





Átomos y moléculas



JORDI DÍAZ-MARCOS & MIGUEL GARCÍA-GUERRERO

Átomos y moléculas

Nanotecnologías para cambiar el mundo



GUADALMAZÁN

© JORDI DÍAZ-MARCOS • Miguel García Guerrero, 2021
© Talenbook, s.l., 2021

Primera edición: octubre de 2021

Reservados todos los derechos. «No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea mecánico, electrónico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del *copyright*.»
Guadalmazán • Colección Divulgación científica

Guadalmazán • Colección Divulgación científica
Director editorial: Antonio Cuesta
Edición de Ana Cabello

www.editorialguadalmazan.com
pedidos@almazaralibros.com - info@almazaralibros.com

Imprime: Romanyà Valls
ISBN: 978-84-17547-48-6
Depósito Legal: CO-885-2021
Hecho e impreso en España - *Made and printed in Spain*

*En memoria de Joaquín Tutor Sánchez
y en honor de todas aquellas personas
que nos han inspirado.*



Índice



INTRODUCCIÓN	13
I. TANTEAR A CIEGAS: CASUALIDADES ATÓMICAS	17
Historia de una especulación afortunada.....	19
El nacimiento de la química.....	21
Dalton y los átomos modernos	28
2. UN NUEVO MUNDO: DE MOLÉCULAS Y FÍSICA CUÁNTICA..	35
Año milagroso	37
Buena onda.....	43
Un Nobel para un «despeje»	47
Pleito cuántico.....	50
Indeterminación, gatos y dados	52
3. LA PREHISTORIA DE LAS NANO	57
Un viaje con <i>Ant-Man</i>	59
Nanopartículas naturales	62
Maquinaria de la vida	64
Nanomateriales de chiripa	67
Azul maya	68
Copa de Licurgo.....	70
Acero de Damasco.....	71
4. EL ESPECTÁCULO DE LAS NANOTECNOLOGÍAS.....	75
Motores de creación.....	79
Una «pequeña» polémica	83
Apuesta por avances posibles	86
Enfoques de las nano.....	89
5. VISUALIZAR LO INVISIBLE.....	97
Atravesar montañas: el efecto túnel	100
Antecedentes: el microscopio de electrones	103
La libertad en IBM y el microscopio de efecto túnel	108
Las técnicas de sonda próxima (SPM)	114

6. MARAVILLAS DEL CARBONO	119
El <i>Science Star</i> de las nanotecnologías	120
El balón más famoso del mundo nano.....	125
Un paso más allá: los nanotubos.....	129
¿Qué hace tan especial a los nanotubos de carbono (CNTs)?	132
7. LA FIEBRE DE LAS NANOTECNOLOGÍAS (O LAS NANO CONQUISTAN EL MUNDO)	139
La primera iniciativa nacional: de las inversiones a la conquista ...	140
La revolución industrial del siglo XXI	144
Un científico con espíritu de niño.....	145
Una cinta detrás de la revolución del «panal de abeja»	148
Una capa bidimensional extraordinaria	150
<i>Regreso al futuro IV: Graphene Valley</i>	152
8. ALICIA Y LAS MARAVILLAS DE NANOLAND	157
Quantumland: la importancia de la física cuántica en el mundo nano	158
Mr. Feynman, usted no estaba de broma: aplicaciones del mundo nano	166
9. MEDICINA EN TIEMPO REAL	173
Las primeras máquinas moleculares	175
El cuerpo humano: un conjunto de máquinas nanotecnológicas ..	179
Estampas de nanomedicina.....	183
Del <i>grey goo</i> al <i>pink goo</i> : las máquinas moleculares son el futuro ...	192
10. LA VIDA ES UN RIESGO (Y TAMBIÉN LAS NANOTECNOLOGÍAS).....	197
Fantasmas de las innovaciones pasadas.....	201
Fobia a la nanofobia	203
Riesgos de las nanopartículas	207
¿Qué podemos hacer?.....	210

Introducción

Imagina que despiertas y te das cuenta de que tu teléfono móvil ha desaparecido. Un día antes lo dejaste cargando en su lugar habitual pero ahora, inexplicablemente, no está. Revuelves tu casa de arriba abajo y no aparece; desesperado, te preguntas dónde pudiste dejarlo. Pero ahí no queda la cosa, sales a la calle y se respira una atmósfera confusa: todo el mundo parece vagar distraído y preocupado. Basta dialogar con María, la dueña de la tienda de la esquina, o Desi, la responsable de la entrada de tu trabajo, para darte cuenta de que el tuyo no es un caso aislado: todos los móviles han desaparecido. ¡Qué extraño!

Te sientes horrorizado al pensar en todo lo que se acaba de perder con estos valiosos aparatos. No es solo un tema de llamadas, también se pierde la cámara digital, que permite registrar los detalles más trascendentes de nuestro día a día, el GPS (o la brújula), que nos ayuda a orientarnos cuando buscamos una dirección, nuestros contactos, así como las plataformas de redes sociales, que nos ponen al corriente de las vidas de los amigos y brindan la necesaria dosis diaria de memes. ¿Qué va a ser de nosotros sin todo eso?, medía vida reposa en estos pequeños y valiosos aparatos.

Aunque el ejemplo resulta algo extremo, sirve para hacernos ver hasta qué punto nuestras actividades cotidianas dependen de la tecnología, en general, y de los móviles, en particular. Tan solo piensa cuánto tiempo al día usas el teléfono, cómo te sientes desesperado cuando la batería tiene menos del 20 % y no hay un cargador a mano; o, quizá, alguna vez hayas notado —en una sala de espera o en el transporte público— que mucha gente se «sumerge» en sus móviles en vez de conversar con las demás personas.

Un aparato tan trascendente termina por moldear nuestras vidas. La forma en que organizamos nuestros planes, la manera en que creamos imágenes para recordar nuestras experiencias o proyectamos una imagen personal a través de redes sociales, así como también la manera en que nos relacionamos con quienes nos rodean. Y todo esto no es casualidad, alguien tomó la decisión de darle cierta forma a cada uno de los aparatos y las aplicaciones que impregnan nuestras actividades; con esto, al mismo tiempo, definieron la manera en que vivimos al usarlos.

Así, nos atrevemos a decir que hay dos tipos de personas en este mundo: las que diseñan tecnologías y las que se limitan a usarlas. Los miembros del primer grupo tienen en sus manos el poder de dictar cómo viven los del segundo. Al saber esto, ¿estamos dispuestos a quedarnos sentados a esperar a que alguien más le dé forma a nuestro futuro? ¿A qué alguien nos moldee?

Lo menos que podemos hacer es conocer las diferentes opciones tecnológicas a nuestro alcance, incluso entenderlas, para tomar decisiones informadas sobre el tipo de actividades que deseamos realizar con nuestros aparatos. De forma ideal, deberíamos ir mucho más allá para saber qué está pasando con las tecnologías de vanguardia y buscar modificarlas para que respondan a nuestras necesidades.

Hoy en día nos encontramos en los albores de las más grandes revoluciones de la historia, vivimos el inicio de la era

de las nanotecnologías. El poder humano para modificar nuestro entorno llega a su punto más alto con la capacidad de acomodar átomos a voluntad para lograr avances extraordinarios. El detalle es que, como veremos en el libro, esta manipulación ocurre en una dimensión tan pequeña que es, en esencia, invisible para nosotros. No resulta fácil entender y cambiar algo que parece tan alejado de nuestras vidas. Y es que hablamos de la escala de átomos y moléculas, objetos miles de millones de veces más pequeños que nosotros.

A pesar de que parecen algo ajeno a nuestra realidad, la distancia es solo aparente, aun sin darnos cuenta, las nanotecnologías ya nos invaden por todos lados. Y para muestra, volvamos al ejemplo de los móviles, después de todo quizá es el único instrumento electrónico con más aparatos que personas en el mundo y, a su vez, posee 70 de los casi 120 elementos de la tabla periódica. Gracias a la manipulación de la materia, al nivel de átomos y moléculas, los teléfonos inteligentes consiguen muchas de sus características más valiosas: la mayor capacidad de energía (y menor tiempo de carga) de las baterías de iones de litio, la resistencia del «vidrio gorila» que nace al sustituir átomos de sodio por potasio para proteger la pantalla, los sensores de huellas digitales para identificar a los usuarios, los millones de circuitos que se incluyen en espacios diminutos para procesadores y dispositivos de memoria, la inclusión de un número cada vez mayor de sensores individuales en el CCD de la cámara digital, el GPS que capta la señal de satélites para establecer la posición del aparato, el acelerómetro que identifica su posición (vertical u horizontal) y ayuda a contar los pasos que realizamos, los sensores de capacitancia que permiten el funcionamiento de la pantalla táctil, el magnetómetro que capta el campo magnético de la Tierra para ubicar el Norte y el sensor de proximidad que sirve para desactivar la pantalla cuando hablamos por teléfono.

Y estas son solo algunas de las maravillas que ya están dis-

ponibles en los móviles. Existen grandes avances en otros campos como en la construcción, los cosméticos, los textiles, el sector de la energía o, sobre todo, la medicina. Pero lo mejor aún está por llegar y solo podremos aprovecharlo al máximo en la medida en que la sociedad entienda el poder a su disposición, así como la forma en que los nuevos avances pueden resolver sus problemas.

Esta comprensión no implica que las personas se vuelvan especialistas en nanotecnologías —aunque no está de más lograr que los más jóvenes hagan una carrera tan prometedora—, pero lo que sí urge es contar con una ciudadanía informada con repercusión en varios ámbitos: empresarios que sepan usar los nuevos avances en mejores productos y servicios, autoridades públicas que orienten la investigación para satisfacer las necesidades sociales, así como una opinión pública exigente, capaz de comunicarse con científicos, empresarios y políticos, para cobrar protagonismo en el diseño de las nuevas tecnologías que definirán su forma de vivir en el futuro.

Con este libro buscamos ayudar a que los lectores conozcan las bases históricas de la revolución de las nanotecnologías, los principios científicos esenciales que hacen posibles sus avances y las rutas factibles de innovación que abren la puerta a soluciones de muchos de nuestros retos presentes y futuros. Todo esto implica lograr que tú, nuestro lector, te sientas parte de esta maravillosa aventura.

Y es que nada nos fascina más que una buena historia: con principio y final, con un argumento sugerente, personajes interesantes e, incluso, un poco de picante, donde nos encontremos ciertos antagonismos y tiranteces.

En resumen, te ofrecemos acercarte a un relato apasionante y singular, con personajes increíbles que conoceremos en detalle. Pero necesitamos un último e insustituible detalle, tú, el lector, y es que gracias a ti tenemos el cóctel perfecto para una historia exitosa. ¿Nos acompañas a la aventura más pequeña jamás contada?

Tantear a ciegas: casualidades atómicas

Hay personas que mueren muy jóvenes, pero aun así se las arreglan para causar un gran impacto antes de irse, para cambiar vidas a su alrededor. Quizá no tengan el crédito que merecen, pero no por eso deja de sentirse su influencia. Ese es el caso del casi desconocido Thomas Garnett.

Garnett fue un médico escocés del siglo XVIII con una importante habilidad científica y notoria capacidad como conferenciante. Fue profesor del Instituto Andersoniano (actualmente, Universidad de Strathclyde) en Glasgow, Escocia, y llegó a ser nombrado profesor de Filosofía Natural y Química en la prestigiosa Royal Institution.

La carrera de Thomas pintaba para cosas grandes, pero su vida dio un brusco vuelco con la muerte de su esposa (Catherine Jane Cleveland), en diciembre de 1798, al dar a luz a su segunda hija. El ánimo del científico cayó en un pozo del cual nunca más pudo salir. Perdió toda motivación para salir adelante, dejó de cumplir con su trabajo científico

y, tan solo cuatro años después de la partida de su esposa (a los 36 años), Garnett murió de fiebre tifoidea.

Aun así, poco antes de que su vida colapsara como un castillo de naipes, este médico realizó una serie de conferencias sobre química que —al menos indirectamente— cambiaron el rumbo de la ciencia. Sus presentaciones en Liverpool fueron tan buenas que le pidieron repetirlas en Mánchester. En la segunda sede, sus charlas causaron un gran impacto en John Dalton, un científico apasionado, quien —si bien ya contaba con cierto prestigio— hasta entonces dispersaba su trabajo en intereses muy diversos.

Dalton se hizo un nombre en la comunidad científica inglesa gracias a su estudio pionero sobre la ceguera de ciertos colores, un padecimiento que compartía con su hermano Jonathan. La inspiración para el trabajo nació cuando John le regaló a su madre unos calcetines y, para su sorpresa, ella le preguntó por qué eran rojos (él creía que eran azules). A partir de ahí desarrolló el trabajo sobre la incapacidad para percibir de forma adecuada el color rojo, con un impacto tal que hasta la fecha al padecimiento se le conoce como daltonismo.

Pero los intereses de este científico iban más allá de comprender la condición de su vista. A lo largo de su vida registró miles de datos meteorológicos, coleccionó plantas y las distribuyó en categorías, estudió mariposas y analizó la metamorfosis de las orugas. La pasión siempre estuvo ahí, pero la claridad para centrarse en un objetivo más específico llegó cuando Dalton asistió a las conferencias de Thomas Garnett. Salió inspirado para entregarse a la química sin sospechar que influiría en ella de forma determinante.

Justo en la última década del siglo XVIII esta área de la ciencia comenzaba a consolidarse, alejándose irreversiblemente de la alquimia gracias a un trabajo científico mucho más riguroso. Esto brindó una atracción que Dalton no pudo resistir, permitiéndole llegar al campo correcto en el momento oportuno para integrar ideas añejas (de más

de 2.200 años) con los descubrimientos más recientes. Así, sentó los cimientos de nuestra visión moderna de la estructura de la materia.

HISTORIA DE UNA ESPECULACIÓN AFORTUNADA

Antes de continuar con la historia de Dalton, debemos viajar a la Grecia del siglo V a. C. para encontrar el origen de un concepto esencial en nuestra aventura: el átomo.

Por entonces, el estudio de la naturaleza era más bien teórico y especulativo, aún no existía lo que conocemos como ciencia moderna, es decir, las actividades que nos permiten construir conocimientos verificables (a través de experimentos) para entender, explicar y predecir el comportamiento de las cosas que nos rodean.



DEMÓCRITO

Nos situamos en la ciudad de Abdera, donde vivió Demócrito, un filósofo que desde joven tenía fama de extravagante. De su maestro Leucipo tomó una idea clave para la historia atómica: la materia debe estar hecha de partículas

tan pequeñas que no pueden estar formadas por ninguna otra cosa. Como eran indivisibles en esencia, Demócrito bautizó a estas partículas hipotéticas como átomos (que en griego significa «algo que no se puede dividir»).

Claro que todo esto era pura especulación, su aporte solo se apoyaba en argumentos lógicos. Los filósofos de la época no consideraban necesario verificar sus ideas experimentalmente, eran producto de la razón y, según ellos, esta se encontraba por encima de todo. Y aunque hubieran querido comprobar la veracidad de sus afirmaciones, no había una descripción concreta de cómo deberían ser esos átomos, cuál sería su tamaño y sus propiedades. Lo dicho, se quedaron en mera especulación.

A pesar de que nunca puso manos a la obra, Demócrito estaba obsesionado con la posibilidad de separar una gota de agua en gotas cada vez más pequeñas, con la idea de cómo se debería llegar al punto de tener fragmentos tan diminutos que no pudieran partirse. Describió los átomos como cuerpos sólidos (sin ningún vacío interior), indestructibles, indivisibles, homogéneos e invisibles. Las partículas de distintas sustancias podrían distinguirse por su forma y tamaño, pero no por tener una estructura interna.

Demócrito redondeó su visión al postular que deberían existir diferentes tipos de átomos que al combinarse unos con otros y teniendo cierto vacío entre ellos formarían todas las sustancias conocidas. Mirándolo en retrospectiva, impresiona su capacidad visionaria, no había forma de corroborar o desmentir la idea; era como un disparo al aire o tantear a ciegas en un lugar desconocido, pero él se acercó de forma loable.

Lo malo fue que la propuesta encontró poco eco en sus contemporáneos, es más, lo señalaron como «el loco de la fiesta», encontrando su idea absurda; incluso, convirtiéndola en objeto de burlas. El argumento de sus opositores era que si las partículas ocupaban espacio tendrían que poder dividirse; en caso de ser indivisibles, significaría que no ocupan

espacio y entonces no serían nada. La materia no podía estar hecha de nada.

Ante semejante respuesta, podemos imaginarnos que hubo muy poco respeto por el trabajo de Demócrito y sus escritos no fueron conservados. Afortunadamente, sus ideas no se perdieron del todo, fueron una gran influencia en Epicuro, un maestro de gran renombre que —un siglo después de la muerte de Demócrito— le dio continuidad a la escuela atomista.

Aun así, esta especulación nunca llegó a dominar la perspectiva de los filósofos del mundo antiguo. El gran Aristóteles —con el respaldo de todos sus seguidores— se opuso al concepto de átomo de forma tajante; para él no era posible que existiera vacío dentro de la materia (una idea un poco ingenua; pero eso ya lo veremos después). De cualquier forma, esta escuela hegemónica logró establecer la idea de que la materia estaría formada por cuatro elementos —tierra, agua, aire y fuego—, que se combinarían para formar todas las cosas. Las ideas aristotélicas en la materia perduraron por más de 2.000 años, pero la propuesta atomista tuvo suficientes adeptos para sobrevivir de forma marginal.

EL NACIMIENTO DE LA QUÍMICA

Imagina que bastara con que tocaras un objeto para convertirlo en oro. Sería extraordinario contar con una habilidad semejante, no tendrías que volver a preocuparte por el dinero en tu vida. La leyenda del rey Midas, con más de 2500 años de antigüedad, nos muestra que las ansias de tener un camino directo a la riqueza material son muy antiguas. Claro que esa misma historia, en la que el protagonista termina solo y muerto de hambre, ofrece una moraleja para tener cuidado con lo que puede ocurrir cuando un deseo

tan extremo se llega a cumplir. Pero ni esta lección sirvió para contener el impulso de la alquimia en la Edad Media.

Los alquimistas buscaban transformar unas sustancias en otras, su método consistía en variar la cantidad de los cuatro elementos *aristotélicos* que contenían. Uno de los principales objetivos que los guiaba era conseguir convertir diferentes materiales en oro; aunque sus esfuerzos nunca se consolidaron del todo en un trabajo experimental sistemático.

De todos modos, al trabajar en la composición, estructura y propiedades de la materia, la alquimia fue un antecedente muy importante para la química. De hecho, muchos de sus intentos fallidos permitieron establecer nociones básicas para el posterior desarrollo de esta área de la ciencia. Sin embargo, sus objetivos (como transmutar diferentes materiales en oro o encontrar la fuente de la eterna juventud) y los fundamentos erróneos en que se basó la acercaban más a la magia que a lo que hoy entendemos como ciencia.



GALILEO

Con la llegada del Renacimiento (a partir del siglo XVI), aparece la figura de Galileo Galilei, considerado padre de la ciencia moderna por el trabajo experimental en que apoyó sus ideas sobre el movimiento de los cuerpos. Sin embargo, Galileo nunca dirigió su atención a la estructura de la mate-

ria, fue Robert Boyle, otro gran pionero experimental, el que tomó esta línea de trabajo.

Este inglés, que vivió en el siglo XVII, cobró gran fama por la bomba de vacío que construyó para experimentar con la presión en los gases. De ahí nació la famosa ley de Boyle-Mariotte: a temperatura constante, el volumen de una masa de gas es inversamente proporcional a su presión.

A Boyle no le convencía la visión de los elementos de Aristóteles, por lo que —sin hacer mención específica a los átomos— planteó la idea de que toda la materia estaba compuesta por partículas diminutas idénticas y, al combinarse en diferentes formas, estas unidades crearían los distintos elementos. Además, desarrolló una teoría de compuestos, según la cual habría sustancias que surgían al combinar distintos elementos. El hecho de que esta propuesta contemplara que las partículas que forman todo fueran idénticas entre ellas no es casual. Boyle era alquimista y con esta visión se mantenía abierta la puerta a la transmutación de los elementos.



BOYLE

Pero tendrían que pasar casi 100 años para que llegara alguien aún más trascendente para nuestra historia, el fundador de la química moderna que sentó las bases para el futuro aporte de Dalton: Antoine Lavoisier. Este hombre

venía de una familia francesa adinerada y desde pequeño tuvo siempre la mejor educación, aunque a los 5 años sufrió la desgracia de perder a su madre.

Lavoisier estudió derecho, por presión de su padre, pero su verdadera pasión estaba en la ciencia. A los 25 años ya era miembro de la Real Academia de Ciencias de París y se podía dedicar con gran pasión a su verdadero interés —sin preocuparse mucho por el dinero—, gracias a una útil (aunque a la postre fatídica) inversión del legado de su madre: usó su herencia para comprar parte de la empresa Ferme Générale, dedicada a recaudar los impuestos en Francia. Con esto se hizo con una fuente de ingresos segura, aunque sobra decir que no era el negocio más popular entre sus compatriotas.



LAVOISIER/PALUZE

El vínculo con la empresa le dejó un beneficio extraordinario, en lo personal y también para su trabajo científico. Jacques Villedieu, un socio de la misma firma, tenía una hija de 14 años (Marie-Anne Pierrette Paulze) a la que le pidió en matrimonio el conde de Amerval (de 42 años). A pesar del prestigio del conde, a Jacques no le gustaba la idea de entregarle su pequeña a ese «viejo»; pero sería una gran ofensa dar una negativa sin motivo a un gran aristócrata.

En un momento de inspiración, el angustiado padre pensó hablar con Lavoisier, un hombre educado, de buena familia y mucho más joven (en ese momento tenía 28 años). Si argumentaba que su hija ya estaba comprometida, no habría ningún agravio para el conde.

Marie-Anne era una joven bella e inteligente, por lo que Antoine no dudó en aceptarla y se casaron el 16 de diciembre de 1771. Las cosas fueron a pedir de boca desde el inicio: con la dote de su boda instaló un laboratorio en el que su mujer, de forma entusiasta, le ayudaba en su empresa científica. Y vaya que fue valiosa para su avance: no era una asistente cualquiera, sino que realizó tareas esenciales para el trabajo de su marido.

Ella dominaba el inglés y el latín, idiomas esenciales para estar al día en los avances científicos y que él no manejaba. Le ayudó a mantener correspondencia con notables químicos de la época e, incluso, sirvió de intérprete en sus encuentros personales. Además, era una hábil dibujante que se encargó de ilustrar los arreglos experimentales usados en sus investigaciones. Más que una ayudante para Lavoisier, Marie-Anne fue esencial para dar a conocer su trabajo¹.

Aunque la historia no siempre lo aclara así, Antoine y Marie-Anne (como pareja) son los padres de la química moderna. Su trabajo se destacó por el énfasis en mediciones cuantitativas muy precisas que condujeron al que quizá sea el principal fundamento de la química: la ley de conservación de la materia. En todo proceso químico, la misma cantidad de materia existe antes y después de la reacción. Los compuestos iniciales pueden cambiar, incluso estar en estados de agregación diferentes (al desprender gases o condensarse estos), pero la masa total será la misma.

1 Toda una influencer visionaria, siempre se dibujaba a sí misma realizando el registro de ese trabajo asegurándose así de pasar a la posteridad.

Y tuvo otro aporte de gran impacto, aunque quizá menos fundamental, que sacudió la química de la época. A inicios del siglo XVIII, George Stahl propuso que todas las sustancias combustibles contenían un componente esencial para el fuego: el flogisto. Al quemarse, los objetos perderían flogisto hacia el aire y esto explicaría la disminución de masa después de una combustión. La visión fue aceptada ampliamente por los químicos de la época, pero no sería un concepto vigente por mucho tiempo.

Antoine realizó experimentos con fósforo y azufre, en los que encontró que ganaban masa al reaccionar con el aire y generó un conflicto con las ideas de Stahl: creó la necesidad de una propuesta diferente para reemplazar al flogisto. Paralelamente, en Inglaterra, Joseph Priestley calentó óxido de mercurio y produjo un gas que hacía que el fuego de una vela ardiera con más vigor. Su explicación fue que se trataba de un «aire puro» que mejoraba la respiración porque estaba libre de flogisto. Estas ideas las compartió directamente en una cena en casa de los Lavoisier en 1774.

Los franceses repitieron los experimentos y llegaron a la conclusión de que el aire tendría dos componentes: uno que se puede combinar con los metales y hace posible la respiración y otro que sería un asfixiante ajeno a estos procesos (hoy lo conocemos como nitrógeno, el cual conforma el 78% del aire).

Al continuar sus estudios sobre procesos de combustión, Lavoisier bautizó el primer componente del aire con el nombre de oxígeno y lo identificó como un elemento químico clave. A partir de ahí (1783) se lanzó a una cruzada contra las propuestas previas para explicar qué ocurre cuando se queman las cosas, como hizo con el flogisto, en aras de llevar a la química a una forma de pensamiento más estricta. Su trabajo también lo llevó a identificar la composición del agua, mostrando que estaba hecha de oxígeno y lo que entonces se conocía como aire inflamable (hidrógeno).

En colaboración con otros científicos, Antoine retomó el concepto de elemento de Boyle, manteniendo el nombre de varias sustancias ya descubiertas e identificando otras más. Su trabajo derrumbó por completo la idea aristotélica de los cuatro elementos, de hecho, logró que se reconocieran 33 sustancias simples distintas. En cuanto a los compuestos, propuso que sus nombres reflejaran su composición química.

Lavoisier además ordenó los elementos en 4 grupos: gases, metales, no metales (o tierras raras) y lo que él denominó «fluidos imponderables», como la luz y la energía procedente del calor. Esta clasificación fue mejorada por Döbereiner, que los ordenó en tríos de elementos con propiedades similares (por ejemplo, carbono-nitrógeno-oxígeno) y con una característica diferencial: el peso atómico del segundo elemento era la media de la suma de los pesos atómicos del primer y del tercer elemento. Se comenzaron a cimentar las bases para lo que sería la tabla periódica.

En 1789, justo cuando estallaba la Revolución francesa, Antoine publicó su libro *Tratado elemental de química* en el que apareció la ley de conservación de la materia, donde definió los elementos como sustancias simples que no pueden ser divididas por medios químicos conocidos y dio a conocer la tabla de sustancias simples, primera lista de elementos conocidos.

Parecía que el trabajo de Antoine y Marie-Anne daría para mucho más, pero, tras la Revolución francesa, llegó el Terror: sangriento periodo en el que se eliminaron a muchas personas que se consideraban contrarrevolucionarias. Tristemente, por su participación en la empresa de recaudación de impuestos, Lavoisier fue sentenciado a muerte por el delito de «conspiración contra el pueblo de Francia» y murió en la guillotina el 8 de mayo de 1794. Un día después, Joseph Louis Lagrange lamentó: «Les tomó solo un instante cortar esa cabeza y 100 años quizá no sean suficientes para producir otra igual».

DALTON Y LOS ÁTOMOS MODERNOS

Dicen que más vale llegar a tiempo que ser invitado. Y quizá esto nunca estaría mejor dicho que con John Dalton, un profesor de 32 años de origen rural con escasa educación formal y que, por azares del destino, se encontraba dando clases en Mánchester en el momento justo. Así fue como escuchó a nuestro primer protagonista, Thomas Garnett, en 1796, en una conferencia que le cambió la vida. Para un apasionado del conocimiento de la naturaleza, no era para menos: le mostraron un campo vibrante, que acababa de nacer, con un universo de posibilidades para trabajar, descubrir y, por qué no, ganar dinero.

A diferencia de personajes como Boyle y Lavoisier, herederos de familias opulentas, los orígenes de Dalton eran mucho más humildes, provenía de una familia campesina de Eaglesfield (al noroeste de Inglaterra) y siempre debió ganarse la vida con arduo trabajo en la enseñanza e investigación. Las maravillas de la química le dieron una excelente oportunidad para posicionarse mejor en su universidad y contar con otras opciones para avanzar en el escalafón científico.



Su lugar en el mundo académico no había sido fácil de lograr. De no ser porque su familia era parte de la Sociedad Religiosa de los Amigos (mejor conocidos como cuáqueros), John probablemente no habría recibido ninguna instrucción formal en su infancia. En aquella época, apenas uno de cada 200 ingleses sabía leer. Pero tuvo la fortuna de prepararse en la escuela local de su grupo religioso, en la que el maestro John Fletcher fomentó su gusto por aprender y un gran amor por las matemáticas. Sin embargo, el gusto no duró mucho porque, cuando nuestro protagonista tenía apenas 12 años, su maestro debió partir y el pueblo se quedó durante un tiempo sin nadie que enseñara.

Fue el mismo Dalton quien, poco después, se decidió a abrir otra escuela en Eaglesfield, iniciando así lo que sería su pasión de toda la vida por la enseñanza, el aprendizaje independiente y la posibilidad de ganarse la vida de esta manera. Recibía algo de paga de sus estudiantes, que resultó fundamental para apoyar a su familia en momentos de necesidad.

Tiempo después conoció a Elihu Robinson, un acaudalado cuáquero de su mismo pueblo que tenía una sólida formación en ciencia e, incluso, mantenía correspondencia con científicos de la talla de Benjamin Franklin. Robinson tomó a John bajo su tutela y lo motivó a seguir su profundo deseo de conocimiento, algo que nunca dejaría de hacer en toda su vida.

Dalton se mantuvo activo dando clases en lugares cercanos (que apenas le permitían sostener sus gastos) y, tras conocer a John Gough, se vio motivado a realizar meticulosas investigaciones meteorológicas: tomando datos precisos de humedad, presión, viento y temperatura, que a inicios de la década en 1793 resultaron en el libro *Observaciones y ensayos meteorológicos*.

Justo ese año le llegó su gran oportunidad, el New College de Mánchester buscaba un profesor de matemáticas y filosofía natural. Un directivo de la escuela le pidió a Gough que recomendara a alguien y propuso a John Dalton, quien no

dudó en aceptar la oferta en cuanto la recibió. Una vez que llegó a Mánchester, se sintió como pez en el agua, social, profesional y personalmente.

Aunque en algunos momentos de su vida Dalton llegó a tener inclinaciones románticas, pronto se dio cuenta de que su pasión por la ciencia y la enseñanza no le dejarían tiempo para dedicarse a una familia (o quizá que las obligaciones de una familia se pondrían en medio de su avance académico). Fue así que se dedicó en cuerpo y alma al conocimiento de la naturaleza, siendo su estudio sobre el daltonismo una de las primeras cosas que le dio fama.

Así estaban las cosas con John cuando asistió a las conferencias de Garnett que le dieron un vuelco a su vida científica. Pronto se puso al día en las ideas de Lavoisier sobre los elementos químicos e incluyó la química entre las materias que debían enseñarse en el New College. Aunque por problemas económicos de la escuela poco después tuvo que dejar esa institución, su trabajo no cesó aun cuando para mantenerse debía dedicar mucho tiempo impartir clases particulares.

En 1799, Dalton descubrió el trabajo en el que el francés Joseph Louis Proust estableció que todos los compuestos tienen proporciones bien definidas de los elementos que los conforman. Cada una de las sustancias que estudió tenía la misma relación de los elementos que la formaban, si se trataba de agregar una mayor cantidad de uno de ellos, simplemente, quedaba como residuo.

John partió del trabajo de Lavoisier y Proust y de sus propios experimentos —con monóxido y dióxido de carbono— para formular una teoría en que revivió las ideas de Demócrito: los átomos, partículas indivisibles, serían las unidades fundamentales de los elementos químicos y, al combinarse, formarían los diferentes compuestos (cuyas unidades más pequeñas son las moléculas). Cada elemento —como el hidrógeno, el carbono o el oxígeno— tendría átomos dife-

rentes en función de su peso distintivo. En ese momento no había forma de identificar el peso de los átomos individuales, por ser demasiado pequeños, pero se sabía que el hidrógeno era el elemento más ligero y a este, Dalton le asignó un peso de uno. A partir de ahí estableció los pesos de otros elementos y compuestos en función de su relación con el hidrógeno.

A la muerte de Garnett, y sin que este tuviera idea de los sucesos que había desencadenado, John se encontraba en proceso de consolidar un modelo que hasta la fecha es referente para nuestra idea de la estructura de la materia. Sus resultados se publicaron un año después, el 21 de octubre de 1803, con una lista de pesos atómicos para 21 elementos y compuestos. Para su época, si bien había mucha más información del comportamiento de los elementos químicos al combinarse para formar compuestos, la nueva propuesta atómica no dejaba de guardar semejanzas con la de Demócrito: fueron ideas que «tanteaban» a ciegas en un reino que aún era muy pequeño para explorarse experimentalmente, pero señalaron el camino correcto para lograr una comprensión mucho más profunda de la química.

Al dar seguimiento a la nueva propuesta, el físico italiano Amadeo Avogadro estableció una relación directa entre las diminutas partículas y las propiedades de la materia a escala mayor: indicó que el volumen de un gas, para condiciones específicas de temperatura y presión, es proporcional al número de átomos o moléculas que lo conforman. Más adelante, esta idea llevaría al concepto de mol, la unidad de una sustancia que contiene un número específico de partículas (átomos o moléculas) igual al de 12 gramos de carbono-12 o 1 gramo de hidrógeno. Al igual que el trabajo de Dalton, se trató de una propuesta en la dirección correcta, pero nadie tenía idea de cuál era la cantidad de partículas: el famoso número de Avogadro.

El modelo empezó a tomar forma y resultó muy interesante para los científicos de la época, sin embargo, tenía tres

grandes problemas: no había evidencia explícita de la existencia de los átomos de Dalton, tampoco se ofrecía una idea del tamaño que podrían tener tales partículas ni de cómo calcular el número de Avogadro. Los investigadores estaban atados de pies y manos para probar su validez. Así, todavía a finales del siglo XIX, la existencia de los átomos y las moléculas no era un hecho científicamente reconocido, se les consideraba objetos hipotéticos —útiles para el trabajo estadístico de la termodinámica realizado por James Maxwell y Ludwig Boltzmann—, pero no había pruebas que los respaldaran.

Además, poco a poco, se demostró que la propuesta no era perfecta. Por ejemplo, algunos de los pesos planteados por Dalton no concordaban con los resultados que se obtuvieron posteriormente para diferentes elementos. Hacía falta una nueva forma de comprender las bases de la química.



MENDELEIEV

Las ideas sembradas en el siglo XVIII por Lavoisier y Döbereiner, poco a poco, llevaron a un clamor para darle una mayor estructura analítica a esta área de la ciencia. Dicha estandarización se comenzó a elaborar en Karlsruhe, en 1860, en la Primera Conferencia Internacional de Química. Después de ese evento, el ruso Dmitri Mendeleiev se obsesionó con lograr la estandarización de la química. Así, después de muchos planteamientos, escribió en diferentes tar-

jetas las propiedades fundamentales de los 65 elementos químicos conocidos hasta ese momento. Entonces, tuvo su epifanía: encontró que las propiedades de algunos elementos se repetían cuando el peso atómico aumentaba en ciertas cantidades.

Según cuentan las crónicas de la época, en 1869, por serendipia, acabó de visualizar la solución en un sueño. Al despertarse, Mendeleiev dijo: «Acabo de ver en esta tabla que todos los elementos encajan perfectamente». De forma apresurada, casi demente, comenzó a escribirla en un trozo de papel.

En poco más de dos semanas, Dmitri publicó sus hallazgos sobre el comportamiento cíclico de las características de los elementos y una de las creaciones más grandes en la historia de la ciencia: la tabla periódica, con la relación directa entre los pesos atómicos de los elementos y sus propiedades químicas. Científicos contemporáneos a Mendeleiev tuvieron ideas similares, pero él fue el primero en publicar su estructura, con el impresionante añadido de predecir la existencia de elementos químicos que todavía no se conocían, basándose en los huecos en la tabla, incluyendo las propiedades que los acompañarían. Algunos fueron descubiertos muchas décadas después con las condiciones esperadas por Mendeleiev. Simplemente, genial.

La esencia de la visión atomista de Dalton resultaba compatible con el trabajo de Mendeleiev, lo cual se consolidó como un auténtico paradigma para entender la estructura de la materia, tanto que logró sobrevivir a una nueva sacudida. El impacto llegó en 1897 de la mano de Joseph John Thomson. Con sus estudios de la naturaleza de los rayos catódicos descubrió la existencia de los electrones, partículas muy ligeras con carga eléctrica negativa que forman parte del átomo.

El descubrimiento de Thomson demostró una cosa fundamental: los átomos no son indivisibles, tienen una estruc-

tura interna con cargas eléctricas positivas y negativas. Pero era demasiado tarde para cambiarles el nombre, el concepto de átomo como unidad básica de los elementos químicos ya estaba demasiado arraigado en la comunidad científica. A pesar de no ser indivisibles, el nombre perduró, y vaya que llegaría a ser un término usado de forma frecuente con la llegada de la era atómica en el siglo XX.

2

Un nuevo mundo: de moléculas y física cuántica

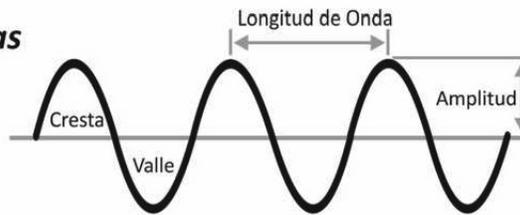
Alguna vez habrás observado cómo el azúcar se mezcla en una taza de café. Los granos se sumergen en el líquido caliente y poco a poco van desapareciendo. La sustancia sigue ahí, lo podemos verificar al probar la bebida y notar su dulzura, pero lentamente se está disolviendo; es decir, a nivel molecular el azúcar (sacarosa en realidad) se mezcla con el agua caliente del café.

Las moléculas son la unidad mínima de una sustancia compuesta que conserva sus propiedades y están formadas por átomos de diferentes elementos químicos. El azúcar se disuelve porque las moléculas de agua atraen las de sacarosa, logrando desprenderlas de los granos hasta mezclarlas por completo con el líquido. Aquí cabe preguntarnos cuál es el menor tamaño posible de una partícula de sacarosa en el agua: ¿cuánto mide su molécula? Esta pregunta, aparentemente inocente, la hizo uno de los científicos más grandes de la historia.

Hasta 1905 nadie podía decirlo a ciencia cierta. De hecho, reconocidos científicos como Mach y Ostwald consideraban

que moléculas y átomos eran mitos geniales, servían para cuadrar las ideas básicas de la química, pero no había pruebas contundentes sobre su existencia. Por otro lado, había una importante corriente de investigadores que no solo creía en la existencia de las moléculas, sino que además defendían que eran básicas para explicar el comportamiento de gases y líquidos: la energía de las moléculas al moverse y chocar unas con otras estaría asociada a magnitudes macroscópicas que se pueden medir, como temperatura, presión y volumen. Sin embargo, sin evidencia del tamaño de las moléculas, o de la cantidad de ellas en cierto número de gramos de una sustancia (el número de Avogadro), sería muy difícil probar que eran reales.

Características de las Ondas



Ciclo: Es una oscilación completa, con una cresta y un valle.

Frecuencia: número de ciclos completos por unidad de tiempo.

Y es que en ese momento las moléculas eran invisibles o, dicho de otra manera, estaban mucho más allá de la capacidad humana para detectarlas de forma experimental. Hacía mucho tiempo que se habían desarrollado los microscopios ópticos que usaban lentes para ampliar la imagen de objetos muy pequeños —claves, por ejemplo, para descubrir las células y su estructura interna—, pero su capacidad no era suficiente para ver moléculas.

El detalle es que los microscopios tienen un factor limitante esencial que surge de la naturaleza de la luz. Desde inicios del siglo XIX, se sabe que la luz es una onda transversal,

una perturbación con una trayectoria de «sube y baja», que forma valles y crestas. La longitud de onda es la medida de un ciclo completo, la distancia entre una cresta y otra o entre un valle y otro, y define la resolución mínima de una imagen que se puede formar con luz.

Ernst Abbe, en 1870, explicó que la luz solo permite observar cosas que midan más de 200 nanómetros², que sería aproximadamente la mitad de la longitud de onda visible más pequeña (lo que corresponde al violeta). Así como un lápiz no puede dibujar cosas más pequeñas que su punta, la longitud de onda define el tamaño menor de las imágenes que se pueden formar con luz. Ya para esa época estaba claro que, en caso de existir, las moléculas serían mucho más pequeñas que la mitad de la longitud de onda del violeta; por lo tanto, sería imposible verlas³.

AÑO MILAGROSO

Así estaban las cosas cuando, en medio de uno de los periodos más complicados de su vida, la inspiración llegó a un joven genio desesperado. Era 1905 y hacía algunos años que Albert Einstein había concluido sus estudios en el Instituto Tecnológico de Zúrich, pero no conseguía trabajo en ninguna universidad⁴ —a duras penas, mal vivía gracias a un amigo que le ayudó a ser empleado de la oficina de paten-

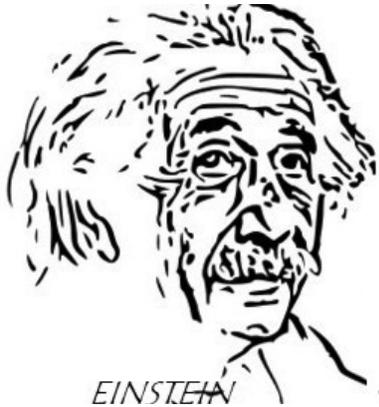
2 Un metro consta de mil millones de nanómetros, o sea que 200 nm son 0,0000002 metros.

