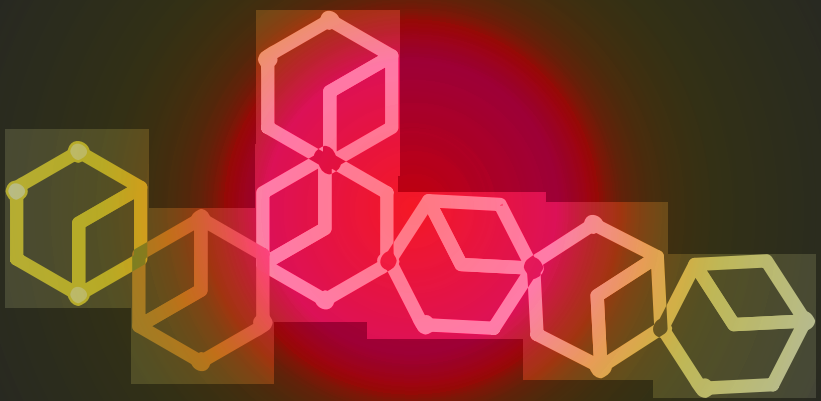
NANOTECNOLOGÍA y Sociedad en Argentina

VOL. 2

Regiones del Conocimiento Tecnocientífico



Compiladores

Mauricio BERGER
Tomás CARROZZA
Gonzalo L. BAILO

FUNDACION ARGENTINA DE NANOTECNOLOGIA

unc innovación y vinculación

Nanotecnología
y Sociedad en Argentina

Volumen 2

Regiones del Conocimiento Tecnocientífico

Compiladores

Mauricio Berger
Tomás Carrozza
Gonzalo L. Bailo

Nanotecnología y Sociedad en Argentina : vol 2 : Regiones del Conocimiento Tecnocientífico / Federico Aguero ... [et al.] ; compilación de Mauricio Berger ; Gonzalo Bailo ; Tomás Carrozza. - 1a ed compendiada. - Córdoba : Mauricio Sebastian Berger, 2023.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-00-1418-0

1. Nanotecnología. 2. Innovaciones. 3. Regulación. I. Aguero, Federico. II. Berger, Mauricio, comp. III. Bailo, Gonzalo, comp. IV. Carrozza, Tomás, comp.
CDD 338.476205

Con el aval de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN) y de la Secretaría de Innovación y Vinculación Tecnológica de la Universidad Nacional de Córdoba (SIyVT- UNC)

FUNDACION ARGENTINA DE
NANOTECNOLOGIA

unc
innovación
y vinculación

página en blanco a propósito

Contenido

Introducción
«Nanotecnología y Sociedad»
como un debate en progreso
Mauricio BERGER Tomás CARROZZA Gonzalo L. BAILO
11

INSTITUCIONES Y POLÍTICAS DE INNOVACIÓN

¿Las nanociencias y nanotecnologías como ejemplo
paradigmático de las políticas
de convergencia tecnocientífica?
Algunas reflexiones a partir del caso argentino
Matthieu HUBERT Ana SPIVAK L'HOSTE Bárbara BURTON
31

Fundación Argentina de Nanotecnología
Una reseña institucional
51

Instituto de Nanociencia y Nanotecnología
Una aproximación histórica e institucional:
fortalezas, debilidades y perspectivas
Rodolfo D. SÁNCHEZ
67

La modularización como una estrategia (política) de gestión de la nanotecnología
Santiago ENRIQUEZ
99

MAPEOS DE CAPACIDADES REGIONALES

Nanotecnología en la provincia de Buenos Aires: capacidades del sistema científico y tecnológico y sus aportes al desarrollo socio-productivo
Federico AGÜERO Nahuel ARES ROSSI Alex KODRIC Denise ROSKELL Matías MANCINI Ángela CANDREVA
129

Regionalización de la innovación nanotecnológica: tendencias locales
Parte I
Lucía LÓPEZ VIDAL Cecilia GAGGIOTTI María Lorena TALBOT WRIGHT Lorena MORENO Santiago Daniel PALMA María Lina FORMICA
161

Regionalización de la innovación nanotecnológica: tendencias locales
Experiencias en primera persona
Parte II
Lucía LÓPEZ VIDAL Cecilia GAGGIOTTI María Lorena TALBOT WRIGHT Lorena MORENO Santiago Daniel PALMA María Lina FORMICA
205

MAPEOS DE LA NANOESCALA

Nanoestructuras
Una visión desde la Química Orgánica
Laura I. ROSSI Mariana A. FERNÁNDEZ
Alejandro M. FRACAROLI Alejandro M. GRANADOS
O. Fernando SILVA Raquel V. VICO
245

Óxidos, nanoestructuras, nanomanipulación
y respuesta eléctrica de
nanoestructuras individuales
Rodolfo D. SÁNCHEZ
279

Nanomateriales en sistemas electroquímicos de
almacenamiento y conversión de energía
Federico RONCAROLI Horacio R. CORTI
311

Micro y Nano partículas para diagnóstico y
tratamiento de cáncer en Intecnus
Analía L. SOLDATI David TOLABIN M. Magdalena GONZALEZ
329

Pequeñas soluciones para grandes
problemas en odontología
Gustavo Fabián MOLINA María Belén CABALÉN
Juan Pablo ARANGUREN Gustavo PINO Ismael RODRÍGUEZ
Laura RIBBA Martín SAINZ AJA Santiago Daniel PALMA
361

Taxonomías, ontologías y nanotecnologías
Los derechos de las nanoentidades
en las regiones de la predictibilidad
Gonzalo L. BAILO
387

NANOTECNOLOGÍAS, AMBIENTE Y SUSTENTABILIDAD

Agro- nanotecnología en Argentina De los experimentos a los desafíos regulatorios nano- específicos.
Mauricio BERGER
419

El rol de la nanotecnología en la remediación de contaminantes acuosos en Argentina
Estefanía BAIGORRIA
449

Nano-ecotoxicología: una mirada ambiental
Analía ALE Victoria S. ANDRADE
471

Productos nanotecnológicos innovadores como estrategia para agregar valor a la forestoindustria del NEA. Desafíos de los sectores público/privado
Nanci EHMAN Laura COVINICH Nicolás CLAUSER María VALLEJOS María Cristina AREA
401

REFLEXIVIDAD EN EL NANOMUNDO

Relatos de mi travesía por el mundo de lo pequeño
Pablo LEVY
533

Relatos de mi travesía por el mundo de lo pequeño

Pablo LEVY

Resumen

Las temáticas abordadas por la Ciencia de Materiales en la escala de los nanómetros son numerosas y abarcan desde aspectos estrictamente básicos (referidos a la promoción general del conocimiento) hasta las aplicadas (resolución de problemáticas para un avance tecnológico específico y concreto). En este trabajo narro mis experiencias por los senderos de la nanociencia, focalizada en la Física de Dispositivos electrónicos utilizando óxidos. Intento zanjar la distancia entre una presentación estrictamente técnica y una de divulgación, con sesgos hacia uno y otro lado a lo largo del recorrido, que a veces resulta sinuoso. Tomo como itinerario mi propio trabajo con óxidos: algunos son superconductores, otros magneto-resistentes, y otros son simplemente aislantes. El recorrido narrado intenta mostrar algunas bellezas del nanoMundo.

Palabras clave

nanociencias, nanotecnologías, nanoMundo, dispositivos electrónicos, óxidos

A modo de introducción

Soy científico y me dedico a la investigación de temas básicos de la Materia Condensada. Mi formación primaria, secundaria, universitaria de grado y posgrado las realicé en instituciones públicas. Soy físico, trabajo en tres instituciones del Estado como investigador: la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). Elegí las temáticas de investigación sin una orientación, condicionamiento o presión externa. Sin embargo, como siempre pensé que el objetivo final de una investigación debía idealmente contribuir a mejorar la vida de las personas, orienté los temas hacia posibles aplicaciones concretas: aquellas que se pudieran «poner sobre la mesa» en un plazo relativamente perentorio.

Lo que sigue es una visión subjetiva de mi travesía por el mundo de lo pequeño, con puntos de vista personales que no siempre se alinean con el enfoque científico tradicional. Comienzo entonces este texto con un descargo de responsabilidad para evitar confusiones: el que avisa no es traidor.

En una misma licuadora se entrelazarán la «objetividad de la ciencia» y la «subjetividad del científico» en el entendimiento de que este mix podría ser -en algunas instancias y para algunos objetivos específicos- superador de las partes componentes. Así, nos encontraremos con óxidos superconductores, irradiación con iones pesados, materiales magneto-resistentes, nano-estructuras huecas, junturas óxido-metal, dispositivos con memoria no volátil, películas delgadas, mediciones a bordo de un satélite, y la emulación de sinapsis entre neuronas.

Las imágenes de mis experiencias científicas como investigador se entremezclan con las de algunas caminatas y travesías que realicé en diferentes momentos de mi vida. La idea es proveer al lector no familiarizado con la Ciencia de Materiales de ideas y conceptos que podrían ser útiles para encarar otras «caminatas más técnicas».

Dejo entonces en claro la dirección y el sentido de lo que contaré: un relato sobre los paisajes que he visto, sin la intención de explicarlos detalladamente, lo cual sería

propio de un libro de texto relativo a tópicos de la materia condensada. Como sucede en toda travesía, en esta llevaremos algunos elementos indispensables e iremos encontrando y construyendo otros. Asumo que tendremos una mochila con –al menos– algunas herramientas, entre las que contaremos con los siguientes conceptos:

- la idea de cuánto es un metro,
- la comprensión sobre qué es un átomo, y
- el hecho de que existe la carga eléctrica (positiva y negativa)

Repasaré estos conceptos brevemente, comentaré sobre algunas precauciones y cuidados que es siempre importante recordar antes de partir....y luego empezaremos la caminata.

El *metro* nos servirá para tomar noción de los tamaños de las entidades que iremos encontrando. Después de todo, si queremos pasear por el nanoMundo, lo mínimo que precisamos es definir una escala de longitudes. Un metro (1 m), un centímetro (1 cm) o un milímetro (1 mm) son escalas que nos resultan familiares: tenemos una noción intuitiva de estas medidas. Entre 1 m y 1 mm hay un factor 1000 de diferencia: precisamos 1000 mm para formar 1 m. Por simplicidad, a veces usaremos la notación científica: 1 cm = 1E-2 m, 1 mm = 1E-3 m. Así, el diámetro de un cabello es aproximadamente 5 x 1E-5 m, es decir 50 micrones. Un micrón (1E-6 m) es el límite inferior de la «escala humana». Un nanómetro corresponde a 1E-9 m, mil veces menos que un micrón.

Los *átomos* están formados por un núcleo que tiene protones y neutrones, alrededor del cual orbitan los electrones. El diámetro del núcleo atómico es de 1E-15 m, un tamaño difícil de imaginar. Sin embargo, el diámetro de un átomo es bastante más grande: mide alrededor de un décimo de nanómetro, es decir 1E-10 m.

Resulta interesante preguntarse cómo es que la humanidad llegó a imaginarse que existen entidades tan pequeñas, ¡y es sorprendente que algunos miles de años después haya logrado tener evidencia experimental de esas partículas! No está de más recordar que todas las cosas (materiales) están formadas por átomos...

Si a un átomo (que tiene *carga eléctrica* neutra) se le sacan algunos electrones (que tienen carga *negativa*), estamos

en presencia de un ion (carga *positiva*). Un átomo puede ser proclive a unirse con otro átomo por muchos motivos, la atracción entre cargas eléctricas de signo diferente es uno de los motivos.

Ya con esta mínima mochila casi lista me preparo para ir saliendo, y los invito a que me acompañen en este relato de mis travesías por el nanoMundo. Eso sí: no olvidemos que algunos comentarios intentan ser inspiradores o dar un sabor sin ser extremadamente ajustados. Son caricaturas: nadie debe pensar que por describir al Pato Donald estamos describiendo un cierto tipo de ave que suele tener predilección por el agua. Nuestro pacto de lectura queda entonces explicitado.

Y va una última advertencia: una de las características del nanoMundo es que la superficie toma un rol preponderante por sobre el volumen. En una naranja –como en toda esfera– la relación superficie / volumen crece al disminuir su radio. Por debajo de cierto tamaño frutal tendremos que tener cuidado pues el jugo de naranja podría ser simplemente jugo de cáscara y su color pasar de ser naranja a ser blanco. En esta travesía tendremos que poner atención al hecho de que las propiedades intensivas (o sea, aquellas que no dependen de la cantidad de material) ¡pasan a depender de las dimensiones de las partículas que lo componen!

Un poco de (mi) historia

A lo largo de mi vida profesional, algunas veces recorrí senderos del nanoMundo. Se trata de unos caminos no siempre bien marcados que se entrecruzan temáticamente, dando lugar a una interdisciplinariedad maravillosa. Son senderos que se reproducen y se bifurcan, trifurcan, tetrafurcan, pentafurcan… y un poco más allá comienza nuevamente la bifurcación.

Sin haberlo decidido a priori yo tomé un recorrido, una de tantas posibilidades, sin tener en claro algunas de sus consecuencias. Hubo algunos indicios de lo que vendría, pero como todo lo que sucede antes, no sabemos que eso puede ser antecedente de lo que vendrá después. Aunque a veces lo intuimos: son fluctuaciones del futuro en el presente.

Tuve una percepción inicial de la estructura atómica de la materia durante una práctica de laboratorio de una de las primeras materias que cursé en la Universidad de Buenos Aires. El experimento consistía en fabricar dos péndulos, cada uno de ellos formado por un imán de masa «m» colgando de un hilo de longitud «l». Los imanes estaban lo suficientemente cerca como para «verse»: acoplaban sus movimientos. Al hacer oscilar a uno de ellos mientras el otro estaba en reposo, sucedía que luego de un tiempo el primero estaba quieto mientras que el otro oscilaba de la misma manera que lo había hecho el otro inicialmente. Y luego se volvía a trasvasar la energía entre uno y otro.

Posteriormente fueron 10 los péndulos magnéticos acoplados. Por primera vez pude ver la magia del transporte de energía en un osciloscopio. El docente de turno nos reveló entonces que los átomos podían ser pensados como pequeños imanes: tenían momento magnético. Y nos dijo que la estructura de los materiales podía representarse como un conjunto de masas «m» equiespaciadas a lo largo de una línea (caso unidimensional o 1-D). Cada par de masas estaban unidas por resortes de constante «k» que representaban la interacción magnética.

¡Guau...! En un mismo escenario se me presentaba el magnetismo y la estructura de la materia, dos temas que me resultaban más esenciales y profundos que la construcción de edificios y puentes. Yo había empezado mis estudios universitarios en la Facultad de Ingeniería -carrera de Ingeniería Civil- pero pronto tuve, orientado por el comentario de ese docente, un viraje hacia las transiciones de fase, las fluctuaciones, los exponentes críticos, la percolación, las memorias, los dispositivos y los sensores.

Era la época en que frecuentaba las bibliotecas, y tuve el placer de ver un dibujo de ese esqueleto vibrante en una desvencijada edición del libro de León Brillouin sobre la propagación de ondas en cristales (ver fig. 1). No sabía que años después ese tipo de enfoque se convertiría en algo cotidiano para mí. El modelado fenomenológico de las propiedades de la materia y las transiciones de fase sólido–sólido serían la hoja de ruta de mi travesía, pero yo no lo sabía en ese momento.

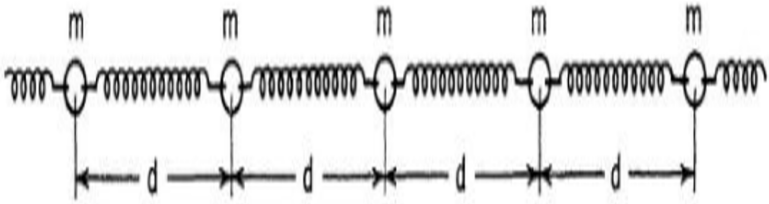


Figura 1. Esquema presentado en la primera edición del libro «*Wave propagation in periodic structures*» de Leon Brillouin (McGraw Hill, 1946), y que por primera vez me hizo pensar en la manera de modelar un cristal.

Enterarme de que era posible modelar las propiedades de un material me abrió panoramas, inquietudes e ideas similares a las que visualiza un caminante: un posible recorrido en un enorme mapa. Parte de esa fascinación llegaba al notar que la repetición de un mismo motivo (una masa y un resorte, en este caso) impone que la dinámica del sistema no pueda ser muy diferente para un cierto conjunto «masa + resorte» que para otro que se encuentra alejado del primero. Aunque un sistema sea inmensamente grande, si es periódico, es posible estudiar solamente una parte muy pequeña del mismo: su «celda unidad».

Había conocido las transiciones de fase del agua y los estados de agregación de la materia en la escuela primaria, pero recién en la etapa universitaria tomé noción de los detalles que había allí escondidos. Recuerdo que en una caminata por subsuelos y pasillos oscuros encontré, tirada en el piso y con signos de abandono una maqueta del diagrama de fases del agua hecho en cartón, ocupando casi un metro cuadrado de superficie. Recuerdo esos toboganes y superficies contorneadas que delimitaban agua líquida del vapor y del hielo como si los estuviera viendo hoy.

En ese momento yo estaba lejos de imaginarme que era posible desmenuzar las particularidades de las transiciones de fase reales describiéndolas sobre una hoja de papel, de manera que al entenderlas mejor uno pudiera entender mejor a la naturaleza. Esta imagen de los áto-

mos (representados por la masa «m») que se interpelan (la interacción es representada por el resorte de constante «k») estando alineados y equiespaciados era un anticipo de que los problemas complicados (muchas «m» y muchas «k», todas diferentes, todas desordenadas ocupando todo el espacio) pueden tener soluciones simples.

La primera bifurcación

Mi caminata por el mundo científico empezó con algunos tanteos por el mundo de la física nuclear: aceleradores y novedad eran las palabras que me convocaron cuando me acerqué al TandAr, un pujante proyecto hecho realidad en la CNEA. En esta etapa, yo promediaba mis estudios de Física en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

El acelerador TandAr estaba en un edificio moderno, su equipamiento reluciente era casi lo primero que yo conocía del mundo de la FÍSICA (¡con mayúsculas...!) que se iba abriendo hacia mí. Sentí admiración por los personajes que iban saliendo de los laboratorios...

En ese laboratorio se estudiaban los núcleos atómicos (recordar que su escala espacial es de 1E-15 m). Para desmenuzarlos bombardeaban diferentes átomos con iones energéticos, que habían sido acelerados aprovechando su carga eléctrica en un acelerador electrostático. Alguna vez me habían contado la siguiente caricatura a modo de enseñanza: si tengo que darme cuenta qué es lo que tengo enfrente mío y no sé cómo reconocer de qué se trata pues todo está muy oscuro, una estrategia puede ser tirarle un objeto con energía y analizar lo que queda después del violento choque. Habrá pedazos de vidrio y pedazos de... cemento, cal y pintura. Ahhhhh, ¡era una pared lo que tenía enfrente mío...! En cambio, si luego de lanzarle el proyectil escucho que alguien grita, podría haber sucedido que le di de lleno a un ser vivo. Los físicos nucleares estudian núcleos atómicos de maneras similares. Para analizar los restos de colisiones atómicas usan detectores de partículas.

El trabajo de laboratorio que encaré en el TandAr consistió en estudiar ciertos detectores de partículas energéticas formados por semiconductores dopados. Y aquí es cuando reaparece en mi vida la Física del Estado Sólido,

una bifurcación en este camino que me llevará al nano-Mundo.

Para poder conducir electricidad, en los semiconductores los portadores de carga deben superar un cierto umbral de energía, saltando de la banda de valencia a la banda de conducción. De la misma manera en que los electrones pueden estar ligados al átomo (electrones de valencia) o abandonarlo y moverse más allá (electrones de conducción), estos materiales tienen portadores de carga que pueden «quedarse» o pueden «moverse». Si la banda de conducción es una autopista de movimiento rápido, la banda de valencia es un estado en el que no hay desplazamientos. Para moverse, los portadores de los semiconductores deben saltar esa brecha, precisando un cierto estímulo. Como (casi) todos.

En un semiconductor, la disponibilidad de portadores capaces de conducir carga eléctrica depende fuertemente de la temperatura. Si la temperatura es baja no pueden llegar al canal de conducción, entonces hay pocos portadores y la resistencia eléctrica es alta. Si sube la temperatura, los portadores son estimulados térmicamente a tener la energía suficiente como para llegar a ese canal de conducción y la resistencia es más baja que en el caso anterior. Para fijar ideas, en la fig. 2 se puede ver esquemáticamente la dependencia de la resistencia de un semiconductor como función de la temperatura.

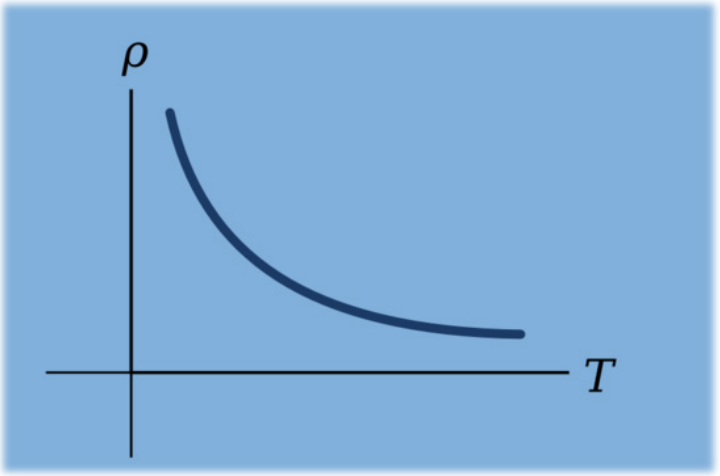


Figura 2. Resistencia eléctrica de una muestra semiconductora como función de la temperatura. A medida que se enfría al sistema, los portadores de carga tienen menos estímulo para poblar la banda de conducción, y permanecen en la banda de valencia, aumentando la resistencia eléctrica del material hasta valores cada vez más altos. En el otro extremo, para las más altas temperaturas la resistencia de un semiconductor tiende asintóticamente a cero, sin llegar nunca a dicho valor.

Al poner en contacto un semiconductor en que los portadores de carga son electrones (tipo «n») con otro semiconductor que tenga portadores de carga que tienen una «ausencia de electrones» o «presencia de huecos de electrones» (tipo «p»), entonces los electrones se van de la zona «n» hacia la zona «p» dejando huecos de electrones en la zona fronteriza entre ambos materiales. Este proceso continúa hasta que la acumulación de cargas balancea las fuerzas que actúan sobre ellas. En el equilibrio queda una delgada zona sin cargas eléctricas entre ambos materiales, en la que se establece un alto campo eléctrico que ejercerá fuerza sobre toda carga que se sitúe en esa zona.

Si este dispositivo se polariza «en inversa» (aplicando una tensión externa que refuerza la separación entre electrones que migraron y huecos que quedaron) se establece una zona de deserción de carga sujeta a un campo eléctrico altísimo. Si se mantiene al sistema a baja temperatura, la recombinación de huecos con electrones será muy baja, y solamente en caso de que una partícula energética disturbe ese escenario se producirá un flujo de corriente. El dispositivo descripto es un detector de partículas energéticas, y si sabemos detectar ese pequeño flujo de corriente tendremos evidencia de la llegada de partículas a nuestro sensor.

La instrumentación asociada a la detección de señales pequeñas es una habilidad que me llamó la atención. Me recordaba a que, durante las caminatas, uno puede estar atento a las pequeñas señales que dejan algunos habitantes del lugar. Siempre hay huellas en el suelo, plantas rotas, plumas o excrementos que pueden darnos pistas. Aprender a leer esos detalles ínfimos aporta información que siempre resulta importante, ¡aunque más no sea para tener cuidado durante la travesía…!

Casi sin buscarlo, empezó a aparecer ante mí el mundo de la Materia Condensada. Allí había sólidos que presentaban mundos intermedios entre los conductores y los aislantes: los semiconductores. Ese mundo me cautivó, y me llevó del edificio recién inaugurado del TandAr con hermosas ventanas y verdes vistas y moderno equipamiento, a las oficinas viejas y los laboratorios oscuros de la Sede Central de la CNEA: allí había un territorio llamado Física del Sólido que me atrajo y no dejó de atraerme por... más de tres décadas.

¡Ya en el camino...!

Un cristal es una estructura de átomos que ocupan posiciones bien determinadas en el espacio. La diferencia respecto de un gas o de un líquido radica en que los átomos están en movimiento relativo entre sí. En un cristal, los átomos en posiciones «casi fijas» se encuentran a distancias bien determinadas de los otros átomos, dando lugar a una estructura ordenada. Se dice que una estructura tiene alguna simetría si es posible intercambiar alguna de sus partes sin que se pueda distinguir el cambio realizado. Por lo tanto, vemos que la periodicidad es una de las simetrías presentes en un cristal.

Los átomos se encuentran en esas posiciones desde que el cristal empieza hasta que... ¡termina! Esto sucede desde un borde hasta el borde diametralmente opuesto de la partícula cristalina. La separación entre átomos es aproximadamente 1E-9 m. Supongamos que un cristal tiene 1 mm = 1E-3 m de lado, entonces allí pueden alinearse ordenadamente al menos un millón de átomos. Un pedacito de 1mm x 1mm x 1mm contendrá 1E+18 átomos. No es mucho, pero tampoco es poco.

Cuando una onda incide sobre un arreglo ordenado de objetos cuya «distancia de ordenamiento» es comparable a la longitud de onda del frente que llega, se producen efectos a priori inesperados: interferencia y difracción emergen como conceptos novedosos (ver fig. 3). Estas ideas se desarrollaron inicialmente con la Óptica, y luego tuvieron su momento triunfal con la entrada en escena de la Mecánica Cuántica: así como las ondas tienen aspectos de partículas, las partículas evidencian –en determinadas circunstancias– propiedades ondulatorias.

Figura 3. Cuando un frente ondulatorio se encuentra con un uno o varios obstáculos de dimensiones comparables a su longitud de onda se producen los fenómenos de interferencia y difracción. Cuando incide luz sobre una delgada mancha de aceite -o sobre una pompa de jabón- un mundo desconocido se empieza a revelar ante nosotros. La superficie de un Compact Disc o un DVD dejan entrever panoramas similares. En la foto se observa un frente de olas atravesando un confinamiento que da lugar a fenómenos novedosos asociados tanto a las olas como a la «ranura». De la misma manera, cuando un frente ondulatorio incide sobre un cristal nos encontramos con señales que nos permiten entender algunas de sus características.

El hecho de estar «casi fijos» en sus posiciones espaciales hace que los átomos formen una red de difracción. Cuando incide sobre ella un frente de onda apropiado, da lugar a un «patrón de difracción» que tiene muchísima información sobre la estructura cristalina.

Me resultó muy instructivo y emocionante ver los efectos de la difracción generada por un cristal con mis propios ojos (ver fig. 4). Todas las herramientas matemáticas que había aprendido para describir a la red cristalina quedaron develadas en un instante al conocer el «espacio recíproco». Parafraseando el dicho, me quedó en claro que una imagen vale más que mil fórmulas. Esta imagen es la huella digital de una red cristalina y tiene la información que permite reconstruir al cristal en su totalidad.

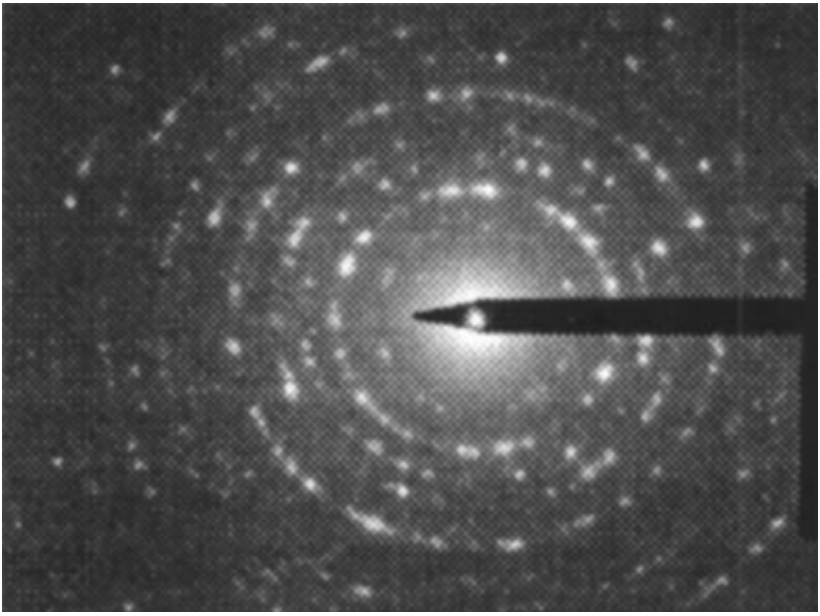


Figura 4. Patrón de difracción obtenido en un microscopio electrónico en modo transmisión, haciendo incidir el haz de electrones sobre una muestra cristalina. La aguja alargada y puntiaguda es el soporte de la muestra. Los electrones difractados por la muestra permiten ver un patrón con alta simetría sobre una placa fosforescente que revela información sobre su estructura cristalina.

A partir de saber que los átomos «se mueven un poco» alrededor de sus posiciones de equilibrio (¡los átomos vibran...!) conocí a los *fonones*, unas «partículas» que llevan las vibraciones de la red cristalina de un lado hacia el otro. ¿Cómo se describen las vibraciones?

La repetición de la distancia entre átomos (periodicidad) impone restricciones notables: cada átomo no puede hacer algo muuuuy diferente a lo que hacen los otros. Como vimos en la fig. 1, no es razonable esperar que una masa «m» haga algo muy diferente de lo que hace la enésima masa «m». Su única libertad es hacerlo en un momento diferente al momento en que lo hace su vecino.

Este concepto se describe en términos de la diferencia de fase entre lo que hace uno y otro átomo, y así aparecen los fonones. Los espectadores de un estadio que se sien-

tan y paran coordinadamente es un buen ejemplo de una onda que se propaga: cada individuo hace lo mismo que el resto, ¡pero teniendo en cuenta de hacerlo en un momento muy especial!

Es importante notar que la *diferencia de fase* entre el movimiento de dos objetos no tiene nada que ver con las fases de la materia. Se dice que dos eventos están *desfasados* cuando –al repetirse cada uno de ellos- se producen con una cierta diferencia de tiempo entre sí. Por otro lado, los diferentes estados de agregación de la materia son llamados «fases». El paso de una a otra es una «transición de fase»: por ejemplo, el agua pasa de fase líquida a gaseosa en condiciones de temperatura de 100 C y a presión atmosférica.

Los fonones son un fenómeno ondulatorio y por lo tanto pueden dar lugar a un «patrón de difracción», que es la huella digital de las maneras en que puede vibrar una red cristalina. Mi primer trabajo estudiando Física de Sólidos consistió en calcular los tipos de fonones presentes en un cierto cristal, ¡y luego...medirlos! Yo no lo sabía: modelar, calcular, sintetizar y medir pasaron a ser acciones cotidianas de mis siguientes etapas de caminante por los senderos de la investigación.

Un modelo es una representación de un fenómeno, y se realiza con la intención de describirlo, entender los mecanismos subyacentes y predecir comportamientos. En la medida en que la descripción sea acertada y las predicciones realizadas sean cumplidas emergerá la bondad del modelo. Una simulación utiliza un modelo e incluye en un código programable todas sus características. Simular algún aspecto del comportamiento de un cristal puede ser una tarea ardua. Las herramientas computacionales necesarias dependen del nivel de profundidad y detalle de la descripción a realizar. En general, las habilidades matemáticas resultan indispensables para poder sacar provecho de las simetrías del problema a tratar. En el caso de los cristales, una de las simetrías presentes es la periodicidad.

Tanto modelar como medir el ordenamiento de átomos nos permite entender y nos da información sobre las propiedades de los materiales. El camino al nanoMundo consistiría en mirar ese mundo macroscópico cada vez

más de cerca: pasar de los milímetros a los micrones, y luego a los nanómetros es el desafío de esta caminata. Aprendí que dentro de todos estos tamaños es posible encontrar orden, ¡y también desorden...! A diferencia de un *cristal* -en el cual todos los átomos están ordenados-, en un material *amorfo* no hay ninguna correlación entre las posiciones de los átomos: no es posible encontrar orden. Una manera de visualizar esta diferencia de orden (y no de especie) es recordando las diferencias entre bosques plantados (en que vemos hileras de árboles equiespaciados) y bosques naturales (en que no hay una relación directa entre la posición de cada árbol). Una muestra amorfa no tiene un patrón de difracción asociado como lo tiene una muestra cristalina (ver fig. 4). Comparando los niveles de desorden en las posiciones atómicas, un sólido amorfo se parece más a un líquido que a un cristal.

«Orden» y «simetría» son dos palabras singulares en la naturaleza. Montones de entidades poseen una o la otra o las dos, desde las plantas y animales hasta los cristales. En todos los casos, el establecimiento de un orden está guiado por principios: no es casualidad. En las transiciones de fase se puede alterar el orden y la simetría de diferentes maneras. En estas condiciones se producen fenómenos que revelan mecanismos y competencias que se dirimen en el nanoMundo, y muchas veces se manifiestan en propiedades tangibles en escalas de longitud humana.

En esa etapa de la travesía yo estaba a punto de empezar a conocer algunas transiciones de fase sólido-sólido. Para mi sorpresa, encontraría que había una generalidad subyacente: cerca de los «puntos críticos» en que se producen estas transiciones había fenómenos inesperados de coherencia, divergencia, dinámicas ralentizadas y leyes de escala que se cumplen solamente en esas inmediaciones. Un mundo estaba empezando a abrirse ante mí.

Una conductividad fuera de lo común

Conocí a la superconductividad en 1987, poco tiempo después de que se descubrieran los *HighT_c* (superconductores de «alta temperatura crítica»), unos óxidos de cobre que revolucionaron la Ciencia de Materiales por varios años. La Escuela IB-CONICET sobre «Sólidos»

realizada en el Centro Atómico Bariloche en septiembre de 1987 resultó ser mi entrada al mundo de la física de la materia condensada con enfoque experimental.

La propiedad marketinera de los superconductores es que tienen resistencia eléctrica igual a cero. $R_{superc} = 0$. Estrictamente cero. La temperatura crítica, T_c, es la temperatura por debajo de la cual el agitamiento térmico deja de prevalecer por sobre el estado coherente de la superconductividad. $R_{superc} = 0$ quiere decir que los portadores de carga eléctrica pueden moverse por el material al que pertenecen aun si no hay una fuerza que los estimule, y sin ninguna fricción con el medio. Los portadores superconductores no disipan energía durante su movimiento. Este es un estado ordenado de la materia, el sistema tiene una transición de fase del estado normal al estado superconductor determinado por el (inesperado) apareamiento de electrones.

Si bien durante los primeros años del siglo XX se entendía el hecho de que R disminuyera al disminuir la temperatura, el consenso de la época sostenía que debajo de cierto umbral de temperatura se produciría una condensación de los portadores de carga. En otras palabras, se esperaba que sucediera algo parecido a lo que sucede con un gas al bajar la temperatura: en cierto momento las partículas «se ven entre sí» y se juntan, dando lugar a un líquido o un sólido, vale decir, un condensado. Conocemos el fenómeno: cuando el vapor de agua se encuentra con una superficie fría, condensa en forma de gotas de agua, por ejemplo sobre un espejo o un vidrio.

El estado condensado vaciaría de portadores al material y, por lo tanto, R debería crecer desmedidamente. Imagínense a la persona que en 1911 enfriaba sus muestras y, en vez de continuar midiendo la resistencia eléctrica de un metal (ver fig. 5) o la de un «condensado de portadores» de resistencia altísima, ¡obtuvo datos que señalaban una resistencia nula!

La superconductividad es conocida desde 1911 en algunos metales puros (¡no en todos!), y poco a poco se la descubrió en otros sistemas. Esta propiedad se manifiesta al enfriar una muestra superconductora hasta unos 260 C bajo cero. Año a año se fueron encontrando materiales cuya T_c era cada vez más alta, pero hasta 1985 no se ha-

bían superado los -230 C. Hasta ese momento todos los sistemas superconductores eran metales o aleaciones de metales.

Después de todo, no resulta tan raro que un metal -que es un material que ya conduce bien la electricidad a temperatura ambiente- se vuelva mejor conductor al enfriarlo: la red cristalina que tiende a detener el paso de portadores está cada vez más quieta a medida que se enfría y los portadores pueden pasar más cómodamente (con menor resistencia) por entremedio. Por este motivo la R_{metal} baja cuando la temperatura baja.

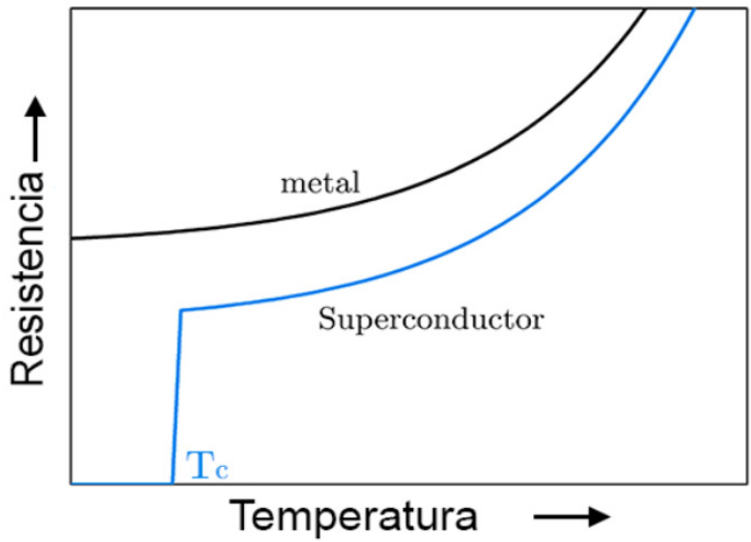


Figura 5. La resistencia eléctrica de un metal disminuye al disminuir la temperatura. Al enfriar, los átomos se mueven cada vez menos alrededor de sus posiciones de equilibrio, haciendo que el paso de portadores entremedio sea facilitado: R se hace cada vez más chica. En un superconductor existe un valor de T_c por debajo del cual R es nula: R_{superc} ($T < T_c$) = 0. En un metal, al disminuir la temperatura hasta los valores más bajos accesibles, R_{metal} mantiene un valor finito, mientras que en un superconductor R = 0. Notar que un conductor perfecto (metal con R = 0 a la temperatura más baja) no tendría una transición de fase.

Si bien un superconductor no es lo mismo que un conductor perfecto, el fenómeno estuvo inicialmente asociado solamente a materiales metálicos. La novedad fue que en 1986 se encontraron óxidos (materiales que en general son «malos» conductores eléctricos) que cuando eran enfriados se «volvían» (transición de fase es la palabra correcta) ¡superconductores! La sorpresa fue doble, pues la T_c a la que se produce la transición normal–superconductor estableció un récord (-230 C).

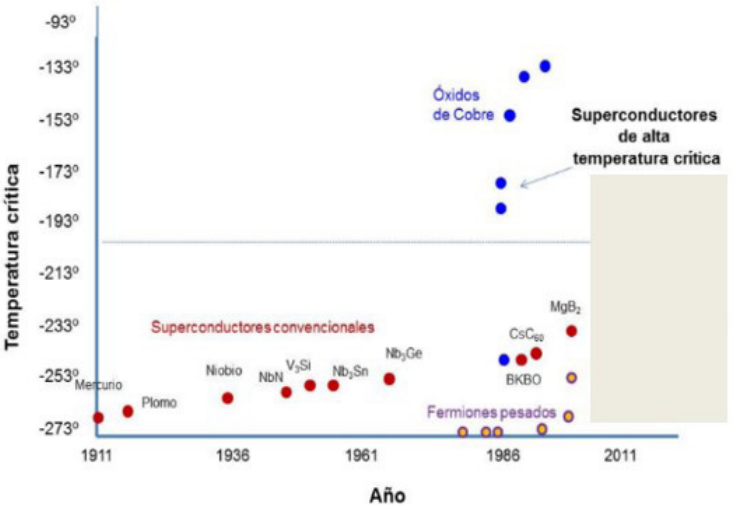


Figura 6. Esquema de la historia del aumento de T_c de materiales superconductores de diferentes composiciones como función del año de su descubrimiento. En 1986 se inicia la etapa de los superconductores de alta temperatura crítica. En los años subsiguientes al descubrimiento del primer óxido superconductor el record fue superado ampliamente, permitiendo el estudio de materiales con T_c > -130 C y aún mayores.

A los pocos meses del descubrimiento original diferentes investigadores fueron sintetizando y caracterizando nuevos óxidos cuyas T_c ya estaban por encima de los -170 C (ver fig. 6). Haber podido aumentar el valor de T_c resultó importante porque el costo del enfriamiento determinaba que no fuera económicamente redituable pensar en

aplicaciones con superconductores de manera masiva. El objetivo siempre consistió en aumentar T_c hasta temperatura ambiente, de manera que las aplicaciones estuvieran (literalmente) al alcance de la mano. En el camino los investigadores iban encontrando pistas sobre este mecanismo tan poco habitual.

Una rareza en el nanoMundo

Durante las caminatas, a veces podemos encontrarnos con rarezas y peculiaridades de la naturaleza. Es cierto, eso depende de nuestra capacidad de sorpresa. Así como hacen falta habilidades para encontrar un camino, también uno puede o no estar preparado para sorprenderse. Se trata tanto de aprender y ejercitar la habilidad para descubrir novedades, como de mantener la capacidad de asombro con que nacimos.

Entre los nano-objetos que encontramos en el nanomundo están los naturales -que existen en la naturaleza y solamente tenemos que buscarlos- y los artificiales. A estos últimos hay que diseñarlos, sintetizarlos y fabricarlos. Ya encontraremos algunos ejemplos durante la travesía.

Contaré ahora el caso de un objeto nanoscópico natural que tiene características que me sorprendieron desde que lo conocí. Los superconductores, además de presentar resistencia eléctrica nula ($R_{superc} = 0$), pueden tener un comportamiento muy particular en presencia de un campo magnético. Sucede que, hasta cierto valor, las supercorrientes que no disipan energía generan un campo magnético igual y contrario al externo. Superado ese valor crítico de campo, en algunos materiales comienza a ingresar el campo magnético… ¡en forma cuantificada!

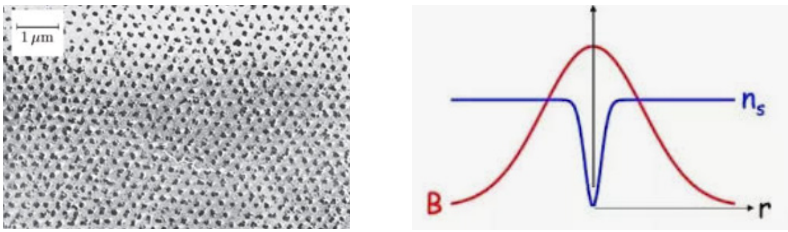


Figura 7. Panel superior: vista de la superficie superior de una muestra superconductora en presencia de vórtices. Las zonas

oscuras corresponden al «carozo» no superconductor. Alrededor de cada una de esas zonas circulan las supercorrientes del vórtice. Nótese que los vórtices tienden a ordenarse en redes hexagonales. Las regiones claras (oscuras) corresponden al material superconductor (normal). La técnica de visualización utilizada es la decoración de la superficie de la muestra con pequeñas partículas ferromagnéticas en presencia de vórtices. Cuando el material es llevado a temperatura ambiente para la visualización usando un microscopio electrónico de barrido las partículas permanecen en los sitios ocupados por el núcleo del vórtice. Panel inferior: perfil de un vórtice a una altura fija, la zona no superconductora central (~ 2 nm) está rodeada por la zona superconductora por donde circulan corrientes sin disipación (~ 200 nm) ya que $R_{superc} = 0$.

Así como la carga eléctrica y los niveles de energía atómicos están cuantificados (lo que equivale a decir que no pueden tener valores arbitrarios), el flujo magnético también puede tomar solamente ciertos valores discretos dentro de los materiales superconductores. Estos valores son múltiplos del *cuanto de flujo*, lo cual se materializa en *vórtices* de corriente que no disipa energía. Estos objetos son longitudinales: tienen una zona central siguiendo su eje que no es superconductor (la que en superconductores de alta T_c tiene un diámetro de 2 a 5 nm) y una zona de tamaño de alrededor de 200 nm por la cual circulan supercorrientes (ver fig. 7).

Síntesis de materiales novedosos

Motivado por esta temática inicié mi doctorado estudiando superconductores basados en óxido de cobre (cupratos). De los varios nuevos materiales que se empezaron a descubrir a partir de 1986, mi trabajo se centró en el cuprato $La_{0.8}Sr_{0.2}CuO_4$. Un cristal de este material consiste en la repetición de la celda unidad que se presenta en la fig. 8, en la que es posible individualizar a los átomos de lantano (La), estroncio (Sr), cobre (Cu) y oxigeno (O).

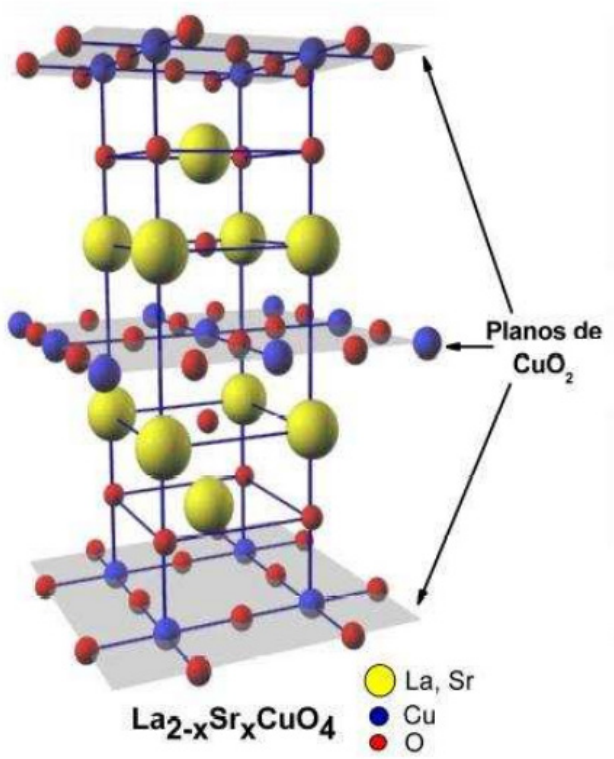


Figura 8. Celda unidad del $La_{0.8}Sr_{0.2}CuO_4$ mostrando las especies de La, Sr, Cu y O en diferentes colores, en las ubicaciones y con las proporciones correspondientes a las que se encuentran en el cristal superconductor. Este material pertenece a la familia de los cupratos superconductores, los que ocupan un lugar destacado en la búsqueda de superconductividad a temperatura ambiente. La altura de la celda unidad es de aproximadamente 1 nm y las distancias entre átomos son de aproximadamente 0.2 nm.

Las muestras de este tipo de materiales se sintetizan en el laboratorio: son artificiales, no se encuentran «andando por ahí» en la naturaleza. En general, hay diferentes maneras de obtener un mismo material y los químicos tienen habilidades inimaginables para hacerlo. La reacción en estado sólido para sintetizar un óxido consiste en

juntar polvos de diferentes óxidos simples que contienen a las especies precursoras, mezclarlos bien, y luego calentarlos en un horno, con la intención de que se forme el producto esperado. Por efecto de la alta temperatura que se alcanza en el horno los óxidos simples inter-difunden entre sí formando un material que en general es homogéneo.

Llegar a obtener el material que uno espera no siempre es fácil. Puede sobrar un poquito de estroncio, o el nivel de oxigenación no ser el buscado. En el ámbito culinario, esta verdad la saben todos los cocineros. A veces, a simple vista queda en claro que no hemos llegado a buen puerto. Otras veces hace falta «probar con una cucharita» el resultado. En el laboratorio se caracteriza el material obtenido con diferentes técnicas hasta llegar a ponerle la etiqueta correcta, lo cual no siempre sucede en el primer intento. Ni en el segundo. La «suerte del principiante» no suele repetirse.

Siguiendo estas ideas, nuestro grupo en el Centro Atómico Constituyentes – CNEA fabricó monocristales y policristales de $La_{1-x}Sr_xCuO_4$ que eran caracterizados luego para determinar su composición exacta. Recién entonces quedaba el camino despejado para hacer estudios sobre su comportamiento, incluyendo la transición de fase normal-superconductor.

Irradiando monocristales

Cuando hay vórtices en un superconductor (recordar que $R_{super} = 0$) y se inyecta corriente por arriba de un cierto valor umbral sucede que R deja de ser nula. El motivo es que, en presencia de una corriente, los vórtices se desplazan. ¿Sería posible inmovilizarlos?

La respuesta estuvo vinculada al acelerador TandAr, el mismo que me había tentado a dedicarme a la física nuclear, pero ahora para realizar investigaciones en Ciencia de Materiales. El objetivo de los experimentos era aumentar el anclaje de vórtices en cristales superconductores, evitando que se produjera disipación durante su movimiento. Si los vórtices se encontraban bien agarrados a los defectos, se produciría un aumento de la corriente máxima que pueda transportarse sin generar disipación.

¿Qué quiere decir «anclaje»? Si introducimos en un me-

dio homogéneo ciertas irregularidades, éstas pueden actuar como centros de dispersión para el movimiento de portadores eléctricos, aumentando la dificultad que poseen para trasladarse. Si estos escollos o «baches» en el camino son lo suficientemente profundos, estamos en presencia de una trampa que inmoviliza al portador. En este caso, si bien los vórtices no son los portadores de carga, estos son afectados por ellos, por lo cual el hecho de inmovilizarlos redunda en un cambio en las características del transporte eléctrico.

Los vórtices tienen geometría cilíndrica, orientada en la dirección del campo magnético aplicado. La mejor manera de «agarrarlos» es con un defecto que tenga forma de columna, pues el efecto se presentará a lo largo de toda su extensión.

El tipo de daño que generan los iones energéticos cuando atraviesan una muestra cristalina depende de las propiedades del material que recibe la irradiación y de la energía del proyectil incidente. Si la energía de la partícula es baja, probablemente se frenará enseguida y quedará dentro de la muestra, depositando toda su energía durante su breve recorrido por el material anfitrión. Pero para el caso de los óxidos superconductores irradiados con partículas de 300 MeV producidos por el acelerador TandAr, el ion atraviesa el material destruyendo el orden cristalino a su paso y llega a emerger por la cara opuesta a la de incidencia. La energía que el proyectil entrega al material no se distribuye homogéneamente y el daño generado queda localizado en la región cercana a la trayectoria del haz. En un óxido cristalino la estela de material amorfo tiene aspecto cilíndrico. Este material no cristalino constituye los defectos columnares que permitirán atrapar vórtices de la manera más eficiente.

El acelerador TanAr es un instrumento relativamente grande. Debido a la complejidad y dificultades en su operación y mantenimiento, cuando funciona bien «hay que usarlo YA» porque no se sabe cuándo volverá a repetirse semejante evento. Los turnos se asignan con mucha antelación y por fin había llegado el momento. Durante toda esa semana asignada no habíamos logrado obtener grandes resultados. Era viernes, nuestro turno expiraba, y el acelerador estaba empezando a funcionar -recién en

ese momento- ¡a las mil maravillas! Los planetas comenzaron a alinearse durante lo que luego devino en la noche previa al nacimiento de mi primer hijo. Yo debía volver cuanto antes a casa, pero… no podía abandonar el experimento: lo que no habíamos logrado hacer durante una semana estaba a punto de concretarse en ese momento. Llegué a mi casa destrozado por el cansancio, y pese a las súplicas de la futura madre de mi hijo, me tiré a descansar. Esa toma de refuerzos me permitió despertar unas pocas horas más tarde y estar listo para la siguiente aventura en el mundo de lo pequeño.

Granularidad en un superconductor

Participé de estudios sobre muestras formadas por policristales de $La_{1-x}Sr_xCuO_4$. Como las mediciones se realizan debajo de 230 C, es necesario usar un criostato (equipo diseñado para realizar mediciones a bajas temperaturas controladas sin que se condense la humedad del ambiente) enfriado utilizando Helio líquido. Realizamos las mediciones en el Laboratorio de Bajas Temperaturas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

Durante su fabricación la muestra es presionada en caliente con la intención de que los granos cristalinos se aglutinen y compacten. Aumenta su densidad y es autoportante, de manera que se la puede manipular con cierta facilidad. Este material en formato policristalino constituye un superconductor granular ya que los bordes de grano poseen características no superconductoras, a diferencia del volumen del material.

En estos superconductores, el anclaje de vórtices se produce de una manera parecida a la manera en que se apilan los granos de arena. Eso me recordó uno de mis paseos en bicicleta por la playa a orillas del mar.

Quizás el lector no lo sepa, pero no vivimos ni en la Edad de Piedra, ni en la Edad de los Metales: estamos en la Era del Silicio. La arena está formada por óxido de silicio en su mayor parte, y puede tener otros compuestos minoritariamente. Sucede que el silicio es el material más estudiado y más pormenorizadamente procesado en la historia de la humanidad: se utiliza para fabricar unos dispositivos electrónicos presentes de a millones en to-

dos los aparatos electrónicos modernos: los transistores. A lo largo de este texto encontraremos varias menciones a su ubicuidad.

La arena se nos presenta en forma de granitos, los encontramos unos arriba de los otros en la playa. Se la clasifica según el tamaño de los granos. La arena muy fina tiene tamaño de partícula de entre 63 micrones y 125 micrones. Por debajo de los 63 micrones se la de denomina «limo» y mayormente se la encuentra en suspensión en el viento y en los ríos. Luego, se las clasifica por su diámetro medio.

Si distraídamente desparramamos o tiramos arena seca se forman montañitas. ¿Qué determina esta forma? Casi sin quererlo, mientras miraba el mar y sus vaivenes vino a mi mente un modelo que explica el modo en que se acumula la arena cuando uno va tirando «grano por grano» de arena sobre una superficie plana, para formar una «montañita de arena». Yo había usado el Modelo de Estado Crítico (CSM por sus siglas en inglés) para analizar el apilamiento de vórtices en superconductores granulares. Casualmente la inspiración de este modelo eran los apilamientos de los granos de arena. El CSM propone que la única pendiente que pueden tener los acantilados de arena es la pendiente «crítica», es decir aquella pendiente que, en caso de ser levemente mayor, haría que los granos de arena se desbarranquen. En ese caso, se produce un «derrumbe» del acantilado hasta que se restablece la pendiente «crítica». En la realidad todas las pendientes menores son factibles, porque obviamente las «laderas» permanecen estables cuando los granitos no se desbarrancan. En el modelo CSM, con la idea de simplificar, se establece que la pendiente crítica es la única posible. La versión «humana» de esta modelización sería la frase «no nos ponen una carga sobre nuestra espalda que resulte más pesada que lo que nuestros hombros pueden soportar», ¡pues en caso contrario moriríamos como el granito de arena que se desbarranca por la pendiente mayor que la crítica!

De esta manera es posible describir todas las configuraciones imaginables de montañitas de arena. La más sencilla es la que se forma en un reloj de arena. En el caso de los superconductores granulares, el CSM permite descri-

bir las varias configuraciones de vórtices bajo la excitación de campo magnético.

En la orilla, en la zona con olas bajas que cubren y descubren la arena, la superficie es plana y dura. Las olas que van y vienen van apisonando permanentemente el terreno, confiriéndole solidez. Un poco más lejos del agua, la arena está seca y el suelo es poco firme en la superficie, pues hay un deslizamiento entre los granitos de arena que permiten que cualquier peso se hunda en la arena, formando un pequeño acantilado de arena alrededor del objeto, cuya pendiente es menor o igual a la «crítica», porque si no los granitos se deslizarían barranca abajo.

En general los modelos pueden aplicarse para descripciones que no fueron las inspiradoras originales. Siguiendo con el CSM, un pedrero en la ladera de una empinada montaña cumple –reajustando apropiadamente algunos detalles- las mismas características que la arena en la playa, o que las pelotas de plástico en un pelotero. Además, vimos que algunas características y modelos del nano-Mundo tienen su correlato en el mundo de las escalas humanas. Pero esto no sucede siempre, y hay que tener cuidado con la extrapolación de comportamientos hacia uno y otro lado.

