

# MATERIALES avanzados

Instituto de Investigaciones en Materiales ■ UNAM

Año 6 ■ Núm.11 ■ Agosto 2008

ISSN 1665-7071



**La alquimia, precursora de la química moderna ■ El diseño sustentable de los materiales constructivos ■ Sensores a base de polímeros  $\pi$ -conjugados ■ Óptica no lineal en materiales orgánicos y polímeros ■ Imágenes del interior de la materia ■ Premio 2007 a la mejor tesis doctoral en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales ■ Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz**

# Presentación

---

**MATERIALES avanZados** es una revista de divulgación cuya finalidad es difundir, entre investigadores y estudiantes de posgrado, las últimas noticias del mundo de los materiales. Los artículos se presentan en un lenguaje inteligible para aquellos que estamos acostumbrados a hablar y leer sobre la ciencia.

Con un texto sobre la alquimia, que une la sabiduría milenaria a los más modernos conceptos científicos, se abre este número de **MATERIALES avanZados**. Los conocimientos de Nancy Martín y sus colaboradores nos conducen por los vericuetos de tan fascinante disciplina, fundamento de la física y de la química actuales. En fundamento, a su vez, de la arquitectura y de la ingeniería, debería considerarse el diseño de los materiales constructivos, diseño que puede y debe ser sustentable según lo explica Silverio Hernández. Los dos artículos siguientes tratan sobre las propiedades y el uso de los polímeros, uno de los temas de más actualidad en la ciencia de los materiales. Por un lado, los polímeros podrían usarse como sensores y, por otro, los materiales poliméricos presentan características originales como la de ser no lineales en sus propiedades ópticas. Así lo exponen tanto Juan Manuel Reyna y Ernesto Rivera como Ana Laura Pérez-Martínez y Takeshi Ogawa.

Alfonso Huanosta inaugura una nueva sección de la revista, a saber, la exposición de los principios científicos de las técnicas de caracterización o de estudio de los materiales. En este caso se trata de la microscopia electrónica, tema esencial para la mayoría de nuestros estudiantes.

Con gran alegría festejamos esta vez dos premios, uno a la mejor tesis otorgado a Erika Bustos Bustos por su original trabajo: “Diseño, construcción y caracterización de superficies modificadas organizadamente con dendrímeros PAMAM y compuestos electro y foto-activos”, y el otro a Leticia Baños, que recibió el Premio Sor Juana.

En la sección de reseñas Enrique Lima nos recomienda el libro *La invención del color* sobre el color y los pigmentos.

# Instrucciones para los autores

**MATERIALES avanZados** es una revista de divulgación científica, cuyo propósito es mostrar y discutir los descubrimientos en el área de la investigación en materiales. Los artículos y las secciones recurrirán al lenguaje científico especializado, necesario para mantener el rigor del tema. El principal objetivo de la revista es el de difundir información sobre materiales entre lectores habituados a los temas de investigación.

La revista se publica en español, cada seis meses.

## Elaboración de los textos

Se consideran dos tipos de secciones:

a) Artículos cortos, de un máximo de 8,000 caracteres (contando espacios), que ocuparán cuatro páginas de la revista.

b) Artículos largos, con un máximo de 20,000 caracteres (contando espacios) que aparecerán en 10 páginas de la revista.

Siendo ésta una revista de divulgación científica, se recomienda que las fórmulas matemáticas o nomenclatura demasiado especializada se reduzcan al mínimo.

El texto del manuscrito en cuestión tendrá un título y el nombre de los autores con su filiación y dirección electrónica. Podrá contener, además, un resumen, una introducción, los subtítulos necesarios de acuerdo con el tema, las conclusiones y el número necesario de referencias bibliográficas.

## Entrega del texto

El texto se entregará en un archivo electrónico vía e-mail, en formato word sin sangrías ni tabuladores.

En el texto se especificará el lugar donde deberán incluirse las figuras.

La lista de los pies de figura se hará al final del texto.