3 En un sentido óptico, que implica que se use luz para detectarlas, pero más adelante habrían de desarrollarse otros métodos para verificar su existencia.

4 Claro que en gran medida se lo ganó a pulso. Aprovechó a fondo la libertad educativa del sistema suizo, entraba poco a clase y no mostraba mucho respeto por sus profesores; aunque siempre fue un ávido lector de los trabajos científicos más importantes de su época. El detalle fue que, aunque logró graduarse, sus maestros no tenían de él un concepto muy

tes en Berna, Suiza—. Además, diferentes propuestas de tema para su tesis doctoral habían sido rechazadas por sus supervisores. Por si eso fuera poco, estaba muy presionado por sacar adelante a su hijo Hans Albert y a su esposa Mileva.

Afortunadamente (para todos), la situación nunca mermó su pasión por la ciencia; así se seguía reuniendo regularmente con amigos para discutir de sus intereses y avances científicos, con una pasión seductora. Precisamente fue en una tarde de café, al discutir con Michele Besso (excompañero de la universidad y también empleado de la oficina de patentes), que se le ocurrió que en su tesis podría determinar el diámetro de la molécula de azúcar.



La idea resultó fructífera, fue aceptada y, a la postre, permitió que Einstein obtuviera su anhelado grado de doctor; aunque en gran medida ha pasado desapercibida para la mayoría de las personas fuera de la comunidad científica. Y no fue debido a que algunos científicos envidiosos trataran de impedir que luciera su trabajo, aunque en la época le

alto, al grado que fue el único de su generación que no tuvo una plaza como profesor asistente en el Instituto Tecnológico de Zúrich.

sobraron escépticos a su propuesta, sino por el brillo de los otros aportes revolucionarios que él mismo publicó en esa época. Y es que 1905 es considerado como el «año milagroso» de la física, precisamente por los artículos extraordinarios que Einstein desarrolló cuando tenía únicamente 26 años. A la par de su tesis, el alemán abordó y resolvió algunos de los más grandes problemas científicos de su época en una serie de trabajos que sacudieron la física de forma irreversible:

a) **TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.** Quizá se trate del aporte más revolucionario, polémico y famoso de entre los cinco artículos de ese año. Einstein estableció que la velocidad de la luz (299.792 km/s en el vacío) es la única cosa absoluta en la naturaleza y todo lo demás es relativo. La teoría vino a transformar por completo nuestra concepción de tiempo, espacio, masa y energía, ya que todas estas magnitudes se ven afectadas cuando un objeto logra velocidades cercanas a la de la luz. Esto abrió un universo de posibilidades en muchos sentidos, pero el tema es tan rico (y con poco vínculo para nuestra historia) que debemos dejarlo para mejor ocasión.

b) **EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA.** Einstein se preguntó si la inercia de un cuerpo (relacionada con su cantidad de materia) depende de la energía con la que cuenta. Aquí apareció por primera vez la ecuación más famosa de la historia, $E = mc^2$, que nos brinda dos ideas clave:

1. Cuanta más energía tiene un cuerpo, mayor será su masa. Por lo tanto, resulta muy complicado alcanzar la velocidad de la luz, ya que cuanto más rápido se mueve un objeto, este tendrá más masa y será más difícil seguir acelerándolo.
2. En virtud de que la velocidad de la luz es tan grande, basta una pequeña cantidad de materia para liberar muchísima energía (como ocurre en los procesos nucleares).

c) **EL DIÁMETRO DE LAS MOLÉCULAS.** Como ya dijimos, la inspiración de una tarde de café se combinó con la desesperación por sacar su tesis y Albert decidió obtener su doctorado a través de este aporte de gran valor. Después de todo, entre sus trabajos de 1905, se trata de su publicación más citada por los científicos. Para este trabajo, Einstein tuvo la astucia de abordar el problema desde varias perspectivas: primero, comparó los coeficientes de viscosidad de un líquido (agua) con partículas suspendidas (azúcar) y sin ellas; además, usó la ley de Stokes para la movilidad de una partícula y aprovechó las leyes de Van't Hoff de las soluciones diluidas y presión osmótica, para conformar un arsenal para calcular la dimensión de las moléculas que se disolvieron en agua. El principal resultado fue que el tamaño de la molécula de azúcar (sacarosa) debía estar alrededor de la mil millonésima parte de un metro (1×10^{-9} m), es decir, un nanómetro.

d) **MOVIMIENTO BROWNIANO.** El estudio de las moléculas no terminó al establecer su tamaño, nuestro protagonista se dio el lujo de atar otro cabo suelto de la física del siglo XIX. En 1827, Robert Brown, biólogo y botánico escocés, observó un fenómeno inexplicable para su época: granos de polen suspendidos en agua se movían de manera errática en el líquido sin que hubiera forma de explicar tal comportamiento en una partícula microscópica inerte.

El problema permaneció sin solución durante 78 años, hasta que el «enrachado» Albert decidió continuar con su trabajo molecular. Su trabajo señaló que este movimiento, aparentemente aleatorio, era resultado de recibir un gigantesco número de choques por parte de las moléculas de agua: concretamente 10^{14} , o lo que es lo mismo, 100 billones de golpes por segundo. Como las partículas de agua son unas 1.000 veces más pequeñas que las de polen, el impacto de una sola no es significativo; pero, al haber tantas moléculas, el movimiento resulta del efecto colectivo. Y como la distribución de las moléculas, y sus choques, no es totalmente

pareja, el polen se mueve en la dirección donde hay menos impactos (la presión ahí es más baja).

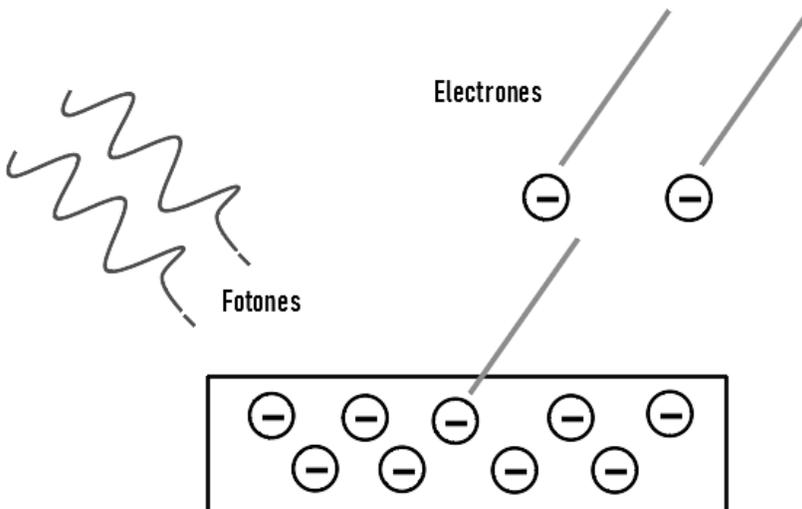
Todo el aporte molecular de Einstein era maravilloso en la teoría, pero aún se debía verificar. En los siguientes años, Perrin, un físico francés, desarrolló una serie de experimentos que se apoyaron en las predicciones del alemán y terminaron por verificarlas. Comprobó que las moléculas existen, estableció que su tamaño estaba en el rango de los nanómetros y obtuvo una primera aproximación del número de Avogadro con un valor de $7,15 \times 10^{23}$ (ligeramente mayor que el aceptado actualmente de $6,022 \times 10^{23}$). Con estos aportes se brindó el soporte que le faltaba a la visión atomista-molecular de la estructura de la materia (¡Dalton y Avogadro tenían razón!) e hicieron a Perrin merecedor del Premio Nobel de Física en 1926.

e) EFECTO FOTOELÉCTRICO. En 1887, Heinrich Hertz, la misma persona que construyó el primer aparato para emitir y captar ondas de radio, descubrió de forma accidental un fenómeno extraordinario: cuando llegaban rayos ultravioletas a dos electrodos con una diferencia de potencial, se alteraba el voltaje de la descarga entre ellos. En ese momento, era ampliamente aceptado que la luz estaba hecha de ondas⁵ y aún no se habían descubierto los electrones como partículas que forman parte de los átomos, por lo que nadie podía explicar semejante comportamiento.

Tal como le ocurriera a John Dalton un siglo antes, Einstein llegó a trabajar en el problema correcto en el momento adecuado gracias a dos grandes aportes de la época. En 1897, Thomson descubrió el electrón y poco después quedó claro que se trataba de la unidad básica de la

5 De hecho, se sabía que la luz visible era parte de una familia de ondas electromagnéticas que incluía las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo, el ultravioleta y, poco después se sumarían a ellas, los rayos X y los rayos gamma.

electricidad. En 1900, como parte de su trabajo de la radiación del cuerpo negro, Max Planck hizo pedazos la energía: demostró que, en los procesos en que se emite y absorbe radiación, el intercambio de energía no puede ser arbitrariamente pequeño: tiene ciertas denominaciones básicas indivisibles⁶. Planck denominó «cuantos» a esas unidades, ya que se podía saber su cantidad de energía al multiplicar su frecuencia (el número de ciclos que completa en un segundo) por la famosa constante de Planck, con la ecuación $E = hf$.



6 ¡Son átomos de energía! Pero el nombre ya estaba ocupado, así que hubo que bautizarlos de otra manera. En esencia, los cuantos se portan como el dinero: yo no puedo partir un billete de 20 \$ por la mitad para pagar 10 \$, para eso existen otras denominaciones. De igual forma, el cuanto de una onda con una frecuencia alta por sí mismo no puede dividirse en unidades más pequeñas; tendría que haber interacciones de absorción y emisión de energía con algún átomo para lograr que su energía se divida en cuantos asociados a una frecuencia menor.

El valor de la constante ($h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, o 0,000000000000000000000000000066) es tan pequeño que al principio no parecía haber grandes novedades a partir de este aporte. Pero Einstein supo sacarle provecho para explicar el efecto fotoeléctrico y, a la vez, sentar las bases para lo que sería conocido como la física cuántica. Planteó que, si bien la luz es una onda, los paquetes de energía asociados a los cuantos se comportan como partículas. Así, cuando los rayos ultravioletas chocaban con el metal, en los experimentos de Hertz les daban energía para escapar de sus átomos y afectar el voltaje en los electrodos. Este fenómeno es la base para el funcionamiento de las celdas solares, es decir, la transformación de la luz (fotones) en corriente eléctrica (electrones en movimiento). Actualmente, se perfilan como una de nuestras grandes esperanzas energéticas del futuro y es que el Sol es una fuente de energía inagotable. Las eficiencias de las celdas actuales (porcentaje de electricidad que generan en función de la luz que llega) apenas llega al 20 % (en laboratorio supera el 60 %), pero esta tecnología está en continuo e imparable proceso de mejora.

Mucha gente cree que Einstein recibió el Nobel por la teoría de la relatividad, probablemente su aporte más famoso, pero en realidad fue el efecto fotoeléctrico el que le permitió ganar el premio. En cualquier caso, después de años de batallar para sobrevivir —con cierta fama de ser un físico arrogante, pero sin mucho que aportar—, Albert estaba a punto de convertirse en el científico más celebrado de la historia.

BUENA ONDA

A pesar del asombroso trabajo de Einstein en 1905 (quizá únicamente comparable a lo que Newton hizo en 1666), el reconocimiento no llegó de inmediato. Parte de la esencia de la investigación científica se encuentra en el escepticismo,

no creer las cosas a la primera, sino hacer lo posible por desmentirlas para estar seguros de que son válidas. Y muchos científicos se entregaron en cuerpo y alma a derrumbar las radicales ideas de Albert. Sin mucho éxito, por cierto.

Quizá el caso más notable de debate y esfuerzo por echar por tierra sus resultados tuvo que ver con el efecto fotoeléctrico. La idea de que la luz se comportaba como una onda estaba profundamente arraigada entre los físicos, después de un fantástico experimento de interferencia que Thomas Young realizó en 1801. Y quizá el concepto de dualidad onda/partícula era aún muy radical para que lo aceptaran la mayoría de los científicos. Después de todo, lo que se demostró es que la luz se podía comportar como una onda, pero nada indicaba que no pudiera ser una partícula.

Aun así, había dos frentes importantes que trataban de desmentir la solución de Einstein para el efecto fotoeléctrico: uno teórico (liderado por nada más y nada menos que el gran físico danés Niels Bohr) y otro experimental (con Robert Millikan a la cabeza). Años de debates y experimentos condujeron a la misma conclusión, no había error en la idea de que las ondas electromagnéticas están compuestas por paquetes de energía (partículas), que serían llamados «fotones» por Gilbert Newton Lewis en 1926. Curiosamente, el trabajo empírico de Millikan fue tan meticuloso que acabó por convertirse en el principal aporte para corroborar los resultados de Einstein; podría pensarse que le salió el tiro por la culata, demostró lo opuesto a lo que quería, pero su labor le valió el Premio Nobel en 1923 (no creemos que tuviera queja alguna por no tener razón).

Tal como ocurrió con el efecto fotoeléctrico, uno a uno los otros aportes del físico alemán fueron validados, hasta el punto de que en la segunda década del siglo XX ya era toda una celebridad. Un auténtico *rockstar* en todos los sentidos, incluso antes de ganar el Nobel (en 1921), las ofertas de trabajo que previamente lo eludían ahora le sobraban, los

auditorios se abarrotaban para escuchar sus conferencias y hasta podía presumir —como ningún científico antes— de que su fama le trajo gran éxito como seductor⁷.

Quizá lo más valioso para Einstein fue que, para la década de 1920, nada importante pasaba en el mundo de la física sin que él se enterara. Literalmente, estaba en la cresta de la ola en un momento revolucionario. Y efectivamente, en aquel momento se apilaron toda una serie de avances disruptivos.

En 1911, Ernest Rutherford descubrió que los átomos tienen un pequeño núcleo donde se concentra la carga positiva (más adelante se sabría que está formado por dos partículas diferentes: protones y neutrones). Un par de años después, Niels Bohr planteó un modelo atómico en el que los electrones no pueden acomodarse «donde les dé la gana», sino que están distribuidos en niveles asociados a la constante de Planck; cuanta menos energía tenga una partícula, más cerca se ubicará del núcleo y conforme aumenta esta magnitud, los electrones se ubicarán en capas exteriores situadas en lugares bien definidos (los orbitales). Al recibir energía, mediante un choque o por radiación, un electrón salta a un nivel exterior; pero el nuevo estado no es estable y se emite un fotón para liberar la energía extra y regresar a la capa original.

La nueva visión de la estructura subatómica de la materia resultó efectiva para explicar diferentes fenómenos, por ejemplo, por qué los materiales emiten luz al calentarse. Sin embargo, carecía de una teoría física fundamental, más bien era un modelo hecho a base de parches. Hacía falta un aporte sólido para explicar el comportamiento de los elec-

7 Las continuas infidelidades de Albert generaron gran tensión con Mileva, su primera esposa, que eventualmente llevó al físico a pedir el divorcio en 1916. El proceso se alargó hasta 1919 y no se concretó hasta que el científico se comprometió a, en caso de ganar el Nobel, entregar a ella una parte del premio económico.

tronos, los físicos sabían que quien lo lograra se cubriría de gloria, había una carrera frenética por crear esta teoría.

Así estaban las cosas cuando, en 1924, Einstein recibió una carta del notable físico francés Paul Langevin⁸. Uno de sus estudiantes acababa de presentar una propuesta extraordinaria como trabajo de tesis para obtener su doctorado, pero Langevin no sabía si era una genialidad o una toma-dura de pelo, por lo que acudió al célebre físico para pedir su consejo. Y no era para menos, su pupilo acababa de darle un vuelco a las ideas de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico. Según el alumno, si la luz —que todo mundo consideraba una onda— puede portarse como una partícula, entonces sería posible que cualquier partícula material (o de forma específica, un electrón) pudiera ser una onda. ¿Qué locura era esta?



8 Quien, en 1910, cuando Marie Curie ya llevaba viuda algunos años, vivió un tórrido romance con la mujer más famosa en la historia de la ciencia. Aunque esa es harina de otro costal.

UN NOBEL PARA UN «DESPEJE»

Entró en escena un joven aristócrata francés, Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie, y de qué manera. Desde muy joven, Louis mostró grandes aptitudes académicas, pero irónicamente tuvo problemas para encontrar su vocación: empezó por estudiar historia, luego, cambió a filosofía y, finalmente, a derecho, todo sin éxito. Afortunadamente, en la familia le ayudaron con un fantástico viaje de inspiración.

Su hermano mayor Maurice, un prestigioso físico experimental, fue el secretario técnico en la Primera Conferencia Solvay⁹ y llevó a su hermanito (de 19 años) como acompañante. Al evento, que se realizó en Bruselas en 1911, acudieron científicos de la talla de Marie Curie, Henri Poincaré, Paul Langevin, Ernest Rutherford y, por supuesto, Albert Einstein. Tras codearse con estas y otras personalidades, el joven Louis regresó a París convencido de que quería ser físico teórico.

Estudió en la Universidad de París, bajo la supervisión de Poincaré y Langevin, perfilándose para una brillante carrera científica. Tuvo que posponerla durante algunos años al ser llamado por el ejército en la Primera Guerra Mundial; aunque transitó por el conflicto sin mucho problema, ya que los privilegios de su familia le ayudaron a cumplir su servicio en la estación telegráfica de la Torre Eiffel.

Una vez concluida la guerra, retomó las cosas donde las había dejado. Estaba impresionado por los estudios de Einstein y mostraba un gran interés en el campo emergente de la física cuántica, sobre todo en los estudios Max Planck. Fue así que desarrolló una tesis doctoral que pasó a la historia al darle una vuelta genial a la dualidad onda-corpúsculo,

9 El mayor evento de la física a nivel mundial, que se realizó en Bruselas bajo el patrocinio del químico e industrial Ernest Solvay.

con una perspectiva novedosa para la teoría del electrón en el átomo.

Louis de Broglie combinó la ecuación del efecto fotoeléctrico con la de la equivalencia entre masa y energía, para obtener una expresión en la que se puede calcular la longitud de onda de cualquier objeto en movimiento si dividimos la constante de Planck entre su momento¹⁰ ($\lambda = h/p$). Matemáticamente, el proceso fue hermoso en su simpleza, cualquier estudiante de secundaria podría hacerlo actualmente, pero la clave estuvo en las implicaciones físicas de la idea. A veces, el mérito no radica tanto en el trabajo, sino en saber ver lo que nadie más ha podido encontrar.

Para la mayoría de los objetos materiales, el cálculo de la longitud de onda de Broglie resultaba en esencia inapreciable. Como ya dijimos, la constante de Planck es un número muy muy pequeño y si además la dividimos entre un número grande, como, por ejemplo, el momento de una persona que pesa 75 kg y se desplaza a 8 km/h, obtenemos una longitud de onda minúscula del orden de 10^{-36} metros, algo imposible de medir. De hecho, actualmente no podemos detectar nada que mida menos de 10^{-20} m. En cambio, para los electrones de poca energía, partículas que además tienen una masa diminuta, la longitud de onda puede estar cerca de 1 nanómetro¹¹.

En 1924, el mismo año en el que Max Born acuñó el término de física cuántica, Louis publicó sus conclusiones donde defendió el comportamiento dual —como onda y como partícula— de los electrones. Su planteamiento fue tan sencillo como genial. Si la luz se podía comportar como onda y como

10 El momento es la cantidad de movimiento de un cuerpo y se calcula multiplicando su masa por su velocidad.

11 Lo cual, posteriormente, abrió la puerta para nuevos microscopios que usaron electrones en vez de luz, con el fin de crear imágenes de objetos mucho más pequeños.

partícula, ¿por qué no los electrones podían comportarse también como partícula y como onda? Cuando Einstein leyó el trabajo quedó cautivado, no solo dio su visto bueno para que Langevin avanzara con la tesis de su alumno, sino que elaboró un artículo en el cual refería y promovía el aporte de Louis de Broglie. Con esto, la fama del noble francés empezó a crecer como la espuma (fue como si una gran celebridad de la actualidad compartiera su aporte en redes sociales llegando a millones de *likes*).

De todos modos, parte de la comunidad científica se mantuvo escéptica hasta que no hubo una demostración experimental del comportamiento ondulatorio del electrón. Esta demostración llegó en 1927 gracias a Davisson y Germer, que verificaron la difracción de los electrones. Tan solo dos años después, en 1929, el joven De Broglie recibió el Nobel de Física, convirtiéndose en el «príncipe de la cuántica»¹². Pero esto solo era la punta del iceberg de lo que vendría para el mundo cuántico.

Para finalizar nuestra historia sobre De Broglie, debemos añadir que fue un gran comunicador de la ciencia, recibió el primer Premio Kalinga, en 1942, otorgado por la Unesco a los mejores divulgadores. Por si esto fuera poco, fue el gran impulsor de una mayor colaboración internacional para el progreso de la ciencia, lo que llevó al nacimiento del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), institución que actualmente está a cargo del Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés).

12 A diferencia de Einstein, que tuvo que esperar 16 años desde que publicó su trabajo para recibir el Nobel, Louis lo ganó solo 5 años después de realizar su aporte, a la edad de 37 años. Lamentablemente, su madre falleció un año antes y murió convencida de que su hijo no era alguien relevante en el mundo de la física.

PLEITO CUÁNTICO

Gracias al artículo que publicó Einstein sobre el trabajo de Louis de Broglie, la idea llegó a un profesor originario de Viena que trabajaba en la Universidad de Zúrich, Erwin Schrödinger. Schrödinger era un científico de medio pelo que, hasta entonces, había publicado trabajos sólidos, pero poco trascendentes. Lo que tenía muy claro es que no le gustaba nada el modelo atómico parchado que había desarrollado Bohr con algunos de sus colaboradores, odiaba los forzados niveles de energía y encontró en la visión del electrón como onda la oportunidad de aumentar su prestigio y deshacerse de esa idea.

Al inicio no realizó ningún trabajo de investigación al respecto, pero en su cátedra empezó a destacar las bondades de la nueva propuesta. Pronto un colega le hizo ver que si las ondas de electrones se iban a tomar en serio no bastaba con conocer la longitud de onda, se debería desarrollar una ecuación para describirlas; Schrödinger encontró ahí su epifanía, él iba a ser el científico que habría de crear esta fórmula. Pero la tarea resultó ser más complicada de lo que pensó, sus primeros intentos resultaron infructuosos.

Cansado y decepcionado, decidió tomarse un respiro romántico en los Alpes para relajarse. No se sabe a ciencia cierta quién fue la musa que lo acompañó en el viaje, solo tenemos claro que no fue su esposa. Desde joven, Erwin fue siempre un sensualista empedernido y con Anny (su esposa) encontró a la pareja perfecta para tener una relación abierta, la cual floreció sin problema en la moral relajada de Suiza. Los esposos gozaban de la libertad de buscar romances donde mejor les pareciera, hasta el punto de que Schrödinger llegó a colaborar con un matemático que en ese momento era amante de Anny.

En fin, sea como fuere, al regresar de los Alpes, Erwin ya contaba con la primera ecuación de onda para el elec-

trón. No logró incorporar en ella los efectos relativistas para tomar en cuenta las altas velocidades de las partículas, pero aun así era un aporte extraordinario. Seguramente, su fama y su carrera se forjarían al ser la primera persona en desarrollar una teoría matemática completa del electrón. Ya veía venir el Nobel.

Pero la cosa no fue tan fácil, tenía competencia. Justo al mismo tiempo, Werner Heisenberg, un protegido de Niels Bohr y Max Born, acababa de desarrollar su propia teoría. El «otro» trabajo era muy diferente al de Schrödinger, usó los datos experimentales disponibles en la época como base para construir una matriz compleja —algo así como una gran tabla que ordena la información en filas y columnas—, para explicar y predecir el comportamiento de los electrones. Werner conservó los niveles de energía como parte esencial de su aporte, después de todo debía respetar a su maestro, y también confiaba en que sería su ruta al éxito.



SCHRÖDINGER

El choque de científicos no se hizo esperar: no solo se jugaban la supremacía de sus teorías, sino que en el proceso también iba su prestigio y el futuro de sus carreras. Con

tanto en juego, se dieron hasta con la cubeta, con descalificaciones que iban desde lo matemático hasta lo personal.

Justo cuando el pleito se ponía más interesante, hubo un coloquio en la Universidad de Berlín en el que Einstein dijo: «¡Escuchen!, hasta ahora no teníamos una teoría cuántica exacta y hoy, de repente, tenemos dos... Estarán de acuerdo que estas dos teorías deben ser mutuamente excluyentes. ¿Cuál es la teoría correcta? Quizá ninguna de ellas lo sea». Acto seguido, uno de los más de 200 físicos presentes se paró y respondió: «Acabo de llegar de Hamburgo. Pauli demostró que las dos teorías son idénticas».

Wolfgang Pauli era uno de los físico-matemáticos más respetados de la época, su capacidad crítica era tan conocida que lo conocían como «el látigo de Dios». Si Pauli afirmaba que las teorías eran idénticas, no podía haber duda al respecto. Lo interesante es que dos propuestas que partieron de supuestos tan distintos resultaron ser equivalentes. Después de todo, resultó que tanto Schrödinger como Heisenberg tenían razón. Aunque técnicamente el enfrentamiento terminó en empate, en breve veremos que este último contó con dos factores que le dieron cierta ventaja sobre su rival.

INDETERMINACIÓN, GATOS Y DADOS

Heisenberg tenía apenas 24 años cuando desarrolló su teoría del electrón, pero ya era considerado un joven maravilla en el mundo de la física. En la Universidad de Múnich fue alumno de Arnold Sommerfeld, a continuación, trabajó con Max Born en Gotinga y de ahí se lo «robó» Bohr cuando, después de dar una conferencia, habló con el brillante joven y vio su gran potencial. Además, Werner era un gran amigo de Pauli. Todos estos elementos se combinaron para que Werner tuviera un equipo de físicos sin parangón para apoyar su propuesta.

En cambio, Schrödinger era 14 años mayor, su trabajo era mucho más solitario y menos glamuroso. No contaba con un grupo comprometido para darle respaldo, si acaso había físicos notables —como Einstein y De Broglie— que simpatizaban con su trabajo. Eso sí, para la mayoría de los físicos era mucho más fácil usar su ecuación de onda que las elaboradas matrices de su rival. Pero quizá lo que menos ayudó en aquel momento fue su intransigencia, nunca quiso adoptar aspectos valiosos de «la otra» física cuántica.

Después de que se demostrara la equivalencia de las dos propuestas, Bohr y Heisenberg tuvieron la visión de ponerse a trabajar en aprovechar lo que pudieran del trabajo de Schrödinger para crear una nueva versión, o interpretación, de la mecánica cuántica. Así, proclamaron que mientras no se realice ninguna medición, un electrón puede encontrarse en todos los estados posibles al mismo tiempo; solo cuando se mide en un experimento, colapsa la función de onda y la partícula se limita a un comportamiento específico. Es decir, si queremos conocer la posición del electrón, debemos medirla; pero al hacerlo estaremos falseando el resultado, ya que únicamente representa una foto «manipulada» por el hecho de haber hecho la medida.



HEISENBERG

Como complemento, Max Born mostró que las predicciones físicas de la función de onda para situaciones específicas realmente aparecen cuando esta se eleva al cuadrado. A partir de esto calculó los lugares donde sería más posible encontrar al electrón en los átomos, definiendo las formas de los orbitales atómicos que son esenciales para la química. En este sentido, aunque suena muy raro, estas partículas no eran ondas mecánicas —como las que se forman en un estanque al lanzar una piedra— o electromagnéticas —como la luz—, sino ondas de probabilidad. En el mundo cuántico ya no existían las certezas de otras áreas de la física, todo se comportaba en términos de la probabilidad de que algo ocurriera.

Por si esto fuera poco, Werner redondeó sus ideas con el famoso aporte que lleva su nombre: el principio de indeterminación de Heisenberg, el cual afirma que no es posible establecer con total exactitud la posición y el momento de una partícula. Cuanto mejor se conoce una magnitud menos se sabe de la otra. Después, se vería que esto también aplica para el tiempo y la energía, con consecuencias extraordinarias para que —en periodos muy cortos, menores a millonésimas de segundo— algunas partículas puedan tener grandes variaciones de energía que les permitan superar barreras que de otra forma serían imposibles de salvar. De aquí saldrían las bases para, como veremos más adelante, crear los microscopios de efecto túnel.

La nueva perspectiva sonaba verdaderamente asombrosa, quizá demasiado, hasta el punto de que dos grandes físicos no estaban conformes con ella. Por un lado, Schrödinger se lanzó con todo contra ella e incluso intentó ridiculizarla con una de las más famosas analogías de la ciencia:

Un gato está encerrado en una caja con un dispositivo potencialmente asesino. Dentro de la caja hay un elemento radiactivo con una probabilidad del 50 % de decaer, y emitir un rayo, en cierto periodo de tiempo (digamos una hora); en

caso de que se produjera el decaimiento habría un aparato que lo detectaría y liberaría un veneno para matar al inocente minino. Si no hay forma de ver el interior de la caja, para un observador externo el animal puede estar al mismo tiempo vivo y muerto —así como la función de onda del electrón le permite adoptar todos los estados posibles de forma simultánea—, hasta que abra el contenedor y la función de onda colapse en una de las dos opciones. Así, el observador externo marcaría el resultado. Era ridículo pensar en un gato al mismo tiempo vivo y muerto.

Bohr rápidamente respondió a la sátira, señalando que la función de onda no colapsa en el momento de abrir la caja, sino cuando el detector identifica el rayo resultante del decaimiento; sería ahí donde colapsaría la función de onda y no en el pobre gato. Irónicamente, aunque la idea del gato de Schrödinger cobró mucha fama, la respuesta nunca se volvió célebre.

La segunda queja vino de alguien que se sentía aún más incómodo con el rumbo de la física cuántica, sobre todo porque prácticamente fue uno de sus padres fundadores: Einstein. En una carta a Max Born, Albert escribió: «La mecánica cuántica resulta imponente. Pero una voz interior me dice que así y todo no es verdadera. La teoría ofrece mucho, pero no nos acerca al secreto del Viejo. En cualquier caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados».

La frase que muchas veces ha sido simplificada al decir «Dios no juega a los dados» dice mucho del rechazo del físico más famoso de la historia a una teoría que dejó atrás las certezas y la causalidad completa para pasar a un mundo de probabilidades. Aunque fue clave para su desarrollo, Einstein no tendría la última palabra para las escalas de moléculas, átomos y partículas menores. En ese «nuevo mundo» Dios sí juega a los dados y esto tendría que tenerse presente al trabajar en la escala de átomos y moléculas.



3

La prehistoria de las nano

Nada como un buen baño después de un pesado día de trabajo. Te quitas la ropa, al tiempo que van desvaneciéndose tus preocupaciones, para meterte en la ducha. Dejas que la presión del agua te brinde un masaje en la cabeza y la espalda, a la vez que el líquido se desliza por tu cuerpo para limpiarte, física y mentalmente. Disfrutas del ritual al máximo, pero tratas de no prolongarlo porque la conciencia ecológica te invita a no exceder tu gasto de agua.

Al salir de la ducha, justo cuando coges la toalla, notas algo peculiar, ahora sientes más frío que cuando te quitaste la ropa para entrar a bañarte. Es extraño porque el agua estaba caliente y te hizo sentir más relajado, pero aun así parece que hubiera bajado la temperatura. Aunque, lo que es aún más curioso, la sensación de frío desaparece en cuanto te secas con la toalla.

¿Qué ocurre? El agua y el aire (como todas las cosas) están formados por moléculas, partículas que nunca están quietas, se mueven sin cesar. Cuanto más alta sea la temperatura de un objeto, mayor será la energía de sus moléculas, pero

no todas las partículas están igual de agitadas: hay pequeñas variaciones que causan que unas sean más rápidas que otras.

Existe un fenómeno fascinante cuando el agua está en contacto con el aire: las moléculas del gas chocan con las de agua y, al hacerlo, les transfieren energía. Si la partícula en cuestión era lenta, solo se moverá más rápido dentro del líquido; pero en el caso de que sea más rápida, el choque puede generar energía suficiente para sacar la molécula del agua y dejarla flotando en el aire¹³. El detalle aquí es que siempre se desprenden las partículas con más energía (calientes), dejando atrás las que se mueven menos (frías).

Así, cuando nuestra piel está mojada, el aire se lleva los millones de pequeñas gotas de agua con la temperatura más alta y nos deja las de menos energía. Como nuestro cuerpo está más caliente que el agua, hay un flujo de energía en busca de equilibrio; visto desde la física no es que se sienta frío, esta magnitud no existe, sino que percibimos la pérdida de calor. Y el aire sigue chocando con el agua y llevándose las moléculas con más energía, por lo que mientras sigamos mojados seguiremos sintiendo esa «fuga» de calor.

Bueno, pero ¿a qué viene todo esto? El ejemplo de la ducha y el frío sirve porque nos acerca a un fenómeno de la escala nanométrica (entre 1 y 100 nanómetros), los choques entre moléculas, que tiene claras implicaciones en nuestra experiencia directa. Y claro que esto no empezó a suceder a raíz de los avances de Einstein o de la física cuántica, todas las personas con la piel mojada han percibido lo mismo¹⁴. La diferencia es que ahora entendemos lo que ocurre en

13 Haga el experimento de llenar un vaso de plástico con agua, señalar el nivel del líquido con un marcador y dejarlo destapado en un lugar ventilado. Revíselo cada dos días para observar cómo el nivel baja poco a poco.

14 De hecho, el sudor es un mecanismo que ayuda a regular la temperatura del cuerpo gracias a la refrigeración que se presenta con la evaporación del agua que contiene.

las escalas más pequeñas para dar forma a los fenómenos que vemos y vivimos directamente. Por eso, para explorar con más detalle las condiciones extraordinarias en la escala de átomos y moléculas vamos a sumergirnos de lleno en el mundo nanométrico.

UN VIAJE CON ANT-MAN

No cabe duda de que el universo cinematográfico Marvel nos ofrece aventuras fascinantes. En *Ant-Man*, película de 2015, Hank Pym inventa unas pastillas (denominadas Pym, por su apellido) que permitían disminuir el tamaño sin afectar a la fuerza de quien se las tomaba. Estas pastillas las tomó Scott Lang para convertirse en Ant-Man y vivir experiencias asombrosas.

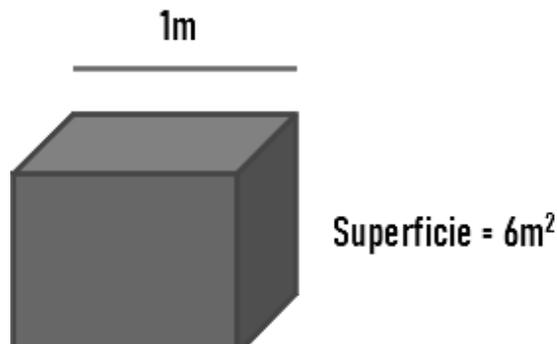
Las pastillas Pym permitían a Ant-Man pasar desapercibido y resolver las situaciones gracias a su tamaño, fuerza y destreza (aunque esto fue difícil de conseguir). Ahora, imaginemos poseer el secreto de las pastillas Pym y supongamos que cada píldora nos permite reducir nuestro tamaño diez veces. ¿Qué pasaría si nos tomáramos sucesivamente pastillas Pym hasta llegar al mundo nano?

Ingerir una pastilla Pym nos permitirá ver cosas diez veces más pequeñas, debemos repetir nueve veces este proceso de fantasía para llegar al mundo de los nanómetros. En el camino, repasaremos las condiciones de un cubo de un metro cubico que vamos a dividir en cubos más pequeños, para destacar cómo cambian las propiedades de la materia en diferentes escalas.

Iniciamos por ver las cosas en su tamaño habitual. En nuestra experiencia directa, el metro sirve como principal patrón para medir las cosas y equivale aproximadamente al largo de una guitarra (mil millones de nanómetros). Un cubo perfecto de $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ tiene un volumen de 1 m^3 y una superficie —que lo pone en contacto con su entorno— de 6 m^2 .

Ahora, tomemos la primera pastilla Pym para encoger- nos 10 veces, quedando nuestro tamaño en 0,1 metros, el tamaño del lado más corto de una postal fotográfica. Si partiéramos el cubo original en cubos perfectos de 0,1 m x 0,1 m x 0,1 m, tendríamos cubitos de $0,001 \text{ m}^3$. Lo interesante es que, aunque la masa y el volumen total siguen siendo los mismos, ahora hay 1.000 cubos con una superficie de $0,06 \text{ m}^2$ cada uno, para un total de 60 m^2 .

Viene la segunda pastilla y nos lleva a un centímetro: el ancho promedio de la uña del dedo índice de las personas (10 millones de nanómetros). Ahora, tendríamos un millón de cubos con una superficie total de 600 m^2 . Una dosis más y alcanzamos el tamaño de un grano de azúcar, 1 milímetro, tendríamos mil millones de cubos con este tamaño en sus lados y un área de contacto con el exterior de 6.000 m^2 .



Quizá se hayan dado cuenta de que en cada paso tenemos cubos 1.000 veces más pequeños, con una cantidad 1.000 veces mayor, por lo que el volumen total sigue siendo el mismo; pero la superficie de contacto se multiplica por 10 en cada paso, porque los cortes descubren partes del material que previamente estaban dentro del bloque. Para no hacer esto muy engorroso, les dejamos las cuentas de cada paso y retomaremos el total cuando lleguemos a nuestro objetivo.

Con la siguiente reducción llegaremos a una de las cosas más pequeñas que pueden distinguir nuestros ojos a simple vista: el grosor de un cabello humano, que anda por los 0,0001 metros. La quinta dosis de pastilla Pym nos sitúa en la escala de los glóbulos blancos de la sangre (10 micras); y un paso más nos acerca a las mitocondrias de las células que, por su tamaño de una micra (1.000 nanómetros), apenas pueden observarse con los mejores microscopios ópticos.

Con luz no es posible ver objetos más pequeños, pero gracias a microscopios de electrones y técnicas de rayos X, sabemos cómo son las cosas que hay al continuar el viaje. Así, con la séptima pastilla se alcanza un tamaño cercano al de algunos virus —como el del sida, la influenza o el famoso SARS-CoV-2—, en los 100 nanómetros. Un poco más de pastilla Pym y vemos los anticuerpos (inmunoglobulinas), moléculas de 10 nanómetros que protegen a nuestro cuerpo de bacterias y virus.

Al fin, llega la última dosis para alcanzar en la última etapa del viaje: el centro del mundo nano¹⁵. Hay que especificar que el prefijo nano no solo sirve para medir longitudes, indica la parte mil millones de veces más pequeña de algo. Existen los nanogramos, los nanosegundos..., en este caso, hablamos de la fracción del metro y, por eso, son nanómetros (nm). Gracias al trabajo de Einstein sabemos que ese es el diámetro de la molécula de sacarosa (azúcar). Ahora sí, retomamos las cuentas de nuestros cubos: al hacer la división con cada uno de los 9 pasos, tenemos mil cuatrillones de partículas (1×10^{27} , o sea, un uno seguido de 27 ceros), con un volumen de $1 \times 10^{27} \text{ m}^3$ cada una y una superficie total de seis mil millones de metros cuadrados ($6 \times 10^9 \text{ m}^2$).

Aquí aparece una de las principales situaciones extraordinarias de las nanopartículas: la cantidad de materia y su

15 Y el centro mismo de la vida, la molécula de ADN tiene un diámetro de apenas de 2 nanómetros.

volumen son los mismos, pero la superficie de contacto con la exterior crece mil millones de veces. Esto influye en un sinnúmero de procesos relacionados con la interacción del material con otras cosas: reacciones químicas, efectos de la luz, transferencia de calor, dispersión de materiales, etc.

Así, por ejemplo, el aluminio es muy estable a gran escala, pero a nivel nano es explosivo; el óxido de zinc y el dióxido de titanio, que se usan en los bloqueadores solares, son blancos en tamaño macro, pero se vuelven transparentes cuando se manejan en tamaño nano. Y no son estos los únicos casos de moléculas que pueden interactuar con nosotros. Por esto, antes de entrar de lleno al control atómico y molecular que se trabaja con las nanotecnologías, vamos a explorar las formas en las que desde la antigüedad los seres humanos convivimos con maravillas nanométricas.

NANOPARTÍCULAS NATURALES

«No puede ser, hoy no» fue lo primero que pensé al despertar con un agudo dolor de garganta. Eran apenas las 7 de la mañana del 25 de diciembre de 2010 y parecía que una infección podría arruinar la Navidad y, peor aún, el primer viaje a la playa con nuestras hijas. En el transcurso del día empeoraron un poco los síntomas con una fuerte congestión nasal, hasta que un médico confirmó mis peores sospechas y me recetó un tratamiento de antibiótico en inyecciones.

Afortunadamente, el ánimo no me abandonó y, tomando muchas precauciones, esa misma noche hicimos el viaje que veníamos planeando durante meses. Lo bueno es que el mismo cansancio me ayudó a dormir durante la mayor parte del camino de 12 horas, de otra forma habría sido un tormento. Al fin llegamos a la playa y nos dirigimos al hotel. Estaba concentrado en instalarnos en la habitación para

bajar al mar con las niñas. Las actividades y emociones me distrajeron al punto de olvidarme de la infección por un rato.

De repente, mi esposa me preguntó cómo seguía de la garganta. Entonces me di cuenta de que el dolor había disminuido considerablemente, sintiendo la nariz mucho más despejada. Por un momento creí que podría ser solo por la alegría del día, el tratamiento médico y los beneficios de la mayor presión atmosférica al nivel del mar. Aun así, al día siguiente experimenté una mejora como nunca había tenido con una infección similar hasta ese momento. Debía haber algo más.

Poco después me enteré de que, además de los factores que ya mencioné, las ciudades en la costa tienen un beneficio extra. El efecto del aire sobre el agua marina, por la misma evaporación que comentamos al inicio del capítulo, lleva al ambiente gotitas de agua junto a las sales y los minerales presentes en el mar. Todo esto crea un aerosol de nanopartículas de cloruro sódico suspendidas en el aire muy beneficioso para nuestras vías respiratorias. Cuando estas moléculas entran a la garganta y los pulmones tienen un efecto desinfectante; además, regeneran la mucosa y ayudan a descongestionar la nariz.

Con este ejemplo, y sus beneficios, vemos que las nanopartículas no dependen en absoluto de la acción humana, ni siquiera de nuestra existencia. La evaporación del agua marina es tan antigua como nuestro planeta. Claro que, las cosas nunca son completamente beneficiosas, también existen casos naturales dañinos para la salud, por ejemplo, cortesía de los volcanes. La actividad de estas estructuras geológicas desprende humo con ceniza a escala nano que, en caso de inhalarse, puede causar serios problemas respiratorios.

Pero las nanopartículas naturales no se limitan a cosas tan simples como agua con sales o partículas de ceniza, existen casos de estructuras más elaboradas. Un ejemplo son los nanotubos de carbono, una de las grandes novedades de la era de las nanotecnologías gracias a sus propiedades mecánicas y eléctricas. Estas estructuras se descubrieron en 1991 (lo

cual veremos en detalle en el capítulo 6), pero su existencia en nuestro planeta es mucho más antigua.

La presencia histórica de los nanotubos de carbono es fascinante. Científicos rusos certificaron su existencia en rocas ígneas que se formaron a partir de magma bajo la superficie terrestre hace 250 millones de años. Se han encontrado nanotubos en algunos yacimientos de petróleo en la costa sureste de México formados a partir de materia orgánica (plantas y microorganismos) enterrada hace millones de años. Finalmente, en un largo salto temporal, en Groenlandia se han encontrado bloques de hielo con 10.000 años de antigüedad que en su interior tienen nanotubos formados por procesos naturales de combustión.

A fin de cuentas, la naturaleza va muy por delante de nosotros, se las ha ingeniado para crear arreglos maravillosos, con creciente complejidad, sin los que la vida misma no sería posible.

MAQUINARÍA DE LA VIDA

Imagina una molécula capaz de replicarse, es decir, tomar materiales del entorno y hacer copias de sí misma. Suena un poco descabellado, pero es una opción más que viable; tanto que, de hecho, ya ocurrió hace millones de años. Las moléculas autorreplicantes de las cuales hablamos se conocen como genes y son las estructuras esenciales que permiten la reproducción de los seres vivos. O mirado desde otro punto de vista, basado en las ideas del biólogo y divulgador británico Richard Dawkins, podemos pensar que los seres vivos somos el medio del que se valen los genes, como nanomáquinas, para perpetuarse.

Los genes son fragmentos de la gran cadena de ácido desoxirribonucleico (ADN)¹⁶ que contiene la información con las características de todo ser vivo. Cada gen es responsable de producir moléculas con tareas celulares específicas, o sea, asociadas al desarrollo de ciertas funciones fisiológicas. Las unidades básicas que conforman los genes son los nucleótidos, ejemplo claro de nanoestructuras que, a pesar de su gran complejidad, tienen origen natural. Las condiciones de descargas eléctricas, erupciones volcánicas y otros factores de la Tierra primitiva permitieron que —de entre millones de combinaciones posibles— aparecieran moléculas como aminoácidos, que dieron pie a proteínas, que eventualmente permitieron la existencia del ácido ribonucleico (ARN) y el desoxirribonucleico (ADN).

La variación en la secuencia de las cuatro bases nitrogenadas en los genes —adenina, citosina, timina y guanina— ofrece un código genético único que distingue a unos seres vivos de otros y, en detalles más específicos, también marca las diferencias entre individuos. Cuando una célula se reproduce mediante la mitosis, la información genética se replica de forma íntegra; el producto son dos células con los mismos genes. En la reproducción que involucra a dos organismos, mediante la meiosis se producen células especializadas (óvulos y espermatozoides) que, al unirse, combinan sus genes y engendran un descendiente con una secuencia genética única.

Es una maravilla saber cómo esta compleja maquinaria molecular se ha desarrollado a lo largo de miles de millones de años hasta lograr la gran diversidad de formas de vida en nuestro planeta. Solo con siglos de trabajo científico hemos logrado acercarnos a entender sus mecanismos, códigos y la forma en que podemos adaptarlos o replicarlos para nuestro

16 En el caso de algunos virus, la información genética puede estar contenida en ácido ribonucleico (ARN). Aunque hay todo un debate sobre si los virus están vivos,

beneficio. Pero, sin duda, una de las principales razones para creer en una revolución tecnológica a partir de la ingeniería molecular viene de esta maquinaria biológica; con nuestra mera existencia, la naturaleza demostró el poder que pueden lograr las combinaciones moleculares correctas.

Ahora bien, no todas las maravillas moleculares van a ser agradables o benéficas: o si no, que le pregunten al SARS-CoV-2. En el momento de escribir este libro, nos encontramos inmersos en la más grande pandemia de los últimos 100 años, más de 250 millones de personas han enfermado y el planeta completo ha cambiado su ritmo de vida, con el confinamiento más prolongado y numeroso de la historia. Y todo por un diminuto artefacto bioquímico que ni siquiera está del todo vivo, un virus. Podemos decir que los virus son los «no muertos», pues cuando se encuentran aislados de un ser vivo no se alimentan, no liberan energía ni la atrapan, no hacen nada. Pero en cuanto entran en contacto con una célula huésped, la secuestran y obligan a su «maquinaria» a producir copias del mismo virus, las cuales salen a atacar más células. El proceso se repite hasta que el sistema inmune del organismo en cuestión logra detener este ataque o, desafortunadamente, el «bicho» acaba con el individuo.

Un virus, en esencia, consiste en una cadena de ácido nucleico (puede ser ADN o ARN) que es protegida por una capa de proteínas de tamaño nanométrico y, a veces, tiene una membrana grasa en su exterior. Por eso, cuando aún no nos infectan, un buen lavado de manos se encarga de eliminarlos de nuestra piel, el jabón desbarata la capa de grasa y al mismo virus. Si ya fuimos infectados, los glóbulos blancos y anticuerpos (otro caso de maquinaria a escala nano) comienzan la batalla para intentar eliminar al invasor.

Los antibióticos no sirven contra los virus, porque su mecanismo consiste en matar directamente al invasor o evitar que le lleguen insumos para alimentarse y reproducirse, lo cual es muy eficaz contra las bacterias. Pero ¿cómo matas

lo que no está vivo? ¿De qué sirve bloquear la llegada de alimento para bichos que no lo necesitan?

Aun así, existen sustancias capaces de inhibir el desarrollo de virus específicos, lo cual facilita la recuperación de los pacientes infectados. Actualmente, a un ritmo frenético, se han creado diferentes antivirales que ayudan a combatir al SARS-CoV-2, causante de la COVID-19, y muchas de las soluciones estudiadas nacen desde la nanoescala.

Claro que lo mejor siempre es prevenir, por eso una de las estrategias más efectivas contra los virus consiste en entrenar a la maquinaria molecular de nuestro sistema inmune para acabar con diferentes tipos de estos «bichos». Cada vacuna introduce al cuerpo herramientas moleculares que permiten a nuestras defensas detectar un virus y neutralizarlo para que no llegue a enfermarnos o minimizar sus efectos. La creación de la vacuna para un nuevo invasor no es un proceso rápido, pero, una vez que se desarrolla con éxito y se administra a toda la población, representa un avance esencial para salvar millones de vidas. Las defensas de nuestro cuerpo a nivel molecular son maravillosas pero las vacunas, como apoyo para enriquecer su proceso de aprendizaje, son la clave para derrotar a un gran número de virus peligrosos.

NANOMATERIALES DE CHIRIPA

Decía Louis Pasteur que «la suerte solo favorece a la mente preparada» y tenía toda la razón. Aun así, hay momentos de la historia en que no importa cuánto te hayas alistado, el conocimiento y la tecnología disponibles no dan para un éxito consciente. La humanidad lleva miles de años usando procesos moleculares que brindan avances muy valiosos — por ejemplo, la creación del jabón hace más de 4800 años en Babilonia—, aunque en realidad esto sucedía sin siquiera saber de la existencia de las moléculas y mucho menos enten-

diendo cómo afecta el logro en cuestión, ocurría de pura chiripa o, dicho con otra bella palabra, por serendipia.

Existe un sinfín de ejemplos de acomodados moleculares que se lograron por casualidades afortunadas, por lo que un abordaje detallado de todos sería el cuento de nunca acabar. Nos vamos a concentrar en tres casos particulares que ocurrieron en contextos muy distintos para ilustrar esas casualidades extraordinarias.

AZUL MAYA

«El que quiera azul celeste, que le cueste». Todos hemos escuchado esta frase que resalta la necesidad de pagar un precio elevado para poder obtener algo valioso. Ya sabemos que es un color precioso que se vincula al cielo y al mar, pero no se trata solo de eso, hay un antecedente histórico por el que el dicho refiere a esa opción cromática particular.

En la Europa renacentista (siglos XV y XVI), los pintores contaban con una gran variedad de pigmentos para realizar sus obras, pero el azul era un problema. No era fácil obtener tonos adecuados para el cielo y, sobre todo, lograr que permanecieran a lo largo de los años. Tampoco era algo imposible: existía el lapislázuli, una opción hermosa y efectiva, pero muy costosa. El mineral poseía un bello color azul y excelente resistencia al paso del tiempo, pero solo se conseguía en unas cuantas minas de Oriente Medio, en lo que ahora es Afganistán, y se extraía con gran dificultad.

El «azul del ultramar», como lo llamaron por su procedencia, era un auténtico lujo por su rareza y gran distancia de traslado, costaba su peso en oro. Así, los artistas padecían grandes penurias para incluir este color en sus obras, solo lo conseguían cuando tenían un patrocinador acaudalado —como la iglesia que pedía una pintura de la Virgen con su

manto azul o algún ricachón que se permitía el exceso de incluir esta gama cromática en su retrato—.

Claro que eso era en el viejo continente, mientras tanto, en Mesoamérica las cosas eran muy diferentes. Una cultura local llevaba siglos usando una excelente pintura azul esencial para sus ceremonias. El azul maya fue la envidia de los europeos cuando vieron su intensidad y capacidad de permanencia. Además, al compararlo con otros colores, era muy notoria su gran resistencia y menor degradación a condiciones ambientales, tanto en vasijas como en pinturas. Incluso, aún en nuestros días, es impresionante admirar un mural en el templo de Chichén Itzá —elaborado hace unos 1570 años—, que conserva el tono de azul como si hubiera sido pintado ayer. Ya quisiera que el exterior de mi casa, pintado hace 5 años, se conservara de esa manera.

Si bien, la calidad del color en las obras mayas saltaba a la vista, lo que no estaba claro es cómo una cultura prehispánica creó una pintura con tales virtudes. Durante muchos años la forma de obtener el pigmento fue un completo enigma. La planta de añil, de la familia del índigo, abunda en la región de los mayas, pero inicialmente se descartó que lo hubieran sacado de ahí porque se desvanece fácilmente con los efectos de los elementos naturales. Antropólogos de todo el mundo recopilaban piezas con el famoso azul maya, pero nadie daba con sus secretos para explicar los fundamentos para una pintura tan resistente.

Hasta la década de 1960 no fue posible descifrar su secreto y, solo gracias a la microscopía electrónica, se encontró que la clave estaba escondida en el mundo nano. El pigmento que brinda el color sí proviene de la planta de añil, pero no era la única sustancia presente, lo mezclaron con palygorskita, una arcilla que cuenta con cavidades de tamaño nanométrico.

La combinación, que se logra al calentar la mezcla durante varios días, permitía que el extracto de pigmento azul quedara atrapado en los poros de la superficie de la arcilla, de

esta manera quedaba aislado de elementos que pudieran causar su descomposición. Gracias a este arreglo, el azul maya tiene la maravillosa capacidad de resistir a la luz, al calor, la humedad y hasta a la presencia de ácidos como ningún otro material de su época. Fue así que los mayas dieron una lección de cómo lograr un azul celeste sin que tanto cueste. Aunque, irónicamente, vaya que a los científicos les costó entender el secreto del pigmento indeleble.

COPA DE LICURGO

En el siglo IV de nuestra era, casi al mismo tiempo que los mayas empezaban a desarrollar su famosa pintura, en Roma se fabricaba uno de los objetos de vidrio más sorprendentes de la historia: la copa de Licurgo. Este cáliz es un objeto elaborado con bellos ornamentos, con acabado en plata dorada, para representar la muerte del mitológico rey romano que le da nombre. Los detalles en el acabado del cáliz son de un gusto muy fino, pero no es eso lo que lo hace especial.

La copa, que desde 1958 se exhibe en el Museo Británico en Londres, ha fascinado a un sinnúmero de personas por su capacidad de cambiar de color según la dirección desde la que se le ilumina. Cuando la luz le llega de frente, muestra un color verde jade opaco; mientras que si los rayos vienen desde la parte posterior, se observa un rojo rubí traslúcido. Al igual que con el azul maya, durante muchos años no se tuvo una idea clara de la forma en que se producía este efecto. Más aún, hasta la fecha no se sabe a ciencia cierta la forma en que los artesanos romanos lograron crear semejante vidrio; aunque, sin duda, más copas fueron creadas con técnicas semejantes, la de Licurgo es la única que sobrevive hasta nuestros días.

En 1990, llegó el momento de la verdad, el vidrio del cáliz fue estudiado con un microscopio electrónico de transmisión

que reveló la clave de la coloración variable: se encontraron nanopartículas de plata y oro en suspensión en el vidrio. Las primeras tienen una proporción de 330 partes por millón y las segundas, solo de 40 partes por millón. El tamaño de los fragmentos oscila entre los 50 y 70 nanómetros, lo cual permite reflejar la luz verde sin eliminar la transmisión del resto del espectro de colores; a partir de ahí, las mismas partículas dispersan los tonos de azul en el interior de la copa y dejan pasar el rojo que se observa con la iluminación desde atrás.

Hay un debate sobre si la idea de agregar plata y oro en muy pequeñas proporciones fue un esfuerzo consciente para darle propiedades extraordinarias al vidrio o si el logro fue completamente accidental por la presencia de los materiales en el taller donde se elaboró la copa. Lo que sí está claro es que los artesanos no tenían forma de saber la escala a la que debían reducir las partículas metálicas para obtener un efecto tan asombroso, es decir, aunque hubiera una intención, no tenían conciencia de cómo lograrlo. La idea del avance accidental se refuerza porque no se estableció una tradición en la elaboración de este tipo de vidrio ni se hicieron muchas piezas parecidas.

Aún en nuestros días, no es sencillo conseguir un material con estas propiedades. Recientemente, lo logró la empresa estadounidense Corning Glass Works al replicar la composición química y estructura interna para crear este efecto variado de colores que se reflejan y transmiten. Ahora sí que, como dijo Ramón de Campoamor: «Nada hay verdad ni mentira, todo depende del cristal con que se mira».

ACERO DE DAMASCO

Es una gran sorpresa saber los personajes ilustres que pueden encontrarse en el limbo —primer nivel del infierno— según Dante Alighieri. En su obra más famosa, *La Divina*

comedia, el poeta narra que hay un grupo de virtuosos excluidos del paraíso, no por falta de méritos, sino por carecer del bautismo. Entre estos grandes hombres destacan Demócrito, Sócrates, Aristóteles, Euclides, Ptolomeo, Galeno y, de forma un tanto inesperada, Saladino.

La mayoría de los personajes nombrados por Dante fueron sabios griegos que dejaron una herencia cultural enorme para occidente y, sin estar asociados al catolicismo, podían ser vistos con una perspectiva empática, recordemos que la obra en cuestión era, en esencia, religiosa. En cambio, Saladino podría considerarse un enemigo hecho y derecho: fue un legendario gobernante del siglo XII que, como sultán de Egipto y Siria, logró unificar gran parte de Oriente Medio para defender al islam y enfrentarse a los cruzados en las guerras para recuperar Tierra Santa.



Acero de Damasco.

A pesar de todo esto, en occidente el líder musulmán era visto con respeto, incluso admiración; hay referencias a él como un ejemplo de inteligencia y caballerosidad medieval. Claro que sin su sobresaliente capacidad militar la combinación de buenas ideas y costumbres no hubiera servido para darle mucha fama. Saladino encabezó temibles ejércitos que trajeron de cabeza a los reyes de Europa antes de que, en la tercera cruzada, pudieran conquistar Jerusalén. En sus filas contaba con soldados formidables, pero también tenían sables hechos de un material sin igual en su época: el acero de Damasco.

En los alrededores de la ciudad de Damasco (Siria) se fabricaban espadas sobresalientes por su alta dureza, gran flexibilidad y un filo que parecía no perderse nunca. Cuenta la leyenda que podían cortar un pedazo de tela en el aire, incluso, rebanar una roca sin perder sus virtudes. El uso de estas armas, que no tenían rival en las batallas con los cruzados, contribuyó a darle aún más misticismo a Saladino y sus ejércitos. Y, casi como si fuera una marca moderna con una imagen distintiva, el acero de Damasco estaba cubierto de bandas onduladas que se conocían como patrones damascenos.

Después de más de 800 años, también con técnicas de microscopía electrónica, investigadores alemanes lograron dilucidar la razón de sus propiedades extraordinarias. Como antecedente debemos decir que todo el acero se produce al combinar hierro con un poco de carbón, que representa menos del 2 % de la masa resultante, pero aporta dureza y flexibilidad al metal. El proceso se realiza derritiendo y dejando enfriar el metal muchas veces en presencia de carbón, para integrar el elemento en su estructura molecular.

Lo que se encontró en 2006, cuando los científicos estudiaron una espada de este tipo a escala nano, es que su estructura contenía nanotubos de carbono. No resulta difícil de creer si consideramos que, como vimos anteriormente,

hay muchos casos en que la misma naturaleza logró producir este tipo de estructuras. Aunque no hay certeza sobre cómo se consiguió la presencia del material, se cree que influyeron dos factores importantes. El primero fue que el carbón se producía con madera de la región, que ofrecía buenas condiciones para la formación de nanotubos. Además, es posible que algunas impurezas que se encontraron en el metal —de vanadio, cromo, manganeso y níquel— formaron diferentes planos en el proceso repetido de fundir y enfriar el acero, los cuales, a su vez, sirvieron como catalizadores para la creación del diminuto material que brindó las condiciones únicas de dureza, flexibilidad y filo de las espadas.

Gracias a esta chiripa de los fabricantes de espadas en Damasco, los nanotubos de carbono ayudaron a Saladino en muchos de sus grandes triunfos. Aun así, como veremos en el capítulo 6, las mayores conquistas de este material llegarían hasta los albores del siglo XXI, cuando al fin se identificó y entendió su estructura. Solo así fue posible sacarles completo provecho para todo tipo de avances, de igual forma que fue necesaria la combinación de conocimiento y tecnología modernos para trabajar en el control molecular que buscan las nanotecnologías.

4

El espectáculo de las nanotecnologías

Pocas cosas cautivan a las personas como un buen *show...*, y si un científico en la historia lo supo aprovechar ese fue Richard Feynman. Dick, como le llamaban sus amigos, se hizo célebre por sus aportes a la física¹⁷, pero su verdadera leyenda se construyó sobre el espectáculo que montaba a su alrededor. Incluso, tras su muerte, su colega Murray Gell-Mann llegó a afirmar que a veces Feynman parecía más interesado en crear anécdotas que en hacer ciencia.

Cuando Dick era un veinteañero, lo reclutaron para integrarse al programa más importante en la historia de la ciencia: el Proyecto Manhattan. El simple hecho de estar ahí ya era un gran mérito, pero además fue el líder de grupo más

17 Ganó el Premio Nobel en 1965 por el desarrollo de la electrodinámica cuántica, la teoría que nos ayuda a entender la interacción entre la materia y las ondas electromagnéticas. Además, aportó ideas para verificar la existencia de los quarks, explicó el fenómeno de superfluidez en helio y descubrió los problemas que causaron la catástrofe del transbordador espacial Challenger. El buen Richard fue toda una caja de sorpresas.

joven de todos los que estuvieron en el esfuerzo para crear la bomba atómica, luciendo entre mentes tan grandes como Enrico Fermi, Niels Bohr o Robert Oppenheimer. Claro que, en su permanente dualidad entre científico y personaje, no se contentó con destacar por su trabajo, además, durante su estancia en Los Álamos realizaba bromas a sus colegas con la forma de decirles la hora, los retaba a plantear problemas matemáticos para resolverlos mentalmente y abría cajas fuertes con documentos clasificados. Más adelante, hizo célebres sus visitas de trabajo a un club de *striptease*, en donde desarrollaba ecuaciones mientras deleitaba la pupila con chicas *topless*, y no podemos olvidar su participación tocando la *frigideira* en las comparsas del carnaval de Río de Janeiro.



Fuera adonde fuera, Feynman nunca pasó desapercibido e incluso él mismo se hizo cargo de agrandar su fama al ofrecer vívidos relatos de sus aventuras, como los que se pueden encontrar en el libro *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?* Algunos colegas, como Freeman Dyson, llegaron a definirlo como «mitad genio, mitad bufón». Quizá la cosa no era

para tanto, pero está claro que tanto la investigación como la creación de historias memorables le apasionaban sobremedida y se combinaron para darle un aura casi mítica. Su afinidad para maravillar a quienes lo rodeaban le venía desde la infancia y fue alimentada a la par por su padre, que le hizo amar la ciencia, y por su madre, que le contagió su excelente sentido del humor y la habilidad para contar historias.

El pequeño Richard montaba y desmontaba radios, hasta que logró entender cómo reparar las averías más comunes. Esto vino de perlas a sus vecinos, ya que en la época de la Gran Depresión pocos podían permitirse pagar a un técnico para arreglar sus aparatos y Feynman lo hacía gratis. Además, en la combinación casi perfecta de ciencia y espectáculo, realizaba demostraciones de «magia química» para sus vecinos: encendía mecheros de Bunsen para quemar yodo y producir columnas de humo morado; simulaba convertir el vino en agua a través del cambio de color químico, y, para su gran final, se prendía las manos en fuego con éter de petróleo. La esencia de su espectáculo provenía de obtener fenómenos maravillosos a partir de las propiedades químicas de distintas sustancias para despertar el asombro de sus vecinos.

Muchos años después de estas demostraciones, al dictar la mítica conferencia *There's plenty of room at the bottom* («Hay bastante espacio en el fondo»), en 1959, Feynman buscó involucrar a la comunidad científica en una empresa aún más fascinante: manipular y controlar la materia a la escala más pequeña conocida para crear tecnologías con propiedades extraordinarias. Para muchos esta conferencia marca el inicio de la era de las nanotecnologías

A partir de la propuesta planteada en esta conferencia, retó a los investigadores de la época a aprovechar su conocimiento de la materia a nivel atómico para manipularla y crear aplicaciones útiles. Visualizó cuán grande podía ser el poder de las tecnologías más pequeñas.

Los planteamientos no surgieron solo de la especulación, tuvieron inspiración en los complejos mecanismos biológicos del interior de las células, mecanismos de escala nano que tendremos la oportunidad de discutir en el capítulo 9. Con ellos, la naturaleza muestra el poder que podemos encontrar al manipular la materia con precisión atómica, Feynman únicamente especuló con la creación de los instrumentos adecuados para hacerlo.

Pero la noción no se quedó en lo abstracto de buscar hacer cosas con elementos diminutos, como átomos y moléculas, sino que sugirió diferentes campos en los que se podría aprovechar; en particular, es notable su visión para la informática. Recordemos que en aquel entonces las computadoras eran enormes, ocupaban edificios enteros, pero con una capacidad de procesamiento ridícula comparada con la que tiene cualquier teléfono inteligente en la actualidad. A pesar de la importancia de la conferencia de Feynman, ¿podemos pensar que la comunidad científica relacionada con la nanotecnología se formó para seguir el liderazgo de este científico en busca de controlar la materia a nuestro antojo? En realidad, no. ¿Se logró que políticos y empresarios brindaran un apoyo inusitado al tema? Pues tampoco. Aunque en esa época, el investigador ya gozaba de una fama sin par entre sus colegas, aún era un desconocido para la mayor parte del público no especializado.

Tuvieron que pasar cuatro décadas para que se lanzara una estrategia a gran escala con el fin de entender, predecir y controlar el comportamiento de sistemas moleculares: la *National Nanotechnology Initiative* (Iniciativa Nacional de Nanotecnología, NNI) de Estados Unidos. Cuando la Administración de Bill Clinton anunció este programa, a bombo y platillo, usaron la conferencia y la figura de Richard Feynman como parte de un mito creacional para las nanotecnologías en ese país. Y decimos mito porque se quiso vender la idea de la conferencia como el impulso de una gran

ola de innovación en miniatura, cosa que realmente no sucedió en las décadas de 1960 y 1970.

MOTORES DE CREACIÓN

Nunca creas en los discursos de los políticos. No importa lo que en su día dijera Clinton para justificar la NNI, afirmar que la explosión de las nano fue consecuencia directa de la conferencia de Feynman es una verdad a medias. Su visión brindó una ruta prometedora, pero Richard nunca se puso manos a la obra para materializarla ni logró que en las siguientes dos décadas el tema cobrara auge. Hasta finales de la década de 1970, la conferencia apenas fue citada siete veces en la literatura académica.



La primera persona en usar el concepto específico de «nanotecnología» fue Norio Taniguchi, en 1974, como parte del artículo *On the basic concept of Nano-Technology*. En ese trabajo se refirió a artefactos capaces de procesar materiales con acabados ultrafinos, prácticamente la idea implicaba procesar, separar y deformar las cosas átomo por átomo.

Quizá, el mayor efecto de la charla de Richard Feynman se presentó de forma indirecta por su influencia sobre Eric K. Drexler. A sus 24 años, cuando era un estudiante de postgrado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Drexler encontró en la biblioteca de la universidad una transcripción de *There's plenty of room at the bottom*; después de leerla, quedó cautivado con la idea de manipular átomos a voluntad. Hasta entonces, el joven trabajaba en temas relacionados con la colonización espacial, pero a partir de ahí cambió su área de interés a la ingeniería molecular. En especial, puso su atención en la maquinaria de la ingeniería genética con el afán de averiguar si podían usarse medios mecánicos para realizar procesos parecidos a los que las células controlan biológicamente a través de las proteínas.

Pronto Eric se dio cuenta de que tenía entre manos un potencial extraordinario. Y es que las revoluciones tecnológicas del pasado tenían campos de acción muy específicos: la primera, en el siglo XVIII, se limitaba a los artefactos, o procesos, que podían articularse con una máquina de vapor; varias décadas después, vino la gama más amplia de aparatos que funcionaban con electricidad, y para la década de los 70 del siglo pasado, ya aparecían las tecnologías de información y las comunicaciones con un campo de acción que abarca cualquier cosa relacionada con la captura, procesamiento y distribución digital de información. En cambio, cuando se contempla la revolución nanotecnológica, la habilidad para manipular átomos en patrones complejos se trata de un campo de acción que abarca todas las cosas hechas de estas partículas, es decir, todas las cosas que nos rodean. No existe un límite o restricción para las posibilidades de la ingeniería molecular.

En 1981, Drexler publicó sus ideas en el artículo *Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation* en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences*, donde integró ideas científicas modernas

con los conceptos de Feynman para plantear su propia visión de la fabricación molecular con precisión atómica.

Hay que decir que en ese momento construir objetos con precisión atómica era una utopía, no existían instrumentos con la resolución necesaria para visualizar la materia a esa escala y, menos aún, para manipular partículas tan pequeñas. Las cosas cambiaron de forma espectacular gracias a los laboratorios de IBM en Suiza con el desarrollo de los microscopios de sonda próxima, de los que hablaremos en detalle en el capítulo 5.

Si bien, las ideas de Feynman y Drexler eventualmente inspiraron a muchos investigadores, la base real que abrió la puerta a las nanotecnologías fueron los nanoscopios de IBM. Y este hito, a su vez, permitió a Eric pasar de un sueño abstracto a discutir avances factibles. Aquí entró en juego otra propuesta que derivó de una conferencia de mediados del siglo XX, en este caso del matemático John von Neumann, quien consideró la creación de autómatas con la capacidad de autorreplicarse a partir de un mar de partes a su disposición. Los artefactos de Von Neumann sirvieron de inspiración para la tesis doctoral de Drexler, con la visión de una máquina molecular que pudiera construir copias de sí misma a partir de los átomos y moléculas que la rodean. La propuesta resultó tan radical como ambiciosa, tanto que muchos investigadores se negaron a supervisar su trabajo de investigación.

Las dudas jamás detuvieron el ímpetu del joven visionario. No conforme con dar a conocer sus ideas en el mundo académico, decidió dirigir su propuesta de ingeniería molecular a una audiencia mayor. En 1986, publicó el libro de divulgación *Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology* («Motores de creación. La próxima era de la nanotecnología»). El texto sirvió como vehículo para dar relevancia a las nanotecnologías y ponerlas en el foco de atención de la escena pública por las personas que leyeron el libro directa-

mente y la onda de noticias que generó en múltiples medios de Estados Unidos.

Aunque las ideas de Feynman y Taniguchi son cimientos esenciales para las nanotecnologías, realmente estaban inactivas hasta que Drexler ofreció un nuevo panorama de su potencial: el libro planteó el uso de biomoléculas como inspiración para crear ensambladores moleculares capaces de armar artefactos con precisión atómica, especuló que estos aparatos hipotéticos servirían como fábricas de cualquier cosa útil para el ser humano o, en caso de llegar a salirse de control, podrían convertirse en una «plaga gris» (*grey goo*) de nanopartículas autorreplicantes capaz de acabar con la civilización. Las dos ideas resultaron sumamente provocadoras para agentes científico-tecnológicos y también para diferentes sectores del público no experto. Drexler ofreció una visión de artefactos que podrían revolucionar todo, desde las ciencias biológicas hasta los viajes espaciales.

La publicidad derivada del trabajo de Drexler influyó en muchos científicos de todo el mundo que empezaron a interesarse por las nanotecnologías. Un ejemplo clave fue Richard Smalley —futuro Premio Nobel de Química en 1996, personaje clave en el avance de las nanotecnologías y que, por azares del destino, se volvería un duro crítico de la visión de Drexler—, a pesar de que inicialmente se declaró seguidor de Eric y señaló que *Engines of Creation* lo influyó para trabajar en nanotecnologías e incluso regaló copias del libro a las autoridades de la Universidad de Rice (donde trabajaba en ese momento).

El auge de la idea de manipular los átomos a voluntad, a finales de los 80 y principios de los 90, coincidió con el ascenso de Richard Feynman a un estatus de celebridad en todo el país; sobre todo después de su explicación en 1986 (en la televisión nacional) de las causas de la catástrofe del transbordador espacial Challenger. Así, en aras de alejar a las nanotecnologías de algunas ideas polémicas de Drexler

(como la de la posible plaga gris), se buscó un origen «autorizado» para las nano que remitió a la charla del legendario físico. Se acababa de construir, a partir de Feynman, un mito creacional que llegaría hasta nuestros días.

UNA «PEQUEÑA» POLÉMICA

«Cuando un chico y una chica se enamoran, con frecuencia se dice que hay buena química entre ellos. El uso coloquial de la palabra “química” en las relaciones humanas se acerca a la sutileza de lo que ocurre en el más mundano emparejamiento de moléculas. En una reacción química entre dos moléculas “dispuestas” se forman enlaces entre átomos en un baile usualmente complejo que implica movimiento en múltiples dimensiones... Y si la química es en verdad buena, las moléculas que reaccionan van a producir exactamente el resultado deseado».

Con esta bella metáfora entre los enlaces químicos y el amor, Richard Smalley abrió el artículo *De química, amor y nanobots* que publicó la revista *Scientific American* en 2001. Aunque la idea inicial era romántica e inspiradora, el objetivo real del autor era establecer un argumento mucho más conflictivo: contrarrestar la visión de Drexler. Primero calculó que, trabajando un átomo a la vez, un ensamblador molecular de este tipo tardaría millones de años en construir un objeto de unos cuantos gramos. A continuación, contempló cómo cambiarían las cosas en caso de contar con ensambladores autorreplicantes. Así, en poco tiempo se podría crear un cúmulo tan grande de nanomáquinas que podrían construir el mismo objeto en solo una pequeña fracción de segundo.

Hasta ahí no surgía ninguna polémica, parecían reforzarse las ideas revolucionarias que impulsaban la ola de las nanotecnologías planteada por Eric Drexler. Pero entonces

Smalley se preguntó sobre la misma viabilidad de los ensambladores e identificó dos problemas que hacían imposible su existencia: los «dedos gordos» y los «dedos pegajosos». El primer caso consistía en la necesidad de controlar la posición de todos los átomos en la molécula que se construye, lo cual implicaba que el ensamblador debería tener más «dedos» para operar de los que caben en la región nanométrica de manipulación, recordemos que su ancho no puede ser menor a un átomo. En segunda instancia, las mismas fuerzas que permiten que los «dedos» manipuladores se adhieran a los átomos para moverlos harían que no se pudiera soltar estos bloques en el lugar preciso.

Por si la fuerza de los argumentos científicos no fuera suficiente, cerró el artículo con la frase: «No puedes hacer que una chica y un chico se enamoren solo con juntarlos». Lo que se inició con un tema de amor se convirtió en poco menos que una declaración de guerra.

Poco después Eric Drexler y varios colaboradores publicaron una carta de respuesta en la que criticaron la noción de Smalley de que una reacción implica entre 5 y 15 átomos, para afirmar que en muchos casos solo hay dos reactivos. En estos casos sería posible inmovilizar uno de ellos y adherir el otro a un solo dedo. Además, señalaron que el problema de los «dedos pegajosos», aunque existe en algunas reacciones, no aparece siempre. Como ejemplo de que esto era viable mostraron a los ribosomas de la célula que se encargan de sintetizar proteínas con técnicas posicionales. Por lo tanto, la biología molecular daba pruebas de la posibilidad de los ensambladores.

Drexler, al fin y al cabo, defendía la viabilidad del ensamblaje molecular comparándolo con la maquinaria de la vida: «La naturaleza muestra que las moléculas pueden servir como máquinas porque los seres vivos funcionan por medio de dicha maquinaria. Las enzimas son máquinas moleculares que hacen, rompen y reorganizan los enlaces que mantienen unidas a otras moléculas. Los músculos son impulsados

por máquinas moleculares que arrastran las fibras entre sí. El ADN sirve como un sistema de almacenamiento de datos, transmitiendo instrucciones digitales a máquinas moleculares, los ribosomas, que fabrican moléculas de proteínas. Y estas moléculas de proteínas, a su vez, constituyen la mayor parte de la maquinaria molecular».

Así cobró forma el debate más famoso de la historia de las nanotecnologías. Los siguientes años, los dos protagonistas siguieron discutiendo, y hasta descalificándose, alrededor de las posibilidades reales del ensamblaje molecular. Drexler defendía sus enormes posibilidades y su potencial peligro, en cambio, Smalley siguió rechazando la idea de que fuera posible. El debate resultó esencial como factor para detener el avance de la ingeniería molecular, los argumentos de un ganador del Premio Nobel como Smalley sirvieron para disuadir a la comunidad científica de trabajar en esta área y también para alejar a los inversores, tanto públicos como privados.

A pesar de la innegable importancia de la visión de Drexler, gradualmente, científicos y autoridades públicas empezaron a separarse de sus ideas. Se le empezó a calificar como un sueño de ciencia ficción y no tardó en crecer el número de científicos que, siguiendo a Smalley, hicieron críticas públicas a Drexler en eventos académicos y diferentes medios de comunicación.

Drexler y sus seguidores intentaron hacer frente a los ataques técnicos que recibió su perspectiva. Sin embargo, no lograron detener el giro en la visión hegemónica del nuevo campo en la que se asoció el concepto más a nanopartículas con propiedades valiosas que a poderosos ensambladores moleculares. Aunque Eric Drexler puede jactarse de haber impulsado considerablemente la construcción social de las nanotecnologías, a fin de cuentas, perdió la batalla retórica para mantener el significado original del concepto.

APUESTA POR AVANCES POSIBLES

Para triunfar en el mundo de la tecnología, como en muchos otros ámbitos, hay que saber venderse. La historia de las nano tiene un fuerte componente de mercadeo: primero, con un discurso dirigido a investigadores por parte de Feynman y, luego, con una estrategia que llegó al público no especializado, con Drexler. Finalmente, de la mano de autoridades gubernamentales, se construyó una visión integradora cuya novedad no fue el trabajo técnico en sí mismo —muchas cosas ya se hacían décadas atrás—, sino la capacidad de vender a los diferentes sectores el potencial de los nuevos avances. Y todo se vino a coronar con el hecho de que, aun antes del año 2000, dos hitos relacionados con las nanotecnologías fueron reconocidos con el Premio Nobel: el microscopio de efecto túnel en 1990 y los fullerenos en 1996.

Las nano son probablemente uno de los primeros casos de ciencia y tecnología que, como afirman Davide Mariotti y sus colaboradores, se ven afectados por creencias populares para crear una especie de «investigación científica pop». De hecho, es una ola científico-tecnológica atípica, en tanto que gran parte de su inversión se presentó de arriba abajo, de la propuesta teórica a la implementación práctica, en vez de partir de un avance concreto, con aplicaciones específicas que lo llevaron a abrirse paso en diferentes sectores. Precisamente, este carácter distintivo *top-down* nos lleva a preguntarnos cómo despertaron las nano un entusiasmo colosal en la inversión pública y privada a nivel mundial.

Desde la década de 1970 se hacía investigación a escala de nanómetros, aunque se le llamaba de otra forma, pero a inicios de los noventa las ideas de Drexler impulsaron el auge del uso de terminología «nano» para describir fenómenos a esa escala. El cambio de lenguaje buscó mostrar el progreso tecnológico para conseguir apoyo en un momento en que la ciencia básica en Estados Unidos necesitaba recursos. Esto

se reforzó con el interés de los fabricantes de instrumentos por destacar su capacidad de caracterizar la materia a escala nano. Se produjo entonces una avalancha de cosas nano: revistas especializadas, departamentos de I+D en empresas y, finalmente, estrategias nacionales a gran escala. La punta de lanza fue la Iniciativa Nacional de Nanotecnología lanzada por Estados Unidos en el año 2000; a partir de este momento, a modo de efecto dominó, siguió la inversión pública y privada en Japón, la Unión Europea, China y el resto del mundo.

A pesar de la innegable importancia de la visión de Drexler, gradualmente científicos y autoridades públicas empezaron a separarse de sus ideas. Se le empezó a calificar como un sueño de ciencia ficción, no tardó en crecer el número de científicos que, siguiendo a Smalley, hicieron críticas públicas a Drexler en eventos académicos y diferentes medios de comunicación.

La participación de muchos otros agentes, y con más recursos a su disposición, así como el manejo de las expectativas respecto a los nuevos avances, terminó por orientar las nanotecnologías a una nueva perspectiva.

Y hablamos de estos avances en plural porque involucran una gama muy amplia de artefactos, con aportes y avances en varias disciplinas: siendo este su factor diferencial, hablamos de una multidisciplinariedad construida en la física, química, biología, ciencia de materiales, computación, medicina, etc. Para las nanotecnologías —con todos sus enfoques y aplicaciones— solo existe un factor de convergencia: crear artefactos cuyas propiedades surgen de la manipulación de la materia a una escala de entre 1 y 100 nanómetros. Asociar estos aportes tan variados a la misma tecnología sería como incluir en la misma categoría a una jeringa, un lápiz labial y un puntero láser solo porque tienen aproximadamente el mismo tamaño. La esencia, en todo caso, para presentar las nano

como un cúmulo es que su desarrollo nació de la capacidad de visualizar y manipular la materia con precisión atómica.

La visión original de ingeniería molecular es muy ambiciosa e implica un desarrollo a largo plazo que no tiene certeza completa de lograrse; aunque los avances actuales de las máquinas moleculares parecen ir por buen camino. En cambio, el trabajo con nanopartículas puede ofrecer resultados más modestos, pero con metas viables a corto y medio plazo más realistas. Esto no significa que la ingeniería molecular nunca llegue a convertirse en una realidad, seguramente será el gran punto diferencial de las nanotecnologías, pero a lo largo de los últimos 20 años ha estado fuera de las prioridades de inversión pública y privada. Por lo pronto, se han logrado grandes avances y, a pesar de la ausencia del discurso disruptivo de los primeros años, este camino conservador puede convertirse en cimiento de una transformación más radical.

Las propiedades novedosas de los materiales a escala nano ya están cambiando la forma en que vivimos mediante aplicaciones más diferenciales, rápidas, fuertes, eficientes, seguras y confiables. La base de datos *Statnano* (<https://product.statnano.com/>) tenía identificados, a inicios de 2021, más de 9.300 productos nano en el mercado elaborados por empresas en más de 60 países; aunque las innovaciones revolucionarias aún brillan por su ausencia, más bien se trata de avances incrementales respecto a tecnologías existentes —como procesadores para computadoras más pequeños y potentes, mejores sistemas de almacenamiento de datos, cosméticos con nuevas ventajas, etc.—, quizá los aportes más valiosos se encuentren en la medicina, como veremos más adelante, por ejemplo, con tratamientos contra el cáncer que reemplazan la dañina quimioterapia con estrategias dirigidas específicamente a los tumores. La clave, en todo caso, es que las nano ya dejaron el territorio de las promesas para convertirse en una poderosa realidad.

ENFOQUES DE LAS NANO

Hay que ver lo que se puede lograr con 5.572 kg de mármol blanco. Esto queda muy claro al visitar la Galería de la Academia de Florencia, donde se encuentra una de las obras maestras del Renacimiento y quizá la estatua más famosa del mundo: el *David* de Miguel Ángel. La figura de más de 5 metros de alto genera una atracción casi magnética en los visitantes, quienes, boquiabiertos, ven cómo la obra muestra las proporciones humanas en su máximo esplendor.

Era común que a su autor, Miguel Ángel Buonarroti, le preguntaran cómo logró elaborar semejante escultura. Ante esto el maestro respondía: «Simplemente, retirando del bloque de mármol todo lo que no era necesario. Cada bloque de piedra tiene una estatua en su interior y es tarea del escultor descubrirla. Vi la figura en el mármol y la tallé hasta que la puse en libertad».

Las técnicas para trabajar la materia han evolucionado mucho desde el siglo XVI para permitir la creación de otro tipo de maravillas, pero ahora en la escala molecular. Sin duda alguna, la belleza y precisión de las nanotecnologías es incomparable con el trabajo de Miguel Ángel, pero su enfoque principal parece inspirarse en la metodología del maestro. Los ingenieros diseñan una estructura y esculpen los materiales, retirando lo que no se necesita hasta lograr las propiedades deseadas. Claro que, en vez de usar un cincel, son necesarias técnicas avanzadas de litografía, corte, grabado y afilado con precisión de nanómetros.

A esta forma de crear dispositivos se le conoce como *top-down* («de la cima hacia abajo»), por el hecho de partir de «bloques» grandes para crear las nanoestructuras con propiedades extraordinarias. Al trabajar de esta manera se sigue un camino de miniaturización de artefactos que ya existían para tratar de hacer más eficiente su desempeño y conseguir más capacidad en tamaños mucho menores. Se ha de remarcar que las

posibilidades actuales para el diseño de nanomateriales todavía hemos de hacer más precisa la tecnología. Actualmente, haciendo un símil, es como si Miguel Ángel esculpiera el *David* con unos guantes de boxeo puestos, lo lograría hacer, pero no de forma tan exuberante. Eso no detiene la creación de estructuras precisas, cosa que ya se está logrando.

Esto se aprecia de forma clara en la industria electrónica. Los discos magnéticos de hace 30 años —con capacidad de 1.44 MB— eran unas 10 veces más grandes que las tarjetas de memoria actuales que almacenan hasta 256 GB: ¡un incremento de más de 160.000 veces! Algo semejante ocurrió con los procesadores para computadoras, que en la década de los 70 ocupaban edificios enteros, teniendo una capacidad de procesado apenas una fracción de la capacidad de un teléfono móvil actual. Es sorprendente pensar que estos últimos aparatos llevan en su interior cerca de 10.000 millones de transistores.

Me gustaría hablar del problema de manipular y controlar las cosas a escala pequeña. Tan pronto como menciono esto, la gente me habla de la miniaturización y hasta qué punto ha avanzado hoy en día. Me hablan de motores eléctricos que son de la medida de la uña de tu dedo pequeño. Hay un dispositivo en el mercado, me dicen, con el cual puedes escribir el padrenuestro en la cabeza de una aguja. Pero esto no es nada: esto es el paso más primitivo en la dirección que pretendo discutir. Es un mundo sorprendentemente pequeño el que hay debajo. En el año 2000, cuando miren atrás hacia esta época, se preguntarán por qué no fue hasta 1960 que alguien empezó seriamente a moverse en esta dirección.

¿Por qué no podemos escribir los 24 volúmenes completos de la Enciclopedia británica en la cabeza de una aguja?

Richard Feynman¹⁸

18 There's plenty of room at the bottom, 1959.

En 1959, Feynman se preguntó: «¿Por qué no podemos manipular la materia átomo a átomo?». Sin duda alguna, una gran pregunta que desde hace tiempo puede ser respondida: «Sí, sí que podemos». Es más, a esta capacidad de construir átomo a átomo se le ha dado el nombre de estrategia *bottom-up* («del fondo hacia arriba») y junto a la estrategia *top-down* («de la cima hacia abajo») constituyen las dos metodologías usadas para fabricar objetos en el mundo nano.

La opción que más le hubiera gustado a Feynman, la *bottom-up*, se basa en la obtención de las nanoestructuras a partir de sus componentes esenciales: átomos y moléculas. Esta manipulación es posible con técnicas como las microscopías de sonda próxima (SPM) o se puede lograr, de forma más general, aunque más imprecisa, con otras técnicas como la síntesis química. Si pensamos en átomos y moléculas como bloques de construcción Lego, esta forma de trabajar implica tomar las piezas más simples para construir las estructuras complejas que buscamos.

En el caso de la estrategia *top-down*, estamos mucho más evolucionados gracias a la gran herencia tecnológica de la industria de la microelectrónica. Aquí, la analogía de los Legos nos lleva a considerar un punto de partida con grandes estructuras, hechas con muchísimos bloques, que tratamos de repetir en escalas cada vez más pequeñas hasta llegar a manipular detalles del tamaño de las piezas más pequeñas.

En contraste, se espera que los avances más importantes de las nano lleguen a través del enfoque de *bottom-up*, más cercano a la visión original de Drexler, se ensamblan piezas atómicas y moleculares para crear materiales y artefactos útiles. Esta especie de nano-Lego funciona a través de procesos de síntesis química, autoensamblaje, ensamblaje por posición e incluso por procesos bioquímicos (después de todo, la actividad al interior de la célula inspiró mucho del trabajo de las nano).

El enfoque *bottom-up* es mucho más disruptivo que el *top-down*; aunque no debemos dejar de lado que se basa en la manipulación átomo por átomo, con la dificultad que esto conlleva. Así, el mayor reto para el trabajo de *bottom-up* se encuentra en mejorar las técnicas de nanofabricación para poderlas implementar a escala industrial, aunque ya existen materiales —como los nanotubos de carbono y el grafeno— exitosos en este sentido.

Podemos resumir en tres grandes bloques de procedimientos *top-down* usados para fabricar «nanocosas»: a) transferencia de patrones a escala nanométrica; b) eliminación de material para obtener la nanoestructura (por ejemplo, de grafito a grafeno); c) adición de capas y sustancias sobre otros materiales.

Las dos estrategias (*bottom-up* y *top-down*) han permitido un avance significativo de los sistemas nanotecnológicos a medida que evolucionaban las tecnologías disponibles. Así, podemos distinguir una serie de fases o generaciones que caracterizan, en términos generales, el avance de las nanotecnologías:

- Primera fase (1990-2005). Se obtuvieron estructuras pasivas: recubrimientos, materiales nanoestructurados, nanopartículas y nanocompuestos. Un ejemplo con gran aceptación en el mercado son las nanopartículas de óxido de titanio o de zinc para protectores solares.
- Segunda fase (a partir de 2005). Las nanoestructuras pasivas se volvieron activas. Las nanopartículas pueden cambiar su estado sucesivamente. Las aplicaciones de esta generación se encuentran en algunos fármacos, así como en sensores o transistores.
- Tercera fase (a partir de 2010). A las nanoestructuras pasivas se les unen los nanosistemas tridimensionales, obtenidos con técnicas de auto o bioensamblaje

(bottom-up). Aquí encontramos casos como las nano-redes biológicas o arquitecturas más complejas.

- Cuarta fase (a partir de 2015). Se logró la capacidad de diseñar nanosistemas moleculares complejos que hacen posibles acciones heterogéneas donde cada molécula en el sistema tiene una estructura y función específica. Esto permite obtener nuevos dispositivos a la carta con una variedad de funciones muy interesante.

Los avances que actualmente se promueven desde las nano involucran una amplia gama de disciplinas para su desarrollo, por lo que sería confuso repasar lo que se hace en cada campo. Para ofrecer un panorama general, y de forma más pragmática, podemos distinguir seis grandes áreas de avance en las que actualmente se distribuye el avance de las nanotecnologías:

1. Medicina. Algunos ejemplos muestran nuevos métodos para el diagnóstico de enfermedades, protocolos para la administración de medicamentos con efectos secundarios negativos mínimos (enviando los fármacos a lugares específicos), vendas que evitan infecciones y facilitan la regeneración de piel en quemaduras, así como sistemas de etiquetado molecular, etc. De todos modos, este ámbito lo discutiremos en profundidad en capítulos posteriores.
2. Energía. Se centra en el desarrollo de fuentes renovables de energía limpias y costeables (en especial, materiales para celdas solares con mayor eficiencia y versatilidad en su instalación), creación de baterías eléctricas más eficientes, como las que se usan en cámaras digitales y celulares, pero con capacidad para aplicaciones más robustas como coches, casas y aviones, catalizadores para combustibles y sistemas de transmisión de energía de alta densidad, entre los ejemplos más desta-

cables. Estos avances están llamados a tener un papel clave en la lucha contra el cambio climático.

3. Calidad ambiental. Destacamos técnicas viables para detectar y eliminar contaminantes del agua y el aire, protocolos innovadores para la remediación de desechos peligrosos, mejoras en procesos industriales orientadas a la reducción en el uso de materias primas.
4. Información y comunicaciones. Se pone el foco en opciones avanzadas para el almacenaje de información, nuevos dispositivos de cómputo (transistores de un solo electrón y sistemas de computación cuántica), pantallas ultradelgadas, más brillantes y eficientes, y sensores basados en nuevos materiales (como el grafeno).
5. Industria pesada. Se encuentran aplicaciones de nuevos materiales para medios de transporte y para la construcción enfocados en el desarrollo de fibras más resistentes y ligeras, cemento capaz de absorber contaminantes del aire, recubrimientos resistentes al desgaste para alargar la vida útil de la maquinaria, materiales autolimpiantes, etc.
6. Bienes de consumo. Son los menos revolucionarios, pero a la vez los más presentes en el mercado. Incluyen la producción de alimentos y embalaje para alimentos, cosméticos e insumos de cuidado personal, nuevos textiles antimanchas o que facilitan la transpiración, agentes antibacterianos y múltiples aplicaciones para el sector deportivo y el de automoción.

En resumen, podemos señalar que las nano tienen tres fortalezas¹⁹: hacer más eficientes los productos que cono-

19 Ideas tomadas del artículo: Foladori, G. (2010). *Las nanotecnologías en contexto. Sociología y tecnociencia: Revista digital de sociología del sistema tecnocientífico*, 2(0), 35—55.

mos hoy en día, crear productos multifuncionales y reducir y sustituir significativamente la cantidad de materia prima en muchas ramas industriales. Pero no todo puede ser completamente bueno, también hay tres debilidades a tener en cuenta: pueden aparecer propiedades toxicológicas desconocidas así como efectos nocivos a la salud en relación con esas tecnologías (tanto al fabricarlas, como al usarlas y en el proceso de desecho) y, por último, puede implicar efectos relacionados con el empleo y la división social del trabajo.

Aquí se debe señalar que todas las tecnologías implican riesgos y no por eso se detiene su avance, de otra forma no tendríamos automóviles, radiografías, teléfonos móviles o aviones. La clave para la adopción exitosa de un sistema tecnológico emergente se encuentra en la capacidad de aprovechar las ventajas al máximo y, al mismo tiempo, tener claros los riesgos para manejarlos de la manera más segura posible. En los siguientes apartados pondremos énfasis en los grandes avances que se han ido construyendo, para complementarlos con un capítulo dedicado a los riesgos y aspectos sociales de las nano.



5

Visualizar lo invisible

Desperté con las primeras notas de la alegre melodía de mi alarma. Aún no había abierto los ojos y el primer estímulo del día me inundaba, obligándome a levantarme para desactivar la música. Abrí los ojos, miré a mí alrededor y me sentí sobrecogido por todos los estímulos que percibía. No solo recibía luz de todos los objetos de mí alrededor, las plantas de mis pies sentían el suave tacto de las sábanas, me inundó el olor a suavizante de mi edredón recién lavado y mi lengua reseca (con un gusto amargo) me demandaba un vaso de agua.

Me levanté a la vez que estiraba los brazos con una satisfactoria sensación de alivio, abrí la ventana y sentí la brisa fresca en mi cara, sentí cómo el aire del exterior entraba en mis pulmones mientras escuchaba el canto de los pájaros y acariciaba suavemente a mi perro, que acudió a mi lado cuando sintió que me levantaba. Con todo esto, reparé en la maravilla que es nuestro cuerpo, un aparato que nos permite percibir muchos aspectos de nuestro entorno aun sin poderlos ver.

Claro que, como dicen, una imagen vale más que mil palabras, basta una fracción de segundo para que la luz que

recibimos nos permita identificar formas, tamaños y colores de las cosas a nuestro alrededor, incluso puedes hacerte una idea de la distancia a la que se encuentran. No cabe duda de que la vista es una maravilla, pero no debemos obviar que tenemos la fortuna de contar con otros cuatro sentidos para explorar y conocer nuestro entorno.

Y es que, cuando no podemos ver, el oído, el gusto, el olfato y el tacto se agudizan: los sonidos son más claros, los sabores más intensos, hay una mejor percepción de los olores y aumenta la sensibilidad al tocar las cosas. En particular, es notorio cómo las personas invidentes usan este último recurso como una herramienta esencial para desplazarse (con apoyo de un bastón especial) y familiarizarse con su entorno directo gracias a la alta capacidad de percibir detalles en las yemas de los dedos.

Aquí debemos destacar la naturaleza eléctrica de la percepción del tacto: aun cuando creemos que tocamos un objeto, en realidad no hay un contacto físico directo con él. Como ya vimos, toda la materia está hecha de átomos con un pequeño núcleo (con carga eléctrica positiva) rodeado de una nube de electrones (con carga negativa). Siempre que se acercan dos cargas iguales se presenta una fuerza eléctrica repulsiva y, por tanto, se rechazan. Así, la sensación de tocar algo en realidad es consecuencia de la repulsión entre los electrones de sus átomos y los electrones en los átomos de nuestra mano (o cualquier otra parte de nuestro cuerpo). Aun así, el resultado es el mismo, esta interacción nos brinda información sobre el objeto y también la posibilidad de moverlo.

Los avances de la primera década del siglo XX nos hicieron conscientes de que las moléculas y los átomos existen, pero son más pequeños que las cosas más diminutas que nos permite ver la luz. Estamos ciegos en el mundo nano: ¿es posible usar un mecanismo semejante al tacto para explorar y visualizar la estructura de las cosas a esa escala?

A grandes rasgos esta es la idea detrás de los microscopios de sonda próxima que, a partir de la década de los ochenta, nos permitieron visualizar el mundo de moléculas y átomos. El 10 de agosto de 1982 se publicó la patente estadounidense 4.343.993, un hito en la historia de las nanotecnologías. Los investigadores Binnig y Rohrer, de IBM, acababan de crear el microscopio de efecto túnel o *Scanning Tunneling Microscope* (STM). Se trató del primer aparato capaz de «tocar y manipular» en la nanoescala, una especie de nanoscopio que dio la razón a Richard Feynman, tal y como predijo en 1959 cuando aseveró que «si queremos hacer manipulaciones a nivel atómico, primero debemos poder ver lo que está sucediendo».



La invención del STM les valió a sus creadores, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, el Premio Nobel de Física de 1986 y, además, sentó las bases de otro microscopio especial, el AFM. En 1985, también en los laboratorios de IBM con la colaboración de nuevo de Binnig junto a Gerber y Quate se creó el microscopio de fuerzas atómicas (*Atomic Force Microscope*, AFM). Para entender cómo funcionan ambos microscopios, exploraremos toda la ciencia que permitió su invención, exploraremos la base de los microscopios de sonda próxima.

ATRAVESAR MONTAÑAS: EL EFECTO TÚNEL

Imagina que estás en un pueblo situado en la base de una montaña. Para ir a la comunidad vecina, al otro lado de la elevación del terreno, tienes dos opciones: escalar la montaña o atravesarla excavando un túnel. En el mundo nano, el equivalente a esta última situación, movernos a través de la montaña, ocurre con una barrera de potencial, una fuerza que solo se puede superar si se alcanza un nivel mínimo de energía. Según la mecánica clásica, si una partícula no llega a esa magnitud nunca va a superar el obstáculo. Al volver con nuestro símil, para ir al pueblo vecino (pasar sobre la barrera), debemos invertir el esfuerzo suficiente para escalar la montaña. Para la física cuántica esto es posible sin alcanzar la energía mínima requerida, sin escalar la montaña.

El efecto de túnel cuántico ocurre cuando las partículas atraviesan una barrera que, según la física clásica, debería ser imposible de atravesar. El obstáculo puede ser un medio físicamente intransitable, como un campo eléctrico, un material aislante o un medio vacío. Para el ejemplo del pueblo, sería como atravesar la montaña... sin construir el túnel²⁰.

20 Por cierto, con frecuencia se piensa que los efectos cuánticos están alejados de nosotros, pero en realidad no podríamos realizar muchas funciones importantes sin ellos. Por ejemplo, el sentido del olfato se relaciona con el efecto túnel. ¿Cómo? El proceso de oler es más complejo de lo que parece: nuestra nariz tiene más de 400 tipos de receptores químicos, lo que nos permite detectar la presencia de diferentes sustancias en un proceso similar al de una llave y un candado. El candado tiene una cerradura que funciona con una llave específica; los receptores (candado) identifican la forma de la molécula (llave). Pero no siempre ocurre así, hay excepciones que surgen del efecto túnel. Por ejemplo, el etanol y el etanotiol tienen olores completamente diferentes, aunque sus formas son semejantes. El etanol es el alcohol común que usamos para desinfectar las heridas o como base para el gel antibacteriano, con su olor tan potente característico; el etanotiol, en cambio, huele a huevos podridos. Esto sugiere que algún otro mecanismo de identificación está funcionando. Los receptores de olor dependen, en parte, del túnel cuántico para identificar determinados compuestos químicos. Nuestros receptores de

Y, ¿cómo es posible que exista el efecto túnel desafiando las leyes de la mecánica clásica?

Este curioso fenómeno surge del principio de indeterminación de Heisenberg, parte esencial de la física cuántica. En el capítulo 2 vimos que el físico alemán Werner Heisenberg estableció que en la escala de lo diminuto (moléculas, átomos y partículas más pequeñas) hay ciertas magnitudes que no pueden determinarse con total exactitud de forma simultánea. El caso más conocido es el de la posición y el momento (que combina masa y velocidad), así si conozco con gran precisión el lugar donde se encuentra una partícula hay una incertidumbre muy alta en cuanto a su momento, y viceversa.

Un caso menos famoso, pero más importante para el efecto en cuestión, es el de la indeterminación de tiempo y energía. Cuando sabemos con claridad la energía que tiene una partícula en cierto proceso, no podemos definir con claridad el periodo que dura. Y, como complemento, en periodos muy cortos de tiempo existe la posibilidad de un amplio margen de incertidumbre en la energía, esto significa que la indeterminación da lugar a variaciones importantes, una partícula puede alcanzar niveles de energía imposibles para la física clásica.

Pero no crean que, en procesos suficientemente cortos, todas las partículas puedan vencer cualquier barrera de energía. Como ocurre en todas las cosas buenas, existe una letra pequeña para hacer uso de la indeterminación. El grado de energía está sujeto a condiciones de probabilidad: cuanto mayor sea la diferencia de energía para alcanzar el nivel necesario, más será complicado que ocurra. Así, el efecto túnel cuántico depende de la «altura» de la barrera

olor bombean una pequeña corriente a través de la molécula haciendo que vibre de una manera determinada, en este proceso, algunos electrones experimentan un efecto túnel a través del espacio no conductor entre las células del receptor y la molécula.

y la cantidad de partículas disponibles en el proceso. Por lo tanto, cuanto más grande sea la «montaña», menor será la proporción de casos en que las partículas simplemente la atraviesen, por lo que serán necesarios miles de millones o hasta billones de eventos para que unas cuantas logren llegar al otro lado.

La esencia del efecto es que las reglas del mundo cuántico dejan atrás la aspiración de obtener una certeza absoluta, como en el caso de la mecánica clásica, para pasar a un mundo de probabilidades. En nuestra escala, a la hora de saltar un obstáculo no hay medias tintas, todo es blanco o negro: o tienes la energía para pasar por encima o no pasas. En la escala nano, hay una amplia gama de posibilidades que surgen del comportamiento ondulatorio de las partículas. A partir del trabajo de Erwin Schrödinger y Max Born con la ecuación de onda, sabemos que las ondas de las partículas no son mecánicas (como las ondas que se provocan al lanzar una piedra en un estanque) o electromagnéticas (como las de la luz) sino que son ondas de probabilidad.

Una función de onda incluye todos los estados posibles para un objeto (sea un electrón, un átomo o una molécula); cuando se eleva al cuadrado y se resuelve, obtenemos la probabilidad de un resultado particular. Si las condiciones de energía son cercanas a la situación inicial será muy posible alcanzar lo que se busca, pero conforme la diferencia es mayor, el escenario se vuelve más difícil hasta llegar a situaciones que son prácticamente imposibles hasta para el mundo cuántico.

Entonces, el efecto túnel cuántico termina por ser como la oportunidad de usar un pasadizo para atravesar la barrera natural para llegar al otro pueblo. El detalle es que no todos pueden usar este camino: deben entrar en un sorteo en que se elegirá a los afortunados que podrán pasar al otro lado, incluso si no tienen la energía suficiente para escalar la montaña. Cada persona solo puede recibir un número de parti-

cipante y cuanto más alta sea la montaña, mayor será la cantidad de boletos en la rifa, por lo que de cualquier forma es muy complicado ganar. Para casi todas las personas es como si no hubiera túnel ni sorteo, pero unos pocos afortunados gozan de una ventaja maravillosa. Pasan como si la barrera no existiera.

Si lo vemos para situaciones a pequeña escala, como el número de electrones en un átomo o los átomos en una molécula, las probabilidades son tan bajas que hay poca esperanza de atravesar una barrera de energía mediana. Ah, pero si tenemos cosas mucho más grandes —digamos, algo que pesa un miligramo—, al tener más de un trillón de partículas, incluso con probabilidades muy bajas, es posible que alguna partícula se cuele por el túnel cuántico. Lo cual resultó ser suficiente para el STM. Claro que antes de discutir sobre este instrumento revolucionario debemos presentar su principal antecedente, el famoso microscopio de electrones.

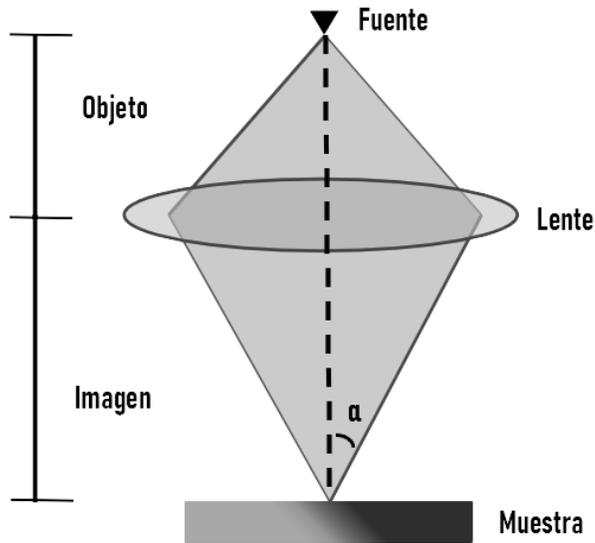
ANTECEDENTES: EL MICROSCOPIO DE ELECTRONES

El microscopio electrónico nació en 1931, apenas cuatro años después del experimento con que Davisson y Germer demostraron que los electrones se pueden portar como ondas. Los primeros modelos de este aparato alcanzaron resoluciones de 10 nanómetros, es decir, podían ver cosas cien millones de veces más pequeñas que un metro. Alcanzaron la resolución de 2 nm a mitades de la década de los 40 del siglo pasado. Al llegar a la mitad del siglo XX, ya se podían observar cosas prácticamente un millón de veces más pequeña que una hormiga. Actualmente, ya pueden captar objetos con resoluciones subatómicas. Esto es gracias a una serie de factores, como, por ejemplo, se ha aumentado la resolución

debido al aumento de velocidad de las partículas para conseguir longitudes de onda cada vez más pequeñas o se ha mejorado las lentes electromagnéticas. Pero ¿cómo se logró esto? Con una combinación de pericia, conocimiento, trabajo y mucha ciencia. Se jugó con el voltaje para ajustar la aceleración de los rayos de electrones y las aberraciones de las «lentes» (o su equivalente para estas partículas). Pero para entenderlo mejor, intentaremos introducirnos en «las entrañas» de un microscopio de electrones.

El funcionamiento de un microscopio electrónico es parecido al de uno óptico, pero en lugar de luz se usa un haz de electrones acelerados a altas velocidades.

Esto permite estudiar cosas mucho más pequeñas, pues los electrones pueden tener una longitud de onda considerablemente menor que la del color violeta (la luz más pequeña dentro del espectro visible). Las propiedades de onda de los electrones son la primera base para este tipo de microscopios; una segunda clave está en que las partículas se puedan mover en un espacio prácticamente vacío para que no se desvíen al chocar con átomos; el tercer aspecto esencial viene de la carga eléctrica, así como las lentes sirven para dirigir la luz en los aparatos ópticos, en este caso se usan campos electromagnéticos para marcar el camino de las partículas. A partir de este principio, en 1926, se desarrolló la primera lente electromagnética. La gran ventaja es que al acelerar los electrones se puede cambiar su momento, lo cual permite controlar su longitud de onda y con ella, el tamaño de las cosas que se pueden observar.



Para que los microscopios electrónicos funcionen, se usan electrones que «iluminan» el material a estudiar. Estos electrones se obtienen de materiales que emiten este tipo de partículas al calentarse, por eso se llaman termoiónicos. Además, se aplica un voltaje para acelerar los electrones, la corriente se hace pasar por orificios que la ajustan a un haz delgado y, finalmente, un conjunto de «lentes» electromagnéticas enfoca los rayos en la superficie de la muestra. A continuación, sucede la interacción de las ondas de electrones con el objeto que se estudia y se detectan los haces de luz que surgen de este proceso para enviar señales a una computadora que las interpreta para producir una imagen.

En general, existen dos tipos de microscopios electrónicos: los de barrido o *scanning* (SEM) y los de transmisión (TEM). Algo valioso es que, con la combinación adecuada de condiciones de iluminación y detectores, es posible trabajar en un modo simultáneo de barrido y transmisión (STEM).

En el TEM, los electrones pasan a través de un sistema de lentes condensadoras antes de llegar a la muestra, que se

encuentra dentro de la lente objetivo. Un punto importante es que la muestra debe ser suficientemente delgada para que los electrones la puedan atravesar. Una vez que los electrones pasan a través del material, un sistema de lentes intermedias toma la imagen formada por la lente objetivo y la magnifica en sucesivos pasos. Finalmente, la lente proyectora forma la imagen sobre una pantalla fosforescente o sobre una cámara digital que envía la información a un ordenador.

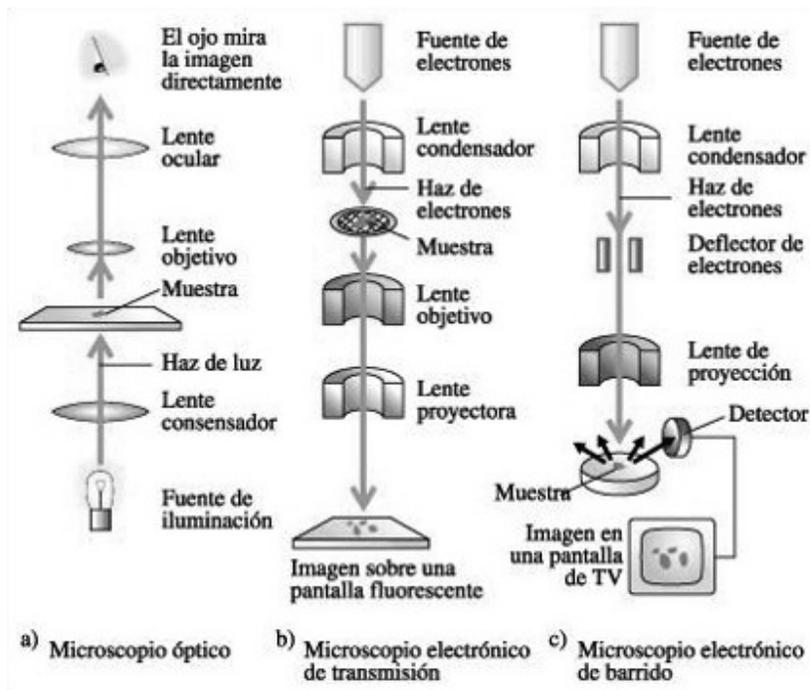
Por su parte, el SEM enfoca los electrones sobre la superficie de la muestra formando un haz fino, gracias al sistema de lentes condensadoras y objetivo. Este haz focalizado realiza un barrido sobre la muestra. Los choques de los electrones sobre la superficie producen electrones secundarios y otras señales que son captados por diferentes detectores. De ahí, se envían las señales recogidas a una consola electrónica y la imagen aparece en la pantalla del ordenador.

El gran salto en la resolución, la capacidad para resolver o ver objetos de los microscopios electrónicos resultó del aumento del voltaje para acelerar el haz de electrones y la mejora en la tecnología de lentes electromagnéticas para minimizar efectos de distorsión (o aberración). Otro salto importante fue el desarrollo de correctores de aberración esférica, en 1997, por parte de Max Haider y Harald Rose. Por último, otras mejoras de la resolución de estas microscopías se asocian a mejores sistemas de vacío y mejores fuentes de electrones. Actualmente, se pueden obtener resoluciones de 0,01 nm a 30 kV y hasta 0,005 nm a 300 kV.

En 1959, cuando Feynman dictó su famosa conferencia, la resolución de este tipo de aparatos apenas superaba un nanómetro y, precisamente por esto, el famoso físico planteó el reto de «mejorar la resolución del microscopio electrónico 100 veces». Hoy en día, están disponibles sofisticados componentes electro-ópticos que ayudan a superar los problemas de aberración para acercarnos a completar el desafío de Feynman. La razón principal por la que ha llevado tanto

tiempo lograrlo es la necesidad de un control informático sofisticado para medir las aberraciones presentes y ajustar repetidamente las corrientes de lente necesarias hasta optimizarlas con un control preciso y complejo de más de 40 elementos ópticos.

Pero Feynman no se limitó a plantear el reto de ver cosas pequeñas, además hizo una de las preguntas más importantes de la historia de la nanotecnología: «¿Por qué no podemos manipular la materia a escala atómica?». Aquí, la microscopía electrónica no tuvo respuesta. Hacía falta nuevas tecnologías, herramientas que también debían basarse en la física cuántica: los microscopios de sonda próxima, comenzando por el microscopio de efecto túnel.



Esquema de tres tipos de microscopios.
Wikimedia commons/ Cacampito.

Así, como adelantó Feynman, fue posible ordenar los átomos a la carta. Y es que, como acertadamente nos dijo: «Los principios de la física, en la medida de lo que sé, no prohíben la posibilidad de maniobrar cosas átomo por átomo. No es un intento de violar ninguna ley, es, en principio, una cosa que se puede hacer; pero a la práctica no se ha hecho».

Con estas reflexiones, Feynman describió la esencia de la nanotecnología como un conjunto de tecnologías que nos permite la manipulación atómica. Si hay un hito dentro de la historia de las nanotecnologías que más se asocia a este ideal es la invención de los microscopios de sonda próxima. Para continuar nuestro relato, saltamos a 1981 y volvemos al trabajo de Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en el IBM Research Lab de Zúrich.

LA LIBERTAD EN IBM Y EL MICROSCOPIO DE EFECTO TÚNEL

No hay nada mejor que te paguen por hacer lo que te gusta. Con un poco de suerte, toda tu vida laboral te la pasas en actividades que te encantan o, de no ser así, al menos de vez en cuando podrás entregarte a cosas más apetecibles. Un aspecto importante es tener la fortuna de un patrón inteligente que te brinde libertad creativa dentro de tus funciones. Y es que un empleado que trabaja en sus propias ideas se siente tomado en cuenta y va a estar mucho más motivado para llevarlas a buen término.

Por eso es que empresas grandes y exitosas, como Google, tienen la política de permitir que sus empleados dediquen hasta un 20 % de su tiempo de trabajo a proyectos propios que sean productivos para la firma. Gracias a estas políticas, existe el servicio más exitoso de correo electrónico en la actualidad, el famoso Gmail. Paul Buchheit era un programador de la famosa firma tecnológica y desde años antes

había pensado en crear un servicio de correo electrónico basado en la web. Todo se le ocurrió antes de que nacieran los pioneros en la materia, Hotmail y Yahoo, pero la idea seguía latente ante las deficiencias de estas compañías. Así, en el año 2001, Buchheit usó su tiempo libre en Google para desarrollar un modelo que permitiera hacer búsquedas dentro de los mensajes de correo y ofrecer un espacio de almacenamiento mucho más grande. Aunque en la empresa hubo alguna resistencia a la propuesta, tuvo suficiente apoyo para hacerse realidad y convertirse en uno de los grandes factores que consolidaron su dominio en los servicios de internet.

Aquí la lección es que muchas empresas se quedan atrapadas en «la caja» de las actividades que ya realizan o la obsesión de hacer todo sobre los proyectos y metas que ya existen, sin dar opción a caminos inesperados que pueden ser muy productivos. A veces, las tareas inmediatas pueden verse como urgentes, desplazando a propuestas que a la larga podrían ser mucho más redituables. Por eso, es necesario darle al talento aunque sea algo de oportunidad de explotar su creatividad.

Y no crean que esto es algo nuevo o exclusivo de gigantes tecnológicos de Silicon Valley, históricamente el avance de la ciencia se ha basado en dar a los investigadores la oportunidad de seguir su pasión para explicar fenómenos naturales y crear soluciones a todo tipo de problemas. Es un enfoque que ha encumbrado a muchas organizaciones y que se adoptó como parte de la esencia en IBM, la empresa de tecnología estadounidense con más patentes, en donde la creatividad de sus investigadores llevó al desarrollo de hitos como el cajero automático, el disquete para la computadora, la banda magnética, el código de barras UPC, la memoria RAM dinámica o los microscopios de sonda próxima.

Fue en los laboratorios de IBM en Zúrich donde se contó con la mezcla adecuada de talento y libertad para crear los cimientos de la revolución nano. Fue allí donde Heinrich

Rohrer —un talentoso científico suizo— encontró la posibilidad de trabajar en varios temas científicos de su interés antes de inclinarse por la ruta que lo inmortalizó (junto a Gerd Binnig) en la historia de la ciencia y la tecnología.

Rohrer nació en 1933, justo un año después de la invención del microscopio electrónico. Aunque desde niño sintió una fuerte inclinación por las lenguas clásicas, al final decidió orientar su carrera hacía la física, con la fortuna de tener como profesores en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich a científicos de la talla de Wolfgang Pauli y Paul Scherrer. En su tesis doctoral estudió el proceso de transición inducida por un campo magnético en superconductores, materiales que por debajo de una temperatura crítica experimentan una transición a un estado de resistencia nula al paso de la corriente eléctrica y en el que los campos magnéticos no pueden penetrar el material.

Después de realizar una estancia postdoctoral en la Universidad de Rutgers (Nueva Jersey, EE. UU.), comenzó a trabajar en el Research Laboratory de IBM en Rüschlikon (Zúrich). Desde allí, empezó a estudiar fenómenos de magnetorresistencia, para luego avanzar a diagramas de fase magnética y llegar al campo de fenómenos críticos, estudios alrededor de los puntos térmicos clave desde donde cambian las propiedades de la materia. En todas las áreas realizó aportes importantes, pero, como él mismo dijo en su discurso de aceptación del Nobel, pudo aprender mucha física de sus colegas, acumular valiosa experiencia y conocimientos para lo que vendría a continuación. Ahora trasladémos al segundo de nuestros protagonistas.

En 1978, Binnig era una joven promesa científica de 31 años, recién llegado a IBM desde su Frankfurt natal, en Alemania. A diferencia de Rohrer, que decidió su vocación definitiva el mismo año que entró a la universidad, Gerd supo que quería estudiar física desde la tierna edad de 10 años. Pero esto no significa que no tuviera otras pasiones.

Así, desde la infancia, su madre le inculcó el gusto por la música y durante sus estudios formó parte de un grupo musical con sus amigos. Quizá este lado musical también fue importante para desarrollar su lado más creativo.

Aunque se sintió un poco decepcionado de sus cursos en física por ser demasiado teóricos y faltos de imaginación, continuó hasta que se involucró en el trabajo experimental. El joven científico se dio cuenta de que su pasión estaba en hacer física más que aprender de ella o, en sus propias palabras, «quizá hacer física es la forma correcta de aprenderla». Pronto su talento le hizo llamar la atención hasta el punto de ser reclutado para integrarse al equipo de IBM en Zúrich. Ahí conoció a Rohrer, quien renovó por completo su curiosidad con su forma de ver la física, combinada con su calidad humana y buen sentido del humor. Pronto, ambos desarrollaron una gran química personal y científica.

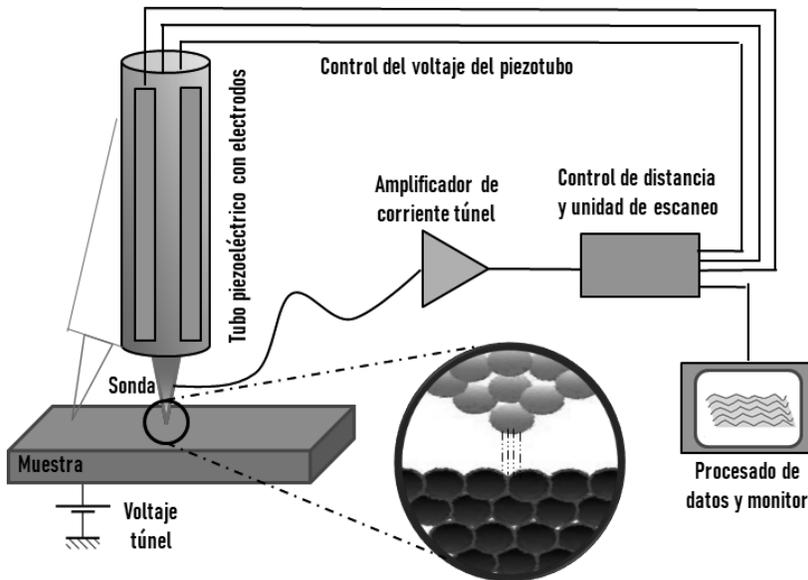
La colaboración se inició con el interés compartido por entender las propiedades superconductoras de ciertos tipos de óxidos metálicos y de su estructura superficial, lo cual era muy difícil por la poca información que les daba la microscopía disponible en aquel momento. Así, por fuerza de la necesidad, Rohrer y Binnig orientaron su atención a crear una herramienta que los ayudara a progresar en sus estudios.

En enero de 1979, entusiasmados por sus progresos, Binnig y Rohrer presentaron su primera patente sobre el STM. Poco después, con la ayuda de Christoph Gerber, comenzaron el diseño y la construcción del aparato. Este nuevo tipo de microscopio fue recibido con cierto escepticismo por la comunidad científica, por la idea disruptiva de renunciar al uso de lentes, era como cerrar los ojos para estudiar todo al tacto. Por si esto fuera poco, su funcionamiento dependía de un complejo fenómeno cuántico: el efecto túnel.

El STM aplica una tensión eléctrica entre dos electrodos: el primero es una punta conductora móvil y finísima, compuesta de pocos átomos; el segundo está formado por

la superficie que se desea analizar, por lo cual debe tratarse de un conductor o semiconductor. La sonda se mueve cerca de la superficie y, cuando se aplica un voltaje, algunos electrones empiezan a experimentar el efecto túnel a través del espacio vacío. Se genera así una corriente desde el primer átomo de la punta hacia los de la superficie de la muestra analizada, sin que ambos estén en contacto. A medida que varía la distancia entre la punta y la muestra, la corriente túnel también cambia. Al ajustar la altura de la punta para que esta corriente permanezca constante, se puede generar un mapa de altura de la superficie, pudiendo llegar a visualizar átomos en 3 dimensiones.

Durante el funcionamiento del microscopio, el desplazamiento de la sonda describe una especie de barrido sobre la superficie analizada, del cual se obtiene una trama de líneas que configura la imagen de la forma de esta superficie. La punta recorre la superficie, extendiéndose sobre picos y valles.



En marzo de 1981, el dueto científico registró una imagen con resolución atómica de los desniveles de superficies de dos metales (oro y tetraestaño de calcio e iridio). Las imágenes resultantes mostraban filas de átomos y amplias terrazas, separadas por escalones de un átomo de altura espaciados con absoluta claridad y precisión. No sabemos qué sintió Neil Armstrong al ser el primer humano en pisar la Luna, pero algo similar tuvieron que experimentar Rohrer y Binnig. Es más, en la entrega del Nobel este último reconoció que «no podía dejar de mirar las imágenes» que acababan de obtener, sin duda alguna «estaba entrando en un mundo nuevo».

El STM resultó ser una aplicación tecnológica maravillosa del túnel cuántico, que hasta entonces no había encontrado un uso tan trascendente: una punta o sonda conductora que se mueve hacia adelante y hacia atrás sobre la muestra. La sonda está lo suficientemente cerca de la superficie para que algunos electrones puedan vencer la barrera de energía (gracias al túnel) a través del espacio entre la superficie y la punta, creando una corriente. Con la presencia e intensidad de la corriente se puede detectar la distancia a la que se encuentra en material; cuando hay un relieve, los átomos se encuentran más cerca y la barrera de energía es menor, por lo que la corriente es más intensa que cuando el nivel del material es más bajo. De esta forma, conforme se realiza el barrido de la superficie se crea una imagen de la muestra en tres dimensiones.

Gracias a este efecto, el STM se convirtió en la primera microscopía con la capacidad para crear imágenes de resolución atómica, pero el triunfo no quedó ahí. Además, se trató de la primera tecnología capaz de manipular átomos de forma individual. Así, 10 años después, con una versión mejorada del STM, Don Eigler y Eric Schweizer descubrieron que, si colocaban la punta del STM cerca de la superficie, un átomo pasaba de la muestra a la punta; así podían recoger átomos y acomodarlos a voluntad. Con esta técnica,

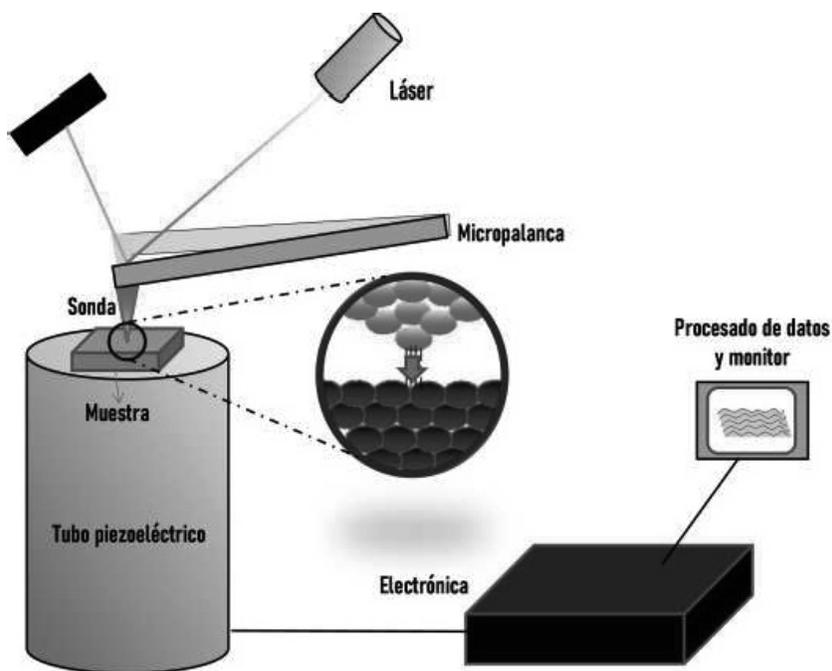
en 1989, usaron 35 átomos de xenón para formar las siglas de IBM en una superficie.

LAS TÉCNICAS DE SONDA PRÓXIMA (SPM)

Los microscopios de efecto túnel fueron un avance extraordinario, pero no eran perfectos. Sus principales problemas son que solo sirven para muestras muy planas y los materiales deben tener al menos cierto grado de conductividad eléctrica, lo cual limita su uso. Estas y otras complicaciones hicieron patente la necesidad de una nueva invención, impulsando la creación del microscopio de fuerzas atómicas (AFM).

El AFM, creado en 1986 por Binnig, Quate y Gerber, es una combinación de los principios del STM con un brazo que puede desplazarse hacia arriba y abajo —como en un tocadiscos— para detectar las variaciones en el nivel de una superficie. En lugar de usar corriente constante, como el STM, en el AFM se mantiene una fuerza constante entre la punta y la muestra, a medida que la punta se escanea sobre la superficie del objeto. Esto significa que la sonda, en la punta del brazo, sube y baja con las protuberancias y depresiones del material. La gran ventaja del AFM es que no requiere un flujo de corriente entre la punta y la muestra, crea imágenes del material sin importar su conductividad, lo que le confiere una gran versatilidad y un potencial increíble.

La punta del AFM también es muy afilada para sondear con detalle la forma de una superficie. La sonda se encuentra al final de una micropalanca, el brazo que mencionamos, que presiona la superficie de la muestra. Las fuerzas de repulsión entre los electrones de la punta y la superficie hacen que el brazo suba y baje a medida que la punta barre el material. La desviación se mide para producir un mapa topográfico de la superficie, siguiendo su perfil línea por línea para registrar una imagen de sus relieves y depresiones.



Para asegurar la fidelidad del barrido se aplica un mecanismo de retroalimentación que monitorea y controla la interacción entre punta y muestra. La micropalanca tiene un espejo en la parte posterior donde se refleja un rayo láser cuya luz llega después a un fotodiodo de cuatro cuadrantes. La sección a la que llega la luz en el detector varía según la posición de la sonda, mientras se mueve hacia arriba (picos) o hacia abajo (valles) para seguir el perfil de la superficie. Con ayuda del control de retroalimentación, el escáner (piezoeléctrico) vertical se extiende o retrae con el movimiento para mantener el punto láser en la misma posición del fotodiodo. Gracias a esto se forma la imagen de la muestra en la pantalla de un ordenador donde se procesa.

La palanca es como el bastón de un ciego que, gracias a los movimientos que se producen al recorrer la superficie de diferentes objetos, ayuda a que su dueño perciba lo que toca.

En última instancia, todo se reduce a un proceso de tacto que sirve para visualizar las cosas en un entorno específico; en la mente de una persona invidente o en el procesador de una computadora conectada al AFM.

Hoy en día, gracias a un constante proceso de mejora, el AFM incluye una amplia variedad de métodos en los que la sonda interactúa con la muestra de diferentes maneras para caracterizar varias propiedades del material. Desde propiedades mecánicas (por ejemplo, adherencia, rigidez, fricción, disipación), pasando por propiedades eléctricas (capacitancia, fuerzas electrostáticas, función de trabajo, corriente eléctrica), propiedades magnéticas o propiedades espectroscópicas ópticas, todo ello con espectaculares resoluciones acompañadas de un fácil manejo.

Gracias a su flexibilidad, el microscopio de fuerza atómica se ha convertido en una herramienta común para caracterizar materiales en colaboración con la microscopía óptica y electrónica, logrando resoluciones hasta la escala nanométrica y más allá. El AFM puede operar en entornos desde ultra alto vacío hasta en fluidos y, por lo tanto, abarca todas las disciplinas, desde la física y la química hasta la biología y la ciencia de los materiales.

Estas técnicas dominan la manera de aproximarnos al estudio de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las nanopartículas, moléculas y todo tipo de sistemas. Las ventajas son especialmente importantes para los sistemas biológicos, que hasta la llegada de este tipo de microscopios eran difíciles de analizar en estas escalas.

Y al igual que el STM, este tipo de dispositivos no se limitan a crear imágenes, sino que también son capaces de detectar todo tipo de propiedades en la nanoescala, desde propiedades físicas (magnetismo, conductividad, etc.) a propiedades mecánicas (resistencia, adhesión, fricción, etc.). A su vez, la sonda AFM se puede usar para manipular átomos a placer, abriendo un enorme campo de posibilidades para una de las

herramientas más importantes en el desarrollo imparable de la nanotecnología. En 2013, IBM volvió a hacer historia al usar uno de estos aparatos para crear el corto animado más pequeño de la historia: *A Boy and His Atom*, que está disponible en YouTube. Estos equipos nos permitieron dar forma o incluso superar las predicciones de Feynman, abrieron la puerta a convertir las nanotecnologías en la más reciente y, quizá, la mayor revolución industrial jamás conocida.



6

Maravillas del carbono

Imagina lo que sintió el *Homo erectus* al producir por primera vez el fuego hace ya un millón de años. Debió de experimentar una gran excitación al crear esa combinación de luz y calor que quizá había visto al caer un rayo y ahora se sometía a su voluntad. Seguramente no fue consciente del gran poder que acababa de crear, el poder del fuego.

Se trató de un hito histórico extraordinario, aunque probablemente ocurrió por casualidad. Quizá se combinó la presencia de un montón de ramas y hojas secas con el choque de un par de piedras que produjeron chispas para encenderlas o bien el movimiento frenético de un palo que, al girar, produjo suficiente calor para generar una flama.

Como sea que fuese, se encontró la forma de «invocar» el fuego a voluntad. Con esto se dejó de sufrir el frío de los inviernos, cambió el sabor de la comida y se volvieron más seguros los lugares donde habitaban. Fue uno de esos momentos de serendipia: una combinación casual, o afortunada, de factores que llevan a un avance extraordinario.

Este tipo de descubrimientos pueden desencadenar auténticas revoluciones, como con el fuego. A partir de él fue posi-

ble crear nuevos artefactos y esto, a su vez, condujo a más avances, a evolucionar. Se pasó del uso de piedras a metales, desde el hierro hasta el cobre o el latón. Mucho tiempo después, llegamos a inventar nuevos materiales (como el acero o los plásticos), que nos conquistaron para volverse imprescindibles.

Así, ya en la época moderna y armados de conocimiento científico, la búsqueda de materiales novedosos continúa. Y es que la evolución nunca acaba, es imparable, aunque no siempre es controlada. Fue otro momento de serendipia el que llevó a descubrir un minúsculo material que sería otra de las piezas clave en la historia de las nanotecnologías: el fullereno. Una «pelota» diminuta, de poco más de un nanómetro de diámetro, descubierta en el ya lejano 1985.

EL *SCIENCE STAR* DE LAS NANOTECNOLOGÍAS

Es curioso cómo a veces un suceso puede cambiar tu vida. Una persona que se cruza en tu camino se convierte en tu media naranja, tu compañero de pupitre se convierte en el amigo inseparable que te acompaña en un sinfín de aventuras o una experiencia fortuita te hace descubrir tu profesión soñada. El hecho que cambió la vida de Richard Smalley ocurrió el 4 de octubre de 1957, el día que se lanzó la sonda Sputnik, el primer satélite artificial de la historia.

La infancia de Smalley transcurrió de forma apacible en una familia de clase media en Kansas City, Misuri. Hasta que vio al Sputnik, a los 14 años, era un estudiante del montón: no destacaba particularmente y, como muchos otros, su único objetivo era hacer lo mínimo para aprobar los cursos. Pero ese día, junto a su hermana, delante de la tele se maravilló con el poder de la ciencia y la tecnología. Se imaginó viajando al espacio y la inspiración se apoderó de él.

Y su nuevo interés por la ciencia y la ingeniería encontró territorio fértil en su familia. Frank Smalley, su padre, tra-

bajaba con equipos eléctricos y mecánicos en una compañía de instrumentos para granjas de la que llegó a ser presidente. Su madre (Esther) había concluido sus estudios de licenciatura en ciencias cuando Richard era un adolescente y le transmitió su pasión por la física. Por si esto fuera poco, su tía Sara Jane Rhoads —química, hermana de su madre— lo dejó trabajar en su laboratorio de química orgánica y lo alentó a estudiar una carrera científica.

A partir de aquí, Smalley se embarcó en el camino que lo convirtió en una de las figuras más importantes para el desarrollo de las nanotecnologías. Se graduó en la Universidad de Michigan en 1965 y se doctoró en Princeton en 1973. Empezó a trabajar en la Universidad de Rice en 1976. En 1996, Smalley fue nombrado director del Centro de Ciencia y Tecnología en la Nanoescala (CNST) en esa misma institución.



RICHARD SMALLEY

A lo largo de su trayectoria, fue uno de los químicos más influyentes de la historia. Entre los diferentes premios que ganó destaca el Premio Ernest Orlando Lawrence en 1992 y, sobre todo, el Nobel de Química en 1996, compartido con

Robert F. Curl Jr. y sir Harold W. Kroto por el descubrimiento del fullereno: un nuevo alótopo de carbono que consta de 60 átomos de ese elemento ordenados en forma de pelota de fútbol. Y, curiosamente, el descubrimiento de la bola más pequeña y famosa de la historia ocurrió a partir de una serie de casualidades.

En la década de 1970, cuando Drexler puso su atención en el mundo atómico, Smalley empezó a estudiar nuevas formas moleculares simples de diferentes compuestos con ayuda de una nueva tecnología denominada espectroscopia láser de haz supersónico. El propio Smalley fue clave para el desarrollo de esta nueva técnica que, el 8 de agosto de 1974²¹, le permitió a su equipo registrar el primer espectro de una molécula diatómica (NO_2) a baja temperatura. El nivel de detalle que alcanzaron era el mismo logrado por entonces en los átomos y las diátomeas, lo que supuso toda una revolución de la física molecular.

Para que nos hagamos una idea, esta técnica tenía el mismo principio de funcionamiento que los aires acondicionados. Así, se fuerza a que un gas —el freón en el caso de los aires acondicionados— aumente su volumen muy rápido, lo cual crea un estado de muy baja presión y genera un efecto de enfriamiento. La disminución de temperatura retarda las rotaciones moleculares, facilitando el análisis de las estructuras generadas. El equipo de Smalley descubrió que podían utilizar las pulsaciones láser para volatilizar cualquier material en la entrada de la cámara de expansión, permitiendo por primera vez que los átomos de cualquier elemento de la tabla periódica se pudieran producir en frío con un haz supersónico (más rápido que la velocidad del sonido). Lo más importante, desarrollaron una forma de controlar la

21 La misma noche en que Richard Nixon renunció a la presidencia de Estados Unidos.

unión de estos átomos en pequeños grupos, que luego se enfriaban en la expansión supersónica.

Prácticamente en paralelo a los estudios de Smalley, el químico británico Harold W. Kroto estaba utilizando espectroscopia de microondas para estudiar las largas cadenas de carbono que se encuentran en el espacio exterior. Él creía que estas cadenas se habían creado en las atmósferas de estrellas gigantes rojas ricas en carbono. Al enterarse de la técnica de Smalley, pensó que podría ser útil para su estudio y le planteó una colaboración.

Inicialmente, Smalley fue reacio a la colaboración con Kroto, pero, finalmente, accedió a trabajar conjuntamente, lo que sería una acertada y afortunada decisión. Así, diseñaron experimentos donde el aparato de Smalley (llamado AP2) disparaba pulsos de rayos láser a ciertos elementos químicos, logrando temperaturas más calientes que la superficie de la mayoría de las estrellas, para finalmente evaporar el elemento objetivo. En esencia, se aprovechaba la gran intensidad de esos rayos para hacer algo semejante a lo que el aire le hace al agua cuando la evapora, como vimos al inicio del capítulo 3, pero con mucho más poder.

Cuando el vapor comenzaba a enfriarse, los átomos evaporados se alineaban para finalmente condensarse. Por último, un segundo pulso láser ionizaba los grupos que se iban a estudiar, empujándolos hacia un espectrómetro de masas para su análisis. Kroto propuso apuntar los láseres del AP2 al carbono para recrear las condiciones de alta temperatura de la atmósfera de una gigante roja y estudiar los grupos de carbono presentes en este tipo de estrellas.

Harry Kroto se unió a Smalley y Robert Curl (que también era profesor en la Universidad de Rice) el 1 de septiembre de 1985 y pusieron manos a la obra combinando ciencia, tecnología e ingenio. Realizaron una famosa serie de experimentos que duró once días, todo en la Universidad

de Rice con ayuda de los estudiantes James Heath, Yuan Liu y Sean O'Brien.

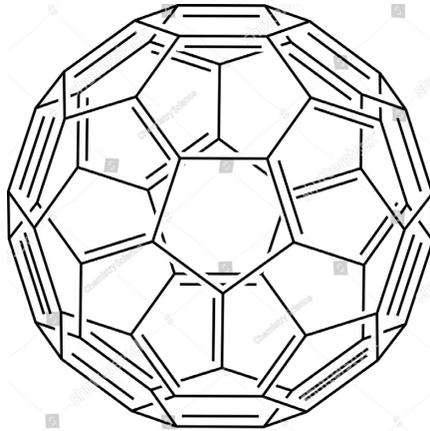
Obtuvieron las largas «serpientes» de carbono que Kroto buscaba, pero, cosas de la serendipia, los estudiantes notaron un pico inusual en el espectro de masas: los resultados mostraban la presencia de moléculas compuestas por 60 átomos de carbono (C₆₀) que se habían formado espontáneamente y en cantidad apreciable. La cantidad era tan alta que indicaba una estructura estable. Pero hasta entonces nadie conocía algo parecido. ¿Qué eran esas estructuras tan extrañas? Aquí comenzaron las conjeturas. La principal idea consideraba una serie de láminas hexagonales de carbono, como las que forman el grafito, pero con todos los enlaces unidos de alguna forma para obtener una forma esférica cerrada. Sin embargo, geoméricamente no hay forma de que hexágonos del mismo tamaño formen una esfera. Smalley tuvo una idea al mirar una pelota, incrustó hexágonos con lápiz y pegamento en la estructura de pentágonos (casualmente, Kroto ese mismo día había hecho a sus hijos una cúpula de papel con pentágonos y hexágonos). El resultado fue un polígono con 60 vértices y 32 caras, de las cuales 12 eran pentágonos y 20, hexágonos. ¡Lo tenía!, había descifrado el enigma del nuevo material.

Llamaron a su macromolécula «buckminsterfullereno», en honor al arquitecto estadounidense R. Buckminster Fuller, muy famoso por aquel entonces por diseñar cúpulas geodésicas con una estructura similar. De ese nombre tan complejo pasó al seudónimo de *buckyball* por su parecido con los balones de fútbol.

La aparición de una nueva forma de carbono, en un mundo que solo conocía el carbón amorfo, el grafito y el diamante, sobresaltó a los químicos y encendió una carrera mundial para comprender sus propiedades. Encontrar una nueva forma altamente estable de un elemento puro es raro en el mundo de la química, de ahí la gran emoción del hallazgo.

El descubrimiento abrió un campo completamente nuevo de estudio químico con aplicaciones prácticas que poco a poco se fueron descubriendo.

La *buckyball* fue la primera de toda una clase de macromoléculas de carbono huecas, con caparazón cerrado, que se conocieron como fullerenos, una familia que se compone de varias formas esféricas que van desde 20 hasta 540 carbonos. El material se convirtió en objeto de una intensa investigación, tanto por su química única como por sus posibles aplicaciones tecnológicas, especialmente en ciencia de materiales y electrónica.



Estructura química del modelo de una molécula de fullereno esférico con fórmula empírica C_{60} .

EL BALÓN MÁS FAMOSO DEL MUNDO NANO

Las abejas son una maravilla. Son insectos que producen la deliciosa miel para endulzar muchos aspectos de nuestras vidas y ofrecer importantes beneficios a la salud de quienes la consumen; cuando extraen el néctar de las flores, realizan la polinización que permite la reproducción de las plantas

y, con una genial capacidad constructora, crean panales en donde habitan, almacenan la miel y protegen a sus larvas.

La arquitectura de los panales no es poca cosa: están hechos con una estructura de hexágonos que embonan perfectamente unos con otros. Lo sobresaliente es que hay otras figuras que podrían servir como base, cuadrados o triángulos, pero no son tan eficientes. La estructura con una mayor capacidad de almacenaje (área) respecto al material necesario para construirla (perímetro) siempre se hará con hexágonos. Esto incluso ha motivado el estudio de matemáticos modernos, quienes demostraron la eficiencia del trabajo de las abejas.

El detalle es que los hexágonos funcionan muy bien para cubrir un plano, o superficies semejantes, pero es imposible cubrir una esfera por completo con hexágonos sin que sobre espacio o se empalmen. Aquí entra en juego la incorporación de pentágonos que «ajustan» los ángulos, para ayudar a disminuir el estrés superficial y cerrar todo en una estructura estable.

De forma aislada, sería un poco difícil explicar cómo se acomodan los hexágonos y pentágonos para formar una esfera, pero, como ya vimos, la forma más simple es bien conocida: el balón de fútbol. En este caso cada pentágono está rodeado por 5 hexágonos y los hexágonos tocan con sus lados a 3 pentágonos y 3 hexágonos; ya en conjunto se forma un arreglo de 12 pentágonos y 20 hexágonos regulares. La *buckyball*, descubierta por Smalley y compañía, tenía esta forma a partir de 60 átomos de carbono.

Posteriormente, se descubrieron otros casos de estructuras cerradas y huecas hechas a base de carbono, conformando la familia de los fullerenos. Además de las esferas, existen casos con forma elipsoide o de tubo. Todos los fullerenos están compuestos de un número par de átomos de C porque agregar un hexágono a una estructura existente significa añadir seis átomos de C.

Conforme los científicos avanzaron en su estudio, se vieron cautivados por sus magníficas características eléctricas, químicas y de resistencia; los *buckyballs*, en particular, destacaron por su potencial como lubricantes y por la posibilidad de usarlos como jaulas para almacenar o transportar otros químicos. Destaca su estabilidad mecánica, ya que su estructura se basa en enlaces covalentes, que son muy firmes. Por ejemplo, su dureza es más alta que el diamante o su ductilidad es 100 veces más fuerte que el acero, todo con el mismo peso. A esto añade una conductividad eléctrica superior a la del cobre.

Por si esto fuera poco, los átomos de carbono se unen a otros elementos con facilidad. Así, es posible modificar la estructura de los fullerenos o acomodar otros átomos a los que pueden unirse para diseñar materiales a la carta. Por ejemplo, son grandes receptores de electrones o se puede aprovechar su condición fotoactiva, es decir, cambian sus propiedades al recibir luz, lo que permite aumentar la eficiencia de las celdas solares que producen electricidad a partir de la luz solar. Aunque, se debe aclarar que su eficiencia es baja en comparación con otros materiales.

Estas estructuras tienen una enorme capacidad para acomodar electrones, lo que los convierte en un catalizador potencial, un agente que acelera las reacciones químicas, aunque para aprovecharlos se debe modificar su estructura para contar con sitios activos para actuar.

La principal desventaja para esta familia de materiales, quizás la razón de que no acabaran inundando el mercado, es lo complicado de su producción.

De todos modos, encontramos alguna aplicación interesante aprovechando el hecho que el material es resistente al desgaste, rechaza la combustión y funciona como excelente lubricante. Puede usarse como membrana de alto rendimiento, como fluido viscoso eléctrico, en filtros de tinta, para recubrimientos de alto rendimiento o recubrimien-

tos ignífugos. En electrónica se ha usado en materiales de memoria, semiconductores, superconductores, diodos, transistores, inductores o en materiales magnéticos (memorias), tinta de impresión, tóner, etc.

Por último, podemos destacar sus aplicaciones biológicas a pesar de su baja solubilidad en medios fisiológicos. Esto es debido a la interesante combinación de algunas de sus propiedades, como son su pequeño tamaño, su hidrofobicidad y su capacidad de transferencia electrónica. Así, los derivados de fullereno solubles en agua pueden servir como antioxidantes en medicina, ayudando a moderar la producción de especies reactivas de oxígeno, o ser útiles contra el estrés oxidativo, interaccionando de manera biocompatible. Esto se consigue mediante su funcionalización, es decir, la capacidad para modificar su superficie con un material biológico.

A pesar de sus prometedoras propiedades y de las grandes expectativas que abrieron con su descubrimiento, apenas existen productos comerciales basados en el fullereno que hayan tenido un impacto significativo.

Quizás el sector donde encontraron el mayor nicho de mercado fue como ingredientes activos para cosméticos, gracias a sus útiles propiedades antioxidativas contra las especies radicales de oxígeno (ROS) o a su excelente potencial como antioxidantes biológicos en compuestos activos para el rejuvenecimiento de la piel. Podemos destacar el uso de los aceites lipídicos C_{60} , este material tiene una carga eléctrica positiva que atrae radicales libres oxidativos cargados negativamente y los neutraliza. Las moléculas C_{60} se absorben a través de la piel y pueden ayudar a neutralizar grandes cantidades de radicales libres oxidantes. Se usan como cremas y ungüentos para la piel en varias afecciones: como antiarrugas, para conseguir una piel más suave y flexible o para sanar más rápidamente las heridas. El C_{60} es lo suficientemente pequeño como para penetrar en las mitocondrias celulares (la parte más «sucia» de la célula) y limpiar

los radicales libres, de forma que la célula tratada recupere su máxima eficiencia. Para que nos hagamos una idea, el C_{60} es 172 veces más efectivo contra los radicales oxidativos que la vitamina C.

Aunque esta forma de carbono no acabó de conquistar el mercado, abrió las puertas a otros alótropos y a la consolidación de las nanotecnologías. Sentaron las bases para el ascenso de los nanotubos de carbono y el grafeno.

UN PASO MÁS ALLÁ: LOS NANOTUBOS

A lo bueno uno siempre se acostumbra fácilmente. Sea en ropa, comida, velocidad de internet o microscopios electrónicos; una vez que probamos algo de calidad, difícilmente nos sentiremos satisfechos con algo inferior. Precisamente eso le ocurrió en 1982 a Sumio Iijima, un investigador japonés de 43 años, cuando regresó a su país después de una estancia de 12 años en la Universidad Estatal de Arizona en Estados Unidos.

El especialista en física del estado sólido investigaba en temas de estructuras cristalinas, materiales de carbono y partículas ultrafinas, para lo que le venía a las mil maravillas el microscopio electrónico de alta resolución de la universidad norteamericana. La calidad del equipo en Arizona era tan buena que Sumio fue la primera persona en la historia en lograr directamente imágenes de átomos de metales.

Iijima siguió su trabajo académico en un centro de investigación en Japón durante los siguientes 5 años, pero se sentía limitado por las condiciones de su laboratorio. Coincidió que en ese momento estaba estudiando la superficie de láminas de silicio, elemento esencial para los materiales semiconductores. Aquí entró en juego NEC, una poderosa corporación de electrónicos con sede en Tsukuba, Japón, que le ofreció integrarse a su equipo científico con una jugosa

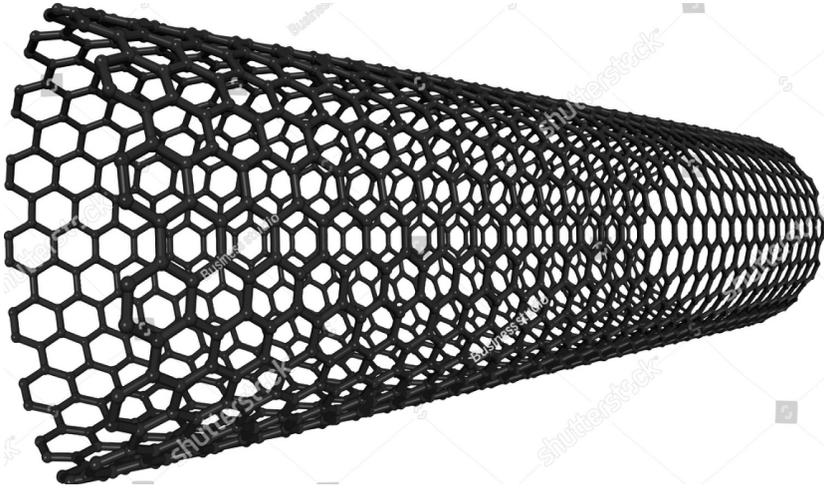
oferta salarial y puso a su disposición un carísimo microscopio electrónico de alta resolución. No dudó en aceptar, era lo que estaba esperando.



SUMIO IIJIMA

En sus primeros años en NEC ayudó a desarrollar microscopios aún más potentes, pero el avance que lo llevaría a la fama llegó en 1991. Sumio trabajaba para obtener imágenes de *buckyballs*. A partir de realizar descargas eléctricas en hollín de carbono, detectó unas estructuras en forma de aguja que no esperaba encontrar. Resultó que estas cosas alargadas eran cilindros hechos de átomos de carbono, los cuales se formaban al mismo tiempo que los fullerenos. Iijima acababa de encontrar los nanotubos de carbono. Sus resultados los publicó en *Nature* y su artículo ha sido citado desde entonces cerca de ¡30.000 veces!, lo que da una idea de la importancia del hallazgo. Al igual que ocurre con las pelotas de carbono, en este caso los átomos establecen enlaces covalentes para formar una red, solo que aquí la estructura era completamente hexagonal y se enrollaba sobre sí misma para crear un cilindro de un nanómetro de diámetro y un

largo considerablemente mayor. Fue un avance mayúsculo, aunque no completamente inesperado.



Modelo de nanotubo de carbono 3D.

Se especula que a inicios de 1950, Roger Bacon descubrió un material similar a los nanotubos de carbono; pero no se pudo comprobar porque no existía ningún microscopio con la suficiente resolución para analizarlos. Eso sí, sus estudios guiaron a las fibras de carbono, material que en 1960 llegó para quedarse. Luego, en la década de 1970, Morinobu Endo obtuvo un tipo de filamentos de carbono que inicialmente parecieron ser los primeros nanotubos de carbono, pero resultaron no ser tales y se les denominó barrelenos. Pasaron otros veinte años para que, en los laboratorios de NEC, Sumio Iijima fuera la primera persona en observar los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT) a partir de una descarga con arco de carbono.

Dos años después, el mismo Iijima junto a Donald Bethune en IBM aislaron nanotubos de carbono de pared simple

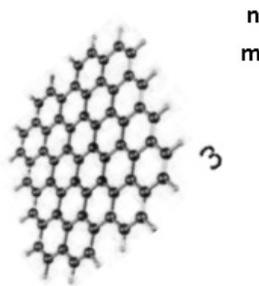
(SWNT), ese descubrimiento atrajo el interés de la comunidad científica. El mismo Richard Smalley participó en el desarrollo de nuevas técnicas para la síntesis de los SWNT, dado que era hartamente complicado sintetizarlos. Lo único que se sabía es que se necesitaba un catalizador metálico, como, por ejemplo, hierro, cobalto o níquel. Smalley descubrió que al impregnar estos metales en las barras de grafito que utilizaba para fabricar el C60 se generaban SWNT en forma de cuerdas que contenían más de cien nanotubos individuales. Entre 1993 y 2005, Smalley fue perfeccionando la técnica hasta llegar a producirlos en solución. En sus últimos días, ya agonizante de leucemia, aún se interesaba por los progresos en este campo sugiriendo nuevas ideas y experimentos, un científico sin duda especial.

A diferencia de su hermano mayor (los fullerenos), muchas de las expectativas que crearon estos finos tubos sí que se cumplieron. A día de hoy destacan por sus propiedades electrónicas, mecánicas, ópticas y químicas y ya se están usando en diversas aplicaciones comerciales, con un mercado estimado mundial de casi 10.000 millones de dólares para 2025 (en 2019 fue de 3.857 millones).

¿QUÉ HACE TAN ESPECIAL A LOS NANOTUBOS DE CARBONO (CNTS)?

Esta especie de pajillas a escala nano son también moléculas completamente huecas compuestas únicamente de carbono con una estructura hexagonal y una distancia entre los carbonos de únicamente 0,14 nm. Destacan por su gran relación de aspecto, es decir, la proporción entre su longitud (que puede alcanzar las micras) y su diámetro (de apenas un nanómetro). Esto significa una relación de 1:1.000, en la que el ancho es tan pequeño respecto al largo que casi se consideran unidimensionales.

Como ya habíamos dicho anteriormente, existen dos formas de CNT, los de paredes múltiples (MWNTs, aislados en 1991) y los de pared simple (SWNTs, aislados en 1993). Los MWNT son cilindros huecos que se forman a partir de varias hojas de grafeno enrolladas. Los SWNTs tienen únicamente una capa que se enrolla para obtenerlos en un cilindro simétrico, solo tienen un número limitado de direcciones donde los átomos coinciden para poder cerrarse. El vector que apunta desde el primer átomo para cerrar la estructura hacia el último se llama vector quiral y su longitud es igual a la circunferencia del nanotubo. La dirección del eje del nanotubo es perpendicular al vector quiral (vector nm de la figura adjunta), el cual determina la quiralidad del tubo; esta, a su vez, define sus propiedades ópticas, mecánicas y eléctricas.



Los MWNTs, en cambio, se componen de varios tubos SWNTs concéntricos con una separación entre capas de aproximadamente 0,3 nm. Sus diámetros varían entre 2,5 a 100 nm (los SWNT van de 0,6 a 2,4 nm). Los MWNTs tienen más defectos estructurales, son menos estables y sus propiedades varían respecto los SWNTs.

Respecto a su síntesis, la cual es extremadamente importante para marcar su comportamiento, los nanotubos de carbono se producen básicamente por tres técnicas, la descarga

eléctrica por arco, la ablación con láser y la deposición química de vapor o CVD, la cual produce una mejor calidad.

La descarga por arco eléctrico es la forma más común y, quizás, más fácil de producir CNTs. Los nanotubos se sintetizan mediante la vaporización de un gas en un arco eléctrico generado entre dos barras de carbono colocadas de extremo a extremo. Un problema de esta técnica es que produce una mezcla de componentes y requiere separar los nanotubos del hollín y del catalizador metálico presente en el producto bruto. Por otra parte, en la técnica de ablación por láser, un rayo láser de alta potencia se proyecta sobre un gas, metano o monóxido de carbono, produciendo una pequeña cantidad de nanotubos. Esta técnica para producir nanotubos se descubrió en 1995 en el laboratorio de Smalley.

Por último, en la deposición química en fase de vapor (CVD) se usa una fuente de carbono en fase gaseosa, generalmente metano, monóxido de carbono y acetileno, que se transforma en una molécula de carbono gaseoso gracias a la energía aportada por un plasma o una bobina calentada resistivamente. La fuente se usa para romper la molécula y obtener carbono atómico, que se difunde hacia el sustrato, se calienta y se recubre con un catalizador, por ejemplo, un metal de transición como Ni, Fe o Co. De esta forma, se crearán nanotubos de carbono si se mantienen los parámetros adecuados. Con el catalizador adecuado se pueden obtener selectivamente o nanotubos tipo SW o MW. Los rendimientos del proceso no superan el 30 %. Es la técnica más adecuada para producir nanotubos de carbono y es una técnica en continua mejora.

Los nanotubos de carbono también ofrecen una serie de propiedades poco usuales que incluso mejoran las de los fullerenos. Por ejemplo, presentan una conductividad térmica y eléctrica magnífica, por encima de las propiedades térmicas del diamante o la conductividad del cobre. Debemos aclarar que su conductividad eléctrica depende de nuevo de su

vector quiral, pudiendo comportarse como materiales semiconductores o metálicos. Además, presentan una resistencia mecánica muy superior a la del acero y, en general, son muy flexibles debido a su gran longitud.

Anteriormente, comentamos la importancia de los métodos de síntesis, los nanotubos tienden a aglomerarse y, si no tienen una alta pureza, pierden sustancialmente sus propiedades. De todos modos, sus excelentes características han llevado a que cada vez existan más productos con nanotubos de carbono.

Todo esto lleva a prometedoras aplicaciones industriales, algunas ya consolidadas en el mercado. Así, en los últimos 10 años su actividad comercial ha tenido un crecimiento sustancial con un aumento del 1000 % en su producción mundial.

Los nanotubos se usan ampliamente en electrodomésticos, automóviles, polímeros, defensa, energía, electrónica, etc. Sus bondades los han llevado a reemplazar al acero en diversos electrodomésticos. También se utilizan en las palas de sistemas de turbina para mejorar la resistencia mecánica, en pantallas de visualización de televisores, en teléfonos móviles, en componentes de aviones y en varios productos más.

Quizás podemos destacar su participación en el sector de la electrónica con productos como teléfonos inteligentes, televisores OLED, tabletas o en electrodos en baterías y condensadores, proporcionando más corriente, mejor estabilidad eléctrica y mecánica respecto a otros materiales. También los encontramos en el empaquetado, en impresión, en materiales compuestos avanzados o pilas de combustible.

En aspectos relacionados con el medio ambiente, se usan en purificadores de agua, gracias a que combinan su minúsculo tamaño con una gran área superficial y alto potencial de adsorción, lo que les permite servir como membrana para filtrar productos químicos tóxicos, sales disueltas y contaminantes biológicos del agua. También podemos destacar aplicaciones que aprovechan una de sus principales propiedades:

la alta resistencia mecánica específica, esto hace que estén presentes en equipación deportiva (como raquetas o bicicletas) y en las carrocerías de vehículos, entre otros ejemplos.

Por último, este material está cada vez más presente en el mundo de la medicina, tal y como veremos más adelante. Se pueden encontrar en vehículos para la liberación controlada de fármacos, aumentando su eficiencia y disminuyendo su difusión y sus efectos secundarios; en ingeniería genética para manipular genomas; en mejores sistemas de detección; para bioimagen, proteómica e ingeniería de tejidos, ya que son un excelente vector en terapia génica, la terapia que repara los genes de células dañadas para luego reinsertarlas en el organismo. El futuro de la medicina irá ligado al avance de los nanotubos de carbono, las expectativas son inmensas, destacando la evolución de las máquinas moleculares y los nanorrobots, sin duda alguna, el aspecto más apasionante para el futuro de las nanotecnologías.

Smalley, muchos años antes, vio su increíble potencial, aunque lastimosamente no alcanzó a ver cómo acabaron evolucionando. A modo de anécdota, les compartimos la forma en que los nanotubos de carbono lo impactaron. Smalley se marcó el objetivo, casi obsesivo, de algún día entrelazar millones de nanotubos para formar largos cables de transmisión eléctrica mucho más ligeros, fuertes y eficientes que la red eléctrica común. Así, inició el proyecto del cable cuántico, «un cable continuo de *buckytubs* que esperamos que conduzca la electricidad 10 veces mejor que el cobre, tenga tan solo un sexto de su peso, un coeficiente cero de expansión térmica y una resistencia mayor que la del acero. Si tenemos éxito, podremos recablear el mundo...».

No pudo acabar este proyecto, pero sentó las bases con su mayor obra, la consolidación de las nanotecnologías, y no solo por el mágico descubrimiento de los *buckyballs*, sino que fue uno de los personajes clave en ver que este con-

junto de tecnologías serían fundamentales en el futuro de la humanidad.

Creía tanto en el potencial de las nanotecnologías que fue uno de los padres de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI), el programa más ambicioso de la historia de investigación de las nanotecnologías. Aprovechó su fama y poder de persuasión para convencer, primero, en 1999, al presidente Bill Clinton y, después, al presidente Bush para realizar una inversión multimillonaria en este programa.

«Estos pequeñísimos objetos, así como la tecnología que los crea y los manipula —la nanotecnología—, revolucionará nuestras industrias y nuestras vidas», declaró ante la Cámara de Representantes de los Estados Unidos en 1999. Smalley, un hombre bajo y fuerte, con una barba incipiente, un agudo sentido del humor y una afinada inteligencia, utilizó su renombre como una plataforma para evangelizar y aumentar la inversión en la educación e investigación en nanotecnologías. Sin duda alguna, ayudó a llevar al mundo de las nanotecnologías a su fase de consolidación.



7

La fiebre de las nanotecnologías (o las nano conquistan el mundo)

La tarde del domingo había sido muy intensa. Primero, habíamos tenido una partida familiar de Monopoly, un juego que inicias con una suma de dinero y, combinado con un poco de suerte, te permite comprar diferentes propiedades. El objetivo es convertirse en el líder inversor del juego, lograr un monopolio de bienes. A la intensa sesión de Monopoly le siguió una aventura de Lego, donde pieza a pieza construyes la estructura que deseas; tu inspiración y la cantidad de bloques son el límite para crear maravillosas edificaciones.

Es curioso, pero ambos juegos me recordaron a las nanotecnologías. En primer lugar, su consolidación ocurrió gracias a inversiones en todo el mundo, sin dinero no hay ciencia ni, mucho menos, tecnología. Todo el mundo quiere ganar la carrera de la innovación. Pero esta competencia no se gana sin construir —pieza a pieza—, una base sólida que la consolide, de lo contrario, el edificio se derrumba. Además, para

construir estructuras inéditas necesitas muchas piezas especializadas, has de invertir en nuevos Legos. A fin de cuentas, ¿qué tecnología construye bloque a bloque, átomo a átomo, si no son las nanotecnologías (NT)?

LA PRIMERA INICIATIVA NACIONAL: DE LAS INVERSIONES A LA CONQUISTA

Desde las décadas de los 80 y 90, varios hitos comenzaron a dar forma al campo de las nanotecnologías, sin embargo, fue necesaria la labor de personas clave para definir las y consolidarlas, personas como Mihail Roco, Jim Murday o el mismo Richard Smalley.

Roco, profesor de ingeniería mecánica en la Universidad de Kentucky, en 1990 llegó a la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos (NSF por sus siglas en inglés) como director de programa para los Procesos de Partículas y Fases Múltiples en la División de Sistemas Químicos y de Transporte. Allí comenzó a organizar actos y charlas que hablaban de materiales de una escala «pequeña». Al ver el interés que despertaban, formó un comité informal para potenciar y discutir sobre el campo. Este comité, que incluyó a James Murday, del Laboratorio de Investigación Naval, Paul Alivisatos, de la Universidad de California (Berkeley), y Stan Williams, de Hewlett Packard, desarrolló la primera definición sobre nanomateriales a partir de los documentos existentes en el tema: «...Sus propiedades químicas y físicas son diferentes de las de los materiales a granel solo en la medida en que sus dimensiones imponen características especiales».

En 1997, Roco y otros investigadores crearon la Asociación de Nanotecnología, precedente de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI), para promover la formación de un nuevo campo científico interdisciplinario basado en las NT. La asociación tuvo una gran respuesta, lo que llegó a los oídos

de Tom Kalil, asistente económico del presidente Clinton, quien contactó con Mihail Roco para proponerle liderar un grupo de trabajo sobre el tema. En 1999, la carrera de las NT estaba liderada por Europa, Japón y EE. UU. con inversiones similares que rondaban los 120 millones de dólares anuales. A inicios de ese año, Tom Kalil y Neal Lane solicitaron a Roco que participara en una propuesta que sería presentada por Clinton en el congreso de los EE. UU. El presidente buscaba consolidar su legado con una gran iniciativa científica, aprovechando el superávit existente del presupuesto nacional del momento.

El 11 de marzo de 1999, Roco tuvo únicamente 10 minutos para presentar la iniciativa ante el Congreso. Su discurso fue un éxito y se inició el trabajo para articular una estrategia nacional (la NNI) con base en algunos temas prioritarios: medio ambiente, salud y seguridad. Además, se incluyó una sección específica sobre las posibles implicaciones y los problemas sociales que podrían resultar de las NT. Con un discurso histórico y quizás artificial que invocó el legado de Feynman, tal y como vimos en el capítulo 4, el presidente Clinton²² anunció la NNI el 21 de enero de 2000. El presupuesto inicial fue de 464 millones de dólares; por cierto, casi de inmediato fue igualado por Japón. El informe abreviado que se presentó no incluía las implicaciones de los nanomateriales para el medio ambiente y la salud, alegando que no había evidencia de efectos adversos. Pero sí que se incluyeron los asociados con aspectos legales y económicos.

No incluir ciertos aspectos fue un riesgo importante,

22 El presidente Clinton rindió homenaje a Feynman en su visión de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología: «Caltech no es ajeno a la idea de la nanotecnología, la capacidad de manipular la materia a nivel atómico y molecular. Hace más de cuarenta años, el propio Richard Feynman en Caltech preguntó: “¿Qué pasaría si pudiéramos organizar los átomos, uno por uno, de la forma en que deseemos?”». (Clinton, 2000).

Engines of Creation —el libro de Drexler anteriormente comentado— tuvo un gran eco en la opinión pública, especialmente llamó la atención el concepto de las apocalípticas máquinas defectuosas o dañadas (la plaga gris) que podrían replicarse sin control y destruir la vida en la Tierra.

Por si esto fuera poco, en 2002 Michael Crichton, autor de *Jurassic Park*, publicó *Prey*, una novela protagonizada por un enjambre de nanopartículas «inteligentes» que se salió de control y que Warner Bros. compró los derechos para realizar una película con la historia. Así, existía una amenaza latente de que una reacción social negativa pudiera detener el despegue de las NT en un momento crucial. Y es que el runrún que generó la posibilidad de nanopartículas autorreplicantes fuera de control llevó incluso al príncipe Carlos de Inglaterra a solicitar una evaluación sobre posibles amenazas de las nanotecnologías a la Royal Society del Reino Unido.

Era el momento crucial para convencer a los congresistas de brindar su apoyo a la iniciativa. Se requirió el apoyo de personajes clave, quizá el caso más destacado y emotivo fue el de Richard Smalley. El ganador del Premio Nobel padecía leucemia y se presentó a defender la propuesta bajo los devastadores efectos de la quimioterapia, débil y sin cabello. Con toda la pasión que le caracterizaba, describió cómo las NT resultarían esenciales en el futuro en terapias dirigidas contra el cáncer que eliminarían los efectos secundarios como los que él padecía. Su presentación fue absolutamente poderosa y convincente. Este y otros testimonios ayudaron a convencer al Congreso para considerar la Ley de Investigación y Desarrollo de la Nanotecnología, que fue presentada por el senador Ron Wyden el 16 de enero de 2003 y que garantizó el apoyo federal a largo plazo para la NNI.

El proyecto de ley fue aprobado por el Senado el 18 de noviembre de 2003 y lo enviaron a la Cámara de Representantes al día siguiente. La Cámara aprobó la propuesta después de solo 40 minutos de debate con una votación de 405-19. El 3

de diciembre de 2003, el presidente George W. Bush firmó el acto en la Ley Pública 108-153. Richard Smalley fue el único de los creadores originales de la NNI invitado a asistir al evento, no se invitó ni a Mihail Roco.

Un punto sobresaliente del lanzamiento de la nueva ley es que contempló «garantizar que las preocupaciones sociales éticas, legales, ambientales y de otro tipo se consideren durante el desarrollo de las nanotecnologías». Se pidió realizar un estudio sobre autoensamblaje molecular y su viabilidad como herramienta de fabricación a escala molecular y otro sobre el desarrollo responsable de las NT. El estudio de fabricación molecular estaba basado en evaluar la necesidad de responsabilidades regulatorias y estrategias para el lanzamiento de nanomáquinas o dispositivos autorreplicantes en entornos naturales, lo que implica una clara influencia de los *best sellers* comentados.

A la luz de las malas experiencias de décadas previas respecto la resistencia pública a la biotecnología y a los organismos modificados genéticamente (transgénicos), los promotores de la NNI experimentaron una especie de «fobia a la nanofobia». Desde un inicio, la NNI contempló un apartado de aspectos sociales y comunicación pública de la ciencia, pero en 2005 este compromiso se hizo manifiesto a una escala mayor: la NSF lanzó una convocatoria para un proyecto de colaboración entre divulgadores e investigadores para crear una red nacional capaz de promover la comprensión y el compromiso público con las NT. Se otorgó un apoyo de 20 millones de dólares, el más grande para un proyecto de divulgación en la historia de la NSF, a una coalición de museos de ciencias distribuidos en todo el país liderado por el Museo de Ciencias de Boston, el Exploratorium de San Francisco y el Museo de Ciencias de Minnesota.

A través de un acuerdo cooperativo de 5 años, se creó la Nanoscale Informal Science Education Network (NISE Net), proyecto que —con un nuevo apoyo de más de 20 millones

de dólares— se renovó para extenderse 5 años más en 2010. Hasta la fecha, cientos de museos de ciencia y otras organizaciones de educación científica no formal han participado en las diferentes actividades de la NISE Net; incluso, gracias a que todos sus materiales se publican en español, su aporte tuvo una importante influencia en instituciones educativas de toda Iberoamérica. A diferencia de las complicaciones que se vivieron con otras tecnologías en el pasado, esta postura proactiva permitió involucrar a la sociedad en una discusión que logró crear una perspectiva favorable de las NT.

LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL DEL SIGLO XXI

A pesar de algunas voces críticas, las NT llegaron para quedarse con un despegue fulgurante y definitivo. El siglo XXI veía el nacimiento de una nueva revolución industrial y esta venía de la mano de una inversión sin precedentes en naciones de todo el mundo. Entre 2000 y 2012, 60 países crearon una iniciativa nacional propia en materia de NT. La difusión de las iniciativas de nanotecnología fue extraordinaria, ya que se produjo en un período de tiempo muy breve. ¿Por qué ocurrió esta rápida adopción de estrategias nacionales en un grupo tan diverso de países? Semejante expansión desconcertó a expertos en ciencias políticas y negocios, quienes hubieran aventurado la adopción de acciones similares a la NNI en unos pocos líderes en tecnología, tipo Japón, China o Europa, a los que poco a poco se les unirían más países, una vez que la nueva tecnología se pusiera de moda. Pero esto no fue así, cuando las Naciones Unidas anunciaron, en 2005, que las NT eran esenciales para el desarrollo, la mayoría de los países latinoamericanos adoptaron una iniciativa nacional en la materia en los siguientes años. Aquí destaca Brasil, que concentra el 50 % de la producción académica del continente en NT. Todo el mundo se quería subir a la

ola nano, una tendencia que clamaba que «la nanotecnología sería revolucionaria en un sentido social y económico, así como científico y tecnológico».

Cómo es lógico, hubo algunos focos en este rápido crecimiento. China designó a la investigación y desarrollo (I+D) en NT como uno de los doce megaproyectos de su plan de desarrollo a medio y largo plazo 2006-2020. La situación es lógica cuando sabemos que el director de las Academias de Ciencia de China es nanotecnólogo. Otro foco fue Europa que, independientemente de las iniciativas propias de algunos países, a partir de 2004 creó la European strategy for nanotechnology. Fue ese mismo año cuando los ojos de todo el mundo interesado en NT miraron hacia Europa por un hito que haría explotar el impacto de las NT, consolidándolas como la «nueva revolución del siglo XXI». Se descubrió una nueva y versátil estructura de carbono, el grafeno.

UN CIENTÍFICO CON ESPÍRITU DE NIÑO

El otro día charlaba con mi hijo Rubén, de solo 4 años, y me sorprendió su avidez por entender todo lo que le rodea. Tiene una interminable metralleta de «¿por qué?» para intentar entender su entorno. Siempre he pensado que todos nacemos con un espíritu científico, un impulso innato para el descubrimiento: queremos comprender por qué ocurren las cosas y de qué están hechas.

A través de juegos, buscamos respuestas a la vez que experimentamos, aprendemos y creamos. La maravillosa combinación de curiosidad e imaginación nos lleva a explorar el mundo, lo mismo dejando caer un juguete o empapando nuestra mano con agua, para ver qué ocurre. Por azares del destino, y a veces imposiciones de la escuela, muchas personas olvidan esta esencia científica conforme crecen; pero hay algunos personajes que jamás pierden el afán de inda-

gar, experimentar, crear y jugar. Este es el caso de Andréi Konstantinovich Geim (Andre, para los amigos).

Un viernes por la tarde —cuando la electricidad era más barata—, en la ciudad de Nimega, Países Bajos, Geim desarrolló un experimento peculiar. Era 1997 y el físico ruso de 38 años llevaba más de dos décadas trabajando en diamagnetismo, el fenómeno por el que algunos materiales repelen los campos magnéticos. Fiel a su espíritu juguetón, Andre decidió divertirse un rato: vertió una botella de agua sobre un potente imán de laboratorio. El ridículo experimento funcionó de forma espectacular, el agua «levitaba», por lo que siguió jugando con una rana y un hámster, con el mismo resultado: todos acabaron «flotando».



ANDRE GEIM

Entusiasmado con sus hallazgos, documentó el procedimiento y los resultados al detalle para publicarlos en la *European Journal of Physics*. Gracias a la combinación de ideas interesantes y divertidas, el artículo se convirtió en un éxito: hasta la fecha ha sido citado más de 500 veces por otros científicos. En 2000, su aporte le sirvió para ganar un Premio Ig Nobel, galardón que se entrega de forma anual en la Universidad de Harvard para reconocer aportes que «primero hacen reír a la gente y luego la hacen pensar». El Ig

Nobel es una parodia del Nobel, premio que el propio Geim ganó años después, convirtiéndose en el único científico en la historia en recibir ambos reconocimientos.

Desde entonces, la forma de trabajar de Andre apuesta por la idea del experimento *Friday Night y el espíritu del niño*. Su alegría, compromiso y apego a la ciencia como aventura quizás fueron las razones que atrajeron a su compatriota Kostya Novosiólov al laboratorio de Geim. Y marcaron, sin duda alguna, el camino que los llevó desde el azar al Premio Nobel.

Desde la década de 1930, se había predicho la existencia de una nueva estructura a base de carbono, con solo un átomo de grosor y propiedades extraordinarias, el grafeno. Sin embargo, nadie había logrado aislar este material y muchos dudaban de que fuera posible. Tuvo que presentarse un poco de serendipia, como con la *buckyball* de Smalley, para conseguirlo; una brillante casualidad que ya es parte de la leyenda científica. Quizás ayudó que fuera una tarde de viernes cuando se realizó el famoso descubrimiento...

En 2004, el dúo de científicos rusos trabajaba en la Universidad de Mánchester sobre la hipótesis de que el grafito podía usarse como material base para crear transistores. El objetivo era encontrar una alternativa al silicio para desarrollar estos dispositivos esenciales para la electrónica. Parecía que sus esfuerzos eran en vano cuando, a punto de renunciar a esta línea de trabajo, vieron que los especialistas en microscopía de fuerza atómica usaban una variedad de grafito mucho más pura y cara que el grafito convencional: el grafito orientado pirolíticamente (HOPG). Esta variedad del material permite obtener al instante capas atómicamente planas y sirve como sustrato para depositar otros materiales que se desea analizar. Es un tipo de grafito obtenido a alta temperatura (2000 °C) con muy pocos defectos en la superficie.

UNA CINTA DETRÁS DE LA REVOLUCIÓN DEL «PANAL DE ABEJA»

Aquí fue donde entró una estrategia genial en su simpleza. Geim y Novosiólov usaron cinta adhesiva, tipo scotch, para repetidamente desprender capas del material; lo que se conoce como clivar la muestra. Su idea era un poco alocada, pero —tal y como dijo Novosiólov— una idea lúdica se puede quedar en una broma o puede transformarse en algo importante, todo depende de la intuición científica. Copiaron la técnica de los microscopistas que la usaban como método para preparar sustratos, lo que está claro es que jamás imaginaron los microscopistas que, en este proceso común, desechaban un material tan maravilloso, todo un material merecedor del Nobel.

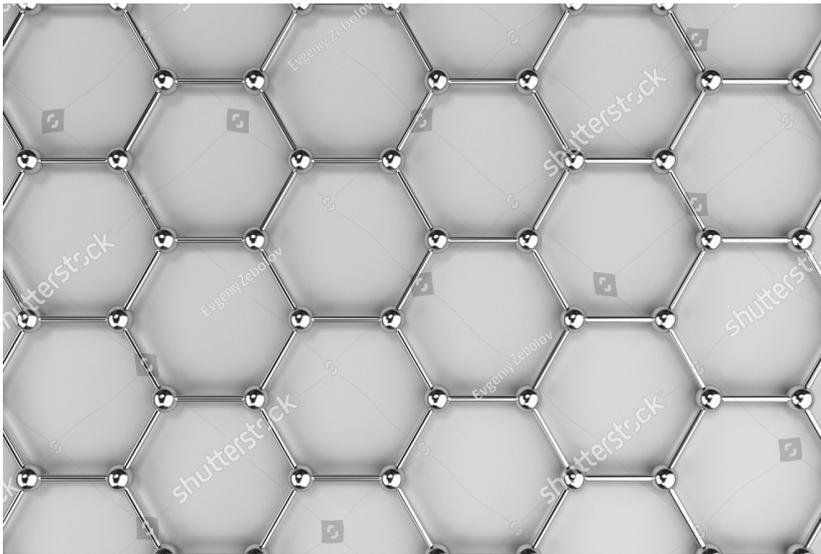
El equipo ruso logró aislar una red hexagonal —estructura semejante a un panal de abejas— de átomos de carbono con una sola capa atómica de grosor. ¡Demostraron la existencia del grafeno! Y el paso clave que llevó su trabajo al nivel del prestigioso Nobel fue encontrar una forma de transferir las escamas ultradelgadas de grafeno —obtenidas de la cinta adhesiva— a una oblea de silicio, el material clásico de los microprocesadores.

A partir de este avance, lograron observar y explorar las extraordinarias propiedades del grafeno, tal como comentaron los protagonistas: «La emoción existiría incluso sin estas propiedades inusuales, porque el grafeno era el primer material bidimensional...». Y es que descubrieron que sí que tenía características sin par: fuerza milagrosa, ligereza, flexibilidad y alta conductividad, todo concentrado un fino material 2D.

Por cierto, en 2004, el primer artículo con los resultados de Geim y Novosiólov fue rechazado por la revista *Nature*, «porque no suponía un avance significativo...». No es algo fuera de lo común, muchos grandes científicos han tenido problemas al intentar publicar los avances que eventualmente los

hicieron célebres. La clave está en no perder el ánimo y buscar publicaciones con la visión adecuada: el mismo año que *Nature* los rechazó, *Science* publicó su trabajo. Esto nos hace ver que los avances científicos no pueden acotarse a las dictaduras de algunas revistas, siempre hay otros horizontes para darlos a conocer.

En 2010, tan solo 6 años después de esta primera publicación sobre el grafeno, sus descubridores recibieron el Premio Nobel de Física. El comité que concedió el galardón a Geim y Novosiólov ilustró el avance de la siguiente manera: «Una fina escama de carbono ordinario, de solo un átomo de espesor, una forma tan plana que tiene propiedades excepcionales que se originan en el notable mundo de la física cuántica».



Representación de una estructura atómica de grafeno.

Para que nos hagamos una idea de su impacto, en 2014, apenas diez años después de descubrirse, la Unión Europea decidió invertir en la iniciativa Graphene Flagship la cantidad más alta en su historia en un material: mil millones de euros para el periodo 2014-2020. El objetivo es desentrañar las propiedades y aplicaciones de este minúsculo y magnífico material. ¿Por qué la Unión Europea decidió apostar «todo al rojo» con el grafeno? ¿Qué motivó al comité del Nobel a reconocer a dos extravagantes científicos rusos por un descubrimiento tan reciente?

Contado de forma simple, el grafeno es un material superlativo. Se trata de la sustancia más delgada y más fuerte conocida por la ciencia, para la misma masa es aproximadamente 100 veces más fuerte que el acero. Para hacernos una idea de lo fino que es, solo un átomo de espesor, una lámina de grafeno es mil veces más delgada que una hoja de papel. Además, el grafeno es un buen conductor de electricidad, flexible, casi transparente, superconductor y conduce el calor mejor que cualquier otra sustancia conocida. Por si esto fuera poco, actúa como una barrera para uno de los átomos de gas más pequeños, el helio y, sin embargo, permite el paso del vapor de agua.

UNA CAPA BIDIMENSIONAL EXTRAORDINARIA

El grafeno es el tercer hermano de la familia del «carbono nuevo», después de los fullerenos y los nanotubos de carbono. Como en los cuentos de hadas, el tercer lugar es muchas veces el mejor. Y es que es el material que muestra con más claridad cómo el acomodo de los átomos puede producir propiedades increíblemente diferentes y sorprendentes. El carbono es uno de los elementos más abundantes en el planeta y, gracias a su capacidad de enlazarse, es un elemento fundamental de la vida en la Tierra, la base de todo,

forma parte desde el ADN hasta del petróleo. Sus átomos tienen la capacidad de unirse a muchos elementos diferentes mediante 4 enlaces covalentes (en los que los átomos se enlazan al compartir electrones).

A pesar de sus propiedades sorprendentes, el grafeno no es un material tan alejado de nosotros. El grafito, presente en los lápices, está formado por un gran número de láminas de este material. Se estima que 1 mm de espesor de grafito contiene alrededor de tres millones de capas de grafeno. Dichas hojas están unidas unas a otras gracias a fuerzas eléctricas de poca intensidad, llamadas fuerzas de Van der Waals. Ambos materiales, grafito y grafeno, muy similares en teoría, tienen propiedades tan diferentes que demuestran los drásticos cambios entre las estructuras del mundo nano y sus homólogas del mundo macro.

El grafeno se considera el primer material en dos dimensiones (2D) del mundo porque su grosor es prácticamente despreciable respecto a sus otras dimensiones. Los carbonos se distribuyen perfectamente en una red hexagonal con solo 0,3 nm de espesor y 0,1 nm entre cada átomo. Gracias a la perfecta unión química de sus átomos, el material está prácticamente libre de defectos. A la vez, gracias a sus flexibles enlaces, la red puede estirarse hasta un 20 % más de su tamaño original.

Los electrones pueden viajar largas distancias en grafeno sin perturbaciones. En los conductores normales, hay una resistencia a las corrientes eléctricas debido a que los electrones a menudo pierden energía cuando rebotan en su estructura, debilitando el rendimiento del material. En el grafeno, gracias a su comportamiento ondulatorio, los electrones se mueven como si no tuvieran masa y avanzan al impresionante ritmo de mil kilómetros por segundo.

Respecto a sus propiedades mecánicas: el grafeno es uno de los materiales más duros y fuertes existentes, superando la dureza del diamante y la resistencia del acero, más de 200

veces en ambos casos. Su rigidez es extraordinaria, soportando grandes cargas sin apenas deformarse, acompañado del hecho de tener gran capacidad de flexión, es decir, se puede doblar sin que se rompa. Tal y como informó la Fundación Nobel cuando se otorgó el Premio a Geim y Novosiólov, «si imaginamos una hamaca cuadrada de grafeno, tan fina como un hilo, atada a dos árboles, esta podría soportar el peso de un gato de 4 kg, a pesar de que la capa pesaría únicamente 0,77 mg, es decir, poco más que uno de los bigotes del gato».

El maravilloso material con «estructura de panal» está llamado a cambiar para siempre el mundo de las telecomunicaciones y los productos electrónicos superrápidos. A su vez, debido a su rigidez y ligereza, sirve para crear nuevos tipos de objetos ligeros, flexibles y fuertes, desde aviones hasta raquetas de tenis y pantallas táctiles.

Las 8 áreas más importantes donde existen o existirán aplicaciones relacionadas con el grafeno son las siguientes: a) textil inteligente, b) aeronáutica y tecnología espacial, c) energía, d) materiales compuestos, e) sensores, f) fotónica y optoelectrónica, g) tecnologías biomédicas y h) electrónica.

REGRESO AL FUTURO IV: GRAPHENE VALLEY

«¿Qué te pasa McFLY? ¿Acaso eres un gallina?». Una frase inolvidable de una película clásica de la década de los 80, *Regreso al futuro* (o *Volver al futuro*, como se la conoce en México). Así era como diferentes personajes retaban al protagonista, Marty McFly, a realizar todo tipo de acciones locas, porque Marty sería cualquier cosa, pero nunca un gallina.

Ahora imaginemos que su mentor, el Dr. Emmett Brown, le pide realizar un último viaje a bordo del mítico DeLorean para cumplir una nueva misión en el año 2050. A su regreso, además de discutir la forma en que alcanzó sus objetivos, el

joven vuelve entusiasmado por mostrarle al estafalario científico las maravillas que encontró en el reino del grafeno.

Doc: Marty, ¿qué llevas en la muñeca?

Marty: Es un dispositivo electrónico portátil que me ayuda a resolver todo tipo de problemas, Doc. Combina las excelentes propiedades electrónicas y mecánicas del grafeno para crear un ordenador portátil, una navaja suiza (con rayos láser), un teléfono e incontables artilugios que caben en la palma de mi mano.

Doc: ¿Y ese traje?

Marty: Me queda genial, ¿verdad? Se adapta a las condiciones del entorno y mide diferentes signos vitales, se llama tejido inteligente.

Doc: Por lo que veo, está todo lleno de interconexiones para la comunicación de datos, hasta pantallas y recubrimientos. Deben haber desarrollado diferentes materiales para lograr tantos avances en la indumentaria.

Marty: Es solo grafeno, Doc. Desde los revestimientos antiestáticos y anticorrosión hasta compuestos ultrarresistentes y ultraligeros, no pesan casi nada y son más resistentes que el acero. Si quieres te enseño más cosas, el grafeno estaba en todas partes.

Doc: Perfecto Marty, vamos a verlo.

Marty: Por ejemplo, los plásticos en el futuro son más resistentes y conductores, gracias a que los mezclan con un 1 % de grafeno; además, aguantan más el calor con solo una milésima parte de grafeno. A propósito, tengo una sorpresa para ti, Doc.

Doc: ¿Qué hiciste, Marty? Recuerda que no es bueno jugar con cosas que puedan alterar el futuro o saber demasiado de lo que nos pasará.

Marty: No es nada de eso, Doc. Observa el DeLorean: lo he modificado. El chasis ahora está hecho de plástico recubierto con grafeno, más resistente, flexible y ligero. El com-

bustible es más eficiente, gracias a los catalizadores base-grafeno y los filtros más eficientes.

Doc: Por los bigotes de Einstein, ¡qué, maravilla!

Marty: Y hay cosas mejores, pero no las pude adaptar al DeLorean. Los coches eléctricos ahora se cargan en minutos con energía que los puede llevar a más de 1.000 km de distancia. Pero los avances no se quedan en los coches: aviones y naves espaciales ahora son mucho más ligeros y eficientes gracias a que se sustituyeron las fibras de carbono de las carcasas por grafeno.

Doc: Marty, ¿qué es ese pitido?

(Ambos se giraron al ver una calcomanía situada en el brazo de Marty).

Marty: Con la emoción me ha subido la presión. Tuve un pequeño accidente y terminé en el hospital. Allí me insertaron unos sensores integrados en la piel que, entre otras cosas, miden la presión arterial. Incluso me dijeron que, por su potencial para unir biomoléculas, el grafeno está allanando el camino para diagnósticos y tratamientos médicos novedosos.

Doc: Casi me estás convenciendo a ir a ver todo con mis propios ojos y hasta hacer algunas pruebas. ¿Es qué ese material no conoce límites?

Marty: No tengo ni idea hasta dónde puede llegar, Doc. Pero también lo vi en envases inteligentes para alimentos: envases que monitorean si los alimentos siguen en buen estado. Ah, también hay artilugios para detectar la contaminación, medir al instante cambios de temperatura en el cuerpo, variaciones de pH o de compuestos químicos. Y, además de ser cosas útiles y ligeras, son muy baratas, Doc. Imagina lo que podríamos ganar si trajéramos algunas de estas cosas y las vendiéramos.

Doc: Marty, sabes mejor que nadie que no hice la máquina del tiempo para hacerme rico, si estoy intrigado es por curiosidad científica de todo lo que se puede lograr.

Marty: Doc, quiero enseñarte más cosas, ven conmigo.

(Ambos subieron al coche. Marty apretó un botón que convirtió el vidrio frontal del coche en una gran pantalla, mostrando un vídeo del joven entrando en una casa).

Doc: Marty, esa casa es magnífica.

Marty: Sí, Doc, su pintura también contiene grafeno, actúa como anticontaminante y, además, nos permite tener edificios más aislados de las inclemencias del clima. Aparte, en las ventanas se puede agregar un recubrimiento para que cambien de color en función de la temperatura. Por cierto, notarás que en el interior de la casa funcionan muchos aparatos. En el futuro se consume todavía más electricidad...

Doc: Por supuesto, Marty, debe ser un gran problema.

Marty: La energía se obtiene de celdas solares base-grafeno y de pilas de combustible. Además, usan supercondensadores para almacenar la electricidad o baterías de litio con grafeno, con mejoras en su capacidad de energía y tasa de carga que hacen que las de 2020 parezcan de juguete (por cierto, esto es gracias a su gran área de superficie, gran conductividad eléctrica, ligereza y estabilidad química).

Doc: No sigas, Marty. Acabarás por convencerme de migrar en el tiempo.

Marty: Solo una cosa más, Doc. Las comunicaciones se basan en tecnología wifi mejorada y hay nuevos bloques de construcción para el internet de las cosas, controlar todo a distancia a través de los electrónicos en nuestra muñeca. Desde la estufa, a coches o eliminadores de basura. Todo es posible gracias a sistemas optoelectrónicos y de comunicaciones ópticas ultrarrápidos basados en grafeno. ¿Quién diría que habría tantas utilidades con los alótropos de carbono?

...

Podríamos continuar esta historia durante un buen rato, pues el grafeno ha abierto muchas posibilidades alimentadas por grandes inversiones como el Graphene Flagship. Se espera que los resultados aparezcan en la siguiente década, quién

sabe si para 2050 la realidad superará a la ficción. A día de hoy, y según Geim, el grafeno está «más o menos terminado».

Andre, con sus continuas ganas de entender y descubrir, no ha parado de investigar e intentar entender otros sistemas bidimensionales como el nitruro de boro hexagonal, el fluorografeno y muchos otros. Y es que, piensen, si se puede hacer tanto con un material que solo está hecho de carbono, ¿cuánto podrá lograrse con la combinación de los diferentes elementos en la tabla periódica?

Para concluir, debemos remarcar el papel de Mildred Dresselhaus, ganadora del Premio Kavli de Nanociencia 2012, para entender mejor las propiedades de los alótropos nano del carbono, gracias a sus estudios sobre las propiedades térmicas y eléctricas de compuestos de intercalación de grafito y fibras de carbono. Su trabajo se basó en los efectos del confinamiento de fonones²³ y las interacciones electrón-fotón en nanoestructuras y sentó las bases para materiales termoelectricos nanoestructurados. Los materiales termoelectricos tienen la capacidad de convertir la energía térmica en una señal eléctrica o, alternativamente, de utilizar energía eléctrica para enfriar activamente un material.

A medida que descubrimos nuevas propiedades en los materiales, aparecen también nuevas aplicaciones que siguen dando la razón a gente como Feynman, Roco, Smalley o, en menor medida, hasta al mismo Drexler, quienes aventuraron el éxito de las nanotecnologías. Hasta ahora, hemos destacado la importancia de los alótropos de carbono, pero existen muchísimos otros nanomateriales.

¿Nos acompañáis a conocer algunos de ellos en el próximo capítulo?

23 Los fonones son modos particulares de vibración periódica en materiales elásticos formados por conjuntos de átomos, sólidos o líquidos. Se puede decir que, así como los fotones son ondas de luz cuantizadas, los fonones son la cuantización de vibraciones mecánicas periódicas (semejantes al sonido).

8

Alicia y las maravillas de Nanoland

En 1865, Charles Lutwidge Dodgson publicó un libro que trascendió en la historia de la literatura, de las aventuras y... de la ciencia. Quizás, la mayoría de las personas no asocian ese nombre con ningún autor conocido, pero si decimos que su seudónimo era Lewis Carroll y que el libro es *Alicia en el país de las maravillas*, seguro que les suena.

El texto está lleno de guiños científicos. Sin duda alguna, la condición de matemático del señor Dodgson fue clave para incluir ciencia en este icónico libro. En las aventuras de Alicia, la niña actúa casi como si estuviera guiada por el espíritu científico —probando diferentes sustancias e intentando varias opciones en el clásico método ensayo/error— para superar todos los retos con los que se encuentra.

La curiosidad sin duda era un motor para Alicia. Esta característica humana esencial la llevó a perseguir al Conejo Blanco a través del agujero, a beber la poción, a comer el pastel y a atravesar el umbral que la llevó a un mundo completamente nuevo. Ahí encontró un sinfín de eventos y per-

sonajes extraordinarios, un cúmulo de maravillas que caracterizan al país que da título a su libro. La historia en sí misma resulta fascinante, un auténtico clásico de la literatura, pero implica ideas más profundas en relación con nuestros intereses. Muchos creen que Lewis Carroll presentó en su obra una metáfora de los singulares fenómenos que la ciencia moderna encontró al aventurarse en el reino de lo diminuto.

En este libro también nos estamos adentrando en el reino de lo diminuto, a través principalmente de sus inspiradores personajes, fantásticos científicos como Feynman, Drexler, Smalley y muchos otros. En este capítulo, los protagonistas serán ustedes, los lectores, a quienes invitamos a adentrarse en la dimensión nano, porque desde allí entenderemos mucho mejor por qué este mundo es tan fantástico y, a su vez, tan real.

Antes de continuar, nos gustaría hablar de las verdaderas protagonistas de este mundo: las nanopartículas. Para hablar de ellas debemos entender cómo se comportan y el primer paso es averiguar qué tiene en común el mundo nano con el mundo cuántico.

QUANTUMLAND: LA IMPORTANCIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL MUNDO NANO²⁴

Era una tarde de verano en Barcelona. El clima era caluroso y muy húmedo, de ese que te quita las ganas de hacer cualquier cosa; un día tedioso y pesado. Semejante situación, sumada a la obligación de estudiar con su hermana, hacía que Alicia se aburriera como una ostra.

De repente, del muro de enfrente apareció un gato. Le

²⁴ Les invitamos a leer el libro *Alice in Quantumland*, de Robert Gilmore, para disfrutar de un profundo viaje de Alicia al país de los cuantos.

daba la impresión de que el felino se quedaba quieto cada vez que lo miraba, cosa muy extraña. Aunque era todavía más raro que llevará un chaleco puesto y le empezara a hablar con las siguientes palabras:

—¡Voy a llegar tarde! —dijo el animal mirando su reloj.

Alicia siguió al gato hasta su madriguera y de repente tuvo la sensación de desaparecer y aparecer, como si se teletransportara. De pronto, se encontró en una sala muy espaciosa, con puertas por todos lados, que en el centro tenía una mesita de vidrio y sobre ella había una copa de color rojizo. Bebió el líquido de la copa y, repentinamente, todas las cosas a su alrededor empezaron a crecer hasta tornarse gigantescas...

No sabemos qué pensaría Charles Lutwidge Dodgson de esta versión adaptada cuánticamente de *Alicia en el país de las maravillas*. Quizás a Lewis le gustaría por las conexiones científicas, recurso que usó de diferentes formas en su libro; por ejemplo, en el primer capítulo, cuando el conejo cae en su madriguera hay una metáfora del concepto matemático de límite. Nosotros lo hemos cambiado al concepto de teletransportación cuántica; aunque también hay guiños a la dualidad onda-partícula, al efecto túnel, al principio de indeterminación de Heisenberg y al plasmón de resonancia del oro. Les retamos a encontrar estos temas en el texto.

De conceptos cuánticos ya hablamos en capítulos anteriores, ahora nos gustaría profundizar en los fenómenos que tienen implicaciones para la nanoescala. Y es que hay propiedades curiosas de algunos nanomateriales distintivas respecto a sus homólogos macro, que solo se pueden entender a través de la física cuántica. Vamos a explorarlas a través de las aventuras de Alicia:

Alicia estaba asustada. No solo había empequeñecido, además notó que no podía moverse con libertad, sino que sus movimientos estaban acotados. Se sentía atrapada.

El confinamiento cuántico. El tamaño minúsculo de las nanopartículas implica que tengan apenas cientos o miles de átomos en su estructura. Diantre, eso no suena a que sean pocos; pero no son nada si los comparamos, por ejemplo, con los más de 200 mil millones de átomos que tiene un cromosoma. En general, todas las moléculas tienen niveles de energía bien definidos para los estados que pueden tener sus electrones, asemejándose al comportamiento de los átomos individuales. Esto da lugar al efecto de confinamiento cuántico: el movimiento de la partícula queda restringido, lo que significa que solo puede tomar ciertos valores de energía permitidos en función de su estructura y composición. Esto ocurre cuando el tamaño de la partícula es tan pequeño que resulta comparable con la longitud de onda del electrón.

En los materiales a escala macro existe una amplia variedad de estados de energía posibles, tantos que los electrones tienen bandas de energía prácticamente continuas. Al tener tantos átomos tan cerca unos de otros, los estados de energía se desdoblán y se modifican ligeramente. Las bandas resultantes de esta gran cantidad de niveles están prácticamente empalmadas, su forma y posición define las características ópticas, mecánicas y eléctricas del material. Surgen así bandas de conducción y de valencia, que determinan el grado de dificultad para el movimiento de los electrones y con ello, si un material es un buen conductor (bandas unidas), un semiconductor (ligeramente separadas) o un aislante (muy separadas).

El caso de estructuras más pequeñas es diferente, hay muchas menos bandas y estas están separadas en posiciones concretas. Tienen bandas de energía discretas, es decir, cuantizadas, que difieren de los niveles de los átomos que los conforman. La combinación de diferentes materiales permite aumentar o reducir la distancia entre las bandas energéticas. Como resultado de estas limitaciones «geométricas», los electrones «sienten» la presencia de los límites de energía

y responden a los cambios en el tamaño de la partícula ajustando su energía.

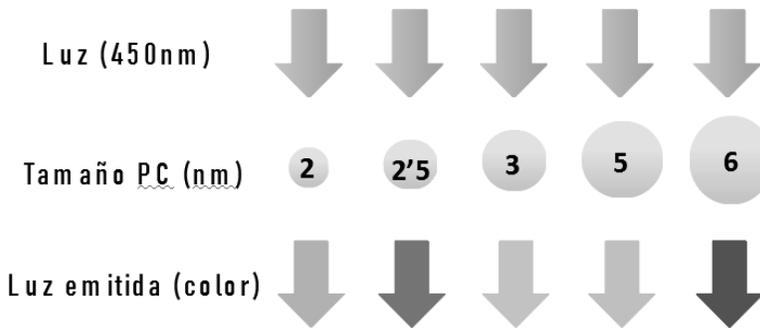
Mediante los puntos cuánticos (PC), un tipo de nanopartículas semiconductoras, el efecto de confinamiento cuántico puede tener aplicaciones importantes. Los PC se desarrollaron en la década de los 80 gracias al científico ruso Alexei Ekimov. A finales de la década de 1970, en el Instituto Estatal de Óptica Vavilov (Leningrado), Ekimov sintetizó nanocristales de cloruro de cobre y seleniuro de cadmio. Años después, tras estudiar sus propiedades, observó un curioso brillo (fluorescencia) en estos materiales. En 1982, su compatriota Alexander Efros publicó la primera teoría sobre el comportamiento de estos minúsculos cristales, a partir del confinamiento de sus electrones. El último punto destacable lo aportó el químico estadounidense Louis Brus, en 1983, con la síntesis de nanocristales en suspensión coloidal. Nacieron así los primeros puntos cuánticos coloidales de sulfuro de cadmio y con ellos tecnologías para iluminación, celdas solares y formación de imágenes biológicas.

El nombre PC se debe a que son tan pequeños que es como si todo su material se concentrara en un punto. Son semiconductores y, cuando reciben rayos ultravioletas, algunos de los electrones de la banda de conducción se pueden mover de forma libre alrededor de la nanopartícula. Cuando estos electrones regresan a la capa externa del átomo (la banda de valencia), emiten luz. El color (la longitud de onda) de esa luz depende de la diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia de ese átomo.

El tamaño, la composición, estructura y forma de la partícula definen sus propiedades ópticas. Si el punto cuántico es más grande, produce longitudes de onda más largas, en tonos rojizos, y viceversa, los más pequeños producen longitudes de onda más cortas y tonos azulados.

¿Por qué ocurre esto? En los más pequeños, las bandas son más anchas que en los grandes, por lo que necesitan más energía para liberar electrones.

Pueden tener aplicaciones en áreas como la catálisis (acelerar reacciones químicas), la electrónica, fotónica, el almacenamiento de información y muchas más. Aunque quizás el campo donde ofrecen más posibilidades es en la nanomedicina, en bioanálisis y bioetiquetado. Ya hablaremos de ellos en el capítulo 9.



—¡No llores niña, que nos vamos a ahogar! —gritó el Sombrerero—. En Quantumland hay muchos secretos. Mira este sombrero, ahora lo ves verde, et voilà! —Alicia se quedó de piedra al ver que el sombrero se hizo más pequeño y de un bello color rubí.

Una importante propiedad cuántica con relación al color es el plasmón de resonancia. Un plasmón es el resultado del movimiento oscilatorio de los electrones de conducción cuando son iluminados por luz (fotones) a una longitud de onda determinada, para amplificar el campo eléctrico con-

siderablemente alrededor de una nanopartícula. ¿Y cómo afecta esto al mundo nano?

Para explicarlo usaremos uno de los elementos más interesantes del mundo nano, el oro, el mismo que ya fuera protagonista en la copa Licurgo. Y es que el material ilustra perfectamente las propiedades únicas que aparecen en la escala nanométrica. En tamaño macro, el oro es prácticamente inerte, poco reactivo, lo que se conoce como metal noble. A escala nano, en cambio, sus propiedades ópticas, mecánicas y magnéticas cambian drásticamente.

Respecto al color, ocurre algo impactante: el oro nano deja de ser dorado para tomar tonos diferentes debido al efecto plasmón de resonancia (uno de estos tonos es el rojo rubí que antes comentábamos en nuestra alegoría). Los metales son brillantes por su propiedad de reflejar la luz cuando incide sobre ellos. Esto se debe a las nubes de electrones en superficie que impiden el paso de los fotones (partículas la luz) que inciden en el material, emitiendo las longitudes de onda del color resultante. En el caso del oro, se trata del clásico color amarillo-dorado.

En la escala nano esto cambia. El movimiento de los electrones en el oro nano está confinado debido al efecto plasmón de resonancia superficial. En este caso, los fotones no se reflejan (rebotan) como en el caso del oro macro, sino que atraviesan la superficie del metal, el par electrón-fotón comienza a vibrar en sincronía a una longitud de onda específica, como si ejecutaran un paso de baile. Así se genera un color que depende de la forma y el tamaño del oro nano.

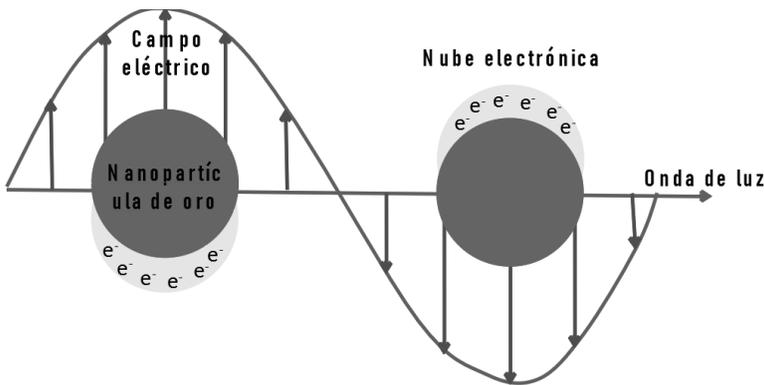
Y esto ocurre porque el oro tiene electrones libres en la superficie. Cuando llega un haz de luz genera una excitación colectiva de los electrones confinados que se acoplan con los fotones de luz que le llegan. Solo a determinadas frecuencias se sincronizan las frecuencias de la onda incidente y las de la oscilación generando un plasmón de superficie resonante (ver figura) que absorbe determinadas frecuen-

cias de luz y, por tanto, transmite las frecuencias no absorbidas. Surge así el color resultante que se puede observar.

Una nanopartícula de oro de unos 90 nm absorbe colores en el extremo rojo y amarillo del espectro, mostrando un tono azul-verde. En cambio, si su tamaño es de 10 nm, absorbe los azules y verdes, por lo que resulta una apariencia roja. Finalmente, su color no solo depende de su tamaño, también de su forma; es posible ajustarlas al gusto para obtener los colores que nos interesan en todo momento. Esto tiene aplicaciones extraordinarias en detección de tumores, por ejemplo.

Alicia huía de un ejército de cartas —que a nosotros, por cierto, nos recordaron al grafeno— y enfrente había un muro gigantesco, estaba atrapada. Del muro salió un brazo que la arrastró al otro lado.

Uno de los fenómenos más extraordinarios que podemos encontrar en la nanoescala se conoce como efecto túnel cuántico; no explicaremos aquí de qué se trata porque ya nos extendimos al respecto en el capítulo 5. Solo vamos a agregar que sin este efecto no serían posibles los procesos de fusión nuclear que se llevan a cabo en el Sol y todas las estrellas, los cuales generan la energía que las caracteriza.



Con todo y su gran presión, que surge de la enorme gravedad de los astros, los núcleos de los átomos no tienen energía necesaria para acercarse lo suficiente entre sí para que la interacción fuerte pueda fusionarlos; recordemos que tienen carga eléctrica positiva, lo que hace que exista una importante fuerza de repulsión entre ellos. La barrera de energía es tan alta que solo un choque entre 10.000 cuatrillones (10^{28}) logra aprovechar el efecto túnel para superarla; pero como en el Sol hay 10^{55} núcleos y cada uno experimenta miles de millones de choques por segundo, resulta que cada segundo ocurre un sextillón (10^{36}) de procesos de fusión. Eso pasa en la lejanía de nuestra estrella, pero aquí se le saca provecho a este efecto para el funcionamiento de los microscopios de efecto túnel y para intentar producir energía eléctrica por fusión.

Alicia había descubierto muchos de los secretos de Quantumland, uno de ellos era la mejora de su capacidad de visión, era capaz de ver y controlar los invisibles campos magnéticos.

El último efecto cuántico que comentaremos se denomina superparamagnetismo y lo encontramos en nanopartículas magnéticas, como las de óxido de hierro. El magnetismo se debe a la presencia de dipolos atómicos magnéticos debidos a dos factores: a) movimiento del electrón alrededor del núcleo y b) momento de espín o giro del electrón (o su campo eléctrico) sobre sí mismo, el cual tiene naturaleza cuántica. Gracias a la suma de ambas contribuciones, cada electrón tiene un momento magnético propio. Pero si todos los electrones tienen esa propiedad y todos los átomos tienen electrones, ¿por qué solo algunos objetos muestran magnetismo a escala macro? Pues porque los momentos de los diferentes electrones, y átomos, están todos desordenados y terminan por anularse unos con otros. Los imanes, en cam-

bio, tienen dominios magnéticos (zonas magnetizadas localmente) con sus dipolos bien alineados; por otra parte, en los objetos de hierro, ante un campo magnético externo, los dipolos se alinean para magnetizarse.

El «problema» es que estos dominios magnéticos suelen tener un tamaño del orden de micras y simplemente no caben (son demasiado grandes) cuando alcanzamos las dimensiones nano, haciendo que las nanopartículas magnéticas sean de un único dominio o monodominios. Esto tiene fuertes implicaciones en su comportamiento: las nanopartículas se magnetizan completamente obteniendo el superparamagnetismo. En presencia de un campo magnético, generan la más alta magnetización posible para su tamaño y en su ausencia, no tienen magnetismo alguno. Esto implica que esta propiedad aumente considerablemente o que incluso algunos metales no magnéticos (como el rodio) se vuelvan magnéticos. De aquí derivan interesantes aplicaciones en el campo de la medicina, como veremos en el capítulo 9.

MR. FEYNMAN, USTED NO ESTABA DE BROMA: APLICACIONES DEL MUNDO NANO

Los trazos de la obra de arte en la que se han convertido las nanotecnologías se comenzaron a dibujar a finales del siglo XX y se hicieron realidad una vez que se consolidaron las iniciativas nacionales. Las nano se convirtieron en negocio y como ya sabemos, *business is business*.

En los puntos anteriores remarcamos que los nanomateriales son los principales protagonistas de la revolución en la nanoescala y abordamos los que debían su comportamiento a la física cuántica. A estos podemos sumar los alótropos de carbono, abordados en los capítulos 6 y 7. Pero existen muchísimos nanomateriales diferentes para conocerlos casi necesitaríamos prácticamente otro libro: tenemos nanoma-

teriales metálicos, como las nanopartículas de plata; óxidos nanométricos, como los de titanio, silicio o aluminio; o también nanomateriales curiosos como dendrímeros, nanoesponjas y muchos más.

Y es que las propiedades físicas y químicas de las nanopartículas pueden ser tan diferentes respecto a los mismos materiales macro que abren un sinfín de posibilidades. Ya hemos visto cómo se modifica el color en el oro o los puntos cuánticos; el punto de fusión, las propiedades mecánicas o la conductividad eléctrica del grafeno o los nanotubos; el comportamiento magnético de los nanoimanes, a lo que podemos añadir la solubilidad, la reactividad química y biológica, la movilidad, etc.

Los efectos de tamaño se pueden dividir en dos tipos, los internos y los externos. Los internos generan una modificación de las propiedades intrínsecas de las partículas (la estructura de sus redes, la temperatura de fusión, la dureza, el ancho de banda, la luminiscencia, coeficientes de difusión, actividad química, etc.) y no dependen del entorno. En cambio, los externos implican interacción con el entorno, son dependientes del tamaño del material hasta que este alcanza una dimensión crítica que coincide con unas determinadas longitudes del material (la longitud libre de electrones, fonones, longitud coherente, longitud de onda de irradiación, etc.). A esto podríamos añadir los efectos cuánticos anteriormente vistos, la electroconductividad del campo magnético, la oscilación de la temperatura crítica de superconductividad, la magnetorresistencia y otras características físicas, como decíamos, infinitas posibilidades.

Han ocurrido muchas cosas en los 20 años desde que se lanzó la NNI, por ejemplo, dos grandes crisis económicas, la de 2008 debido a las hipotecas *subprime* y la que está naciendo en 2020 debido a un pequeño y mortífero virus. Pero ¿qué ha ocurrido con las nanotecnologías?

Quizás uno de los aspectos más destacados de las nano

sea la multidisciplinariedad, lo que implica que la ciencia ha dejado de compartimentarse: físicos, químicos, biólogos, ingenieros y matemáticos se han transformado en nanotecnólogos con conocimientos transdisciplinares. Por poner un ejemplo, para fabricar sensores biomédicos base oro se necesita de conocimientos muy diversos: de química, para la síntesis; de física, para medir sus propiedades y fabricarlos; de biomedicina, para aplicarlos en el cuerpo humano; de ingeniería, para implementarlo, en suma, un conocimiento transversal.

En este tiempo, las nanotecnologías se han consolidado, tanto desde el punto de vista de la I+D como en su presencia en prácticamente todos los sectores comerciales. Las encontramos como base de materiales avanzados, catalizadores más eficientes, en la nanoelectrónica, nuevas herramientas para la medicina, fuentes de energía mejoradas con un impacto creciente en el medio ambiente y los recursos sostenibles, en el sector de la alimentación, cosmética, construcción, textil, deporte, militar, etc.

Es más, desde 2010, con la consolidación de los planes nacionales y el descubrimiento de nuevos métodos de fabricación o la incorporación de métodos complejos 3D y nuevos sistemas intrincados, las nanotecnologías siguen abriendo nuevas posibilidades. Algunas opciones nos llevan a la convergencia con otras tecnologías como los avances cuánticos, las Bio, las Cogno o desarrollos de inteligencia artificial.

Todo esto se traduce en un mercado global que superó los 1000 millones de dólares en 2018 y que, según algunas estimaciones, rebasará los 2.000 para mediados de la década de los 20, con un crecimiento sostenido del 10 % anual.

Las nano han demostrado un impacto significativo y sirven como un cúmulo de tecnologías revolucionarias y beneficiosas que encontramos en cerca de 10.000 productos en el mercado de forma directa y un millón de forma indirecta. Implican más de cinco millones de puestos de trabajo,

entre directos e indirectos, de los cuales más de 20.000 son investigadores.

Sin embargo, los problemas asociados al despliegue de nanodispositivos en condiciones extremas y el alto costo de la tecnología actúan como las principales barreras para el crecimiento del mercado de nanotecnologías. Aun así, se prevé que el aumento del apoyo y la financiación de investigación y desarrollo de organizaciones gubernamentales, así como la aparición de dispositivos autoalimentados, ofrecerán oportunidades para el avance del mercado de nanotecnologías.

A nivel industrial, al día de hoy, destaca el mercado de los nanodispositivos (mecánicos, instrumentales, para manipulación, etc.) y nanosensores (biológicos, químicos, físicos, etc.). Y las aplicaciones con más auge están en la electrónica, la energía, el medio ambiente y, sobre todo, la medicina. Este último sector merece un capítulo aparte, porque no implica únicamente mejorar el sector, hay todo un cambio de paradigma, y no de un color gris como aventuraba Drexler, sino de un color más vivo y esperanzador, la nanomedicina es una revolución dentro de la revolución de las nanotecnologías.

Por supuesto que no todo es positivo en el continuo avance de las nanotecnologías. Todavía hemos de responder de forma contundente a diferentes aspectos sociales que podrían dificultar el avance continuo y sostenible de las nano a nivel mundial: sus implicaciones en la salud o en el medio ambiente; la brecha de distribución inequitativa entre quienes reciben los beneficios y quienes asumen los mayores riesgos; los impactos para el empleo en los sectores que se verán afectados por los avances disruptivos, así como los problemas para dispositivos que tendrán que trabajar en entornos remotos, hostiles o inaccesibles, con desafíos para el diseño del sensor, los materiales, la funcionalidad y el embalaje del aparato.

Un aspecto muy valioso es que se está investigando para que en el futuro los dispositivos sean autosuficientes, aprovechando de forma inmediata la energía del entorno o mejo-

rando su capacidad para almacenarla. Las fuentes de energía efectivas serán cruciales, no solo para estos nanodispositivos, sino que para todos nosotros, nos permitirán operaciones independientes, sostenibles y continuas. Esto implica desarrollar sistemas autoalimentados, de tamaño minúsculo, ultrasensibles, multifuncionales y de bajo consumo, lo que Feynman destacaría como «dispositivos perfectos».

En resumen, las perspectivas presentes y futuras del mercado de nanotecnologías nos llevan a su uso en el sector de la salud, como veremos en el siguiente capítulo. En un punto de gran relevancia en 2021, las nanotecnologías son una de las principales herramientas en la búsqueda de sistemas de detección, tratamientos y vacunas contra la COVID-19; por tanto, una gran esperanza contra la pandemia. Estas y muchas más aplicaciones de las nano en el cuidado de la salud tendrán un impacto creciente en los próximos años.

A todo esto, debemos añadir el impacto que tendrá en otra crisis, el cambio climático. Por un lado, en el tratamiento de aguas están apareciendo nuevos sistemas de filtrado, algunos de ellos ya presentes en productos que se pueden adquirir fácilmente. En el frente de generación de energía se trabaja en nuevos sistemas de almacenaje, en la mejora de la eficiencia en fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica, así como en nuevos sistemas de obtención de energía. A su vez, hemos de añadir las implicaciones ecológicas del uso de menos cantidad de materiales para obtener beneficios iguales o mejorados.

El futuro está listo para ver un notable crecimiento en la aplicación de las nanotecnologías, tendremos que estar atentos y expectantes. Todo esto nos lleva a un futuro prometedor, un futuro donde los sueños de Feynman se harán realidad, es el maravilloso futuro de Nanoland.

—¡Despierta ya, Alicia! —le dijo Feynman acompañado de una sonrisa cariñosa—. Llevas mucho rato durmiendo.

—¡Oh, he tenido un sueño increíble! —dijo desperezándose Alicia.

Y le contó a Richard todo lo que había vivido, todo lo que había visto, las implicaciones de tener un tamaño minúsculo y las sorprendentes aventuras que había vivido. Y, cuando hubo terminado, Richard le dio un beso y le dijo: —A veces los sueños se cumplen, cariño. Piensa que hay mucho espacio allí al fondo, pero ahora corre a merendar, se está haciendo tarde y tenemos mucho tiempo para que otro día me expliques todo lo que has soñado.

Así pues, Alicia se levantó y se alejó de allí corriendo. Y mientras corría, no dejó de pensar en el maravilloso sueño que había tenido.



9

Medicina en tiempo real

Daniel llegó a casa del trabajo como cualquier otro día, le dio un beso a su esposa y se dirigió al baño para sacudirse el estrés del día con una ducha caliente. Mientras se desvestía, notó que las piernas le pesaban, sudaba de forma excesiva y sintió un leve hormigueo en el brazo izquierdo, pero pensó que el agua le ayudaría a sentirse mejor. Al salir se sentía un poco mareado y se recostó en el sillón para echarse una siesta de la que nunca despertó; sufrió un ataque de corazón fulminante.

Pero si Daniel apenas tenía 35 años, ¿cómo es posible que alguien tan joven sufriera ese trágico final? Quizá no tenía la alimentación más adecuada, pero salía a correr dos o tres veces por semana y estaba en buena forma. Claro que no se contaba con las largas horas de trabajo, el estrés de la hipoteca y una condición cardíaca hereditaria que nadie había detectado. Si tan solo hubiera tenido la precaución de hacerse estudios médicos regulares..., pudo tener un aviso para cuidarse más.

El problema es que los seres humanos somos poco afectos a este tipo de prevención. Quizá tenemos miedo a enfrentar la posibilidad de malas noticias sin pensar que en todo caso

es más conveniente saber la verdad para que esto nos permita actuar. Pueden darse situaciones de falta de cobertura médica o de recursos para pagarla para poder darse el lujo de revisiones periódicas. O, lo peor, simplemente se deja de lado por la desidia y las revisiones se postergan indefinidamente para dar paso a cosas más urgentes, aunque menos importantes.

Y es que, cuando se sienten bien, la mayoría de las personas no ven necesidad de estar buscando posibles enfermedades. Lo que no se piensa es que muchas patologías no presentan síntomas hasta que llegan a una fase grave o bien, como en el caso de Daniel, a un final fatídico. Así, en temas de salud, más vale un «por si acaso» que un «quién lo iba a pensar»: siempre será mejor invertir atención, tiempo y dinero en prevenir un problema, en vez de lamentarlo sin más remedio y aceptar sus consecuencias. ¿No podríamos contar con una forma de prevención sin necesidad de engorrosos estudios recurrentes?

En este punto, las nanotecnologías prometen transformar por completo la forma de mantenernos sanos o de arreglar los problemas en caso de tenerlos. Imaginen un ejército de nanorrobots moviéndose por todo nuestro cuerpo en busca de señales que indiquen algún problema de salud, con capacidad para actuar como si de minúsculos cirujanos se tratará, con la capacidad para sanar tejidos dañados (en el corazón, por ejemplo) y mandar señales, en tiempo real, de cualquier otro asunto al que se deba poner atención. Esto es un sueño para el que ya se trabaja, pero no sabemos si podrá realizarse en 30, 50 o 100 años.

Mientras tanto, las nano ya ofrecen recursos extraordinarios para cuidar de nuestra salud. En este capítulo veremos algunos ejemplos del impacto creciente, y quizá irreversible, de estas tecnologías en la medicina. Pero primero vamos a revisar los cimientos de todo el asunto, los primeros avances que le dieron una dimensión real a los sueños de Feynman y Drexler.

LAS PRIMERAS MÁQUINAS MOLECULARES

A veces las cosas más complejas tienen un origen muy sencillo. Hoy en día, Jean-Pierre Sauvage es toda una celebridad científica, tanto por el prestigio de su trabajo pionero para la construcción de artefactos en la escala de nanómetros como por haber recibido el Premio Nobel de Química en 2016. Además, Sauvage viaja por el mundo dando conferencias a jóvenes para contagiar su entusiasmo por las nanotecnologías. Cualquiera que lo viera en acción, pensaría que estaba destinado a esta grandeza.

Pero Sauvage fue un joven de provincias con dudas sobre su vida, parecido a muchas de las personas que asisten a sus charlas en busca de inspiración. A los 16 años, jugaba en su laboratorio casero extrayendo clorofila de hojas de plantas o mezclando sustancias que compraba en la farmacia local y allí encontró su pasión por la ciencia. Era 1960 y Jean-Pierre vivía en Alsacia, una región al noreste de Francia, en donde nadie había oído hablar de las ideas de máquinas moleculares presentadas hacía unos meses en la famosa conferencia de Richard Feynman. Pero, aun sin saberlo, el chico iniciaba un viaje que lo llevaría a sentar las bases de esos aparatos.

Nuestro amigo era un joven con gran habilidad para las matemáticas, pero también era muy pragmático. Al ver el perfil de los personajes más destacados en esta área, le pareció que había que ser un genio para triunfar, por lo que el joven no sintió que tuviera esa capacidad extraordinaria. En la química encontró un campo mucho más accesible y atractivo, así que la eligió como el camino para su vida científica.

Jean Pierre realizó sus estudios en la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, donde Jean-Marie Lehn —ganador del Premio Nobel de Química en 1987— asesoró su tesis doctoral. Después de realizar una estancia de investigación en la Universidad de Oxford, a inicios de la década de los 70, regresó a su *alma mater* como profesor, puesto que conserva

hasta la fecha. Allí estableció un grupo de trabajo que logró un avance esencial para la historia de las nano: los eslabones moleculares.

La esencia de cualquier maquinaria consiste en articular diferentes componentes que puedan moverse unos respecto a otros. En 1983, poco después de que Eric Drexler publicara su primer artículo, Sauvage y su equipo crearon el primer catenano: una estructura que entrelazaba dos moléculas en forma de anillo. Para lograrlo tomaron como base iones de cobre que atrajeron una molécula con estructura circular y otra de medio círculo. Los iones se situaron en posición para que se acomodara una molécula más, encargada de cerrar el círculo abierto para unir los «eslabones». Un aspecto interesante del proceso es que, en vez de usar técnicas químicas, los anillos se unieron de forma mecánica a semejanza de una cadena (de hecho, de ahí viene el nombre de «catenano», palabra que deriva de la palabra latina para cadena).

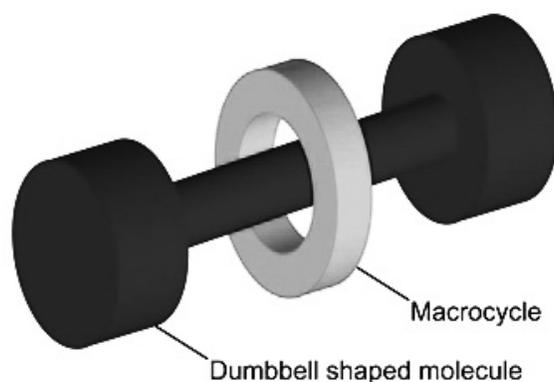
Por si conseguir este proceso exitoso de unión de moléculas no fuera suficiente, el mismo equipo llevó las cosas aún más lejos: fueron los primeros en construir un catenano en el que, al agregar energía, un anillo daba vueltas alrededor del otro. Fue el primer gran paso para la creación de máquinas moleculares no biológicas.

El siguiente hito en la carrera de las máquinas moleculares vendría de la mano de Fraser Stoddart, un personaje más que interesante: creció en una granja escocesa sin electricidad ni las ventajas de aparatos modernos. Al no contar con televisión ni ordenador, Stoddart se entretenía armando rompecabezas, con lo que desarrolló la habilidad de reconocer formas y encontrar la manera de unirlos. A partir de ahí, se inclinó por estudiar química con la idea de crear formas moleculares nunca antes vistas.

Una vez concluidos sus estudios en la Universidad de Edimburgo, Fraser tuvo la oportunidad de crecer profesionalmente con estancias en la Universidad de Queen (Canadá),

la Universidad de Sheffield (Inglaterra) y la Universidad de California en Los Ángeles (Estados Unidos). Así, para cuando se estableció en la Universidad de Birmingham contaba con la experiencia para hacer aportes de frontera en su campo, en especial, para llevar más lejos lo que había logrado Sauvage.

El equipo de Stoddart creó, en 1991, el primer rotaxano: un anillo molecular que en el centro tiene un eje que le permite desplazarse. Y lo hicieron de una forma muy ingeniosa, construyeron un anillo abierto con carga positiva y una barra, o eje, que tenía estructuras ricas en electrones (cargas negativas). Cuando las dos estructuras se encontraron en solución, el semianillo se enganchó al eje y lo cerraron para unirlos mecánicamente a la barra. Lo mejor de todo fue que al agregar calor el anillo saltaba de un lado al otro del eje, como un pequeño cohete. Con el avance de sus investigaciones, llegaron a controlar por completo su movimiento para dejar atrás la aleatoriedad del movimiento molecular. Y, eventualmente, con este tipo de sistemas, Stoddart desarrolló un músculo molecular y un chip de ordenador basado en moléculas.



Representación gráfica de un rotaxano. Autor: M Stone.

En paralelo a los albores de las máquinas moleculares, justo a inicios de la década de los 90, Drexler colaboró con Chris Peterson y Gayle Pergamit para publicar un nuevo libro: *Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution*, en el que por primera vez relacionaron las ideas de los nanobots y ensambladores con el campo de la medicina. Nació así la idea de la nanomedicina.

En 1996, Robert Freitas Jr. describió, con asombrosos detalles, una variedad de útiles componentes nanomédicos y nanorrobots diamondóides. Sus ideas aparecieron en una serie de documentos, artículos y libros, entre los que destaca *Nanomedicine*, la primera obra sobre este tema en la historia. Durante la misma década se crearon las primeras nanopartículas funcionalizadas orientadas a la medicina, aunque hasta 2005 únicamente se publicaron 30 artículos que usaron ese término. Actualmente, hay más de 10.000 publicaciones anuales.



Para concluir nuestra visita histórica a la relación de las máquinas moleculares con la nanomedicina, justo en el año en que se pusieron las primeras piedras de la NNI, 1999, el químico neerlandés Bernard Feringa logró construir un

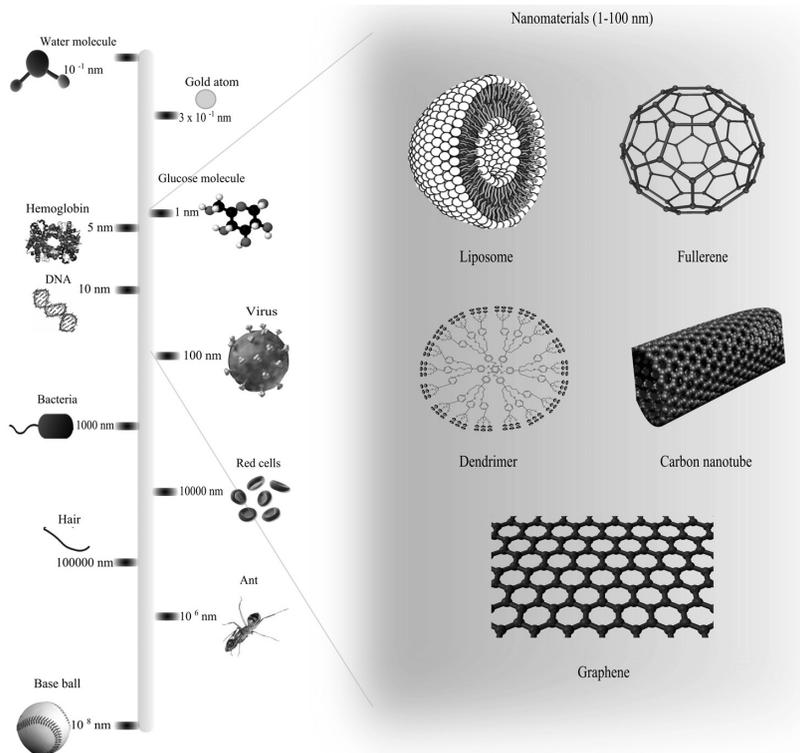
motor molecular. La clave para hacerlo fue una pala de rotor con un giro controlado. Normalmente, las moléculas giran de un lado a otro de forma errática y Feringa creó estructuras químicas que, cuando se exponen a pulsos de rayos UV, giran continuamente en una dirección concreta. Con este tipo de motores se ha podido rotar un cilindro diez mil veces más grande que ellos e incluso ha sido capaz de diseñar un nanoauto.

Debemos destacar aquí una coincidencia más que notable, Ben Feringa también creció en una granja, aunque él sí tenía electricidad, y se sintió atraído a la química por sus tremendas oportunidades para ser creativo. En sus propias palabras: «La belleza de la química reside en que te permite diseñar tu propio mundo molecular». Parece que la tranquilidad del campo puede ser un terreno muy fértil para la formación de científicos imaginativos con pasión por crear nanomáquinas. En 2016, los aportes de Sauvage, Stoddart y Feringa, tres científicos europeos de origen campirano, quedaron unidos al ser reconocidos con el Premio Nobel de Química.

EL CUERPO HUMANO: UN CONJUNTO DE MÁQUINAS NANOTECNOLÓGICAS

La naturaleza es la innovadora más antigua y paciente que existe, durante miles de millones de años ha creado las impresionantes y complejas estructuras que existen en el universo. A partir de solo cuatro fuerzas fundamentales (electromagnetismo, gravedad, fuerza débil e interacción fuerte) y 12 partículas elementales²⁵, surgieron los diferentes átomos que distinguen a los 118 elementos químicos.

25 En realidad, los átomos, que representan la mayor parte de la materia conocida, solo están hechos de tres partículas diferentes: *quarks up*, *quarks down* y electrones. Las demás partículas solo ocurren en situaciones de



Comparación de los tamaños de los nanomateriales con los de otros materiales comunes. [Nanoinformatics: Emerging Databases and Available Tools / Suresh Panneerselvam y Sangdun Choi]

Primero la interacción fuerte se hizo cargo de formar protones y neutrones, a partir de los *quarks up* y *down*, así como de unir a estas partículas para formar el núcleo atómico. Luego, por la acción de la fuerza electromagnética, la atracción entre la carga positiva de los protones y la negativa de los electrones permitió la formación de átomos.

altas energías, como en choques de rayos cósmicos o experimentos de aceleradores de partículas.

A partir de ahí, la gravedad empezó a reunir materia a gran escala para formar galaxias, estrellas y planetas.

Pero sin duda la vida es la creación máxima de la naturaleza. A partir de moléculas sencillas —y con ayuda de la energía de la luz, descargas eléctricas y el calor de erupciones volcánicas—, se empezaron a construir estructuras más complejas hasta crear células, tejidos y organismos mucho mayores.

El cuerpo humano cuenta con un sinnúmero de máquinas moleculares, parte esencial de prácticamente todos los procesos biológicos de nuestro organismo. Un ejemplo son las enzimas, un tipo de proteínas que actúan como catalizadores, se encargan de detonar o acelerar importantes reacciones químicas a nivel celular. Y hay muchos otros pequeños artefactos indispensables para la vida, como los que permiten replicar el ADN (con ayuda de la enzima helicasa) y expresar su información en la producción de proteínas (con el trabajo de los ribosomas).

Quizá uno de los casos más interesantes son las mitocondrias, las centrales de energía de las células, que hacen posibles sus procesos vitales. Al procesar oxígeno y carburantes metabólicos —como glucosa, ácidos grasos y aminoácidos—, estos organelos producen adenosín trifosfato (ATP). El ATP, a su vez, es la moneda de cambio energético que permite a diferentes enzimas desencadenar procesos químicos necesarios para la célula. Por ejemplo, la acción del ATP sobre las proteínas miosina y actina desencadena la contracción de las fibras musculares.

El gran objetivo de las nanotecnologías, inspirado en estos procesos biológicos, es crear maquinaria molecular con la misma precisión atómica. Tal y como hemos visto anteriormente, se han logrado movimientos de moléculas guiadas por estímulos externos, lo que implica expectativas de avances extraordinarios. Pero aún no es momento de echar las campanas al vuelo, debemos ser cautos. Para un desarrollo

óptimo es esencial entender los procesos relacionados con la miniaturización, eficiencia, estabilidad, el suministro de energía, control de movimiento y la solidez en las actividades de los sistemas moleculares.

Probablemente, en la cima de la complejidad de la biología humana se encuentre el funcionamiento de las células del cerebro, las neuronas. Así, para que podamos percibir las cosas a nuestro alrededor —es decir, ver, oír, sentir, oler y probar—, se producen un conjunto de señales eléctricas y reacciones químicas que en última instancia se procesan en el cerebro. Incluso, en el mismo momento de leer este texto, sus neuronas establecen conexiones (sinapsis) para transmitir información entre ellas a través de neurotransmisores. El tamaño de estas sustancias se encuentra en un rango de entre 1 y 5 nanómetros.

Aunque el desarrollo de las máquinas moleculares artificiales apenas se inició con el nuevo milenio, vale la pena preguntarse qué nos depararán en el futuro, especialmente, en cuanto a las aplicaciones relacionadas con la salud. La nanomedicina, según la European Science Foundation, «utiliza herramientas de tamaño nanométrico para el diagnóstico, prevención y tratamiento de enfermedades y para obtener una mayor comprensión de la compleja fisiología subyacente de la enfermedad. El objetivo final es mejorar la calidad de vida».

Desde sus primeros pasos, la nanomedicina se ha centrado principalmente en tres campos: diagnóstico (precoz), tratamiento (localizado) y regeneración médica. Últimamente, podemos añadir un cuarto campo, la teragnosis, que une los campos del diagnóstico y el tratamiento de enfermedades. A continuación, veremos algunos ejemplos de la forma en que la ingeniería molecular ayudará con el cuidado de nuestra salud, tanto en el presente como en un futuro cada vez más cercano.

ESTAMPAS DE NANOMEDICINA

Fueron las dos horas más largas de su vida. Desde que recibió la llamada de la oficina de su médico, para avisar de que ya tenían los resultados de sus estudios y necesitaban hablar con él en persona, Jorge Gutiérrez no dejaba de pensar en las cosas que podían salir mal. Trató de distraerse con un par de tareas pendientes del trabajo, pero no logró concentrarse en nada, así que se dirigió al consultorio.

Al llegar ya lo esperaba el Dr. Alonso con una cara compungida que hizo poco por tranquilizarlo. Con poco preámbulo, el galeno fue al grano: «Tengo que comunicarle una mala noticia, las pruebas con marcadores tumorales salieron positivas».

El señor Gutiérrez sintió un mareo: «¿Y qué significan esas pruebas?», titubeando apenas atinó a preguntar.

«Qué lamentablemente los síntomas que tenía corresponden a un cáncer, en concreto, a un adenocarcinoma de páncreas».

Jorge se puso las manos en la cabeza y empezó a temblar ligeramente. Apenas hacía tres meses que había nacido su primera hija y un cáncer de páncreas sonaba casi a una sentencia de muerte, no la vería crecer. Temió acabar como su padre, fallecido por un tumor similar 12 años antes.

Pero pronto el médico ayudó a cambiar el panorama: «Señor Gutiérrez, tranquilícese. La medicina ha evolucionado mucho y tenemos un posible tratamiento, Abraxane combinado con gemcitabine. El Abraxane es un compuesto basado en nanopartículas con muy buenos resultados para este tipo de cáncer».

El señor Gutiérrez vio un halo de esperanza, había oído hablar de las nanotecnologías, pero no sabía que tenían una aplicación tan valiosa en la vida cotidiana.

Efectivamente, el Abraxane es una realidad, se compone de nanopartículas de albúmina, la principal proteína de la

sangre, y se aplica en cáncer de páncreas, pulmón o pecho. Es uno de los productos de la nanomedicina que ya se encuentra en el mercado, además de otras aplicaciones que ya alcanzaron el uso clínico. Otro ejemplo sería el Caelyx/Doxil, una evolución de la doxorubicina, medicamento contra el cáncer encapsulado en recipientes moleculares hechos de liposomas (membranas de grasa). Esta presentación reduce los efectos secundarios del tratamiento al concentrar el medicamento en los tejidos donde se necesita.

Actualmente, también se comercializa el Cimzia, aprobado en 2008 por la Food and Drug Administration de Estados Unidos (FDA) para la enfermedad de Crohn y en 2009 por la European Medicines Agency (EMA) para la artritis. Para crear el medicamento se acopló un fragmento de un anticuerpo (hecho de proteínas y partes de proteínas) con un polímero soluble en agua. Sus características les permiten intervenir con gran especificidad sobre los procesos biológicos a nivel molecular.

Y son solo algunos ejemplos de productos reales en nanomedicina a los que debemos agregar el uso de nuevas herramientas para investigar compuestos biológicos. Están, por ejemplo, las microscopías de sonda de barrido y las pinzas ópticas para estudiar las propiedades de biomoléculas individuales en condiciones cercanas a las que tienen en la naturaleza. También, como veremos a continuación, se usan nanomateriales como los puntos cuánticos, los nanoimanes o el nanoro. Y esto sin entrar en el posible uso terapéutico de los ácidos nucleicos, ya sea fragmentos de ADN o pequeños fragmentos de ARN como el siRNA (ARN interferente pequeño) en terapia génica.

Andrea no podía dejar de pensar en la locura de la situación, sentía que se ahogaba y salió al balcón a respirar aire fresco. Lo que vio la puso más nerviosa: las calles estaban en absoluto silencio, no se oía ni el ruido de los coches, solo se

escuchaba ligeramente el silbar del viento y el piar de algunos pájaros. «¿Sería así el preludio del apocalipsis?» pensó. Llevaba 90 días encerrada y no se veía la luz al final del túnel; el coronavirus mantenía a un tercio de la población mundial confinada en casa. Volvió a la sala y preguntó a su padre: «Papá, ¿por qué no se pueden hacer pruebas para hallar coronavirus como se hace para detectar otras cosas?, así tendríamos más clara la situación y podríamos salir de casa».

«Desafortunadamente, las cosas no son tan fáciles. Se puede detectar, pero necesitamos tiempo para tomar una muestra y, luego, obtener el resultado; pero espero que pronto descubran nuevas pruebas con resultados rápidos».

«Ojalá, papá. Ojalá». Contestó cabizbaja la niña.

Si pudiéramos hablar con Andrea le pediríamos paciencia, pero también le daríamos esperanza: gracias a las nanotecnologías se ha logrado detectar el SARS-CoV-2 de forma rápida y no solo eso, las diferentes vacunas para prevenir el coronavirus y los medicamentos para tratarlo, que ya nos ofrecen esperanzas, trabajan todos en la nanoescala.

Así, gracias a la fotónica, será posible desarrollar dispositivos *point-of-care* (POC) para detectar el virus SARS-CoV-2 (causante de la COVID-19) en menos de 30 minutos²⁶. Así es posible identificar esta y otras enfermedades a nivel molecular para tratarlas en sus primeros estadios.

Estos dispositivos se basan en estrategias de construcción de dos tipos: *in vivo* e *in vitro*. Los primeros actúan dentro del cuerpo humano, lo cual resulta harto difícil porque se trata de un sistema muy complejo; como un nudo con miles de autopistas llenas de coches. Si queremos que un dispositivo se mueva dentro de nosotros primero debemos pasar las defensas de nuestro sistema inmunitario, debe ser biocompatible, y además hemos de considerar que la sangre es muy

26 El proyecto CONVAT se basa precisamente en la explicación desarrollada.

viscosa y moverse en ella es como nadar en una piscina de miel. Así, construir y usar estos nanodispositivos es un reto mayúsculo. La alternativa es sacrificar el efecto *in vivo* para minimizar problemas con artefactos *in vitro*. Estos nos permiten diseños más sofisticados y, además, presentan la gran ventaja de detectar señales con muy poco fluido o tejido, son altamente sensibles (respuesta rápida a pequeños cambios) y específicos (muy efectivos para detectar agentes químicos y biológicos particulares).

Un ejemplo de dispositivo *in vitro* sería el POC anteriormente mencionado. Estos son rápidos y fiables, necesitan apenas micro o nanolitros de muestra y no requieren tratamientos previos de la muestra ni laboratorios clínicos de análisis. Los POC de nanopartículas de oro funcionan de la siguiente manera: se recubre la nanopartícula con un receptor biológico que detecta la sustancia, por ejemplo, a través de una de sus proteínas; el aparato incluye un sensor para captar la reacción de reconocimiento biomolecular y dar una información medible. Se construyen depositando una capa de nanopartículas de oro, de pocos nanómetros, sobre un material dieléctrico (un aislante que responde a un campo eléctrico). A continuación, se usa un láser para excitar las nanopartículas, si estas se topan con el material biológico a detectar hay una variación de intensidad en la luz reflejada que indica un cambio en la resonancia del plasmón. Con esto se logra identificar la sustancia a analizar de forma eficiente y selectiva.

Por otra parte, también podemos usar los puntos cuánticos (PC) en dispositivos *in vivo*. La estrategia consiste en funcionalizar la nanopartícula, es decir, modificar su superficie con un material biológico. A partir de ahí, se introduce en el cuerpo humano con la idea de que se acumule en la célula a detectar (en el caso que esta esté presente). Por ejemplo, es posible marcar una célula cancerígena con un biosensor específico que reconoce el receptor tumoral (como si fuera

la llave que abre la puerta de la célula) y esto permite acumular puntos cuánticos en ella. Desde el exterior del cuerpo se irradia con rayos ultravioleta para producir fluorescencia que permita localizar los puntos cuánticos y, con ellos, la célula tumoral. Si no se produce ningún brillo en el interior del cuerpo, significa que no hay PC y, por tanto, que no hay ningún tumor.

A su vez, varias de las vacunas ya en el mercado han usado la nanotecnología para su desarrollo.

Pero el aporte de los PC no termina ahí: pueden facilitar la administración controlada de fármacos o usarse como agentes antiinfecciosos. De todos modos, el proceso es complejo porque se deben sintetizar de forma pura y correcta, han de ser biocompatibles y estables, evitar ser atacados por nuestro sistema inmune, carecer de toxicidad y recorrer el cuerpo humano sin ser eliminados.

Por otra parte, el grafeno también tiene excelentes propiedades eléctricas, mecánicas y con alta superficie específica, ideales para usarlo como nanodispositivos. Ya está presente en aparatos para detectar niveles de glucosa de forma rápida, precisa y eficiente. También se prevé su aplicación en la detección de hemoglobina, colesterol o para secuenciar ADN.

Al ir más allá de los procesos de detección, entramos en la segunda posibilidad del uso de la nanotecnología en nanomedicina: tratamiento de enfermedades. Esto implica transportar de forma precisa un medicamento hasta una posición exacta en el cuerpo, aumentando su eficacia para reducir considerablemente su dosis y, con ella, los perniciosos y agresivos efectos secundarios. Además, se desarrollan herramientas moleculares para tratar con ultraprecisión los tejidos dañados, desobstruir cavidades (como los vasos sanguíneos) o actuar directamente sobre un tumor, como hace el Abraxane. Las implicaciones de semejantes avances a corto y medio plazo todavía son impredecibles, pero a la larga significarán un cambio de paradigma en la medicina.

Los nanotubos de carbono, por otra parte, se pueden usar para la liberación controlada de fármacos, lo que se conoce como *drug delivery*. Esto permite entregar la cantidad correcta de medicamento en la zona adecuada con el fin de minimizar los efectos secundarios. Serían el equivalente a los trabajadores de correos que dejan los paquetes en las direcciones de destino. Otra opción de nanorrecipientes para liberación controlada de medicamentos, o *drug delivery*, es formar esferas con nanopartículas poliméricas, o con liposomas, que en su interior tienen el medicamento y que al llegar a la zona a tratar liberan la sustancia de forma local. Son como enanísimos huevos Kinder, donde la sorpresa es un medicamento que quizás nos salve la vida.

A estos casos se suman las nanopartículas magnéticas, conocidas en medicina como SPION (nanopartículas de óxido de hierro superparamagnéticas). Estas también se deben funcionalizar, por ejemplo, recubriéndolas con un anticuerpo que reconoce un antígeno tumoral, acoplándose como una llave en el candado correcto. Las SPION se investigan para tratar los tumores cerebrales tipo glioblastoma, los cuales, por su difícil acceso, muchas veces son intratables. La estrategia es ingresarlas en el cuerpo para que se unan a las células cancerosas en el cerebro; luego, se usa un campo magnético externo que hace vibrar las nanopartículas magnéticas. La vibración brinda el calor suficiente para quemar el tumor —con temperaturas superiores a 43°— sin afectar a las células sanas cercanas. Por otro lado, las nanopartículas magnéticas ya se usan para mejorar el contraste en las máquinas de resonancia magnética nuclear.

Por último, las nanotecnologías se pueden usar en terapias directas sobre nuestros genes. Pueden transportar pequeños fragmentos de ADN a zonas concretas o manipular genes y átomos útiles para bioimagen, proteómica e ingeniería de tejidos. Estas técnicas genéticas cada vez están más de moda, porque abren valiosas posibilidades en la manipu-

lación genética, como tratar enfermedades hereditarias que de otra forma son incurables o difícilísimas de tratar.

Lidia no podía ni moverse. Las consecuencias del cáncer habían sido devastadoras para su espalda: la vértebra lumbar estaba destrozada, mermando su movilidad de forma considerable. La mujer de 37 años tenía la moral por los suelos y eso que acababa de superar un cáncer de mama con metástasis. Después de todo lo que había pasado, después de tanta la lucha, se sentía exhausta y triste al escuchar a su doctor mientras veía la radiografía de su columna vertebral. El doctor Núñez, normalmente inexpresivo, hablaba con una voz suave, pero con un tono alegre que ella no podía entender. «De qué se ríe, se nota que no es su columna ni su movilidad», pensó Lidia. Había pasado de estar triste a estar enojada. Todo cobró sentido con unas palabras esperanzadoras del doctor: «Nos ha llegado un nuevo tratamiento de injertos celulares basados en nanopartículas que pueden ayudar a regenerar su vértebra». Lidia también sonrió.

Además de sus usos para detectar o tratar enfermedades, las nanotecnologías también pueden regenerar una parte dañada del cuerpo o reparar tejidos tras una enfermedad. Hay enfermedades muy agresivas con el organismo que afectan a órganos enteros o un número significativo de células, para dejar partes concretas necrosadas o inservibles. A veces, las zonas dañadas se logran recuperar de forma natural, pero en otros casos el daño es irreversible. Esto se acentúa en las enfermedades neurodegenerativas, como el párkinson o el alzhéimer, que afectan tejidos y estructuras críticas en el cerebro, sin olvidarnos del dramático caso de las hemorragias intracraneales.

Aquí se necesitan estrategias para regenerar diferentes tipos de tejidos y las nano ofrecen opciones muy interesantes. Esto es lógico si pensamos que la interacción célula-célula y célula-matriz en los sistemas biológicos ocurre en

la nanoescala. Así, el diseño de injertos y tejidos artificiales capaces de reconstruir estructuras de células y tejidos ha mejorado significativamente en los últimos años. Las nano brindan la gran ventaja de replicar las condiciones de la parte del cuerpo en cuestión con una estructura creada en el laboratorio.

De esta manera se logra regenerar huesos con nanopartículas de policaprolactona, fosfato de calcio, nanotubos de carbono o titanio recubiertos con hidroxapatita. También, se realiza la regeneración de cartílago mediante el uso de nanopolímeros (de PVA/PCL). Para el sistema nervioso periférico se aplica colágeno electrohilado y para el sistema nervioso central se usan nanopartículas de quitosano de silicio o nanofibras híbridas cargadas con nanopartículas de oro. Para la regeneración de la piel se usan, entre otros sistemas, las nanopartículas de plata o los nanotubos de carbono. Por último, las nanopartículas superparamagnéticas sirven para tratar problemas en los ojos.

A su vez, para reparar un defecto en el genoma de un organismo, hay que eliminar, alterar o insertar un código genético en ubicaciones atómicamente precisas en la secuencia de ADN. Esto se logró gracias al descubrimiento del CRISPR-Cas9, una nanoherramienta que abre una puerta al tratamiento de enfermedades hereditarias y al impulso de la agricultura. Esta técnica fue descubierta y desarrollada por Emmanuelle Charpentier, Jennifer A. Doudna y Virginijus Šikšnys, ganadores del Premio Kavli de nanociencia 2018.

CRISPR-Cas9 se sintetiza a partir de una pequeña molécula de ARN que codifica una secuencia del ADN que se va a alterar. Esta molécula de ARN se une a una proteína Cas9 para formar un complejo CRISPR-Cas9. El complejo se adhiere al ADN objetivo. A continuación, Cas9 abre y escinde el ADN exactamente en la ubicación deseada. A medida que los segmentos de ADN se reconectan, los genes pueden insertarse o desfuncionalizarse. De esta forma, pue-

den corregirse las mutaciones que causan algunas enfermedades cambiando el código genético existente. CRISPR-Cas9 funciona en muchos organismos, incluidas plantas, hongos, animales y humanos. Esto implica el estudio detallado de muchos organismos genéticamente intratables hasta ahora. Por ejemplo, permitirá corregir mutaciones que causan enfermedades y utilizar la terapia génica para curar padecimientos graves, como la distrofia muscular, la anemia de células falciformes y algunas formas de ceguera y cáncer.

A esto hay que añadir las grandes posibilidades de combinar las nanotecnologías con las células madre. La principal característica de las células madre radica en ser pluripotentes, es decir, pueden dar lugar a cualquier tipo de célula especializada. El comportamiento de estas células depende de su entorno bioquímico y las propiedades mecánicas locales en la nanoescala. Si se entienden estas condiciones, podremos acercarnos a replicar las condiciones de las células madre para crecer nuevos tejidos en diferentes órganos, para crear nueva piel, hueso y cartílago, o incluso llegar a regenerar el tejido cardíaco o las células nerviosas.

Las posibilidades que ofrecen las nano, a corto, medio y largo plazo, son inmensas; incluso se habla de un cambio de paradigma en el mundo de la medicina. Todo indica que en pocos años esta ciencia será muy diferente a como la conocemos actualmente, con nuevas formas de detectar y tratar enfermedades, incluyendo la combinación de ambas o creando nuevas posibilidades para la medicina regenerativa. Todo esto aún sin el desarrollo de máquinas moleculares y nanorrobots, que tienen un potencial aún mayor para revolucionar la medicina.

¿Quién se puede imaginar tener en su cuerpo enjambres con millones de nanopartículas que, de forma inteligente, se encargan de cuidar su salud? ¿Realidad o ficción?

DEL *GREY GOO* AL *PINK GOO*: LAS MÁQUINAS MOLECULARES SON EL FUTURO

Karen caminaba por los pasillos de su escuela con alegría evidente, hoy tenía clase de máquinas moleculares. Apenas llevaba unas semanas como estudiante de primer año de medicina y esta materia ya era su preferida. Había escuchado hablar de ellas, como todo el mundo, antes de entrar en la carrera, pero ahora sentía el poder de tenerlas en sus manos. La gente más pudiente las comenzaba a usar con excelentes resultados y el objetivo era hacerlas llegar a toda la población. Ella venía de Zacatecas, en México. Allí todavía no habían llegado estas minúsculas máquinas, pero a medida que escuchaba más sobre su funcionamiento y la forma de aplicarlas, tenía más claro que se dedicaría en cuerpo y alma a ellas. Karen quería mejorarlas y hacerlas más accesibles, estaba segura de que muy pronto llegarían a Zacatecas y ella tenía que ser una de las personas clave para conseguirlo.

Siguió atenta cada palabra de su profesor: «El objetivo de las máquinas moleculares es que se puedan mover libremente, de forma controlada y repetitiva, a partir de un estímulo que les aporte energía. Pueden detectar enfermedades al primer síntoma o antes de que se manifiesten, se espera que pronto puedan actuar en el interior del cuerpo humano como auténticos nanocirujanos. Por ejemplo, podrán realizar un tratamiento personalizado o llevar un medicamento a un sitio concreto del cuerpo. Su uso no se ciñe únicamente a la medicina, también pueden usarse en la electrónica o el tratamiento de aguas. Su impacto superará el de los microprocesadores a finales del siglo pasado, que llevaron la informática a todas partes».

Y Karen siguió escuchando: «Para detectar la enfermedad de manera más eficiente inyectamos un quimioterapéutico fotocontrolado en los nanorrobots y activamos la sustancia con luz láser, mientras se usa imagen por resonancia magnética para detectar el tumor». Karen no podía estar más fascinada.

Todavía faltan muchos años para que las máquinas moleculares y su versión más *cool*, los nanorrobots, lleguen a tener aplicaciones prácticas reales. A continuación, explicaremos las principales características y las potenciales aplicaciones de esta nueva etapa en la evolución de las nanotecnologías. Se estima que entre mediados y finales de siglo, las máquinas moleculares serán parte de los procesos de construcción de muchos sistemas industriales, permitiendo avances sin precedentes, muchos de ellos disruptivos.

La maquinaria molecular busca realizar una serie de movimientos a partir de un estímulo externo. Este llegará en forma de luz o electricidad, proveniente de reacciones fotoquímicas o electroquímicas, cosa que hoy en día se comienza a investigar. También, se están diseñando sistemas de propulsión a partir de estímulos acústicos, magnéticos o lumínicos. Este impulso externo sin duda facilitará su uso. Claro que también pueden usar un propulsor interno, por ejemplo, un fluido corporal como la orina. No debemos olvidar que la naturaleza ya usa las nanomáquinas en distintos procesos; por ejemplo, la fotosíntesis o en sistemas biológicos tan importantes como la transcripción, replicación o traducción del ADN.

Lo que sigue pendiente, y no se logrará a corto plazo, es la interacción precisa de las nanomáquinas con moléculas individuales para realizar movimientos ordenados y jerarquizados o ejecutar un trabajo concreto en micro o nanoentornos. Es decir, hace falta la energía adecuada para su movimiento y, a su vez, controlar la dinámica de sus componentes. Solo así se podrá realizar una acción controlable y repetible con un fin determinado.

Actualmente, este tipo de máquinas se basan en arquitecturas con moléculas enclavadas mecánicamente, como los catenanos o rotaxanos que ya discutimos anteriormente. Con estas estructuras se ha logrado, por ejemplo, modificar la estructura de las membranas celulares, así como manipu-

lar motores que hacen girar objetos macroscópicos o impulsar nanopartículas en solución.

Como vemos, las acciones posibles aún son bastante rudimentarias. Pero no hay que desesperarnos, según el boletín del Premio Nobel de Química concedido a los pioneros de las máquinas moleculares «en términos de desarrollo, el motor molecular está en la misma etapa que en la que se encontraba el motor eléctrico en la década de 1830, cuando los científicos mostraron varias bielas y ruedas giratorias, ventiladores o procesadores de alimentos». A medida que mejoremos la electrónica molecular, los sistemas nanoelectromecánicos (NEMS), la nanofotónica o la nanomedicina, será posible avanzar en los diseños de estas máquinas.

Por ahora, estos dispositivos son fabricados únicamente por la naturaleza, los prototipos artificiales se encuentran en una fase primigenia. Buscamos usarlos en diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades, así como en traumatismos y lesiones, para lograr una mejora global de la salud.

Para encontrar algún ejemplo de prototipo de estas entidades, viajaremos a una universidad que ha aparecido varias veces en este libro, el Instituto Tecnológico de California (Caltech). Allí, en 2016, lograron programar ADN para controlarlo y lograr acciones como fusionarse con otras células u operar sobre otro material de ADN; eso sí, sin controlar su movimiento. Otra tecnología en desarrollo es la del ensamblaje posicional que permite acomodar mecánicamente estructuras de determinadas formas de carbono para la carcasa de un nanorrobot.

A su vez, ya se logró fabricar motores de un solo átomo de calcio, un motor térmico construido en la Universidad de Maguncia en 2014. También se han fabricado «nanonadadores» de apenas 200 nm de grosor capaces de desplazarse a través de fluidos biológicos. Con ellos esperamos administrar medicamentos localmente a células tumorales mediante un control magnético. Por último, se han reportado nano-

transductores que producen fuerzas colosales con relación a su ínfimo peso.

En el avance de los nanorrobots también tendrán que ver otras tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, que nos permitirá predecir y organizar los movimientos de los nanorrobots. Cuando al fin se puedan usar, no tendremos un solo nanorrobot en el cuerpo, sino cientos de millones y su movimiento seguramente será algo caótico. Resulta esencial que se muevan de forma ordenada, como hacen, por ejemplo, las hormigas o las abejas, lo que se conoce como inteligencia de enjambre. Además, se buscará que se autoensamblen —tal y como predijo Drexler— para procesar información y permitir una transición macro-nano «más amigable». Esta misma virtud los hará más compatibles con el sistema inmune y ayudará a su bioincrustación en los tejidos biológicos complejos.

Respecto a potenciales aplicaciones, algunas se orientarán a la administración controlada de fármacos en lugares específicos. Un segundo uso será el monitoreo continuo de nuestros signos vitales para un servicio de nanocentinelas las 24 horas del día. Esto brindará las condiciones para actuar al menor cambio, de forma rápida y eficiente: una verdadera medicina en tiempo real. Imaginemos el impacto que algo así tendrá en casos de trombosis, derrames cerebrales o diabetes. La tercera aplicación se orientará a convertirlos en los nanocirujanos del futuro, máquinas que detecten patologías y actúen contra ellas, corrijan lesiones o realicen cirugías ultraprecisas.

Debemos decir que la nanocirugía ya es una realidad, gracias al uso de nanopipetas para cortar en su totalidad dendritas de neuronas individuales sin dañar los tejidos circundantes. Por último, las máquinas moleculares mejorarán la terapia génica, monitoreando y corrigiendo cualquier irregularidad en el ADN.

Y es que las oportunidades son ilimitadas e incluso cercanas a la ciencia-ficción. Imaginen un ejército compuesto

por millones de estos nanorrobots, una especie de *pink goo* (visión positiva del *grey goo*) al servicio de nuestra salud, con la misión de eliminar tumores, luchar con todo tipo de virus (como el que nos afecta actualmente), detener enfermedades neurodegenerativas y luchar contra los efectos de la vejez, como daños genéticos y mutaciones.

Quizás en 60 años miraremos esta época como nosotros miramos actualmente la época de Feynman, cuando la posibilidad de manipular los átomos a voluntad era una utopía y solo un visionario fue capaz de imaginarla. Es imposible predecir, a ciencia cierta, el impacto futuro de estas pequeñas máquinas y de las nanotecnologías en general; aun así, solo pensar hasta dónde pueden llegar nos hace sonreír. Tenemos la esperanza de un futuro mejor basado en el mundo atómico.

Lo que será fundamental es garantizar que su uso sea responsable. Abundan los ejemplos en la historia de imprudencia en el desarrollo de tecnologías disruptivas, como el uso precipitado de materiales radiactivos en productos que terminaron por causar cáncer a sus productores y usuarios, la aplicación de la energía nuclear en la bomba atómica, así como los avances en manipulación genética para la guerra biológica.

Para cerrar, dejamos abierto un debate ético que está relacionado con la historia de Karen. Se debe garantizar que los beneficios de las máquinas moleculares lleguen a todas las personas, sin importar sus ingresos. Así lo pidió la Asamblea General de las Naciones Unidas al declarar a la nanobiotecnología patrimonio de la humanidad, con la petición de desarrollarla como una tecnología abierta, con fines pacíficos para beneficio de toda la sociedad.

Y, por último, formulamos una pregunta que intentaremos contestar en el próximo capítulo:

¿el desarrollo de las nanotecnologías debe responder a los valores, necesidades y preocupaciones de la sociedad? Es decir, si las nano empiezan a definir cómo vivimos, ¿no deberíamos poder influir en la forma en que avanzan?

10

La vida es un riesgo (y también las nanotecnologías)

Blanco como un fantasma, con bloqueador solar en todo el cuerpo, así tenía que estar para poder salir cuando mis padres me llevaban de vacaciones a la playa. Y aunque no me gustaba mucho esa apariencia, no había otra si no quería tener dolorosas quemaduras que dejaran la piel más roja que una gamba que desembocaba en mudar la piel como las serpientes, cosa que no recomiendo en absoluto.

De pequeño no me causaba problemas dejarme ver con el color de un espectro; pero ya en la pubertad, mi vanidad entraba en conflicto con la crema bloqueadora. «¿Es mucho pedir contar con un protector solar transparente?», reclamaba para mí mismo.

Pero ¿por qué la crema daba ese aspecto fantasmagórico sobre mi cuerpo? El problema estaba en el óxido de zinc, el material más efectivo para proteger nuestra piel de los rayos ultravioleta, junto al óxido de titanio, y precisamente el responsable del residuo blanco. Hace algunos años me enteré de que, gracias a las nanotecnologías, se logró evitar la man-

cha o el color blanco del material: si se usa el óxido de zinc en nanopartículas, la sustancia es transparente y brinda incluso más protección ante los rayos solares.

Genial, una excelente oportunidad para quitarme el problema de las manchas blancas y probar en carne propia las nuevas tecnologías. Para mi siguiente viaje familiar a la playa, ya casado y con dos hijas, compré un bloqueador solar transparente y todos lo usamos sin problemas, evitamos las quemaduras sin tener que parecer fantasmas. Bendita tecnología.

Pero no todo es de color de rosa. Al poco tiempo me enteré de que quizá, en mi entusiasmo por las ventajas del nuevo producto, me precipité en el uso de una tecnología que no conocía bien. La Comisión europea ha restringido el uso de este tipo de nanopartículas en productos en spray por potenciales efectos carcinógenos. En particular, al inhalar nanopartículas de óxido de zinc —como las que contiene el bloqueador— se corre el riesgo de desarrollar daño pulmonar. Este problema no lo tenemos en las cremas untadas, donde evitamos el efecto de inhalación y las cuales se comercializan y pueden adquirirse de forma segura.

Además, hay diferentes estudios²⁷ que documentan que otros tipos de nanopartículas —como los nanotubos de carbono, el dióxido de titanio (también usado como protector solar) o la plata— al ser inhaladas o ingeridas pueden causar efectos nocivos en los seres vivos: desde daño celular hasta desarrollo de tumores. Existen resultados contradictorios en diferentes estudios sobre si las nanopartículas pueden o no penetrar la epidermis para afectar las células de la piel. Todo esto lo tenemos que poner en contexto, porque los efectos nocivos de las nanopartículas dependen de diferentes pará-

27 Existen muchos trabajos al respecto, como ejemplo podemos citar las investigaciones publicadas por Cheng-Chung Chou y su equipo en 2008, Gilliam Federici y colaboradores en 2007, Craig Poland y su equipo en 2008 y Wenjuan Yang y colaboradores en 2009.

metros: la forma, el tamaño, el estado en que se encuentran o la dosis, entre otras muchas cosas, por lo que extrapolar los efectos globales tanto de una nanopartícula, en particular como de las nanopartículas, en general, resulta poco preciso y aventurado.

Con esta información, me enfrenté a la decisión de si debía o no seguir usando los nuevos bloqueadores en formato spray. En mi caso me pareció que el riesgo de dañar los pulmones, aunque no estaba claro, por pequeño que fuera, no valía la pena y preferí usar las presentaciones clásicas. De hecho, quizá debamos evitar, en la medida de lo posible, productos con nanopartículas en aerosol (por los efectos que puedan tener al inhalarlas).

El punto es que, las propiedades de las partículas a escala nano nos pueden ayudar en un gran número de problemas, pero pueden generar riesgos inéditos. Por eso antes de usar un producto que involucra estas nuevas tecnologías es importante saber a qué riesgos nos puede exponer y revisar si los beneficios justifican su uso. Hemos de balancear el coste-beneficio.

En el caso de innovaciones recientes, basadas en avances científico-tecnológicos de vanguardia, no es sencillo saber desde un inicio cuáles son los riesgos a los que nos pueden exponer. Por lo general, esto implica largos procesos de investigación para descartar diferentes tipos de problemas y con frecuencia las empresas no comprueban los resultados para introducir nuevos productos al mercado. Pero no es correcto esperar a ver qué daños causan en los usuarios para empezar a tomar precauciones; eso de tapan el pozo hasta que se ahogó el niño no es una buena idea. Ojo, que no se trata de desechar una innovación útil, sino de tomar las medidas para utilizarla con el menor riesgo posible. En este sentido, las nanotecnologías han crecido teniendo en cuenta sus posibles efectos nocivos y, prácticamente en paralelo a su eclosión, se han desarrollado cientos de estudios para inves-

tigar su posible toxicidad, incluso han nacido nuevas disciplinas, como la nanotoxicología. Esto no ha ocurrido así históricamente con otros desarrollos, por ejemplo, hay expertos que dicen que de los más de 100 millones²⁸ de sustancias químicas conocidas, apenas el 5 % están bien estudiadas y reguladas desde el punto de vista toxicológico.

Un caso ejemplar sobre el manejo de riesgos es el automóvil, una tecnología que simplemente no podemos dejar de usar, pero que desde un inicio mostró dos importantes elementos de riesgo: el daño para los ocupantes en caso de un accidente (que incluso puede resultar fatal) y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. De acuerdo al Global Status Report on Road Safety 2013 de la Organización Mundial de la Salud, 1,24 millones de personas mueren cada año en accidentes viales (25.000 de ellas son mexicanas y un millar, españolas). Por otro lado, aunque la industria es la principal emisora de gases de efecto invernadero, los vehículos automotores se han convertido en un importante factor que contribuye al calentamiento global.

Todo esto no detuvo la producción de automóviles, ni redujo su compra, pero sí desencadenó una serie de avances para reducir su riesgo e impacto. Así, para proteger a los usuarios se crearon elementos como el cinturón de seguridad, las barras laterales y las bolsas de aire; y para reducir las emisiones contaminantes se desarrollaron el filtro, el convertidor catalítico, así como importantes mejoras en las gasolinas. Y esto sin entrar en toda la evolución de la industria de la automoción hacia los vehículos eléctricos.

La clave aquí es no ignorar los efectos no deseados de una revolución tecnológica, por el contrario, se les debe poner la mayor atención posible para evitar que nos afecten a nivel

28 El 23 de junio de 2015, el registro de sustancias del Chemical Abstract Service llegó a los cien millones, aunque muchas de ellas ya no existen.

social e individual. Solo así será posible que gobiernos y empresas implementen regulaciones y estrategias de seguridad, a la vez que se les dará la oportunidad a las personas de tomar decisiones conscientes sobre las tecnologías que usan y la forma en que minimizan sus riesgos. Al menos, ese sería el ideal si hacemos caso a la experiencia con avances previos.

FANTASMAS DE LAS INNOVACIONES PASADAS

Generalmente, los protagonistas de las nuevas revoluciones están tan emocionados con la oportunidad de revolucionar la forma en que vivimos, ganar un Premio Nobel o hasta resolver los problemas financieros de toda su familia, que no siempre se fijan en los riesgos de los avances que desarrollan. Además, como generalmente buscan conseguir apoyo para continuar con sus investigaciones, tienden a concentrarse en las bondades de sus descubrimientos.

Algo así ocurrió al inicio del siglo pasado con el estudio y aprovechamiento de la radiactividad natural. Si bien, en un inicio el descubrimiento de Henri Becquerel no recibió mucha notoriedad, cuando Marie y Pierre Curie empezaron a obtener resultados más importantes muchas personas se animaron bastante con el asunto. Y no era para menos: había materiales —como el uranio, el polonio y el radio— que liberaban energía sin recibir ninguna ayuda exterior, emitían rayos X, rayos gamma, así como partículas subatómicas a grandes velocidades. Rápidamente se encontraron aplicaciones como el uso de los rayos X para producir imágenes del interior del cuerpo de las personas, una verdadera revolución para la medicina. La misma Marie Curie dio su vida aplicando la tecnología de rayos X durante la I Guerra Mundial para ayudar a los soldados heridos durante la contienda; es más, se desplazaba con diferentes equipos en vehículos que fueron conocidos como *les petites curies*, los cuales

salvaron cientos de vidas, pero lamentablemente fueron uno de los detonantes de llevarse la suya propia.

El entusiasmo por el descubrimiento desbordó a la comunidad científica y tuvo gran efecto en la sociedad de su tiempo. Muchas empresas empezaron a incluir elementos radiactivos en productos como pastas de dientes, tónicos «medicinales», cremas faciales, manecillas de reloj, supositorios y hasta vigorizadores sexuales. Las supuestas virtudes de la radiactividad incluso encontraron un territorio fértil en la fantasía del mundo de los cómics, recordemos que el Hombre Araña obtuvo sus poderes como consecuencia de ser picado por una araña radiactiva.

Desafortunadamente, muchos avances se lanzaron al mercado sin tomar en cuenta los posibles riesgos de los productos radiactivos para sus usuarios y las personas que los fabricaban. Existían indicios de peligro, pero pocas personas los conocían: a principios del siglo XX un equipo alemán dio a conocer un informe sobre efectos nocivos de las emisiones radiactivas en el cuerpo humano. El daño iba desde quemaduras, malestar, náuseas o incluso, con más exposición, cáncer. Los resultados no fueron tomados muy en serio ni fueron divulgados de forma adecuada, de modo que los laboratorios y las fábricas mantuvieron sus labores sin tomar las precauciones necesarias. Resultaría absurdo desechar un avance tan importante como la radiactividad, pero la clave era dar a conocer los peligros asociados a los materiales radiactivos y tomar las medidas necesarias para minimizar los riesgos al aprovecharlos.

Después de varias décadas de problemas se consiguió corregir el error hasta el punto de que actualmente existen muchas regulaciones para proteger a los individuos expuestos. Lo malo es que para llegar a esta situación miles de personas —entre investigadores, obreros y consumidores— tuvieron que sufrir problemas de salud. De hecho, la propia Marie Curie, tal y como comentábamos antes, fue víctima de

sus avances: murió en 1934 de anemia aplásica causada por su prolongada exposición a la radiación.

No debemos olvidar que, como dice el Hombre Araña, «todo gran poder implica grandes responsabilidades»²⁹. Y, en una sociedad dominada por los avances de la ciencia y la tecnología, se debe preparar para un hecho ineludible: cualquier tecnología nueva trae consigo efectos no deseados que deben ser tenidos en cuenta antes de introducirla al mercado. Es un hecho que no existe el riesgo cero, la vida misma es un riesgo, en muchos sentidos, y tenemos que prepararnos para llevarla de la mejor forma posible, con tecnologías o sin ellas. Claro que a veces los problemas ni siquiera surgen de los avances, incluso pueden relacionarse con la percepción que la sociedad tiene de ellos.

FOBIA A LA NANOFOBIA

Larry Bell estaba más que emocionado antes de la reunión. Llevaba semanas preparándose para presentar, ante la National Science Foundation (NSF), la obra de su vida: una gran colaboración de los más grandes museos de ciencias en Estados Unidos —de Boston, Minnesota y San Francisco— para desarrollar un programa de divulgación científica sin precedentes. Estaba en juego un apoyo de 20 millones de dólares, un monto sin precedentes, y su equipo se preparó a conciencia, tenían respuesta para todo lo que pudieran preguntarles. Bueno, para casi todo...

Como discutimos previamente, a principios del nuevo milenio existía un gran temor de que Warner Bros. llevara al cine la historia de la novela *Prey*, de Michael Crichton, en

29 De hecho, la frase original, en su esencia, viene del filósofo francés Voltaire.

la que un enjambre de nanopartículas se sale de control. Incluso algunas personas creen que este miedo desencadenó la convocatoria para este apoyo gigantesco para divulgar las nanotecnologías, por eso no fue tan extraño cuando le preguntaron qué harían si se produjera la película de *Prey*.

Si bien la pregunta del comité de la NSF resultó extraña, Bell tenía experiencia de sobra para poder lidiar con el tema. Realizaba actividades de divulgación científica desde que era estudiante del MIT en los sesenta y a partir de ahí desarrolló una brillante trayectoria en el Museo de Ciencias de Boston. Así, el líder del proyecto dijo que la película no sería un peligro, sino una gran oportunidad para despertar curiosidad en el público (quizá a partir del morbo) y con eso implicaría un fuerte estímulo para involucrarlo en una discusión sobre nanotecnologías para ofrecer elementos sólidos y valiosos de estos avances.

Con esto acabó de convencer a los evaluadores para lograr que se aprobara la iniciativa de la Red de Educación Informal sobre Ciencia a Escala Nano (NISE Net por sus siglas en inglés), el proyecto de divulgación científica más grande y ambicioso de la historia. Entre 2005 y 2015, esta Red involucró a más de 250 instituciones en sus actividades con un impacto para más de 25 millones de personas. Y el aporte no se limitó al impacto en Estados Unidos, crearon contenidos de libre acceso (que también están en español) que compartieron en su sitio web. A partir de esta gran colaboración, la NISE Net evolucionó en 2015 para ampliar sus miras y ahora, además del tema nano, aborda muchos otros temas científicos enfocados en la educación STEM (Science, Technology, Engineering y Math).

Esto significa que el miedo a una reacción negativa contra las nanotecnologías impulsó esta maravillosa iniciativa, pero ¿estaba justificado este grado de temor? Sí, totalmente. En las décadas anteriores, la comunidad científica había visto cómo una reacción pública negativa, encabezada por las

protestas de diferentes grupos organizados, se convirtió en un obstáculo mayúsculo para la adopción de los organismos modificados genéticamente (OMG).

A finales de los setenta del siglo pasado, se alcanzó la capacidad tecnológica para realizar ingeniería genética en diferentes seres vivos con la idea de ajustar sus características para resolver diferentes tipos de problemas. Quizá el caso más exitoso, y menos polémico, se encuentre en la manipulación de bacterias para que produzcan la insulina esencial para pacientes con diabetes. De hecho, en general, las aplicaciones médicas de los OMG han tenido una gran importancia y aceptación. El problema ha estado en las orientadas a los alimentos.

Irónicamente, existe una multitud de estudios que avalan la seguridad de consumir frutas o verduras modificadas genéticamente respecto a las de origen natural e, incluso, su uso ha favorecido un consumo más amplio de muchos alimentos. De hecho, en muchos casos los OMG son más seguros: permiten eliminar el uso de pesticidas, además que pueden aportar más nutrientes y cuentan con condiciones para resistir más tiempo antes de echarse a perder. La capacidad de «recortar» partes del ADN de unas plantas para insertarlas en otras y así replicar sus características fue un aporte extraordinario con base en técnicas a escala nano; pero no fue la primera forma de manipulación genética, esto se viene haciendo desde hace miles de años.

Desde que el ser humano empezó a desarrollar la agricultura, se realizó una selección artificial de las plantas que pudieron proliferar. Se elegían los frutos más grandes y sabrosos como referencia para usar sus semillas y sembrar las plantas que habrían de aprovecharse para producir las siguientes generaciones. El proceso de mejora se repitió numerosas veces hasta lograr variedades con características sobresalientes respecto a las plantas originales. Fue así que, por ejemplo, las primeras mazorcas de maíz eran radical-

mente distintas a las que los pueblos prehispánicos llegaron a cultivar gracias a su manipulación genética empírica.

Bueno, y si estas plantas modificadas son seguras, saludables y manipular los genes de los alimentos no es tan nuevo, ¿cuál fue el problema? El detalle es que algunas organizaciones, como Greenpeace, asumieron una postura de agresiva oposición contra el consumo alimentario de los OMG, favorecida por la poca información sobre sus efectos adversos aportada por las empresas del sector. Se emprendieron campañas que los describían como «comidas Frankenstein» (*Frankenfoods*) por el hecho de crear nuevos organismos a partir de «pedazos» de los genes de otras plantas. Esto produjo rechazo, que aún perdura en nuestros días, por parte de algunos sectores sociales, hacia el consumo de frutas y verduras modificadas genéticamente; incluso quienes adoptan la insulina «bacteriana» sin problema se oponen a comer productos de OMG.

Aunque existen componentes irracionales en la discusión sobre estos avances tecnológicos, el movimiento también ha puesto la atención en problemas que merecen discusión. Por ejemplo, el hecho de que compañías transnacionales —como Monsanto— se hayan aprovechado de los desarrollos genéticos para registrar (como propias) variedades naturales de plantas de una forma poco ética, limitando la posibilidad de que los productores tradicionales las cultiven. Además, se han creado muchos frutos sin semilla para evitar que cualquiera pueda sembrarlos. Se trata de aspectos socioeconómicos fundamentales para la discusión de cualquier gran avance tecnológico.

En todo caso, el rechazo a las «comidas Frankenstein» limitó considerablemente el avance de los OMG y sus beneficios potenciales en muchos niveles. Por lo mismo, al contemplar las grandes inversiones que se realizaban en nanotecnologías, existía un profundo temor a un rechazo público que imposibilitara su adopción y avance. Existía una fobia a

la nanofobia, sobre todo contemplando que las nanotecnologías tienen riesgos tan singulares como las mismas propiedades que las hacen maravillosas.

RIESGOS DE LAS NANOPARTÍCULAS

El boom de los productos con nanocomponentes, y la emoción que los rodea, trajo consigo descuidos en términos de seguridad, especialmente por parte de la industria. Se han creado productos con virtudes maravillosas, pero se lanzan al mercado antes de comprobar por completo que no sean un peligro para los consumidores o las personas que los fabrican. A veces da la impresión de que muchas empresas no consideran una prioridad las medidas de precaución para estas nuevas tecnologías. Por suerte, en muchos casos no es así. Pero la responsabilidad no les compete totalmente a ellas, hay casos en que la falta de cuidado proviene del desconocimiento, los riesgos pocas veces se dan a conocer fuera de los círculos científicos, los gobiernos aún no reglamentan el asunto y, con frecuencia, empresarios y consumidores no tienen la información necesaria. Además, los productos se lanzan al mercado con unas regulaciones determinadas por las autoridades competentes, por lo tanto, los productos nano también han de seguir las pautas de los demás productos. Solo en unos pocos casos se ha creado una regulación específica, como en el caso de los productos del sector cosmético o del sector de la alimentación, donde en el etiquetado se ha de marcar la presencia de nanomateriales en su formulación o también en el caso de los plaguicidas.

La clave para el tema de riesgos de las nanotecnologías se encuentra en su entrada al cuerpo: sea por ingestión, inhalación o a través de la vía dérmica o parenteral. En todo caso hacen falta más estudios para conocer los efectos de las diferentes sustancias en los seres vivos, pues no todas se han estu-

diado y hay casos —como el de la plata y el dióxido de titanio— en que materiales inocuos a tamaños mayores resultan dañinos a escala nano; así mismo, falta conocer más sobre los efectos a largo plazo de la acumulación de nanopartículas en los seres vivos y, también, los impactos que los desechos con nanocomponentes pueden tener en el medio ambiente.

A todos los niveles, debe procurarse un enfoque precautorio que ayude a evitar situaciones de riesgo para sacar un máximo provecho de las nanotecnologías. No se trata de caer en un amarillismo en la información o en un fanatismo antinano, por el contrario, la mejor forma de promover las nanotecnologías es aprovechándolas de la forma más segura posible.

Un gran problema radica en que, tal y como comentamos antes, prácticamente no existen regulaciones adecuadas para garantizar la seguridad de los productos con nanocomponentes o para avisar al público de que un producto los incluye. Es como si el entusiasmo por el desarrollo y el potencial de las nuevas tecnologías hubiera rebasado las exigencias de precaución que desde hace años realizan múltiples organismos no gubernamentales, académicos y laborales. No se trata de demandas basadas en un miedo a lo desconocido y con afanes retrógrados, existen evidencias que invitan a la precaución.

Basta dar un vistazo a Google Académico para ver que existen miles de artículos científicos sobre toxicidad y riesgos de las nanotecnologías. Debe tomarse en cuenta que se trata de resultados de estudios *in vitro* o con seres vivos de experimentación, realizados en laboratorio, que no se han desarrollado con seres humanos, sino con ratas, peces, moscas y bacterias, entre otros. Así mismo la disponibilidad de nanomateriales utilizada no es la misma que la que se encuentra en muchos de los procesos y productos desarrollados. Son situaciones muy específicas —en algunos casos con una exposición exagerada—, pero aún no está demos-

trado que no puedan presentarse con los nanoproductos. Y no podemos darnos el lujo de esperar años, o décadas, para ver si alguien enferma o no.

En este sentido, existen mecanismos para ir corrigiendo poco a poco estos defectos. Se estudia arduamente el desarrollo de protocolos laborales para trabajar con nanopartículas de forma segura, desde operar con sistemas de extracción localizada, con equipos de protección individual, sustituir el uso de nanomateriales en polvo (para minimizar la inhalación) y, por supuesto, evaluar la exposición laboral de los trabajadores a través tanto de métodos cualitativos (como, por ejemplo, el método Stoffenmanager) como de métodos cuantitativos, sin olvidar que siempre tiene que imperar el principio precautorio.

Un importante factor a considerar es que, debido a la dimensión de las partículas, cuando los materiales ingresan en el cuerpo de una persona —a través de la piel o por inhalación—, su entrada es inapreciable. Los factores de riesgo de otras tecnologías te pueden hacer sentir mal en unos días con quemaduras, náuseas u otros síntomas, pero cuando las nanopartículas invaden a una persona, esta no se percata hasta que es demasiado tarde y su salud se ha visto seriamente afectada, en el supuesto caso de que así ocurra. Por el contrario, las nanopartículas se suelen usar en muy baja cantidad y debido a su minúsculo tamaño implica que en caso de entrada en el cuerpo siempre será a muy baja dosis, lo que nos da esperanza sobre su seguridad.

Y tenemos que agregar un tema extra, un factor clave que no siempre se tiene en cuenta. Muchas veces cuando se aborda el tema de riesgos de una tecnología se le pone en una balanza contra los beneficios que ofrece. Pareciera lógico analizar si sus aspectos negativos valen la pena respecto a sus impactos favorables. El problema es que las personas que aprovechan las ventajas no son las mismas que sufren el daño por las implicaciones desfavorables. Por ejemplo, los trabaja-

dores que se exponen a nanopartículas en la elaboración de productos con nanocomponentes rara vez tienen los recursos para acceder a tratamientos de nanomedicina de vanguardia o a comprar el equipo de cómputo más sofisticado.

Claro que esta brecha tecnológica de riesgo-beneficio no es algo exclusivo de las nanotecnologías, es algo que ha estado presente desde la Revolución industrial. Pero esto tampoco debe ser un pretexto para conformarnos con el *status quo* y dejar siempre las cosas tal como están; así como no nos conformamos con las tecnologías disponibles y siempre buscamos nuevas formas de resolver nuestros problemas, también debemos intentar mejorar los aspectos sociales que rodean las grandes innovaciones. Un gran objetivo al que podemos aspirar como sociedad, pero debemos pelear de forma individual y sectorial, es construir una mayor equidad en el acceso a los beneficios y en el cuidado de los peligros.

¿QUÉ PODEMOS HACER?

Es innegable que las nanotecnologías han llegado para quedarse y sus múltiples aplicaciones van a mejorar la calidad de vida de millones de personas. Tienen el potencial para resolver grandes problemas como la crisis energética, la escasez de agua potable o se han demostrado imprescindibles para atacar enfermedades temibles como el cáncer, el sida o la misma COVID-19.

Todo esto suena sensacional, pero hasta ahora las principales aplicaciones que ya están funcionando se orientan a productos de lujo: electrónicos (componentes de ordenador, móvil, etc.), cosméticos (protectores solares, maquillajes) y nuevos materiales (equipo deportivo más ligero y resistente, textiles diversos para ropa, recubrimientos de diversos tipos). Es preciso que la sociedad tome conciencia de la trascendencia de las nanotecnologías y busque orientarlas a

resolver problemas sociales, en vez de dejar que sean solo las empresas —y su búsqueda de ganancias— las que definan el camino a seguir.

Este grado de conciencia pública respecto a una nueva tecnología requiere de cierta cultura científica, pero también del compromiso por parte de gobiernos, industria y científicos, para comunicar y discutir las nano (tanto en su parte técnica como en su parte social). Por ejemplo, actualmente en América Latina no hay ninguna obligación para que las empresas que crean un nuevo producto nano investiguen sus posibles riesgos, ni para que informen a los ciudadanos/consumidores del contenido de nanocomponentes en un producto. En la Unión Europea ya existen avances en este sentido, pero ha sido la sociedad civil, y algunas administraciones en alianza con investigadores, la que ha dado la batalla para una mayor regulación.

En última instancia, por tanto, los ciudadanos debemos informarnos para poder exigir las regulaciones que nos permitan buscar, promover y aprovechar innovaciones benéficas a través de las nanotecnologías con la menor exposición posible a los efectos nocivos. Pero la información no va a aparecer por sí sola, es importante que los científicos se comprometan a investigar los riesgos —a la par de las aplicaciones útiles— de las nanopartículas y que las autoridades públicas asignen recursos para este trabajo. Y para que todo esto sirva de algo, hay que divulgar los resultados, así como tenerlos en cuenta para establecer regulaciones para garantizar un uso seguro de las nanotecnologías. Ah, y no puede faltar la retroalimentación social que permita darle legitimidad al avance de las nano.

Recuerden que en general el que paga, manda; por eso las grandes empresas muchas veces dictan la agenda de innovación a gran escala. Pero, como ya hemos visto, una gran parte de la investigación y desarrollo en temas nano se realiza con recursos públicos, con el dinero de todos. El pro-

blema es que, a nivel de sectores sociales, hay pocos esfuerzos por lograr que los avances nano respondan a las necesidades de la mayoría de las personas. Probablemente sea porque esa mayoría ni siquiera conozca su existencia, volvemos al problema de que son esencialmente invisibles, no solo a nivel de tamaño, sino de conocimiento. En este sentido, hemos de depositar nuestra confianza en la comunidad científica que, por sus valores éticos esenciales, trabaja por el bien común.

De forma general, hemos realizado un análisis de las nanotecnologías, un recorrido que nos ha llevado a conocer el maravilloso mundo de la tecnología de manipulación y control con precisión atómica. En este recorrido nos han acompañado algunos personajes clave en esta aventura, algunos de los cuales también han marcado la historia de la ciencia.

Esperamos que, al desnudar moléculas y presentar la esencia de las nanotecnologías, hayamos podido compartir elementos para que nuestros lectores conozcan lo suficiente del tema para poderse lo apropiarse: que entiendan lo que son, lo que pueden ser y las implicaciones que tienen. Como ciudadanos, no podemos conformarnos a moldear nuestras vidas en lo que un científico, un empresario o (peor) un político creen que son nuestras necesidades, tenemos que asumir la responsabilidad de pelear por transformar la ruta de innovación a nuestro favor. Debemos participar en la construcción de nuestro propio futuro, aunque sea átomo por átomo.