Superficies nanoscópicas

En el ámbito de la investigación en Física está bastante establecido que luego del doctorado, un investigador debe cambiar de tema, y también de grupo de trabajo, al menos por un tiempo. La racionalidad de la idea es que luego de 4 ó 5 años de dedicación a una temática con ciertas herramientas y en el marco de un cierto entorno, es sano y saludable explorar otros horizontes. Estas ideas se aplican a las caminatas: alejarse del sendero principal puede sorprender al caminante, incluso puede hacerle replantear la idea de la travesía encarada.

Realicé una estadía prolongada en Bologna, una hermosa ciudad del norte de Italia. Allí conocí y aprendí a usar dos herramientas imprescindibles para la mochila de quien quiera recorrer el nanomundo. Por un lado, trabajé creciendo películas delgadas, unos recubrimientos que pueden llegar a tener unos pocos nanómetros de espesor.

Por otro lado, aprendí a usar un microscopio de fuerza atómica para explorar superficies. Paradójicamente, al regresar al sendero principal las nuevas herramientas no solo no me pesaban en la mochila, sino que me hacían más liviano: ahora podía mirar nuevos horizontes.

Una fábrica de recubrimientos

Hay varios métodos para obtener películas delgadas y cada uno de ellos posee ciertas ventajas sobre los otros. La técnica de depósito por ablación láser consiste en hacer incidir un pulso de un haz láser energético sobre un blanco formado por una muestra cerámica cuya composición queremos replicar en una película. La potencia depositada por el pulso es tan alta que una pequeña parte de la muestra pasa al estado gaseoso. La cámara en que se realiza el ensayo no contiene aire y esta explosión controlada forma una nube (plasma). En las cercanías se encuentra un sustrato sobre el cual se depositará el material producido, dando lugar a un delgado recubrimiento formado por el material a estudiar. El tiempo de exposición del sustrato al plasma, la geometría de la cámara y su presión interna determinan el espesor depositado.

El rol del sustrato sobre el que se depositan estos recubrimientos es sumamente importante: al crecer una película sobre un cristal es posible obtener una continuación del carácter cristalino a condición de que los parámetros de red de ambos materiales sean muy cercanos. Determinar las condiciones de epitaxialidad en el crecimiento puede ser una tarea engorrosa. Una vez definido el material a depositar y el sustrato cristalino, la velocidad del depósito, la temperatura del sustrato y el nivel de oxigenación en la cámara suelen ser determinantes. Así, hasta un cierto espesor es posible mantener la cristalinidad del material depositado. En caso de crecer varias capas encimadas se debe sumar a estos los cuidados el de no destruir el orden del material depositado que pasa a ser sustrato del siguiente.

El término «ablación» refiere a la extracción de una porción del todo en el caso en que la parte extraída mantenga un sentido como conjunto. En este caso la explosión produce un depósito que mantiene la estequiometría original del blanco. Esta característica es muy útil a la hora

de crecer recubrimientos de una composición con varias especies atómicas manteniendo las proporciones originales. Otras técnicas de crecimiento son selectivas respecto de alguna especie atómica. En el caso de evaporar una aleación metálica, es muy probable que una especie se deposite antes que la otra dependiendo de los puntos de fusión de cada una. En todo caso, la técnica de crecimiento de películas delgadas por ablación láser ha mostrado ser una poderosa herramienta para el crecimiento de recubrimientos de óxidos complejos. A posteriori del depósito, de la misma manera que para el caso de síntesis de materiales por métodos químicos, se procede a la caracterización del material obtenido. Las películas se depositan en sustratos delgados, planos y muy limpios: ¡su espesor es de algunas decenas de nanómetros! La cantidad de material depositado es muy poco y no todas las caracterizaciones se adaptan a ser aplicadas en estas muestras.

Un fonógrafo para el nanoMundo

Durante la estadía en Bologna aprendí a operar un microscopio de fuerza atómica (AFM por sus siglas en inglés). Este aparato permite revelar objetos nanométricos por medio de una punta muy «filosa» que se desplaza por la superficie de la muestra a estudiar. La punta del AFM (ver fig. 9) puede apoyarse o estar cerca de la superficie de la muestra.

En este proceso es posible evidenciar la interacción entre punta y superficie, y de esa manera obtener un relevamiento topográfico. Conceptualmente, el modo de operación de un AFM es similar al de un tocadiscos o fonógrafo en que la púa actúa como transductor de topografía en una señal eléctrica que luego se transforma en sonido. A diferencia de la rugosidad micrométrica de los surcos de un disco de vinilo, los nuevos sistemas incorporan mejoras tecnológicas que permiten revelar la topografía en el rango del nanómetro.

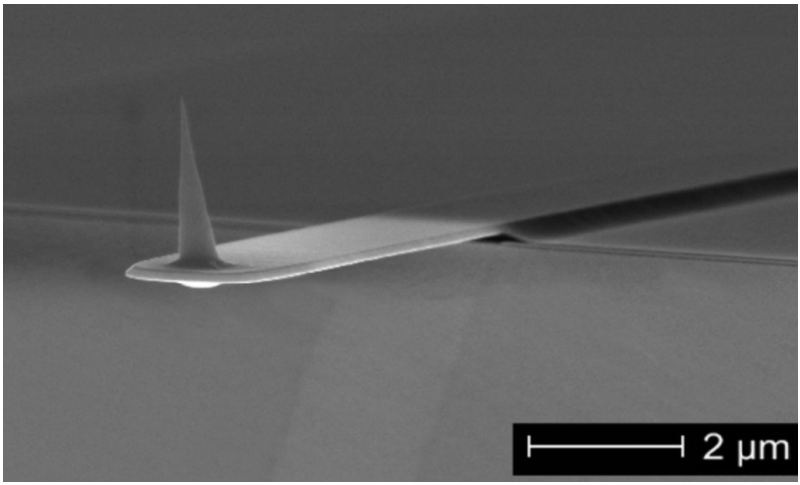


Figura 9. Imagen obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido de una punta típica utilizada en AFM (la punta se encuentra «mirando hacia arriba»). La barra de 2 micrones permite distinguir que la zona del sensado (punta propiamente dicha) tiene dimensiones nanométricas. La punta está crecida sobre un cantiléver que proporciona la estructura de sostén actuando como transductor para monitorear los desplazamientos del sistema.

Parte de la magia de este instrumento es que el investigador puede sentir la muestra, de manera casi literal. El «dedo sensor» es la punta y disponemos de un extenso menú de opciones para realizar la exploración. Una vez elegido el punto de la superficie que queremos estudiar es posible definir la manera en que nos acercaremos y la fuerza a ejercer sobre la superficie. Si nos acercamos hasta tocar, presionar y luego alejarnos tendremos información sobre la dureza y adhesividad de la muestra. Si nos desplazamos por una superficie determinada podremos obtener mapas de diferentes propiedades, dependiendo del tipo de punta y del tipo de barrido utilizado. ¡El AFM es una verdadera mano metida en el nanoMundo...!

Una fábrica en el nanoMundo

Uno de los aprendizajes importantes de mi viaje a Bologna fue el vinculado a lo culinario: allí se le daba una

importancia superlativa a la delicadeza y variedad de manjares a la hora de sentarse a la mesa. Mis favoritos nunca dejaron de ser la pizza y las pastas. Justamente relacionado con estas últimas, y quizás en una mezcla de saberes, lo científico se mimetizó con lo culinario para obtener dos formas de objetos nanométricos que recuerdan a los tagliatelle y a los bucattini: cintitas y tubitos.

En ambas estrategias de crecimiento se combinaron técnicas químicas con físicas. Y en ambas, la irradiación con partículas energéticas jugó un rol central. En un caso, se buscaba saturar el nivel de daño en zonas predeterminadas haciendo incidir una dosis muy elevada de iones que quedaban implantados en el sustrato. En el otro caso, la habilidad consistió en hacer incidir un número bajo y bien controlado de iones, cada uno de los cuales dejaría una estela de material dañado a lo largo de su recorrido.

Nanocintas y tagliatelles

Para fabricar dispositivos usando películas delgadas sucede que en ciertas ocasiones es preciso disponer de sustratos con una rugosidad particular, o con motivos que puedan favorecer ciertos hábitos de crecimiento.

Un experimento en que participé consistió en definir un escalón o borde pronunciado en un sustrato cristalino sobre el cual posteriormente se hace crecer una película delgada utilizando la técnica de depósito por ablación láser. De esta manera el recubrimiento epitaxial tiene una «línea de quiebre» que determina el crecimiento controlado de dos superficies cristalinas gemelas con una frontera bien definida entre ellas.

Obtener discontinuidades de decenas de nanómetros de altura en un sustrato monocristalino no resultó ser «pan comido». La estrategia seguida para socavar un escalón en el sustrato plano fue realizar un ataque químico focalizado, permitiendo definir contornos agudos. Usamos una de las caras de Al_2O_3 monocristalino como sustrato, y la estrategia elegida fue la de implantar argón en las zonas que debían ser comidas posteriormente con ataque ácido selectivo. Irradiando con grandes dosis de argón a baja energía es posible destruir la cristalinidad del sustrato, dando lugar a material amorfo que está ubicado solamente en las zonas expuestas. Una máscara delimita

las zonas protegidas del sustrato, que permanecen monocristalinas.

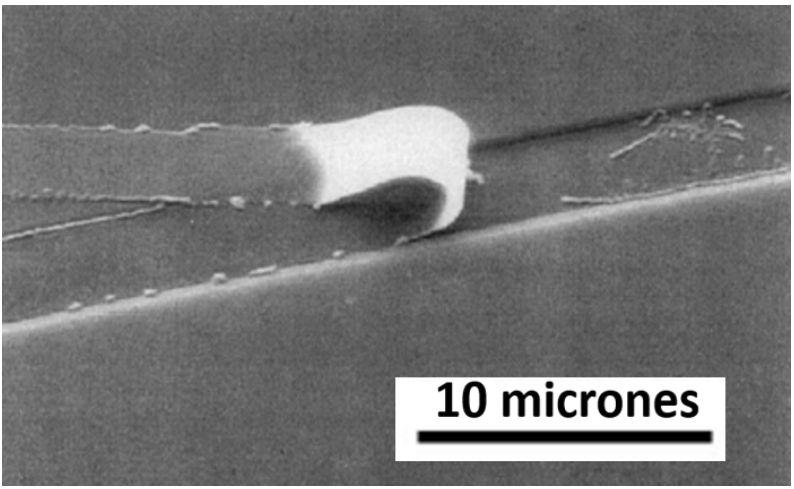


Figura 10. Cinta delgada de alúmina obtenida implantando altas dosis de argón en un sustrato de Al_2O_3 monocristalino, el que es posteriormente atacado de manera selectiva, produciendo la liberación de material del sustrato. Notar que los bordes de las cintas tienen una rebaba producida durante el desprendimiento brusco generado por el ataque químico, que avanza más rápidamente por las zonas tensionadas que se encuentran en los bordes entre zona irradiada y no irradiada. La imagen fue obtenida utilizando Microscopía Electrónica de Barrido.

En el borde entre zonas cristalinas y amorfas se acumulan tensiones, ya que producto de la implantación se produce una expansión del material dañado que presiona la zona virgen. El ataque químico es mucho más eficiente en las zonas tensionadas que en el resto del material. Al sumergir una muestra con zonas tensionadas a lo largo de bandas, se produce un violento desprendimiento de material que libera la tensión mecánica acumulada. Dependiendo del distanciamiento entre estas zonas, es posible liberar objetos alargados y delgados, cuya forma recuerda a los tagliatelles, tal como se puede observar en la fig. 10. Si bien diminutos, por su morfología no dejan de aparecer como sumamente apetitosos.

Posteriormente se crece una película monocristalina so-

bre el sustrato procesado, que ahora tiene zonas vírgenes y escalones producidos por la amorfización y posterior ataque selectivo. En esos bordes se produce un cambio de orientación cristalina de la película epitaxial depositada. Esto afecta el mecanismo de transporte eléctrico de los portadores que atraviesan dichas regiones. Este tipo de juntura tiene propiedades muy interesantes que pueden ser utilizadas en una etapa ulterior para fabricar dispositivos.

Nanotubos y bucattinis

Utilizando bajas dosis de irradiación participé de una aventura que «salió como por un tubo»: la fabricación de pequeños objetos tubulares. La historia empezó –ya a mi regreso a Buenos Aires- con la propuesta de utilizar las capacidades del acelerador TandAr para irradiar plásticos que luego sirvieran como moldes para fabricar hilos metálicos pequeños. La idea es simple: las partículas energéticas que provee el acelerador atraviesan el plástico, dejando dañada la estructura del mismo, algo parecido a lo que yo ya había encarado con los cristales de óxidos superconductores. A diferencia de esos cristales -en donde lo que se daña es la estructura cristalina y ese reguero de zonas amorfas es aprovechado por los vórtices magnéticos- en el caso de los plásticos quedan enlaces químicos debilitados a lo largo de la trayectoria del proyectil. Otra diferencia es que el plástico es mucho más «blando» que el cristal, por lo que, a igualdad de energía de la partícula incidente, el recorrido es mucho mayor en el primero.

Un ataque químico posterior con un ácido será mucho más eficiente atacando las zonas del plástico por donde pasó una partícula, a comparación del efecto que producirá sobre el plástico no irradiado. Las partículas incidentes han dejado enlaces químicos debilitados y por lo tanto, más susceptibles a reaccionar con el ácido. La selectividad (relación entre la velocidad de ataque en la zona irradiada con la de la zona no expuesta) en estas condiciones suele ser de entre 100 y 1000. Conclusión: si sumergimos una lámina de plástico irradiada en un ácido e interrumpimos el ataque químico a tiempo, obtenemos un colador. En efecto, la lámina queda atravesada por canales que comienzan en la cara superior y llegan hasta la

cara inferior (ver fig. 11). La dosis de partículas con que se irradia al plástico determina la cantidad de agujeros por unidad de superficie, y el tiempo del ataque químico determina el diámetro de los canales.

Este tipo de filtros es muy utilizado para depurar el paso de partículas mayores a un cierto tamaño. Se producen a gran escala y comercialmente se las vende con agujeros de tamaños calibrados: constituyen un hermoso ejemplo de aprovechamiento de un proceso para hacer una herramienta con detalles muy pequeños (el filtro) y luego volver a usarla para tamizar el nanoMundo.

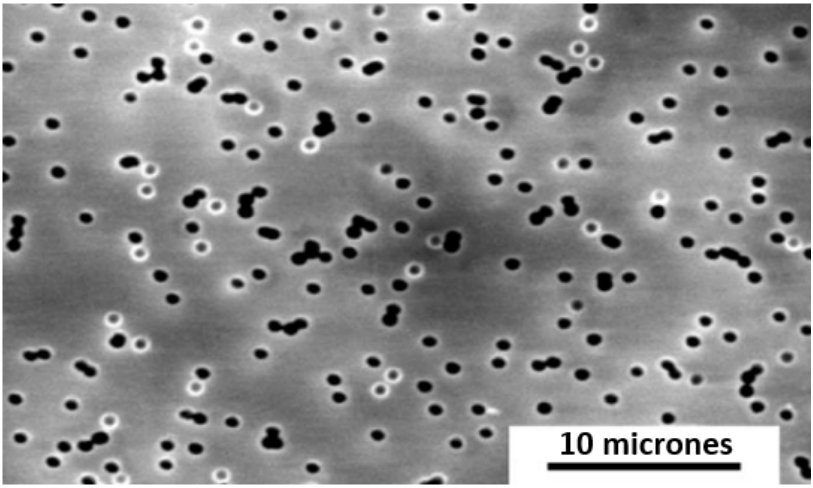


Figura 11. Vista de la cara superior de una lámina de plástico luego de ser irradiada con partículas energéticas y de haber recibido un ataque químico. El ácido ataca selectivamente las zonas por las que pasaron las partículas. La imagen se obtuvo por Microscopía Electrónica de barrido. El diámetro de los canales es de 700 nm aproximadamente, y su densidad superficial se corresponde directamente con la dosis de irradiación: cada ion incidente define un poro.

La idea inicial era utilizar esos filtros para hacer una electrodeposición de metales dentro de las cavidades tubulares. Aplicando un potencial eléctrico sobre una de las caras del filtro sumergido en una solución que contenga partículas metálicas es posible hacerlas migrar por adentro de los tubos hasta que se fueran formando nano–hi-

los del material disuelto.

En esa época usábamos soluciones precursoras para crecer policristales de óxidos utilizando un horno de microondas para calentar los líquidas y evaporar lentamente el solvente (que se encontraba en contenedores de vidrio). Entonces surgió la idea de utilizar los filtros plásticos como nano contenedores, de manera que cuando las microondas evaporaran el solvente se formara el material de manera confinada dentro de los orificios pasantes. A diferencia del método de electrodeposición, ¡siguiendo esta estrategia no era necesario que el material a depositar fuera un conductor eléctrico!

Entonces, los plásticos atravesados por iones y luego perforados por el ataque químico formaban los canales nanométricos que podían ser usados para contener y cocinar las soluciones. Al evaporarse el solvente se produce un crecimiento «desde abajo hacia arriba» en condiciones de confinamiento determinado por las paredes del plástico. En una etapa siguiente se calcina el plástico, liberando nano-objetos que recuerdan por su forma a los fideos tipo bucattini (ver fig. 12).

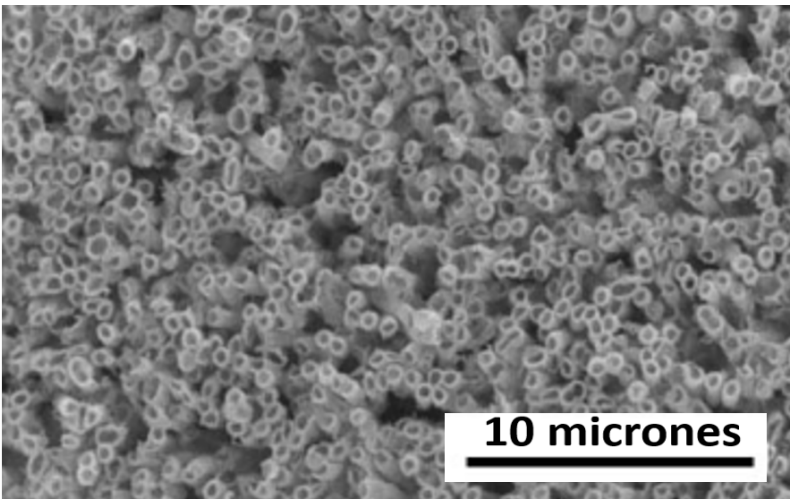


Figura 12. Luego del calcinar el sustrato que funciona como nano reactor, se revelan nano - estructuras que se parecen a los fideos tipo bucattini (pasta seca similar a los vermicellis pero con perforaciones longitudinales en toda su extensión).

La imagen fue obtenida utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. Notar que por sus dimensiones, estos objetos son unas 300 veces más chicos que los fideos comestibles.