Las figuras se incluirán en un archivo separado con resolución de 300 dpi.

Los textos se mandarán a la siguiente dirección electrónica:

[laz@servidor.unam.mx](mailto:laz@servidor.unam.mx)

El autor responsable de recibir la correspondencia se indicará con un asterisco. Las referencias se incluirán siguiendo el siguiente formato:

## Para revistas

- Inicial del nombre y apellido de los autores, "Título del artículo", *Nombre de la revista*, **VOLUMEN** (año), página inicial y final.

## Para libros

- Inicial del nombre y apellido de los autores, *Título del libro*, editorial, país o ciudad, año.

## Ilustraciones

Las fotografías e ilustraciones deberán incluirse en uno de los dos formatos siguientes:

- a) Originales en papel fotográfico.
- b) Digitales, con resolución de 300 dpi y en archivos eps o tiff.

## Información adicional:

Larissa Alexandrova  
Editora responsable de  
MATERIALES avanZados  
Instituto de Investigaciones en Mate-  
riales, Ciudad Universitaria,  
UNAM.

04510, México, D.F. México.

Tel. +52 (55) 5622 4582

[laz@servidor.unam.mx](mailto:laz@servidor.unam.mx)



Nuestra portada: Kiyoto Ota, 2002. *Nenneko*, hierro colado, 67 × 53 × 23 cm.



Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. José Narro Robles  
RECTOR

Dr. Sergio Alcocer Martínez  
SECRETARIO GENERAL

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz  
COORDINADOR DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA



Instituto de Investigaciones en Materiales

Luis Enrique Sansores Cuevas  
*Director del Instituto de Investigaciones en Materiales*

Larissa Alexandrova  
*Editora Responsable*

*Comité Editorial*  
Ana Martínez Vázquez  
Pedro Bosch Giral  
Roberto Escudero Derat  
Enrique Sansores Cuevas  
Juan Hernández Cordero

*Producción*  
Editorial Terracota, S.A. de C.V.  
Edición: Pilar Tapia  
Diseño: Jeanette Vázquez

*Materiales Avanzados* es una publicación semestral de 1,500 ejemplares editada por el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Circula de manera controlada y gratuita, mediante suscripciones autorizadas por el Comité Editorial, entre la comunidad científica nacional e internacional.

Los editores autorizan la reproducción de los artículos que se publican en *Materiales Avanzados* siempre y cuando se cite la fuente.

ISSN 1665-7071

Certificado de reserva de derechos al uso exclusivo del título Núm. 04-2003-041612533600-102. Certificado de Licitud de Título 12619 y Certificado de Licitud de Contenido 10191. Impresa en Editorial Color, S.A. de C.V. Naranjo 96-bis, Santa María la Ribera, 06400 México, D.F.

Agradecemos a la Galería de la Universidad Autónoma Metropolitana y a los artistas plásticos cuyas obras se reproducen en estas páginas su valiosa colaboración. Damos las gracias también a Julieta Aguinaco, Eugenia Benabib y Gilda Castillo por permitir la reproducción de sus obras.

Impreso en México

# MATERIALES avanzados

## Contenido

Presentación	1
Instrucciones para los autores	2
Noticias	4
La alquimia, precursora de la química moderna	9
Nancy Martín-Guaregua y Joaquín Pérez-Pariente	
El diseño sustentable de los materiales constructivos	17
Silverio Hernández Moreno	
Sensores a base de polímeros $\pi$ -conjugados	21
Juan Manuel Reyna González y Ernesto Rivera	
Óptica no lineal en materiales orgánicos y polímeros	27
Ana Laura Pérez-Martínez y Takeshi Ogawa	
Imágenes del interior de la materia	35
Alfonso Huanosta Tera	
Premio 2007 a la mejor tesis doctoral en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales	43
Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz	47
Enrique Sansones Cuevas	

# NOTICIAS

## Canales de protones en celdas de combustible

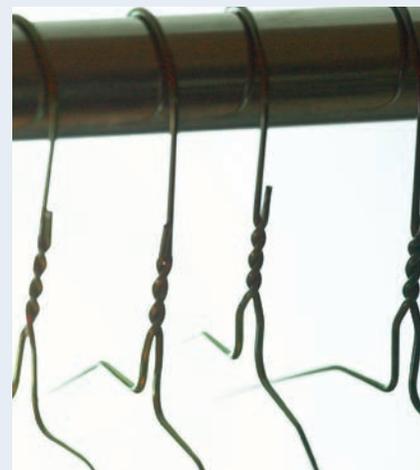
Las celdas de combustible basadas en membranas de polímeros electrolíticos (PEM) e hidrógeno son de las candidatas más prometedoras para utilizarse como fuentes de energía para automóviles. Hasta la fecha, las PEM con mejor desempeño en celdas de combustible de  $H_2/O_2$  se han hecho con nafi3n, un copolímero desarrollado durante la década de los sesenta. Recientemente, en la Universidad Estatal de Iowa, se presentó un modelo numérico que describe adecuadamente las curvas de dispersión de rayos X de este material y muestra de manera muy convincente que el nafi3n tiene una estructura tubular. El modelo considera además las excelentes propiedades de transporte del nafi3n hidratado, cosa que no era posible con las descripciones teóricas desarrolladas previamente. La estructura jerárquica de este copolímero no se entiende completamente, pero el nuevo



modelo tridimensional conjunta las características físicas del nafi3n y describe numéricamente los datos de dispersión de rayos X reportados en la literatura. El modelo utiliza argumentos de simetría para describir una estructura compuesta por un arreglo de nanocanales iónicos orientados embebidos en una matriz polimérica localmente alineada. A pesar de que el modelo tiene limitaciones, se espera que su empleo permita optimizar el desempeño del nafi3n para desarrollar celdas de combustible más eficientes. *Nature Materials*, enero 2008, Iowa State University.

## Deformaciones a escalas nanométricas

Los ganchos de alambre, utilizados comúnmente para colgar ropa, pueden cumplir su función gracias a las imperfecciones introducidas en el material cuando éste se dobla para formar el gancho. Sin embargo, utilizando microscopía electrónica (TEM) *in situ*, se ha demostrado que las estructuras metálicas a escalas pequeñas se vuelven más fuertes no cuando se añaden imperfecciones, sino al removerlas. A pesar de que hay evidencias experimentales convincentes de que las estructuras metálicas pequeñas son más fuertes, ha resultado difícil llevar a cabo observaciones directas de estos procesos mecánicos a escalas atómicas. Los experimentos descritos por los investigadores del Centro Nacional de Microscopía Electrónica, en el Laboratorio Lawrence Berkeley, permiten “observar” cómo se deforman los materiales a escalas nanométricas. La teoría que explica el incremento en la resistencia mecánica asociado con volúmenes pequeños de materiales metálicos está basada en la falta de dislocaciones cuando éstas se pierden durante su migración hacia la superficie del material. Esta teoría de “privación de dislocaciones” se ha observado de manera experimental mediante el uso de TEM *in situ* en pilares nanométricos. *Nature Materials*, febrero 2008, National Center for Electron Microscopy, Lawrence Berkeley National Laboratory.



## Arena pegajosa

Las propiedades mecánicas de la materia granular se modifican al agregar líquido, como lo hemos verificado todos los que hemos hecho esculturas de arena en la playa. Este cambio en las propiedades mecánicas de los materiales granulares es muy útil para varios procesos industriales, como evitar la segregación de granos o manipular la aglomeración de partículas. Gracias a la tensión superficial, el líquido en los intersticios del material se colecta cerca de los puntos de contacto entre los granos. La curvatura de la interfaz líquida genera una fuerza de atracción entre granos, lo que produce una cohesión que afecta las propiedades mecánicas estáticas del material. La explicación de estos fenómenos se ha observado recientemente mediante microtomografía de rayos X, lo cual ha permitido descubrir la morfología del líquido dentro de una pila de material granular. Esta técnica experimental podría aplicarse para estudiar flujos lentos de materiales granulares mojados y, en particular, para aclarar cómo influyen los diferentes tipos de fuerzas involucradas en este proceso. *Nature Materials*, marzo 2008.

## Electrónica orgánica

Desde las primeras demostraciones prácticas de sistemas electrónicos orgánicos se vislumbraron aplicaciones que

no se podían desarrollar con materiales convencionales. Un ejemplo son los displays flexibles, que puedan doblarse y guardarse en el bolsillo cuando no se utilizan. A pesar de que el desempeño electrónico de los materiales orgánicos ha mejorado, el éxito comercial sigue limitado por el elevado costo de fabricación de dispositivos basados en esta tecnología. Recientemente, sin embargo, se ha reportado una técnica de depósito de películas delgadas orgánicas que permite a las moléculas organizarse por sí mismas para formar arquitecturas complejas y con alta movilidad de portadores de carga en las zonas donde se requiera. Esta técnica no sólo permite mejorar las características eléctricas de dispositivos discretos, sino que abre el camino para desarrollar procesos de fabricación de circuitos lógicos digitales simples con materiales orgánicos. A pesar de que es difícil predecir la influencia que tendrá la tecnología electrónica orgánica, la simplificación en los procesos de fabricación de estructuras promoverá sin duda su producción industrial y posiblemente extenderá su rango de aplicaciones a sensores biológicos y sistemas de seguridad. *Nature Materials*, marzo 2008.

### Metamateriales superconductores

Gracias al desarrollo de metamateriales electromagnéticos se ha descubierto una nueva gama de fenómenos físicos. Estas estructuras artificiales tienen patrones de periodicidad con escalas mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz con la cual interactúan y se han usado, entre otras cosas, para obtener materiales con propiedades que no se encuentran en la naturaleza (por ejemplo, con índice de refracción negativo). Hace poco se demostró la fabricación de metamateriales superconductores, estructuras periódicas tridimensionales basadas en cubos de materiales superconductores. Estos nuevos materiales podrían llegar a controlar campos electromagnéticos de una manera más sofisticada. *Nature Materials*, abril 2008.

### Nanocrisales: casi siempre brillantes

Las propiedades fluorescentes de los nanocrisales coloidales han despertado el interés para aplicaciones relacionadas con la obtención de imágenes biológicas y el desarrollo de sistemas láser; sin embargo, hasta ahora todos los nanocrisales coloidales producidos en el laboratorio muestran intermitencia en la emisión de luz. Esta característica, conocida como parpadeo fotoluminiscente, se presenta incluso bajo condiciones de iluminación constante y ha sido la limitante principal para el uso de estos nanocrisales en las aplicaciones mencionadas. Recientemente se ha fabricado un nuevo tipo de nanocrisal de CdSe con una capa gruesa de CdS, que presenta periodos de “apagado” no mayores a 20 ms. Esta reducción en el periodo “oscuro” de la fotoluminiscencia disminuye el parpadeo a niveles aceptables para usos prácticos. Bajo condiciones normales, los pares electrón-hueco de un nanocrisal de CdSe se recombinan al ser excitados por fotones; esto a su vez genera la emisión de otro fotón y se presenta así la fotoluminiscencia. Al ser iluminados, los nanocrisales pueden adquirir carga eléctrica (es decir, se ionizan) y en estas condiciones los portadores generados inician un proceso no-radiativo conocido como recombinación de Au-



ger en la que no se emiten fotones. La recombinación de Auger es varios órdenes de magnitud más rápida que la recombinación radiativa y esto suprime por completo la fotoluminiscencia en nanocrisales cargados. A pesar de que los procesos de carga y neutralización de los nanocrisales todavía no están completamente entendidos, los últimos reportes demuestran que la barrera potencial gruesa formada por la capa de CdS alrededor del nanocrisal limita el escape de portadores de carga a la superficie, lo que disminuye el parpadeo. A pesar de estos resultados alentadores, la optimización de la fotoluminiscencia en los nanocrisales continúa siendo un tema de interés. El objetivo final es suprimir la recombinación de Auger, pues es la única forma de mantener estos “nanofocos” encendidos. *Nature Materials*, agosto de 2008.

### Aparatos a nanoescala con máquinas moleculares

Las máquinas moleculares y las nanoestructuras funcionales son campos que atraen a un amplio espectro de disciplinas científicas. Esto pudo constatarse en el simposio que sobre este tema se realizó durante la reunión de primavera de la MRS (2008 MRS Spring meeting).

Los trabajos presentados en el simposio mostraron que la brecha entre las máquinas moleculares artificiales y sus contrapartes biológicas es cada vez más pequeña. Se reportó el funcionamiento de un motor con rotores micrométricos impulsado por bacterias. Esto demuestra la posibilidad de utilizar la motilidad de las células vivas para mover ensamblajes micromecánicos artificiales. Otro aspecto interesante fue la demostración de la rotación de las moléculas en función de su estructura helicoidal (*chirality*); la activación del movimiento rotatorio se logra mediante excitación óptica y el sentido de giro depende de la longitud de onda del haz de luz. Según las predicciones, éste podría constituir el principio de las funciones mecánicas realizadas por pequeñas moléculas para desarrollar nanocontenedores con cargamento molecular, que podría usarse mediante excitación de luz o a través de procesos químicos. Adicionalmente, se presentaron avances en el empleo de ADN como bloque fundamental para construir nanomaquinaria. Dada su estructura complementaria, el ADN permite ensamblar de manera muy controlada estructuras complejas que pueden responder a estímulos externos. Todos estos avances hacen suponer que el desarrollo de estos aparatos a nanoescala para aplicaciones prácticas está cada vez más cerca. *Nature Materials*, junio de 2008.

### Memoria polimérica

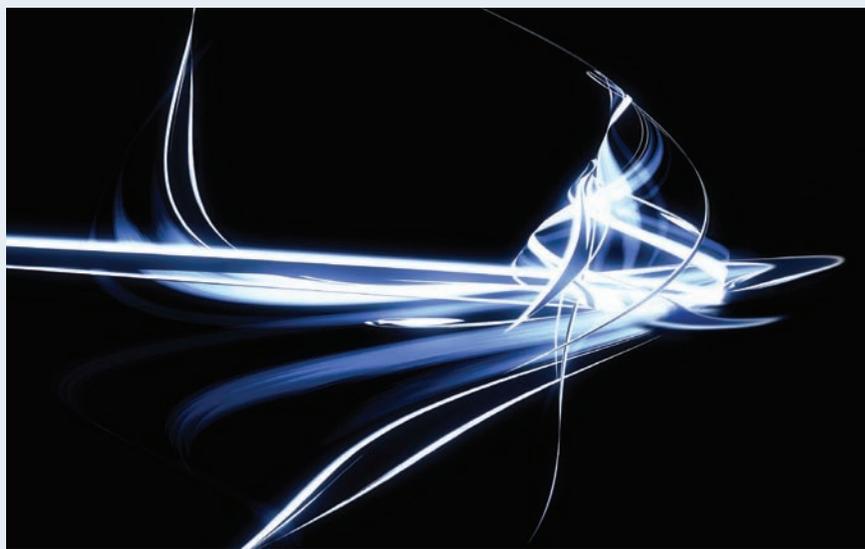
La combinación de polímeros ha mostrado gran potencial para desarrollar dispositivos de memoria compatibles con electrónica impresa de bajo costo. El concepto detrás de estos elementos de memoria es combinar dos polímeros que realizan distintas funciones: uno ferroeléctrico, que proporciona el estado binario para retener datos, y otro semiconductor, que provee los medios para evaluar el estado mediante una señal eléctrica. