una capacidad de cálculo de 8 kflop/s. Un ordenador convencional, a día de hoy, puede llegar a los 30 Gflop/s (más de un millón de veces más rápido) y consume menos de 250 W. El futuro de los ordenadores apunta hacia la conocida como *Computación Cuántica*, que implica un cambio de paradigma en la computación. Este paradigma permitirá no sólo seguir reduciendo el tamaño de los ordenadores, sino también aumentar la capacidad de los

mismos y tratar problemas que no pueden solucionarse con la computación actual.

- *Almacenamiento de información.* Los dispositivos digitales de datos incluyen sonido e imágenes, de manera que constituyen un ejemplo de proceso de convergencia integrador. La carrera por disminuir el tamaño de estos dispositivos es tal que si hoy Hipatia tuviera que salvar la Biblioteca de Alejandría podría escapar sin más que portar un pendrive con toda la información.

Existen otras ventajas menos evidentes, es decir, no derivadas directamente de la miniaturización, pero son las que constituyen la verdadera revolución tecnológica. Están inscritas en el cambio de estrategia que implica la nanotecnología. Este cambio de estrategia se manifiesta de manera diferente dependiendo del campo de la ciencia o aplicación que se esté tratando. Ya hemos visto que la computación cuántica no sólo permitirá seguir reduciendo el tamaño de nuestros ordenadores, sino que además nos permitirá desarrollar algoritmos más complejos gracias a la física que ocurre en la escala nanométrica y subnanométrica. Un ejemplo menos amigable pero en esta línea de cambio de estrategia se plantea en la siguiente pregunta: ¿de qué manera se podría exterminar a la humanidad sin apenas molestar al resto del planeta? la célebre ficción cinematográfica de la saga *Terminator* proponía construir máquinas grandes y con gran potencial destructivo. Sin embargo, si fabricáramos nanomáquinas del tamaño y características de un virus, que destruyeran un tipo de organismo específico, el proceso sería más rápido y selectivo. *Skynet* probablemente disfrutaría de *Gaia* libre de la especie humana, sin apenas vida inteligente y con toda su flora y fauna por aprovechar para sus propósitos. Después, sólo tendría que desactivar estos virus artificiales (suponiendo que se hubiese asegurado de que sus nano-armas letales no pudieran mutar).

Aunque pueda considerarse flirtear con el destino, es necesario darse cuenta de que es totalmente impredecible el cómo será la integración de nanomáquinas artificiales en el ambiente y con nuestro propio organismo. Los peligros asociados a esta tecnología de nanomáquinas es una incógnita: quizás no vayan a ser como en el ejemplo del virus, pero está claro que la integración/liberación de organismos artificiales, por llamarles de otra manera, cambiaría nuestra realidad. Sin embargo, estamos todavía muy lejos de lograr esta tecnología; no tiene sentido plantearnos qué cara tendrán los peligros asociados o cómo actuar/regular para evitarlos.

Otra ejemplo del cambio de enfoque de la nanotecnología –esta vez benigno para nuestra especie– es el de poder ‘reparar’ localmente células dañadas, tejidos o hacer desaparecer cánceres desde dimensiones nanométricas. Esta idea es el sueño de la Nanotecnología en medicina, o *Nanomedicina*, y también ha tenido una realidad cinematográfica en la película *Viaje Alucinante*. En esta ficción se plantea la posibilidad de que un submarino miniaturizado pueda viajar al interior del cuerpo humano con un equipo de personas, también miniaturizado, para poder reparar tejidos de una persona con el cerebro dañado. Está claro que la posibilidad de que nos miniaturicemos no parece que vaya a tener realidad. Sí, sin embargo, la de que podamos enviar fármacos de manera inteligente en pequeñas dosis. Estos “envíos” selectivos, con capacidad de reconocimiento de una diana celular/molecular,

actuarían más eficientemente al disminuir los efectos secundarios del paciente. Además, se podría proteger al propio fármaco frente a la degradación antes de llegar a su destino o proporcionar una vía de administración alternativa a aquellos fármacos poco solubles o que no pueden administrarse de manera convencional. Este tipo de estrategia denominada *drug delivery* en inglés es un campo de investigación muy activo en la actualidad. Por supuesto, la posibilidad de lograr nanomáquinas reparadoras, basadas en el diseño de nuestras proteínas, es potente y posible desde un punto de vista físico, aunque mucho más lejana que la estrategia *drug delivery* de administración de fármacos, que al menos tiene realidad desde el punto de vista de la investigación actual. Otro campo relacionado con la medicina y que engarza con la investigación de nuevos materiales es el de los implantes: se persigue una nueva evolución de implantes que sean activos, más precisos y pequeños.

Por último, es necesario terminar hablando del desarrollo de nuevos materiales y dispositivos asociados. El avance más serio en nuestros días en nanotecnología se está dando en este campo de manera que ya tiene una realidad incluso a nivel industrial. Es por eso que el análisis de los peligros asociados a la nanotecnología a día de hoy ha de centrarse sobre todo en este campo. En principio, el cambio de enfoque de la Nanotecnología permite un diseño a voluntad de nuevos materiales: materiales con propiedades programadas y materiales que se autoensamblen y/o con respuestas activa/pasiva. Ejemplos de estos materiales y dispositivos incluyen superficies resistentes al rayado y a la corrosión, o superficies hidrófugas, limpias o estériles; metales no conductores de la electricidad, tejidos antimanchas, antiarrugas, aislantes, protectores del agua y el frío, tejidos aislantes de agentes químicos y nuevos tintes; nuevos cristales resistentes a altísimas temperaturas, cerámicas y vidrios que no se manchen y cristales fotosensibles; desarrollo de sensores (sensibles a muestras nocivas o contaminantes muy pequeñas, de origen químico o físico) y nanoactuadores. También células solares de alta eficiencia, materiales aislantes térmicos y acústicos y baterías de alto rendimiento.

4. Nanopartículas

En qué momento estamos

El uso de materiales en la nanoescala puede decirse que se inició con la cerámica china hace dos mil años. El uso de partículas negras de carbono en neumáticos se lleva haciendo en nuestra época desde hace muchos años. Sin embargo, nos encontramos en la prehistoria de la Nanotecnología. Buena parte de lo que hemos venido describiendo hasta ahora es un futuro posible pero lejano. El número de aplicaciones industriales hoy en día es tan pequeño que podemos hablar más de evolución tecnológica que de revolución nanotecnológica. En la Fig. 3 se analiza el proceso de convergencia evolutiva entre las dos estrategias para producir tecnología: la bottom-up y la top-down. Como se ve, nos encontramos en el momento en el que ambos enfoques se están utilizando, lo cual se puede interpretar como el comienzo de la gran explosión nanotecnológica.

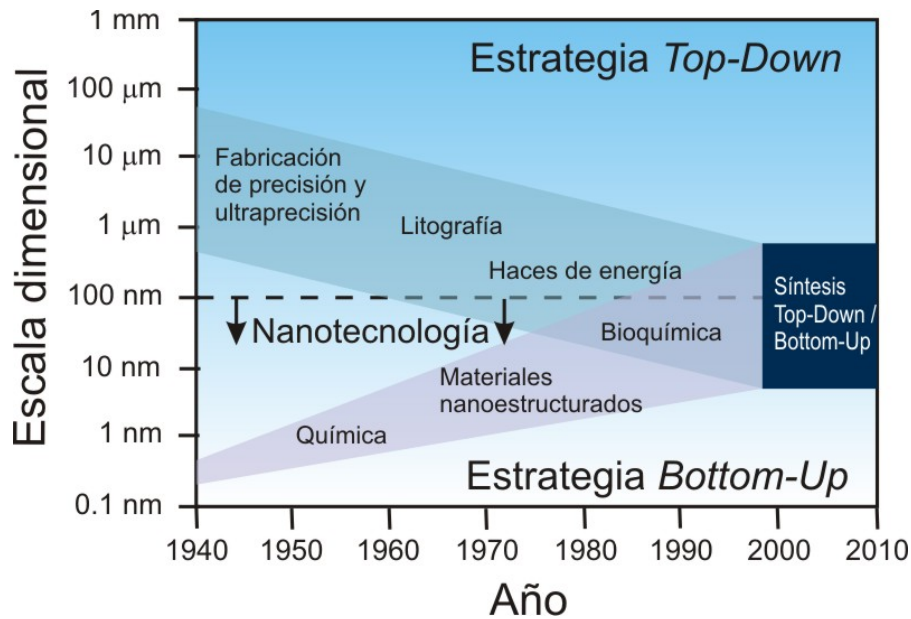


Fig. 3: Convergencia de las técnicas de producción descendente y ascendente.

Materiales nanoestructurados

Muchas de las aplicaciones de la nanotecnología en el presente se basan en el hecho de que en la nanoescala los materiales muestran propiedades distintas a sus propiedades macroscópicas. En la forma de nanopartícula, se aumenta la relación de superficie/volumen, y cuanto más superficie se expone más activo se hace el material. Además, 'adornando' químicamente las superficies de las nanopartículas con otras moléculas se consiguen nuevas propiedades, que pueden incorporarse en dispositivos y sistemas macroscópicos, tales como nuevos sensores que pueden detectar y medir rápidamente la contaminación en el aire o el agua o analizar sangre. Estas nanopartículas serían ladrillos artificiales con los que construir nuevos materiales con propiedades programadas y amplificadas. Las nanopartículas también pueden ser empleadas para rediseñar la estructura física o química de la superficie de otro material. Por ejemplo, un pequeño porcentaje de minerales de arcilla en forma de nanopartículas incorporados en la superficie de una película de polímero puede tener como resultado una potenciación de la impermeabilidad y resistencia al calor, permitiendo el desarrollo, por ejemplo, de un nuevo envoltorio para alimentos que sea ligero, resistente a los olores y que los mantenga frescos. Las nanopartículas están compuestas por un número de átomos/moléculas que va desde unos pocos a unos miles, típicamente.

Existen diferentes tipos de nanoestructuras con las que fabricar nuevos dispositivos y materiales y se pueden clasificar por su geometría.

- Sistemas en una dimensión (1D): películas ultrafinas.
- Sistemas en dos dimensiones (2D): nanohilos, hilos cuánticos, nanotubos.
- Sistemas en tres dimensiones (3D): puntos cuánticos, nanopulvos/nanopulverizados, sistemas funcionales supramoleculares.

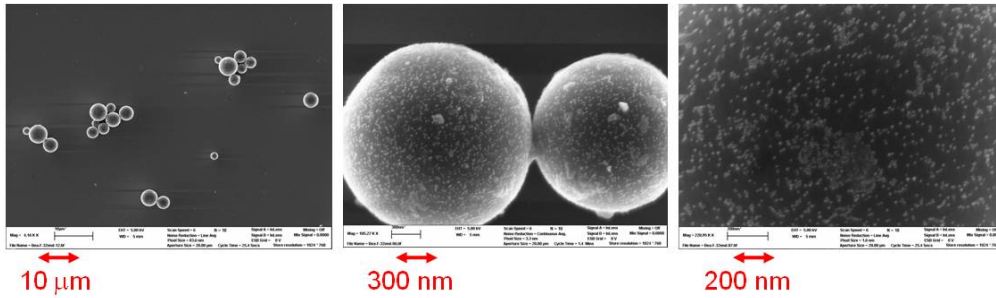


Fig. 4: Partículas de carbono vítreo recubiertas con nanopartículas semiconductoras de CdSe. Cortesía de la Dra. Beatriz H. Juárez (IMDEA Nanociencia).

Hay una gran diversidad de nanopartículas en uso, ejemplos representativos de nanopartículas según la sustancia química empleada son:

- Carbono; óxidos metálicos: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ; semiconductores: CdTe, GaAs; metales: Au, Ag.
- Nanotubos de carbono y de otros materiales.
- Fullerenos: macromoléculas de átomos de carbono: C_{60} , C_{70} , C_{76} , C_{80} . Se espera que se usen en aplicaciones médicas.
- Dendrímeros (partículas poliméricas autoensambladas), composites (materiales nanoestructurados con más de un tipo de sustancia química)
- Puntos cuánticos: de 5-100 nm, hechos de unos cuantos miles de átomos.

Aplicaciones y productos con nanopartículas

En la Fig. 4 se ilustran microesferas de carbono vítreo ‘decoradas’ con nanopartículas semiconductoras (también llamadas *puntos cuánticos* coloidales) en su superficie. Los puntos cuánticos tienen alta especificidad a estímulos de luz. Combinaciones de estos puntos cuánticos con otras microesferas de soporte pueden dar lugar a materiales con respuesta activa y selectiva a la radiación.

Existen una gran variedad de aplicaciones en la actualidad de las nanopartículas:

- **Análisis:** optimización de las propiedades de los sensores e instrumentos para análisis químicos y físicos.
- **Electrónica:** producción de chips, fabricación de dispositivos de almacenamiento masivo.
- **Optoelectrónica:** nuevos principios en el diseño de circuitos, aprovechamiento de los efectos cuánticos en la producción de nuevas clases de transistores, nuevas fuentes de luz basadas en materiales semiconductores (diodos y láseres).
- **Óptica:** procesamiento de superprecisión de componentes ópticos, litografía para producir componentes electrónicos todavía de menor tamaño, componentes ópticos con superficies funcionales esféricas para proyectores de datos, cámaras, anteojos, escáneres.
- **Biotecnología y medicina:** uso de nanopartículas en la cura de tumores, fabricación de superficies y membranas funcionalizadas y nanoestructuradas, optimización de métodos de diagnosis y de métodos de direccionalización de agentes activos, implantes neuroactivos.

- **Ciencia de materiales:** nanocapas ultrafinas, nanocristales, nanoestructuras para componentes de microelectrónica, células de combustible, superficies antirrayado, fabricación de superficies que repelan el agua o el polvo, con propiedades antirreflectantes o fotoactivas.

Estas aplicaciones han dado lugar a productos que están ya en el mercado. Ejemplos representativos son:

- **Crema solar:** para gran protección a la radiación ultravioleta (UV), para pieles muy sensibles. Contienen partículas de óxidos.
- **Cosméticos con nanopartículas.**
- **Compuestos con nanopartículas** en tinta de copadoras e impresoras, para pañales de niños (mejoran la absorción de humedad), en películas transparentes para mejorar su resistencia y permeabilidad a los gases.
- **Pinturas y recubrimientos:** antirrayado, que absorben o protegen de los rayos UV, antirreflectantes (para gafas y otros instrumentos ópticos).
- **Tejidos (textiles):** que repelen el agua y el polvo, que mejoran la protección solar por el uso de partículas de óxido, que protegen de la electricidad estática.
- **Electrónica y opto-electrónica:** Chips electrónicos optimizados, discos duros, memorias RAM, láseres de diodo en visualizadores, iluminación.
- **Optimización energética:** en dispositivos lumínicos, diodos de luz, visualizadores.
- **Deporte:** palos de golf, raquetas de tenis con mejor estabilidad y funcionalidad (contienen compuestos de carbono).

Y a productos que vendrán próximamente. Ejemplos representativos son:

- **Automoción:** sistemas inteligentes que reaccionen al comportamiento en la conducción y estímulos medioambientales con gran precisión en la detección y en las decisiones; espejos y ventanas que se adapten automáticamente a las condiciones externas; mejora de adhesión de los neumáticos en diferentes tipos de carreteras; pinturas que cambien de color; materiales sintéticos para revestimientos interiores.
- **Ingeniería mecánica:** optimización de máquinas mediante el uso de capas funcionales, metrología, sensores.
- **Tecnología energética:** optimización del almacenamiento energético (células de combustible, p.ej.); células solares de alta eficiencia, materiales innovadores que convierten el calor en electricidad.
- **Medicina:** métodos de diagnóstico y tratamiento de cáncer y diabetes; nanopartículas como medio de contraste, para localización y destrucción de tejidos (p.ej. tumores) y para transportar agentes (medicación); biochips para diagnóstico médica.
- **Información y comunicación:** instrumentos multifuncionales en formatos reducidos, visualizadores holográficos 3D, instrumentos que generan diagnóstico online con funciones de aviso automático.
- **Óptica:** técnicas de iluminación basadas en componentes optoelectrónicos (p.ej., diodos de luz de gran superficie); lentes ópticas fabricadas con geometría deseada y con precisión nanométrica (p.ej. para proyectores, en litografía e ingeniería médica).

5. Riesgos: causas y efectos

Como cualquier otra revolución científica, su progreso es inexorable. El avance de la ciencia responde a la curiosidad humana y la tecnología que conlleva sólo puede limitarse artificialmente por leyes de protección o razones comerciales. Esto, muchas veces, actúa marcando vías alternativas del progreso tecnológico pero no lo bloquea totalmente. Dado que en los próximos años tendremos que convivir con esta revolución tecnológica, conviene examinar los peligros que puedan surgir. Sin embargo, es muy difícil predecir los peligros asociados a algo cuyo grueso no sabemos qué aspecto va a tener. Como hemos dicho, la mayor parte de la revolución nanotecnológica está por venir y sólo mediante la imaginación razonada podemos adelantar los beneficios y perjuicios.

Aunque parezca una perogrullada, conviene decir que el principal peligro es no saber cuál es el peligro a largo plazo. Ya hemos visto algunos ejemplos que el cine nos ha presentado, con más o menos acierto, de las situaciones que podrían plantearse. Eric Drexler planteó el hipotético escenario de la *plaga gris* (en inglés, *grey-goo*): máquinas que se construyen a sí mismas (autorreplicantes) y que pueden quedar fuera del control de sus diseñadores, de manera que no sólo nos invadan sino que además consuman recursos indefinidamente. Sin embargo, esta hipótesis está fuera del estado real del conocimiento y por tanto no es una amenaza actual. Otras hipótesis que ya se ha comentado es la de usar nanomáquinas como armas letales altamente selectivas.

Situaciones más reales tienen que ver con el empleo de nanosensores como sistemas espía. Por su tamaño y potencial su uso podría violar la intimidad de una manera altamente invasiva y difícil de controlar/limitar. Los fines militares siempre tienen doble análisis. En cuanto a los que tienen que ver con la protección pasiva, está claro que los sistemas de información por sensores avanzados y baratos van a progresar rápidamente para la detección temprana de agentes biológicos y químicos. En esta dirección, también se desarrollará el equipo militar de respuesta activa: textiles, armaduras, armas y comunicación personal.

Como vemos, la alarma por los riesgos de la nanotecnología no debe dispararse ahora aunque es necesario exigir un estudio de riesgos de cada aplicación que se desarrolle. Hoy requiere más vigilancia los peligros derivados de los organismos genéticamente modificados o la energía nuclear. Los riesgos presentes en la nanotecnología provienen de la fabricación y liberación de nanopartículas.

Riesgos asociados a las nanopartículas: el jamón en lonchas

La característica principal y generalizada de las nanopartículas es la de que la relación [*superficie*] / [*volumen*] aumenta. Una determinada masa de un material presentado en forma de nanopartículas tiene unas propiedades y funcionalidades químicas, físicas y/o biológicas amplificadas. Esto es, la amplificación crece de manera inversamente proporcional al tamaño de las nanopartículas y puede ser varios órdenes de magnitud superior (como el sabor del jamón finamente cortado). No sólo eso: la materia que se presenta en forma de nanopartículas puede mostrar propiedades distintas de las que posee a escala macroscópica. Esto es lo que abre interrogantes.

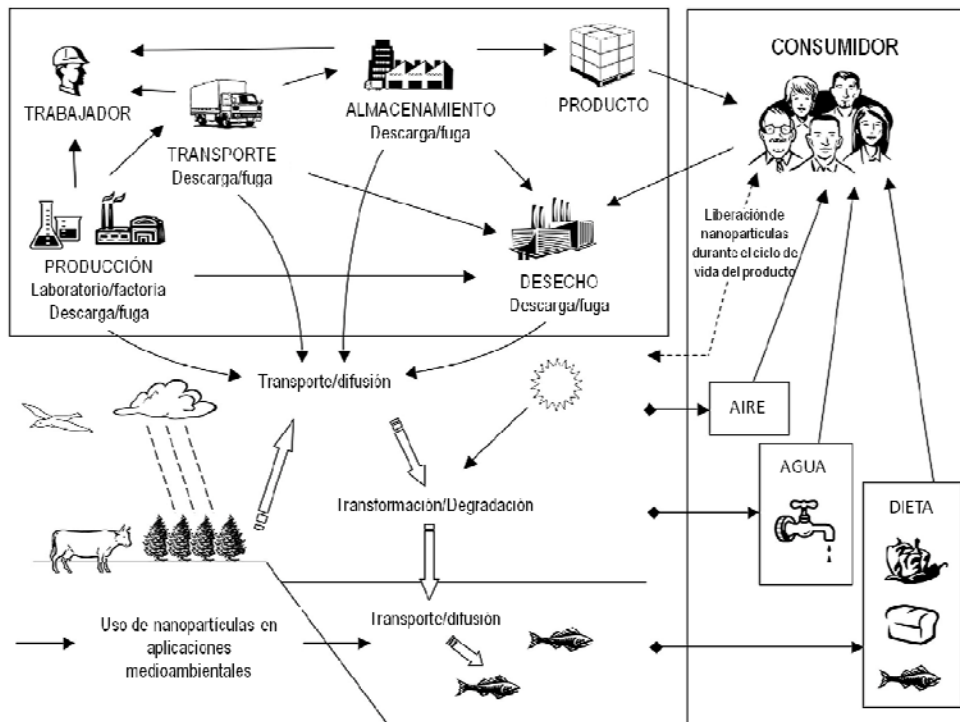


Fig. 5: Posibles rutas de exposición a las nanopartículas y nanotubos basados en las potenciales aplicaciones actuales y futuras. Se sabe muy poco de las rutas de exposición a las nanopartículas y nanotubos, por lo que así hay que considerar esta figura. Adaptado del Instituto Nacional de Recursos y Medio Ambiente de Japón (http://www.nire.go.jp/eco_tec_e/hyouka_e.htm).

Los compuestos que se están usando para construir nanopartículas son sobradamente conocidos, pero no se puede asegurar que una partícula de cierto material con 10 nm de diámetro, por ejemplo, no sea tóxica aunque el mismo material, cuando se presenta en forma de partícula de 1000 nm o más no lo sea. Como consecuencia, la toxicidad asociada, riesgo de explosión, mayor reactividad química incontrolada, contaminación, etc., aumentan colateralmente al beneficio que producen. Por ejemplo, las nanopartículas de plata son más tóxicas que las micropartículas del mismo metal. En dispersión, todavía tienen mayor toxicidad. Por último, es necesario pensar que en contacto con el medio ambiente las nanopartículas pueden experimentar transformaciones que no son fácilmente predecibles y que, por tanto, sólo pueden ser analizadas una vez fabricadas (¡y antes de ser comercializadas!).

A día de hoy hay pocas nanopartículas fabricadas y liberadas. Como consecuencia, no existen casos reales de sucesos negativos. El principal peligro está en laboratorios y empresas manufactureras pero no en el exterior. La mala noticia es que no hay estudios sistemáticos sobre sus efectos nocivos. Tampoco existen casos de efectos adversos en humanos o en otras especies que puedan servir para evaluación. Tampoco se han detectado problemas en el medio ambiente hasta el momento.

Aunque no hay evidencias ni casos de accidentes generados por la presencia de estos entes conviene resolver las siguientes cuestiones:

- Cómo entran las nanopartículas sintéticas en el medio ambiente. Cuál es su ciclo de vida, recuperación, deposición, acumulación, degradación, solubilidad, etc. (ver Fig. 5).
- Cuál es el impacto en la cadena alimenticia.
- Cuál es la capacidad de transformación en transportadores de sustancias tóxicas.

En el organismo pueden entrar:

- por vías comunes: inyección, inhalación o ingestión.
- por vías no comunes: debido a su pequeño tamaño pueden penetrar por la piel o a través de heridas, eccemas, etc.

En cualquier caso, llegan al torrente sanguíneo y se distribuyen rápidamente. Pueden producir inflamaciones en los pulmones, alergias, muerte celular y daño tisular, y trombos por agregación. Por ejemplo, los nanotubos son unas partículas que, por su geometría alargada, los macrófagos de nuestro sistema inmunitario son incapaces de eliminar de nuestro organismo.

Como hemos analizado, los peligros asociados podrían crecer exponencialmente con el tiempo puesto que no estamos hablando de unos pocos materiales concretos que se estén usando por primera vez en aplicaciones a gran escala, como fue el amianto (o asbesto), o de una fuente de energía, como es la energía nuclear. Estamos hablando de que cualquier material disminuido de escala puede presentar riesgos. El número de nanopartículas usadas en dispositivos o productos crecerá en los próximos años por lo que se hará conveniente individualizar el análisis de riesgos de cada producto o material. Aunque el conocimiento actual de los materiales de partida es una base muy sólida, el análisis de los productos fabricados antes de que puedan ser comercializados, sin aseveraciones previas, será determinante. Debido a esta generalidad, no se pueden anunciar directrices rigurosas al hablar de riesgos de la Nanotecnología.

Conclusiones

1. Nanociencia: la nueva revolución científica e industrial del siglo XXI ya está en marcha.
2. Nanotecnología: es la base de las nuevas empresas productivas y de nuevos mercados en fuerte expansión. Experimentará una más rápida evolución que a la que estamos asistiendo hoy.
3. Los riesgos a largo plazo son impredecibles pero de mayor espectro que los generados por la energía nuclear o por la manipulación genética de organismos.
4. A corto plazo, los riesgos están generados por la liberación de nanopartículas.
5. Su efecto, positivo o negativo, es inversamente proporcional a su tamaño.
6. No existen estudios sistemáticos de daños. Tampoco hay suficiente cantidad de nanopartículas manufacturadas hoy para producir daños.
7. Se recomienda de momento tratarlas como sustancias nuevas.

Referencias

- [1] Feynman, R. P. (1960). There's plenty of Room at the bottom. California Institute of Technology.
- [2] Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of "Nano-Technology". *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II*, Japan Society of Precision Engineering.
- [3] Drexler, K. E. (1986). Engines of creation: The coming era of Nanotechnology. <http://www.wowio.com/users/product.asp?BookId=503>.
- [4] Arias González, J. R. (2009). Nano *Bio* Ciencia: La vuelta al sabio renacentista. Blog *Madrid+d* (10-2-2009). <http://www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=38123&sec=Home>.
- [5] Arias González, J. R. (2006). Biofísica: investigando en horizontal. En *El País*, sección Futuro – Circuito Científico (27-12-2006).
- [6] Fennimore, A. M., T. D. Yuzvinsky, W. Q. Han, M. S. Fuhrer, J. Cumings, y A. Zettl. (2003). Rotational actuators based on carbon nanotubes. *Nature* 424:408-410.
- [7] Monod, J. L. (1970). El azar y la necesidad.
- [8] Bustamante, C., J. Liphardt, y F. Ritort. 2005. The nonequilibrium thermodynamics of small systems. *Physics Today* 58:43-48.
- [9] Hormeño, S., y J. R. Arias González. (2006). Exploring mechanochemical processes in the cell with optical tweezers. *Biology of the Cell* 98:679-695.