Dependiendo de diferentes condiciones experimentales, como el diámetro de los canales nanométricos o la concentración de la solución utilizada, es posible pasar de los bucattini a los vermicellis lo cual, como en varios aspectos culinarios, puede quedar a gusto del que los consumirá.

Los pequeños tubos así obtenidos tienen una peculiaridad adicional: sus paredes son policristalinas, están formadas por granos cristalinos (ver fig. 13) de pocas decenas de nanómetros de diámetro. Esto da una riqueza adicional al sistema. Es interesante notar que, fijada la composición particular del compuesto, las dos morfologías escalonadas son generadas por el crecimiento del material desde el nivel atómico hacia el macroMundo: inicialmente crecen los granos, se ubican en las paredes del contenedor plástico, y luego continúan creciendo, formando las paredes del tubo. Los colegas químicos dominan estas alquimias y ensamblajes. Saben cómo hacer para que los reactivos reaccionen, que los solventes disuelvan, y que los confinamientos confinen. Ellos pueden crear muy diferentes objetos pequeños de las formas más variadas. Y saben confinarlos en los recovecos más insospechados....

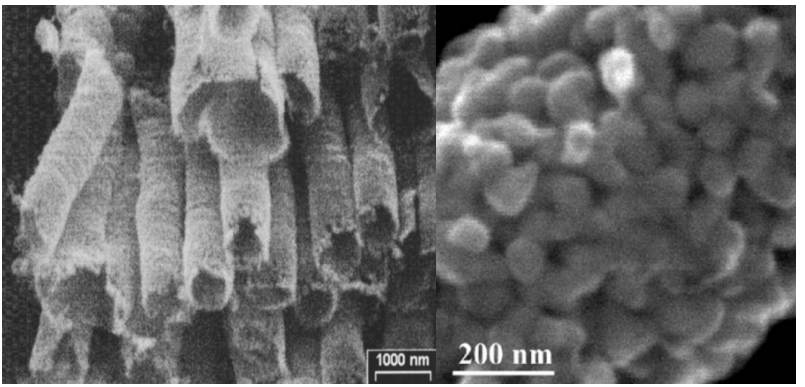


Figura 13. Panel izquierdo: los ramilletes de nanotubos presentan irregularidades que los asemejan a una corteza de árbol. Panel derecho: detalle de la superficie de un nanotubo en el que se pueden individualizar los granos que componen las paredes.

La imagen fue obtenida utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. Notar que la diferencia de escalas entre ambos paneles revela detalles que a priori no son distinguibles.

Si el material que los forma es magnético, cada uno de los nano-objetos alargados es una pequeña brújula. Al sumergirlos en una solución y utilizando un campo magnético variable es posible generar movimientos coherentes que cambian el color del líquido dependiendo de su orientación. Los experimentos vistosos y aparentemente sencillos como el descripto (al que podríamos llamar «nanotubos danzarines») suelen ser una manera eficiente de lograr que el nanoMundo emerja de las profundidades y convoque a potenciales interesados en conocer sus caminos.

Siguiendo la misma idea, existe una aplicación interesante de este tipo de objetos en medicina. Para el tratamiento de algunas enfermedades es necesario enviar medicamentos a ciertas zonas del cuerpo evitando que el mismo de desperdigue. El hecho de que los nanotubos descriptos son huecos y magnéticos puede ser utilizado para encapsular la droga en cuestión, inyectarla en la sangre, y concentrarlos en las cercanías del sitio a tratar aplicando un campo magnético permanente (provisto desde el exterior del cuerpo por un imán). Adicionalmente, aplicando un campo magnético variable es posible agitar los nanotubos danzarines proponiendo un baile intenso, con el doble objeto de liberar la droga de su contenedor y de producir calentamiento localizado por agitación. Así, es posible obtener un procedimiento que afecta las zonas tumorales con alta selectividad.

Orden y desorden

La magneto-resistencia consiste en la posibilidad de controlar las características del transporte eléctrico que tiene un material con la aplicación de un campo magnético externo. Los metales son en general magneto-resistivos: si un portador eléctrico avanza y encendemos el campo magnético en una dirección arbitraria, entonces los portadores experimentan una fuerza perpendicular a la dirección del desplazamiento, que los desvía de la dirección hacia la cual se dirigían inicialmente. Les resulta

más difícil avanzar, y eso aumenta la resistencia eléctrica. Se dice que los metales tienen «magneto-resistencia positiva» pues se produce un incremento de la resistencia eléctrica por la presencia del campo magnético. ¿Existirá la magneto–resistencia negativa?

Siguiendo mi caminata temática, conozco un nuevo (¡para mí!) mecanismo de transporte eléctrico: el doble intercambio. En ciertos óxidos de manganeso (Mn), el electrón que queda más débilmente ligado al Mn puede moverse hacia otro átomo de Mn tomando como punto de apoyo al oxígeno que separa a ambos. La dinámica es casi como la de saltar un arroyo usando una piedra o tronco que están en medio del agua y nos permiten –gracias a la pequeña superficie que emerge– pisar brevemente para saltar al otro lado «casi» sin pisar el agua. La topografía es la que vemos en la fig. 14.

¡Cuántas veces hice esto a lo largo de mis caminatas! ¡Y ahora me vengo a encontrar con un mecanismo similar mientras recorro los paisajes del nanoMundo!

Figura 14. Los saltos que damos para atravesar un arroyo pisando piedras que definen nuestro camino se asemejan caricaturescamente al mecanismo de doble intercambio por el

> cual un electrón se desplaza desde un Mn a otro Mn utilizando como punto de apoyo a un oxígeno. Siguiendo la analogía, si la ausencia de piedras implica una dificultad para el caminante, la ausencia de oxígenos redundará en un aumento de la resistencia eléctrica. La ausencia de oxígenos suele llamarse «vacancias de oxígeno» y en los materiales en que este mecanismo de transporte eléctrico es mayoritario, existe una proporcionalidad directa entre la resistencia eléctrica y el número de vacancias presentes.

Sin embargo, si la temperatura es suficientemente baja, las cargas ya no tienen la energía suficiente para escaparse del Mn e ir saltando, y tienden a quedarse alrededor de su Mn. En este caso, estamos en presencia de una inmovilización de las cargas eléctricas, lo cual puede suceder con diferentes grados de ordenamiento en toda la extensión de la red cristalina. Este orden de carga implica un estado eléctrico aislante. En la analogía con el salto por piedras, una fila de personas que quiere cruzar el arroyo puede quedarse atascada con una persona en cada piedra, o una persona cada dos piedras o en algún ordenamiento regular que imposibilita el movimiento porque el sitio siguiente «ya está ocupado»: se interrumpe el movimiento y el estado pasa de ser conductor a ser aislante. Entonces, por debajo de la temperatura a la que las cargas se ordenan, el estado de conducción eléctrica disminuye notablemente: los portadores se quedan anclados en ciertos sitios formando redes regulares de carga eléctrica ordenada.

En los óxidos de manganeso llamados *manganitas* se da la peculiaridad de que el «salto» se produce solamente si los átomos de manganeso vecinos están alineados magnéticamente. Por lo tanto, se produce un interesante efecto de competencia entre la temperatura (que al disminuir tiende a evitar la conducción eléctrica) y el campo magnético (que al aumentar tiende a promover la conducción eléctrica). Este efecto lleva el nombre de «magneto-resistencia colosal» pues el campo magnético produce cambios significativos en la resistencia eléctrica a comparación de los que produce sobre los metales. Como el efecto del campo magnético es el de disminuir la resistencia eléctrica, se clasifica a este fenómeno colosal como «magneto–resistencia negativa».

El término «colosal» fue impuesto –a su vez– para diferenciarlo del efecto «gigante» que se había descubierto pocos años antes y que ya estaba siendo usado masivamente. En tiempo sorprendentemente corto, la «magneto–resistencia gigante» (conocida como GMR por sus siglas en inglés) había pasado en pocos años desde los laboratorios de investigación básica a los laboratorios de aplicaciones, y desde allí a la industria. Un pasaje de sendero a huella, de huella a camino de tierra, de ripio, consolidado, asfaltado, para llegar a la autopista del consumo masivo: las unidades lectoras de discos rígidos magnéticos basados en dispositivos magneto-resistivos cuyo mecanismo es la GMR estaba desplazando el uso de bobinas en los cabezales de lectura. Este mecanismo había sido descubierto al estudiar apilamientos muy sofisticados de películas delgadas de materiales magnéticos y no magnéticos.

¿Sería posible hacer lectores similares a los que operaban por GMR pero con materiales cuyo mecanismo de transporte eléctrico fuera la magneto–resistencia «colosal»? El valor agregado sería no tener que fabricar complicados apilamientos de películas, y empezar a codificar los valores leídos en el volumen de un material.

El rol del desorden I: tamaño de grano

Volvamos a los senderos del nanoMundo: usando los mismos métodos de síntesis (reacción en estado sólido) utilizados para el caso de los óxidos superconductores de alta T_c, empezamos a estudiar *manganitas*. De todas las *manganitas* posibles –hay muchísimas composiciones– elegimos una muy peculiar que, sin saberlo en ese momento, nos llevaría por caminos inesperadamente difíciles…Y es sabido: los caminos más complicados son los que traen las mayores alegrías… ¡si uno logra encontrar el sendero apropiado!

El ordenamiento magnético en un cristal se produce cuando los momentos magnéticos de cada átomo se orientan coherentemente debido a la interacción entre ellos. Cuando la temperatura impide este acoplamiento estamos en presencia de un estado paramagnético (PM). Si el acoplamiento es tal que los momentos magnéticos tienden a cancelarse localmente en la escala nanométrica

el estado es conocido como antiferromagnético (AFM). Si se alinean en la misma dirección y sentido se produce un refuerzo del magnetismo conformando el estado ferromagnético (FM).

Hay un frondoso mundo dentro del ferromagnetismo, desde estados parcialmente magnéticos hasta la separación espontánea en dominios FM micrométricos que tienden a cancelar el campo magnético afuera de la muestra. También es frondoso (¡y laberíntico!) el mundo de los AFM: las maneras en que los momentos magnéticos atómicos pueden cancelarse en la escala de los nanómetros es muy diversa e intrigante. Incluso hay estados magnéticos «frustrados» en que hay varias opciones de ordenamiento y el sistema no termina de decidirse. ¡Cualquier similitud con la vida de los humanos es apropiada!

En las *manganitas* el ordenamiento FM tiene asociado un comportamiento eléctrico tipo conductor (la conducción se produce por el mecanismo de doble intercambio recién descripto). Por el contrario, el estado AFM es aislante debido a que se produce un orden espacial de la carga, es decir, no hay conducción eléctrica.

Del amplio menú de composiciones de las manganitas, elegimos las especies y proporciones que técnicamente se denominan $La_{0.5}Ca_{0.5}MnO_3$. Este material presenta una interesante competencia entre diferentes ordenamientos: la secuencia de estados PM – FM (conductor) – AFM (aislante de carga) se produce al descender la temperatura. Estas transiciones de fase sólido – sólido se producen a temperaturas bien definidas y es posible determinarlas estudiando diferentes propiedades del material: magnetización, susceptibilidad, resistencia eléctrica, parámetros de la red cristalina, entre otras.

Cuando todas las caracterizaciones indicaban que ya disponíamos de la composición correcta, sucedió que no lográbamos medir esas transiciones de fase en nuestras muestras. La sensación era la de estar perdido en medio del bosque, sabiendo que el refugio buscado estaba cerca, que el tiempo pasaba y las horas de claridad iban quedando atrás. El frío anunciaba la llegada de momentos difíciles si no encontrábamos el sendero correcto. Y cuando las fuerzas empezaban a flaquear... ¡la pista salvadora vino desde el nanoMundo!

El método de síntesis usado para fabricar estos materiales determinaba que el tamaño del grano de los materiales obtenidos fuera pequeño, de unos 100 nm de diámetro o menor. Sabemos que el orden cristalino se degrada e interrumpe al llegar a la superficie de un cristal: se producen curvaturas y quiebres bruscos que determinan que los arreglos periódicos de átomos pasen primero a ser irregulares, y luego terminen. Justamente este desorden inducido por el tamaño de grano era el que inhibía que el orden de largo alcance se produjera en nuestras muestras, formadas por montones de cristalitos de menos de 100 nm. Entonces, si bien verificamos por todos los medios accesibles que la composición sintetizada era la que buscábamos, la respuesta eléctrica y magnética al enfriar las muestras hasta las temperaturas que correspondían a las transiciones de fase de ese compuesto no se observaba.

Para verificar la hipótesis de que era el tamaño del grano policristalino el que inhibía las transiciones de ordenamiento, siguiendo otra metodología sintetizamos muestras de diferentes tamaños de grano. Al comparar las características de las transiciones de este nuevo conjunto de muestras se reveló el rol del tamaño de grano para controlar el estado de orden electrónico. Poder explicar el comportamiento de estos materiales fue como, para un caminante en medio de la nieve, ver a lo lejos una chimenea humeante cuando las fuerzas comienzan a flaquear y cuando los pies, las medias y el calzado están mojados…

El rol del desorden II: impurezas

Una vez que entendimos que el desorden introducido externamente era el responsable de romper el orden microscópico, decidimos aplicar la misma idea pero siguiendo otra estrategia. De esta manera pondríamos a prueba la capacidad predictiva del modelo fenomenológico desarrollado. En vez de utilizar un tamaño de grano pequeño para que hubiera mucha superficie y la red cristalina no se pudiera ordenar, nos propusimos incorporar pequeñas cantidades de una especie contaminante. De esta manera podríamos lograr interrumpir el orden de carga, el que entonces ocuparía regiones más pequeñas en las cuales el nivel de desorden sería mayor.

¿Qué especie química era la apropiada para incorporar? La elección era delicada: inducidos por la impureza pueden producirse segregaciones de materiales y formación de fases diferentes a la esperada. Pero, como comenté varias veces, los químicos tienen una artillería de herramientas que manejan con destreza y...toda la tabla periódica a su disposición!

Siguiendo este camino pudimos observar interesantes efectos de anclaje de los diferentes dominios ordenados: al enfriar una muestra hasta la temperatura en que se debía producir el ordenamiento se produjo una competencia dinámica en que los dominios ordenados crecían a expensas de los desordenados y las paredes se anclaban. Este proceso dio lugar a relajaciones temporales lentas en que las paredes de dominios se iban anclando en las impurezas. Aprendimos que la dinámica de estas relajaciones era cada vez más lenta a medida que pasaba el tiempo, siguiendo una ley muy bien determinada que se vincula al anclaje secuencial y creciente de los bordes de zonas.

Durante las exploraciones (sean en el bosque o en el laboratorio) no siempre tenemos tiempo para detenernos y contemplar la evolución de un proceso. Solemos «ver la foto y no la película». Así, algunos estados que parecen de equilibrio podrían no serlo si nos tomamos el tiempo para observarlos detenidamente. Los experimentos para medir las relajaciones lentas y largas están automatizados y (¡por suerte!) no obligan al investigador a estar de cuerpo presente a lo largo de todo su desarrollo. Sin embargo, varias veces tuve que interrumpir caminatas (reales, durante un fin de semana) para acercarme a comprobar si los movimientos de paredes de dominio requerían de un acompañamiento personalizado. Diseñar experimentos para evidenciar este tipo de comportamiento suele ser una tarea tan delicada como definir un circuito que incluya, durante un paseo, descansos precisos y de duración apropiada.

Memoria magneto-resistiva

Una unidad de memoria magnética, por ejemplo el conocido disco rígido, está formada por un material que tiene regiones FM que pueden orientarse en uno u otro

sentido. Esto da lugar a dos estados, lo que permiten codificar información. La menor porción de información es llamada *bit*: puede tomar uno de dos valores dependiendo de que algo haya sucedido o no. En este caso, la lecto-escritura es magnética pura: tanto para escribir un dato como para leerlo se debe hacer uso de técnicas «magnéticas».

Una variación a este modo de operación para escribir o leer un bit de información es leer el estado por un «modo eléctrico». La magneto-resistencia permite vislumbrar un sensor de campo magnético que codifique el estado magnético en resistencia eléctrica, permitiendo un incremento en la velocidad de lectura.

Las manganitas tienen valores altos de magneto–resistencia negativa, tanto comparada con la de los metales como con la de los GMR. El valor de la resistencia codifica la relación entre los volúmenes que ocupan las zonas FM y AFM. Como la evolución de esos dominios nanométricos es muy lenta, a los efectos prácticos (horas, días) el sistema se comporta como una memoria no volátil. En definitiva, utilizando la «perilla» del campo magnético podemos recordar (de manera no volátil, es decir, sin consumir energía) la intensidad del campo que ha sido aplicada luego de apagar la fuente, simplemente midiendo la resistencia eléctrica.

Entonces, además del interés en el entendimiento de los mecanismos subyacentes al transporte eléctrico y la definición de regiones FM y AFM, ¡había en estos materiales un potencial interés para aplicaciones en el campo de la informática! ¿Cómo debe actuar un caminante que encuentra un atajo que podría interesar o servir para alivianar la ruta de otros? ¿Es preferible obtener un rédito (científico) en un plazo corto, o es mejor seguir el largo derrotero de las potenciales aplicaciones gestionando una patente? Ampliando el contexto de la pregunta: ¿un científico debe reportar sus hallazgos sin pensar en las potencialidades y posibles consecuencias de sus investigaciones?

Memoria electro-resistiva permanente

Utilizamos memoria electrónica en muchísimos momentos y durante muchísimas actividades de nuestro día. El lector de este texto probablemente tenga en sus bolsillos un teléfono celular con datos sobre sus contactos y fotos de momentos únicos... ¡almacenados en una memoria electrónica! En general no nos preguntamos lo obvio: viajamos en auto sin entender cómo funciona un motor o usamos una computadora sin vislumbrar el conocimiento tecnológico allí acumulado.

Estamos muy acostumbrados a que los dispositivos que usamos tengan memoria, olvidando que esa información está guardada en un material muy elaborado al que accedemos con una cierta estrategia. Serendipidad mediante, a veces nos sorprendemos cuando entendemos algún detalle de lo cotidiano y eso nos da herramientas para entender -a su vez- alguna otra cosa. De la misma manera, el investigador que realiza su travesía por diferentes temáticas a veces se puede encontrar a las puertas de entender fenómenos que a priori no estaba buscando. La capacidad de asombro es algo que un caminante aprende a cultivar: regocija el presente y provee herramientas para el futuro.

La temática de las memorias y su lecto–escritura me generaron intriga e inquietud desde chico. Siempre las asocié (erróneamente) sólo al magnetismo. Sin embargo, el «árbol que tapa el bosque» es una instancia que le sucede a todos los caminantes. Yo estaba rodeado de memoria en cartón (por ejemplo en las tarjetas del ProDe) o en vinilo (los «larga duración»). Actualmente, las memorias «eléctricas» son ubicuas. La memoria en teléfonos celulares y cámaras de fotos, o los «pen-drive» dan cuenta de esto. Lo que sigue es mi experiencia vinculada a las memorias electro–resistivas permanentes.

Recuerdos de mi excursión por la memoria

Resulta que un día, mientras atravesaba la etapa «magneto–resistencia en *manganitas*» de la caminata por el nanoMundo, pasó volando un pajarito que se posó en una endeble rama cercana. Desde allí, insistentemente nos sugirió estudiar efectos electro–resistivos en la unión en-

tre un metal y un óxido. Enfrascados en nuestro trabajo sobre la magneto-resistencia, tardamos un tiempito en focalizarnos en esa propuesta: implicaba elegir una bifurcación del camino que, como las sirenas que quieren cambiar el recorrido del barco de Ulises, llaman la atención del incauto navegante intentando desviarlo del recorrido previamente pautado sin que éste lo advierta.

Entonces, aproveché uno de esos días de travesía en que los caminantes del grupo se toman un tiempo para descansar, leer el libro que cargaron pesadamente, lavar ropa, mirar a lo lejos recostados en una roca... Era un día de descanso en la larga caminata; ¡y yo podía usar los instrumentos del laboratorio sin entorpecer los planes de los demás! Entonces, me acerqué a las sirenas. Ulises había pedido ser atado al mástil de la embarcación para no sucumbir a la tentación y no correr así riesgos innecesarios. Acepté intentar medir la electro–resistencia proveniente de esas interfaces entre óxidos y metales, pero eligiendo las muestras que usaría. Así evitaría correr riesgos que implicaran cambiar el rumbo de la investigación en *manganitas*.

¿Qué mejor oportunidad para buscar y ensayar esas potenciales propiedades de interfaces óxido–metal que usar el mismo sistema que en ese mismo momento estábamos midiendo en nuestro laboratorio? ¡Sí, me refiero a las muestras cuyas propiedades magneto-resistentes intrínsecas estudiábamos en esos días! ¿Eran óxidos...? Sí. ¿Tenían interfaces metal – óxido...? Sí. ¿Tenían cables conectados como para medirlos ahora mismo? ¡Sí...! De esta manera aseguraba que la distracción fuera «controlada», siguiendo la estrategia inspirada en Ulises.

El desafío era medir *solamente* la respuesta eléctrica del electrodo, algo que históricamente habíamos evitado hacer para poder focalizar en las propiedades *intrínsecas* de la muestra bajo estudio. El conexionado usado evitaba el problema de medir una respuesta asociada a la forma y material del electrodo, y dejaba de lado las contribuciones termoeléctricas espúreas.

Midiendo con una nueva metodología encontramos que las muestras magneto-resistentes en contacto con su electrodo metálico tenían memoria no volátil ¡sin necesidad de aplicar un campo magnético! El experimento

consistió en lograr conmutar la resistencia eléctrica de la interface metal – óxido entre dos estados utilizando solamente una «perilla eléctrica».

Entonces, ¿la resistencia de una interface metal – óxido no tiene solamente *un* valor...?

Parece que no. Encontramos estados de alta y de baja resistencia dependiendo de qué le hubiéramos hecho antes a la muestra, escribiendo con pulsos eléctricos y leyendo con una corriente eléctrica o voltaje. Estábamos en presencia de una memoria: ¡podíamos guardar información en un sistema así!

La verificación de que el sistema tenía memoria electro–resistiva permanente (que no se diluye a los pocos segundos) consistió en un ensayo de 24 horas. Definimos el estado de resistencia una mañana y nos propusimos: el investigador (explorador) se puede ir a dar una caminata larga por otras temáticas con pernocte incluido. Establecimos un protocolo para dejar al sistema de adquisición midiendo automáticamente. ¡Es una buena estrategia para tener un testimonio de lo que sucede (en el bosque) mientras el investigador (lobo) no está!

Al día siguiente, cerca del mediodía y ya en el laboratorio nuevamente, ¡el valor de resistencia era el mismo que el del día anterior! Incluso, al hacerlo conmutar entre los estados de alta y baja resistencia se mantenían los mismos dos valores previos. En la fig. 15 se describe el experimento completo, realizado a temperatura ambiente sobre un cerámico de una manganita cuya composición había sido «sintonizada» previamente pensando en la competencia de dominios FM y AFM. Con el tiempo, aprendimos que el fenómeno electro-resistivo no depende de la composición exacta de la muestra.

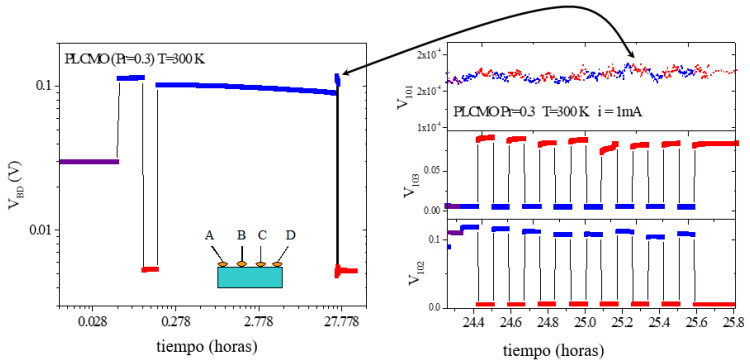


Figura 15. Panel izquierdo: Primera medición realizada en nuestro laboratorio de lecto–escritura electro–resistiva. Se presenta la tensión sobre la juntura metal–óxido de una manganita con La-Pr-Ca en función del tiempo transcurrido (medido en horas). Se puede observar la conmutación inicial entre valores bajos (rojo) y altos (azul) luego de lo cual el sistema es monitoreado durante más de 24 horas. Se presenta también el esquema de electrodos A, B, C y D, en que la corriente se inyecta por los terminales «A» y «D». Panel derecho: transcurridas 24 horas de monitoreo se realiza la conmutación y se obtienen aproximadamente los mismos valores de resistencia remanente baja (rojo) y alta (azul), los datos son mostrados bloque inferior. En los bloque superior e intermedio se presentan los valores de la respuesta intrínseca del óxido (notar que no cambia durante las escrituras y lecturas) y de la interface metal- óxido opuesta (su valor cambia de manera complementaria al de la interface estudiada). En todos los casos la tensión es medida al aplicar una corriente de 1 mA.

Los días siguientes fueron intensos: ¡había que realizar nuevos experimentos y ensayos, queríamos entender los motivos de ese comportamiento electro–resistivo! En ese momento, en la literatura internacional había muy pocos reportes de comportamientos similares. Todos ellos mencionaban un nuevo tipo de mecanismo que daría lugar a una nueva generación de memorias no volátiles: los memristores.

Aprendimos que los memristores codifican en su valor de resistencia el valor de estímulo eléctrico al que lo hemos sometido. Técnicamente la propiedad de «tener me-

moria» se llama histéresis: la palabra se vincula con «historia», el recuerdo de lo que ha sucedido. La sorpresa era poder determinarlo – en un material con magneto-resistencia- solamente con estímulos eléctricos.

Hay varios mecanismos nanoscópicos que determinan los diferentes niveles de resistencia eléctrica en los sistemas metal–óxido–metal. Uno de ellos es la formación de canales conductores entre un electrodo y otro. Al igual que un relámpago establece una conexión eléctrica entre las nubes y la tierra, cuando el campo eléctrico entre electrodos es suficientemente intenso se producen defectos que establecen un camino percolativo permitiendo que circule corriente por donde antes no podía hacerlo. Es factible establecer este alto campo eléctrico usando valores acotados de tensión debido al uso de películas de óxidos cuyo espesor está en la escala de los nanómetros.

Otro de los mecanismos por los que es posible alterar el valor de la resistencia eléctrica de una juntura metal – óxido es por el desplazamiento de vacancias de oxígeno (ausencia de oxígeno en la red cristalina). Ambos mecanismos permiten que se «escriba» una cierta información con estímulos eléctricos, que esa información permanezca de manera permanente en la muestra, y que luego pueda ser leída utilizando un estímulo eléctrico bastante menor en amplitud que el que se había utilizado para escribir. El nivel de resistencia eléctrica remanente está determinado por la configuración de iones en la red cristalina. Encontramos que los cambios que produce un pulso eléctrico (el cual está limitado en duración y en amplitud) son parciales. Entonces, al repetir estímulos de la misma amplitud logramos acumular cambios, lo cual constituye una memoria que puede codificar la cantidad de pulsos recibidos en su valor de resistencia eléctrica. La presencia de multiniveles de memoria determina una nueva potencialidad para las aplicaciones: al codificar en una misma posición del espacio varios estados (*multibits*). ¡Así se puede aumentar la densidad de la información almacenada en un determinado volumen!

¿Simultáneamente electro y magneto–resistivo?

El fenómeno de la electro–resistencia que observamos en las muestras de *manganitas* se localiza en la interfa-

ce entre el electrodo y el óxido, mientras que el magneto-resistivo es un fenómeno inherente al volumen del óxido. ¿Sería posible tener en una misma muestra ambos tipos de memoria simultáneamente? Intentaríamos controlar el nivel de la resistencia eléctrica con dos «perillas» independientes: el campo magnético actuaría sobre el tamaño de los nanodominios magnéticos mientras que las junturas entre electrodos metálicos y óxido serían sintonizables por los estímulos eléctricos.

La memoria magneto-resistiva es observable en el rango de temperaturas en que el óxido bajo estudio tiene ordenamiento FM, a unos 150 grados bajo cero. Por tal motivo tuvimos que hacer el experimento en un criostato. La predicción era que ambas propiedades (la volumétrica y la superficial) debían poder activarse independientemente, asumiendo la hipótesis de que estos mecanismos no interferían entre sí. Si bien la propuesta era plausible, hasta no ver los resultados no lo podíamos afirmar.

Encontramos que dentro de cierto rango las «perillas» eléctrica y magnética no se molestan entre sí, dando lugar a la posibilidad de acceso independiente y simultáneo de los dos estímulos. Así, quedaba determinada una multifuncionalidad, lo cual da un nuevo valor agregado a las memorias permanentes fabricadas con *manganitas*. En ese momento no lo sabíamos, pero tuvimos un anticipo: las palabras «óxido» y «multifuncional» pasarían pronto a formar parte del nuevo nombre de nuestro laboratorio.

Miniaturización: un juego de sombras

Inicialmente, los memristores que obteníamos en el laboratorio eran fabricados «a mano» siguiendo un proceso artesanal de depósito de electrodos metálicos sobre las muestras obtenidas por alguno de los métodos de síntesis química ya conocidos. El formato de los óxidos que estudiábamos por aquella época era el de aglomerados de pequeñísimos policristales, formando muestras de varios milímetros de longitud en cada dimensión y algunos miligramos de peso. Para el conexionado, la pintura de plata es el aglutinante que permite una buena adhesión eléctricamente conductora a la superficie del cerámico. A la vez, al secarse sostiene al cable que precisaremos para realizar la comunicación con el mundo externo, y así po-

der realizar mediciones eléctricas. Depositando con un pincel una pequeña cantidad de pintura se puede lograr tener «buenos contactos». ¡Pero son contactos enormes a la hora de intentar acercarnos a objetos en regiones del nanoMundo! Aun usando un solo pelo de un pincel recién estaríamos acercándonos a las decenas de micrones. Y están hechos de manera artesanal...

Una manera de fabricar electrodos pequeños de manera sistemática es usar técnicas de litografía. La idea básica consiste en fabricar un molde sobre un material que sea robusto, y que contenga todos los detalles que quisiéramos replicar. Luego se transfiere el motivo hacia la superficie sobre la que se lo quiere depositar, utilizando un material más blando. Una de las ventajas de este proceso es que un único molde puede servir para imprimir varias copias de un mismo dibujo.

La litografía óptica consiste en utilizar una máscara (de metal, o de plástico) sobre la cual se ha perforado un cierto motivo, de manera que al hacerle incidir luz y proyectarse su sombra, se pueda ver una réplica del motivo en zonas claras y oscuras. Si focalizamos ese motivo claroscuro sobre una resina fotosensible podremos revelar una estructura tridimensional asociada a los detalles de la máscara original. Siguiendo este tipo de estrategias con niveles de sofisticación incrementalmente extraordinarios es que se ha desarrollado la microelectrónica sobre la que se sustenta la capacidad de cómputo actual. La miniaturización de dispositivos electrónicos es una profecía autocumplida de la tecnología en el sistema de vida actual. Cada dos años se duplica la densidad de dispositivos en un procesador computacional, aumentando su velocidad y rendimiento.

¿Es esto bueno o malo? Paradójicamente, la litografía nos plantea un nuevo claroscuro.

Esta pregunta amerita un trato especial, y no tiene respuesta unívoca. En mis travesías busqué quedarme del lado del quehacer científico aplicado para la paz, progreso y bienestar de los humanos y (sería políticamente correcto en la actualidad incluir) también de los no-humanos. Pero, es innegable que los avances científicos son utilizados con muy diferentes visiones y poderes.

Así, la ciencia no deja de ser también un laboratorio para

la guerra, directa o indirectamente. *A*l igual que los cuidados que nos imponemos colectivamente cuando caminamos por un bosque, es parte de nuestra responsabilidad velar por el buen uso de los desarrollos tecnológicos. Como es bien sabido en el mundo de las películas: «todo gran poder conlleva una gran responsabilidad» y uno «debería tener bien en claro sus prioridades». En todo caso, el uso de técnicas litográficas ha permitido la miniaturización de dispositivos hasta escalas nanométricas, y su producción masiva. Entonces, se abren dos instancias de elaboración:

¿Tiene una ventaja intrínseca el reducir el tamaño de los componentes?

¿Su fabricación en serie implica necesariamente *fomentar el consumismo?*

Desde el punto de vista estrictamente científico, el forzar los límites de la miniaturización hasta lo más profundo forma parte de la búsqueda de conocimiento, lo cual torna válida la iniciativa. La disminución del tamaño suele redundar en aplicaciones menos demandantes de energía. Entonces, desde ese punto de vista, toda miniaturización sería beneficiosa.

Respecto de la producción masiva, los considerandos abandonan el ámbito de la ciencia inmaculada. ¿Es el consumismo una manera de promover el bienestar general? Caminando por el mundo ideal de la ciencia encontramos que hay atajos que conducen directamente hacia los avances tecnológicos concretos. ¿Quién logra utilizar estos avances? ¿Con qué fin se utilizan? Los precipicios al borde del sendero abundan, mantenerse en la senda correcta no es siempre una tarea sencilla.

Una Sala Limpia para el nanoMundo

Volvamos al laboratorio. Si bien nuestros ensayos consisten en el estudio de los mecanismos subyacentes en un dispositivo electrónico, en el contexto de la investigación básica con intenciones de ser aplicable uno trabaja con la idea de tener prototipos que puedan demostrar su aplicabilidad en lo cotidiano, o en ciertos usos «de nicho», o en la formulación de una patente de protección.

La memoria electro-resistiva utilizando óxidos se posicionó como uno de los potenciales contendientes en el

mercado de las memorias no volátiles. Nuestro entusiasmo iba en aumento día a día de la mano de los avances tecnológicos con memristores que se reportaban en aquellos días.

En la medida en que todo prototipo es fabricado pensando en ulteriores etapas de compatibilidad con la producción industrial de dispositivos electrónicos, entré al mundo de la miniaturización de la mano del fenómeno de la memoria electro-resistiva permanente. Como Gulliver en el país de los liliputenses, yo me maravillaba al conocer cada nueva herramienta del nanoMundo. Aprendí que es posible fabricar resortes, voladizos y túneles micrométricos y nanométricos, los que a su vez pueden ser usados para explorar con mayor profundidad y detalle el nanoMundo.

La estrategia de imprimir una cierta estructura utilizando diferentes películas en capas y con motivos que se entrelazan en las tres dimensiones es conocida como «de arriba hacia abajo» (a partir del «Top Down» en inglés). La idea subyacente es encarar procesos de fabricación usando herramientas «humanas» desde la escala de los milímetros, estableciendo un control hacia las profundidades sub-micrométricas.

La estrategia en sentido inverso consiste en mezclar los componentes adecuados en las proporciones adecuadas y de manera adecuada, dejando que la naturaleza actúe. En este caso, se produce un «autoensamblaje» de los átomos o moléculas, los que crecen hacia los micrones o milímetros en su camino «desde abajo hacia arriba» («Bottom Up» en inglés).

En la fig. 16 se presenta un diseño simple de memristores ordenados en que la fabricación sigue la tónica «de arriba hacia abajo» utilizando litografía óptica en varias etapas. Una delgada línea de oro entrecruza varias «barras» anchas de oro. Entremedio de ellas se crece una capa del óxido TiO_2, formando memristores en las varias junturas, los que pueden ser operados de manera independiente.

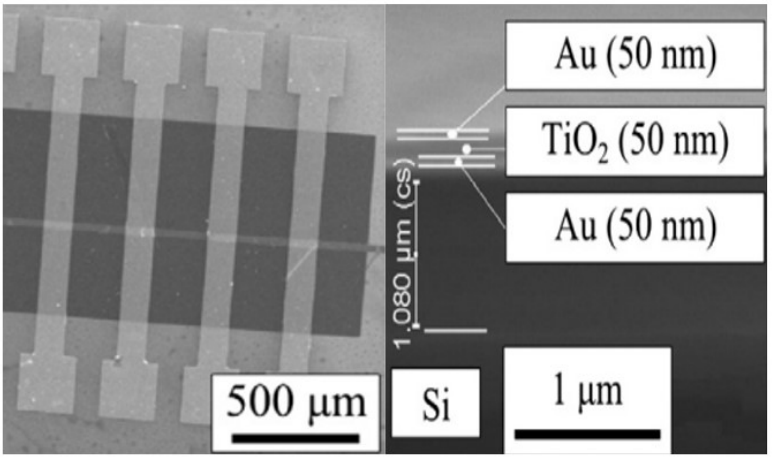


Figura 16. Panel izquierdo: vista superior de un arreglo de memristores: en diferentes tonos de gris se pueden observar 4 electrodos inferiores de oro, la capa de TiO2 (gris oscuro) y la línea superior de oro (gris claro). La imagen fue obtenida utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. Panel derecho: corte transversal del apilamiento de las capas de oro / TiO_2 / oro con sus respectivos espesores. Notar la diferencia de escalas entre paneles. Esta juntura metal / óxido / metal se ha crecido en un sustrato de SiO_2 el que a su vez está crecido sobre silicio. Si bien la tecnología utilizada para fabricar estos dispositivos tiene más de 50 años su utilidad en laboratorios de investigación no pierde vigencia. Y es la misma tecnología usada en la producción de micro-electrónica masiva.

El aire que respiramos en general está lleno de partículas, ¿lo sabías...? La composición y tamaño dependerá del entorno específico, y puede haber partículas naturales o artificiales cuyo tamaño varía entre 1 nanómetro y 100 micrones. Más allá del riesgo que pueden generar para la salud, imaginemos que por esas casualidades del destino una partícula de 10 micrones de diámetro que estaba flotando en el aire cae en la posición de cruce de las barras de oro de la fig. 16: ¡el dispositivo quedará arruinado completamente...!

Para evitar este tipo de percances, todo trabajo vinculado a las dimensiones micro y nanométricas debe realizarse en una Sala Limpia. Allí las condiciones del ambiente es-

tán fijas durante las 24 horas de todos los días del año, y la totalidad del aire es filtrado para evitar la presencia de partículas mayores a un cierto tamaño. Por sobrepresión interna se logra que no ingrese polvo externo. La vestimenta necesaria al ingresar a una Sala Limpia debe seguir una cierta normativa, y dependiendo del máximo valor de tamaño de partícula que se acepte, los requerimientos pueden ser más y más extremos. Y, obviamente, son más y más costosos.

Como siempre puede haber ingreso de suciedad, anidar salas es una estrategia que permite guardar los tesoros más limpios con seguridad extrema. Por ejemplo, las muestras más delicadas o los originales de las máscaras con las que se realizan procesos ulteriores de litografía deben conservarse en el ambiente más limpio y controlado en vistas a reutilizarse.

Otras propiedades y otros materiales

Un memristor es una resistencia eléctrica cuyo valor puede ser definido con estímulos eléctricos. Su existencia fue propuesta en los años ´70. Si bien este comportamiento siempre estuvo presente –a veces enmascarado- en varios dispositivos, su presentación formal en sociedad se produjo hace relativamente poco tiempo. Una de sus características es el cambio gradual de la resistencia a medida que se acumulan estímulos iguales. Esta propiedad es inherente a su mecanismo de transporte eléctrico, y tiene semejanzas con el comportamiento observado en las sinapsis biológicas. La «plasticidad» en la respuesta dependiendo del intervalo de tiempo de arribo entre dos estímulos consecutivos, y la sensibilidad a estímulos por debajo del valor umbral de conmutación (excitación sub-umbral) también tiene similitudes con comportamientos biológicos. Este tipo de semejanzas no parecen coincidencias, y permiten aprender de uno y otro mundo.

Durante los experimentos, algunas veces los memristores quedaban inutilizados por efecto de los estímulos aplicados. Aprendimos que, bajo ciertas condiciones, era posible «repararlos» aplicando un estímulo de la polaridad opuesta o de una intensidad mayor a la ensayada hasta ese momento. ¿Será posible encontrar la manera

de que las sinapsis biológicas dañadas puedan ser regeneradas?

Inicialmente utilizamos manganitas para fabricar memristores. A medida que empezamos a entender sus mecanismos, comenzamos a explorar otros materiales. Inicialmente eran parientes cercanos. Luego nos animamos a explorar otras familias de materiales. Cada dispositivo tiene sus mecanismos particulares de transporte eléctrico; entender la fenomenología subyacente permite encarar nuevos diseños y explorar nuevos comportamientos.

Mi encuentro con la Sinapsis Artificial

La estrategia para el desarrollo de algunos dispositivos artificiales es la mímica de comportamientos o mecanismos biológicos. Una pala liviana como la que llevo durante mi travesía es un buen ejemplo de la inspiración de un objeto artificial en una de las funciones de las manos. También son buenos ejemplos los recubrimientos hidrofóbicos y auto-limpiantes que se basan en procesos similares a los que se desarrollan en la superficie de las plantas (ver fig. 17). Claramente, la emulación de sistemas biológicos es una de las maneras en que la humanidad intenta aprender de la naturaleza en una suerte de «ingeniería inversa».

Figura 17. Los recubrimientos hidrofóbicos presentes en la naturaleza son una inspiración para las estrategias de fabricación de superficies con funcionalidades novedosas. En la foto se puede observar que la textura de la hoja de una planta de tulipán rechaza el agua, determinando la formación de gotas que resbalan por su superficie. He aquí otro ejemplo de mecanismos nanoscópicos que se manifiestan en escalas humanas.

Es notable que lo contrario también resulte válido: aprender de sistemas artificiales puede dar claves para comprender mecanismos propios de la naturaleza. Por ejemplo los desarrollos fluidodinámicos de aviones y barcos han permitido entender funcionalidades de aves y peces. Ambas estrategias han mostrado ser prolíficas. En particular las técnicas informáticas inspiradas en el comportamiento del cerebro se están desarrollando a pasos agigantados. Esta táctica se encara tanto utilizando códigos de programación (*software* en inglés) como instrumentos y dispositivos electrónicos (*hardware*). En ambos casos, la tecnología electrónica planar basada en silicio es la fuerza motora de este desarrollo. Uno de los motivos por los que no estamos actualmente en la Edad de los Metales sino en la Edad de los Semiconductores y más precisamente en la Era del Silicio es debido a que los dispositivos de estado sólido desde 1947 –año de la presentación del concepto de transistor- han proliferado en forma notable. Para dar una idea, en 2022 un procesador moderno tiene 16 mil millones de transistores y está construido (de manera estandarizada y masiva) utilizando procesos que controlan tamaños en la escala de las decenas de nanómetros.

Sin embargo, se anticipa un límite para las prestaciones de esta tecnología, y actualmente se está a la búsqueda de nuevos materiales, diseños y estrategias que puedan soportar el ritmo de demanda de velocidad de procesamiento y de almacenamiento de datos sin sobrecargar el consumo energético. El hecho de que los memristores tengan múltiples valores de resistencia accesibles por estímulos eléctricos motivó una nueva aplicación que, al igual que la memoria, también está inspirada en la biología.

La sinapsis biológica es el punto de encuentro de dos

neuronas: cada una de ellas envía información a la otra; producto de este proceso su «vínculo» puede aumentar o disminuir. Se cree que el «peso sináptico» –que es una medida del valor de ese vínculo- es el objeto que codifica los procesos vitales de entendimiento, aprendizaje y reconocimiento que vuelven al cerebro uno de los órganos más intrigantes de la naturaleza. Dicho de otra manera, los procesos de aprendizaje son una consecuencia de los cambios en el peso sináptico.

Cada neurona envía estímulos eléctricos (pulsos) de amplitud constante por sus terminales (axones) los que son recibidos por las neuronas vecinas vía la sinapsis, las que a su vez podrán emitir nuevos pulsos. La neurona pre–sináptica determina que la post–sináptica dispare estímulos cuando el peso sináptico alcanza un cierto valor umbral. Un memristor funciona como un emulador de la sinapsis: en la medida en que reciba más y más pulsos eléctricos como estímulo, se produce una acumulación del efecto. Así, un memristor aumenta o disminuye su valor de resistencia eléctrica de manera semejante a los cambios que se producen en el peso sináptico.

Si bien este tipo de comportamiento ya había sido emulado utilizando un conjunto de dispositivos electrónicos tradicionales (resistencias, transistores, capacitores, fuentes de alimentación) el hecho de que el memristor sea un dispositivo pasivo (es decir, que no requiere alimentación para su funcionamiento), veloz y altamente miniaturizable hizo que la comunidad temática se volcara de manera masiva a intentar utilizar este nuevo «chiche» para realizar actividades complejas, las que -en última instancia- apuntan a emular un cerebro biológico.

La plasticidad (capacidad de cambio sin rotura) es la característica principal de los memristores, y está codificada en los mecanismos de conducción eléctrica. ¡A la posibilidad de alterar controladamente su estado se suma el hecho de que el memristor tiene la propiedad adicional de memoria no volátil!

Sinapsis artificial: el emulador también aprende

En este contexto, realicé experimentos con una sinapsis artificial (memristor) a la que se le inyectan dos estímulos independientes emulando la llegada de pulsos eléctricos

pre-sinápticos. Estos experimentos fueron hechos con la intención de reproducir procesos complejos, como la memoria asociativa. El famoso experimento de Pavlov (un perro «aprende» a relacionar el hecho de que se lo alimente con una campana que suena) implica un entrenamiento de la sinapsis, luego de lo cual se evalúa si el sistema posee aprendizaje asociativo: un estímulo que inicialmente no provoca reacción puede ser «entrenado» para que la provoque. ¡Guau!

Otro tipo de experiencias apuntan a estudiar la respuesta del sistema dependiendo de la diferencia entre los tiempos de llegada de los estímulos. ¡Sucede que la respuesta de la sinapsis artificial es muy parecida a su inspiradora biológica!

Otras inspiraciones biológicas

¿Qué sucede cuando nos golpeamos? Como sistemas biológicos, nosotros mismos detectamos el dolor, siempre y cuando éste supere un umbral. En nuestra caminata nos pasa innumerables veces: el sutil roce de una rama contra nuestras piernas o el posarse de un pequeño insecto sobre nuestra piel puede no ser reconocido como un peligro, ni siquiera como una presencia. Sin embargo, superado un umbral, una rama nos puede generar una herida y un insecto puede generarnos una reacción alérgica.

Los impulsos eléctricos que hacen cambiar la resistencia de un memristor también tienen un valor por debajo del cual no reaccionan. Los estímulos muy chicos no son detectados, y los muy grandes pueden saturar o dañar al dispositivo. En general existe un cierto valor umbral bien definido por encima del cual un memristor altera su valor, y funciona predeciblemente dentro de una ventana de trabajo.

Los memristores comparten con los nociceptores (así se llaman los sensores biológicos del dolor) varias características: la existencia de un umbral para que se produzca un cambio detectable en la resistencia (umbral de dolor) y la existencia de un período de relajación durante el cual el memristor no reacciona a nuevos estímulos (saturación del dolor). Adicionalmente los memristores y los nociceptores poseen alodinia (dolor producido por estímulos

que normalmente no son dolorosos) e hiperalgesia (percepción intensificada de dolor) luego de haber recibido estímulos muy intensos.

Un sensor háptico es un emulador de las propiedades de la piel. Hay interés actual en desarrollar sensores que miden constantemente los movimientos y la deformación de la piel desencadenando una respuesta táctil en tiempo real: se obtiene una piel artificial completamente suave con sensores y actuadores integrados. Agregando cámaras y micrófonos miniaturizados uno podría pensar en un prototipo de sistema artificial con varias características inspiradas en la respuesta de los sistemas biológicos.

Realizar experimentos de emulación de propiedades biológicas es un desafío científico: implica entender lo maravilloso de los sistemas naturales y poder realizar acciones comparables utilizando las tecnologías más avanzadas. Pensando en estos desafíos mis recuerdos se escapan hacia un póster de Mafalda en que predicaba con ironía: «lo importante es saber tomar lo artificial con naturalidad».

Redes de neuronas artificiales: emulando con códigos

Los seres humanos han construido históricamente aparatos y maquinarias que los ayudan a trabajar, a calcular y... ¡a pensar! También los han ayudado a explotar y matar a otros seres (humanos y «no humanos») y a la misma naturaleza, pero eso es otra historia.

De las marcas hechas con el dedo sobre la tierra pasamos al ábaco, a la calculadora mecánica, a la calculadora electrónica, a los procesadores. Hoy estamos acostumbrados al procesamiento de imágenes y videos en «tiempo real». Estas tareas demandan una altísima habilidad de cálculo y una tremenda cantidad de recursos, los que se instrumentan en procesadores que evolucionan día a día, aumentando su velocidad y su consumo energético.

Resulta sorprendente que el cerebro humano -para realizar procesos semejantes- consume mucho menos tiempo y potencia que sus emuladores electrónicos. Este contraste parece indicar la necesidad de buscar inspiración en el cerebro y sus características sobresalientes para sortear las limitaciones planteadas.

El cerebro tiene la capacidad de organizar sus unida-

des constitutivas (las neuronas) de manera de realizar el procesamiento de información muy eficientemente. La idea de desarrollar procedimientos o dispositivos con comportamiento similar de procesamiento (en adelante, capacidades neuromórficas), siempre resultó muy tentadora. El modelo matemático-computacional de redes neuronales artificiales ha sido una de las primeras iniciativas en esa dirección, utilizando la plasticidad y la interconexión entre nodos como elemento vinculante entre ambos mundos.

Las aplicaciones del Aprendizaje Automático basadas en redes neuronales se expanden día a día, principalmente implementadas en códigos de procesamiento, pero también en soporte físico. Una y otra aproximación depende *totalmente* de la manufactura del silicio, preponderantemente usando dispositivos de la tecnología metal–óxido–semiconductor complementaria (CMOS del inglés).

De la mano de la computación neuromórfica, el reconocimiento de imágenes y la toma de decisiones en base a todos los antecedentes disponibles están dando un cariz propio a nuestro modo de vivir. En la medida en que aumentan los requerimientos para el manejo de altas cantidades de datos -tanto por consumo energético como por volumen físico- el crecimiento de la capacidad de procesamiento visualiza su techo. El uso de nuevos materiales para dispositivos -en general- y los memristores -en particular- ha tomado el centro de la escena desde hace una década.

Un paso más allá: emulando con dispositivos

Las dimensiones de una neurona son de entre 1 y 100 micrones si se contabilizan sus larguísimos axones. La región en que se produce el encuentro entre las terminales de dos neuronas (sinapsis) ocupa un volumen de alrededor de 1 micrón x 1 micrón x 1 micrón. Allí es donde la magia sucede: la plasticidad de las sinapsis permite aumentar o disminuir el «peso sináptico» (la propiedad que determina el aprendizaje) dependiendo de la llegada de pulsos eléctricos.

Cada cerebro humano posee 1E+11 neuronas y cada una de ellas posee 1E+3 axones, dando lugar a la sorprendente presencia de 1E+14 sinapsis en un cerebro, al menos antes

de que se comiencen a destruir. El desafío actual de la comunidad tecnológica abocada a la inteligencia artificial es emular un sistema de muchas sinapsis que se materialice en un prototipo tangible (soporte físico) y no en software.

Una estrategia para intentar acercarse a ese objetivo es la táctica ingenieril u ordenada: fabricar sistemas con un entramado de filas y columnas conteniendo un memristor en cada intersección, de manera que cada uno sea accesible eléctricamente por medio de dos terminales eléctricas. Una vez que hemos aprendido a fabricar un memristor, el desafío consiste en fabricar redes de 2 x 2, 3 x 3,...100 x 100 memristores. Esta tecnología está actualmente en etapa experimental (ya que los materiales de los memristores son forasteros en las fábricas de dispositivos masivos) mostrando excelentes y sorprendentes resultados vinculados a la memoria del conjunto, capacidad de aprendizaje, reconocimiento, etc. Utilizando la firmemente establecida tecnología CMOS junto con otros dispositivos electrónicos ya afianzados en las cadenas de producción, recientemente se han lanzado al mercado circuitos integrados con capacidades neuromórficas basados en silicio. Se espera una nueva revolución cuando los «nuevos materiales» tomen la posta de esta transformación tecnológica.

La estrategia alternativa es crecer al sistema desde abajo hacia arriba, fabricando montones de memristores en configuraciones que -muy probablemente- resultarán menos ordenadas que las mostradas en la fig. 16. En caso de poder fabricar dicho ensamble, es interesante notar que no se tendrá la posibilidad de acceder al estado individual de cada uno de los emuladores de sinapsis, lo cual nos vuelve a recordar a una característica del cerebro.

Desde el punto de vista experimental el desafío está centrado en la microfabricación de una enorme cantidad de memristores interconectados. En una juntura formada por un metal y un óxido, dependiendo de los materiales utilizados, es posible fabricar un memristor. Una de las maneras miniaturizadas de establecer esta unión es usando objetos del nanoMundo: por ejemplo, poniendo en contacto dos nano-hilos metálicos recubiertos por óxido. Si podemos fabricar arreglos de muchos nano–hilos recubiertos conectados entre sí tendremos una red de

memristores y por lo tanto.... ¡muchos emuladores de sinapsis conectados entre sí! Un sistema de este tipo constituye una red neuronal en *hardware*.

Notemos que esta estrategia contiene dos puentes de entrada al nanoMundo, y que ambas se producen desde abajo hacia arriba:

I.- Nano–hilos individuales: son objetos longitudinales cuyas dimensiones transversales están en la escala nanométrica mientras que su largo está en el rango de los micrones. La relación de aspecto (longitud / diámetro) es alta y recuerda a palitos o cañas. En este recorrido ya nos encontramos con una manera de construirlos, siguiendo un procedimiento «físico» que consiste en rellenar diminutos filtros plásticos con un metal. Los químicos conocen maneras alternativas para fabricar nano–hilos. Ellos pueden lograr que el crecimiento a lo largo de una dirección cristalina sea favorecido a expensas del crecimiento en las otras direcciones, dando lugar a las pequeñas espadas metálicas del nanoMundo. Estas agujas pueden tener un recubrimiento no buscado debido a residuos superficiales del método de síntesis, o ser tratados especialmente para generar un depósito particular. En ambos casos, la imagen se asemejará a la de un «cubanito» con mayor o menor cantidad de dulce de leche.

II.- Redes de nano–hilos: es un entrelazado de estos objetos cuasi–unidimensionales que se superponen parcialmente y se tocan dando lugar a un circuito eléctrico con nodos y ramas. En la fig. 18 es posible ver (panel izquierdo) la costa de un lago en la que se depositan montones de cañas colihue flotantes en contacto parcial entre ellas. Esta imagen de escala humana recuerda lo que se presenta en el panel derecho: una dispersión de nano–hilos autoensamblada de dimensiones micrométricas. Para obtener este entramado, los nano–hilos en solución son dispersados en una superficie; al producirse la evaporación del solvente se obtiene el autoensamblado mostrado. La densidad del recubrimiento de la superficie puede ser controlada determinando el nivel de aislamiento de los nano-hilos entre sí.

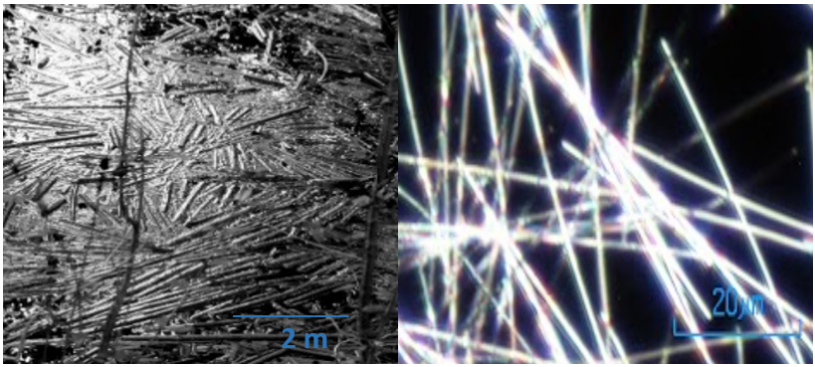


Figura 18. Panel izquierdo: cañas flotando en un lago. Nótese que se encuentran desordenadas y con entrecruzamientos entre ellas. La escala corresponde a 2 m. El cociente entre la longitud y el diámetro de las cañas (relación de aspecto) es del orden de [2 m / 1 cm] = 200. Panel derecho: dispersión de nanohilos de plata en un sustrato de vidrio. La escala corresponde a 20 micrones. La relación de aspecto de los nanohilos es de [70 micrones / 250 nm] = 280. Nótese que la relación entre las escalas de ambos paneles es de un factor 1E+5 y aun así presentan cierta similitud.

Existe un valor crítico de recubrimiento del sustrato que determina el contacto de nano–hilos vecinos de manera continua: por encima de ese valor, una hormiga que se encuentra al borde del lago podría llegar a la otra orilla caminando siempre por encima de las cañas. La percolación es un fenómeno que puede ser estudiado usando el formalismo con que se describe un gran grupo de transiciones de fase. Para un cierto valor de un parámetro crítico se delimitan comportamientos muy diferentes: en el caso de la superconductividad, el valor de la temperatura de transición T_c es el que permite separar dos estados con conducción eléctrica totalmente diferente. En el caso de la percolación, este parámetro es la fracción de recubrimiento: un sistema percola o no percola dependiendo de ese valor.

Una manera de medir experimentalmente la percolación de nano–hilos como los presentados en la fig. 18 es utilizar los portadores de carga como sondas. Si se aplica una diferencia de potencial entre los extremos de la muestra la conducción eléctrica se produce atravesando

los nano–hilos metálicos de manera más o menos tortuosa, siguiendo caminos que a veces están en serie y otras veces en paralelo. La percolación eléctrica se produce con la conexión entre un extremo y otro, siguiendo siempre un camino de conductores metálicos.

En el caso de nano–hilos con recubrimientos, la corriente eléctrica va atravesando las junturas en cada punto de contacto. Dependiendo de los materiales utilizados, estas junturas pueden comportarse como memristores. Cuando son estimuladas con pulsos eléctricos estas redes desordenadas de memristores tienen algunas similitudes con las redes de sinapsis presentes en el cerebro, dando lugar a propiedades emergentes que no son a priori esperadas, y que permiten realizar modelos para contrastar los dos mundos.

La manera en que las propiedades de cada estado se comportan al acercarse a la transición de fase puede ser descripta por la tasa de cambio del fenómeno en las cercanías del cambio. Una característica común a estas transiciones es que la correlación entre los componentes del sistema crece desmesuradamente en la aproximación. Se observan cambios en la dinámica y se producen fluctuaciones que anticipan el cambio por producirse. Los indicios de cambios en propiedades de materiales se desarrollan en el nanoMundo; al controlar el tamaño de la muestra bajo estudio se puede definir el radio de acción de los mecanismos actuantes, lo cual a su vez permite aprender sobre sus características.

La universalidad de este tipo de descripción es conocida como teoría de fenómenos críticos: abarca desde transiciones magnéticas hasta la percolación del fuego en un incendio, desde la transición superconductora hasta la formación de grietas en una salina, o una transición líquido - vapor. Encontrar elementos comunes a lo largo de una travesía me ha resultado inspirador (ver fig. 19), porque pondera las novedades del recorrido y permite entender alguno de sus intrincados aspectos de las correlaciones microscópicas.

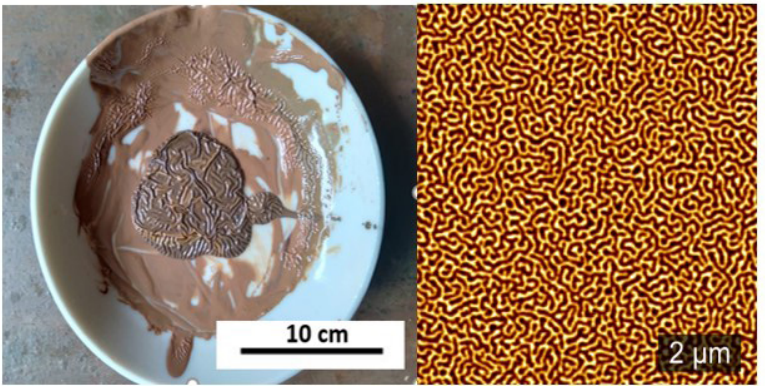


Figura 19. Panel izquierdo: foto de la paleta de un pintor olvidadizo. Sobre la pintura depositada en un plato se forman exuberantes dominios y grietas. Panel derecho: dominios magnéticos observados por técnicas de magneto - óptica. La tonalidad clara y la oscura indican orientaciones opuestas de la magnetización: las interacciones atómicas determinan la coherencia en la alineación dentro de regiones bien delimitadas. Las intrincadas formas de ambos paneles tienen similitud morfológica. Notar la diferencia de escalas entre los dos paneles. Los patrones regulares revelan que las interacciones que se dirimen en el nanoMundo pueden dar lugar a ordenamientos en la escala macroscópica.

¿Qué sucede en una red autoensamblada de memristores formadas por junturas entre nano-hilos cuando los pulsos externos hacen conmutar los valores de cada resistencia, y se establece conducción eléctrica entre dos zonas alejadas? ¿Habrá alguna semejanza con la frase vulgar: ¡se me prendió la lamparita!...?

Los medios hostiles

Durante alguna de las caminatas, mientras estaba saltando vados, metiendo los pies en pantanosos mallines y cruzando riachos, me enteré de la historia de alguien que no pudo evitar que su teléfono celular cayera al agua. ¿Funcionó ese teléfono después de secarlo?

En condiciones habituales sabemos que podemos confiar en las prestaciones de los dispositivos electrónicos tradicionales. Pero durante una travesía, cuando el am-

biente puede ser un poco más hostil, no tenemos en claro si seguirán funcionando luego de un percance inesperado.

¿Acercarías tu teléfono celular al calor de las brasas, o lo dejarías afuera de la carpa en una noche de frío y nieve? Ya de regreso al hogar, ¿meterías tu teléfono en el horno a microondas? Aún sin ser especialistas sabemos la respuesta, y en todo caso no haríamos el ensayo con nuestras propias fotos y contactos. Y menos en una situación en que dependemos de esa herramienta como la única en caso de un imprevisto. Todos los dispositivos electrónicos tienen sus limitaciones.

Tolerancia a la irradiación

Además del fuego, el agua o las ondas electromagnéticas, la naturaleza tiene otras varias fuentes de peligro para los dispositivos. En el espacio exterior -en donde ya no hay atmósfera terrestre- hay una cantidad importante de agentes que pueden degradar o arruinar a las memorias electrónicas. Uno de ellos es la incidencia de partículas energéticas que provienen del espacio exterior. Hay también varios otros entornos más cercanos en los cuales los dispositivos electrónicos están sujetos a condiciones extremas: pozos petroleros, reactores nucleares, equipos de medicina nuclear, plataformas submarinas, oleoductos en desiertos, laboratorios antárticos...

La tecnología actual de memorias no volátiles codifica la información en base al confinamiento de cargas eléctricas en regiones nanoscópicas: se acumulan en un pequeño volumen. Un *bit* de información consiste en la presencia o ausencia de cargas. Cualquier inestabilidad –como la incidencia de una partícula cargada– puede destruir ese estado, perdiéndose la información. El apantallamiento del sistema y la redundancia de la información guardada son estrategias válidas y comúnmente utilizadas. Sin embargo, la solución más robusta consiste en codificar cada *bit* de una manera extremadamente segura. Los memristores tienen definida su resistencia eléctrica por configuraciones estables de iones, lo cual hace que la incidencia de partículas cargadas en bajas dosis no altere sus propiedades.

Nuevamente había llegado el momento de enfrentar un material a partículas energéticas para observar los efectos de la irradiación sobre sus propiedades. En este caso, en vez de mejorar sus propiedades conductoras (caso del superconductor) o de usarlo como contenedor para fabricar un molde (caso del plástico) el objetivo era dañarlo para saber su tolerancia. Irradiamos nuestros prototipos de memoria no volátil con protones en el acelerador TandAr de manera de simular un entorno espacial. El monitoreo de la resistencia se hizo a distancia de la cámara de irradiación y controlando la dosis de iones provista por el acelerador, algo similar a lo hecho en las irradiaciones para amorfizar localmente los cristales superconductores o para atravesar los futuros coladores plásticos.

Cuando conocemos bien una herramienta podemos usarla para usos muy diferentes. Algo similar sucede en las travesías: para llevar poco peso debemos conocer todas las posibilidades de las herramientas y vestimenta que llevamos, de manera de elegir las mejores opciones y minimizar el peso sobre nuestras espaldas.

Memorias a cierta altura

Los satélites artificiales tienen sistemas de control electrónicos con todas las potencialidades de las computadoras que se usan en tierra... y algunas más. Por ejemplo, sus componentes deben ser capaces de resistir un despegue a bordo del cohete lanzador, deben ser inmunes a los cambios de temperatura, y ser tolerantes a la incidencia de radiación electromagnética y de partículas cargadas. Para mitigar la llegada de proyectiles desde el exterior (tanto partículas elementales como residuos estelares y meteoritos), los fabricantes de satélites utilizan carcasas que apantallan y protegen las partes vitales. Esta estrategia compite con una de las características indispensables en un satélite: minimizar el peso. Cuanto más robustos sean los dispositivos viajeros, menos protección deberán tener, disminuyendo la necesidad de protección (lo cual disminuye el costo de una misión).

La necesidad de preservar información abordo es vital: si en algún momento de la misión la computadora se llegara a «colgar» sería indispensable contar con cierta información crítica antes de reiniciar el sistema. Son pocos

datos, los mínimos posibles, pero deben estar definitivamente a resguardo de cualquier problema. Para poder sobreponerse a estas situaciones, hace falta tener esos pocos datos preservados de manera infalible y disponibles en todo momento. Para esos pocos datos se precisa mucha seguridad. Amerita guardarlos en memorias especiales.

El costo de un mismo componente electrónico con validación para uso en satélites puede costar entre 100 y 1000 veces más que su compañero terrestre. Por lo tanto, demostrar la tolerancia de un dispositivo a condiciones hostiles representa una funcionalidad adicional.

Los satélites geoestacionarios se encuentran a 3E+7 m de altura, pesan alrededor de 3E+3 kg y su característica principal es que orbitan a la misma velocidad que la Tierra de manera que -para nosotros- permanecen inmóviles en el cielo. A tan solo 5E+5 m de la Tierra (la mitad de la distancia entre Buenos Aires y Mendoza) orbitan los satélites chicos y pequeños. Estos tardan 90 minutos en dar la vuelta a la Tierra y pesan entre 1 y 50 kg. La industria satelital está atravesando una revolución a partir de que la fabricación de satélites de baja altura fue encarada por empresas y no solamente por países. La idea pedagógica de que un satélite completo pueda ser fabricado durante un cuatrimestre lectivo y la disponibilidad de sofisticados componentes electrónicos a bajo costo determinaron el cambio de época. Para el caso de satélites pequeños (del tamaño de una heladera o un lavarropas), los tiempos involucrados entre diseño y lanzamiento fueron disminuidos desde varios años hasta algunos pocos meses.

Como grupo de investigación básica ¿podríamos ensayar nuestras flamantes memorias en un satélite, fuera éste de tamaño diminuto, pequeño o grande? El solo hecho de que las muestras salieran del laboratorio y realizaran una travesía por una órbita terrestre ya era suficiente motivación. Además, ¿podríamos aprovechar el camino recorrido al ensayar los memristores usando el acelerador TandAr?

El proceso de embarcar nuestros diminutos memristores artesanales en un satélite comercial pequeño y de baja altura implicó construir la plataforma de medición y comunicaciones apropiada: debía conectar el mundo de los controladores electrónicos que comandan al saté-

lite con las regiones nanoscópicas plagadas de vacancias de oxígeno que determinan el estado de resistencia del memristor. A 500 km de altura y a una velocidad de 7 km / segundo, debíamos monitorear regiones de unas decenas de nanómetros. El desafío implicaba unir estos dos mundos sin provocar daños ni en el satélite ni en nuestra propia memoria no volátil.

La historia de esta travesía resultó fructífera: al día de hoy participamos en 9 misiones de la empresa Satellogic... ¡y en ninguna de ellas les generamos problemas...! Como producto de esta «aventura espacial» aprendimos sobre los memristores, sus propiedades en órbita y los detalles vinculados a su empaquetamiento para la travesía. También aprendimos a medirlos fuera del laboratorio, utilizando equipos fabricados por nuestro mismo grupo de trabajo.

Cambio de perspectiva

Así, la travesía que comenzó al estudiar materiales en el nanoMundo con muestras fabricadas de manera artesanal nos lleva a implementar el uso de dispositivos comerciales en órbitas terrestres de baja altura. Y el camino de los instrumentos de medición evolucionó de los costosos equipos comerciales a las plataformas versátiles fabricadas de manera artesanal en nuestro laboratorio.

A partir de esta experiencia nos propusimos ensayar otros componentes electrónicos que sirvieran para aplicaciones satelitales, particularmente una vinculada a detectores de radiación electromagnética y otra vinculada al calor. Detectar las más pequeñas porciones de luz desde un satélite es un desafío actual que podría permitir estudiar radiación proveniente de la superficie de la Tierra y también del espacio exterior. El otro desafío es aprovechar la energía de descarte del satélite para reutilizar a bordo.

En ambos casos utilizamos dispositivos comerciales de producción masiva. ¡Y al estar usando más tecnología necesitamos más ciencia básica! Queremos entender sobre los materiales que de manera eficiente permiten detectar partículas y transformar la información obtenida en luz para luego poder medirla con los detectores de radiación disponibles a bordo. Y precisamos aprender sobre ma-

teriales cuyas vibraciones no permitan transportar calor (ausencia de fonones) de manera de poder aprovechar su capacidad termoeléctrica como generadora de potencia eléctrica.

A modo de cierre

Queda en claro que mi paseo por el nanoMundo es solamente un comienzo de lo que podría ser una aventura hacia «más abajo», hacia el mundo de lo aún más pequeño. Este primer subsuelo que recorrí –explorando la escala de los micrómetros y nanómetros– es solamente la puerta de entrada hacia otros pisos inferiores. Allí habitan las más diversas partículas elementales, viven en un Mundo al que no me acerqué. Tampoco me aventuré por el mundo de las grandes distancias.

El metro representa la unidad de medida más cómoda para los sentidos del ser humano. La idea de que esta unidad no pudiera ser divisible indefinidamente resultó el puntapié para entrar al territorio explorado en este relato. Los sabios griegos pensaron sobre la existencia del átomo, y luego –bastantes siglos después y con ayuda de la más alta tecnología disponible en cada momento– se fueron encontrando pistas para «visualizarlos». La escala del nanoMundo está un poquito más arriba que la atómica. Tiene la particularidad de estar cerca de los micrones y a la vez, de no estar muy lejos de los átomos.

Entre lo indistinguiblemente pequeño y lo inalcanzablemente grande hay una planicie transitada por los humanos. Cuando empecé a estudiar Física me amedrentaba la idea de tener que responder toooodas las preguntas que alguien me planteara, que podían ser sobre lo enorme o sobre lo diminuto. Saber sobre «todo» era una tarea levemente ciclópea para un veinteañero. Acorralado, encontré una escapatoria a ese callejón sin salida admitiendo que podía decir «no sé» a las preguntas cuya respuesta no tuviera en claro. Eso me trajo una cierta paz de espíritu, dándome ánimos para terminar la licenciatura en Física, realizar un doctorado y convertirme en investigador.

Antes de estudiar Física, cursé durante tres años la carrera de Ingeniería Civil. Mi padre era ingeniero y aquel mundo me resultaba familiar. Por otro lado, tenía en cla-

ro que construir obras en un país necesitado de viviendas y comunicaciones era una manera concreta de aportar mi granito de arena. Sin embargo, una inquietud dentro de mí fue ganando lugar: sentía que si yo consagraba mi trabajo a construir edificios o puentes estaba dejando de explorar aspectos esenciales de la vida. Intuía que si me reorientaba hacia el estudio de «la materia», encontraría un sentido más profundo del que yo lograba encontrar en el cemento y las columnas. Y a la vez, si todo salía bien, podría contribuir al desarrollo científico y tecnológico de mi país

Desde ya que uno puede poner ingenio, creatividad y alegría en un proyecto edilicio o, inversamente, ser carente de imaginación y repetitivo en el estudio de la materia. En línea con lo que dijo Proust, hoy creo que lo que importa en estas aventuras no es tanto el camino sino los ojos del caminante. Aunque el nanoMundo está plagado de paisajes motivantes y hermosos. El desafío más importante sigue siendo –desde mi punto de vista– poder canalizar esas búsquedas hacia el bien común. Pero ese sería el tema de un próximo relato.

Agradecimientos

Al acercarse el final de una caminata, y si no hubo grandes inconvenientes, el estado de ánimo del caminante es –pese al cansancio acumulado que pueda estar llevando sobre sus pies y sus hombros– un estado de algarabía. Lo han acompañado no solamente las imágenes, olores, tactos y gustos que fue descubriendo a lo largo del paseo sino también los pensamientos e ideas compartidos con los compañeros de viaje. Hay montones de colegas con los que recorrí senderos y que me ayudaron en las caminatas. Me enseñaron a usar herramientas, me enseñaron a mirar con atención. Caminar solo puede ser revelador: nos puede ayudar a visualizar un interior que a veces desconocemos. Pero caminar en grupo nos conecta con otras sensibilidades y con otros saberes.

En diferentes momentos compartí travesías con Francisco Parisi, Carlos Acha, Victoria Bekeris, Griselda Polla, Gabriela Leyva, Gabriela Pasquini, Rodolfo Sánchez, Horacio Troiani, Daniel Vega, Rubén Weht, Pablo Stoliar, Majo Sánchez, Marcelo Rozenberg, Diego Rubi, Federico Golmar, Gabriel Sanca, Eduardo Martínez, Leticia Granja, Joaquín Sacanell, Mariano Quintero, Fernando Gómez Marlasca, Mariano Barella, Néstor Ghenzi, Cynhia Quinteros, Javier Curiale, Mercedes Linares Moreau, Juani Diaz Schneider, Hernán Bonadeo, Horacio Ceva, Quique Burgos, Mariana Weissman, Francisco de la Cruz, Hilda Lanza, Fabio Biscarini, Luis Hueso y Luigi Correra. Hay montones de colaboradores de «trechos cortos» que me resultaría difícil enumerar sin olvidar alguno. Y hay muchos otros caminantes que estuvieron, están y estarán muy presentes. ¡Queda en claro que les estoy inmensamente agradecido y que estoy orgulloso de haber podido compartir estos senderos!

LEVY, Pablo
Doctor en Ciencias Físicas (FCEyN, UBA). Investigador en CNEA y CONICET, profesor en UNSAM, focaliza sus tareas en Ciencia de Materiales y Física de Dispositivos.
Contacto: levy@cnea.gov.ar, plevygalperin@unsam.edu.ar

página en blanco a propósito

Nanotecnología
y Sociedad en Argentina

Volumen 2
Regiones del Conocimiento Tecnocientífico

2023

ISBN 978-631-00-1418-0

FUNDACION ARGENTINA DE
NANOTECNOLOGIA

unc
innovación
y vinculación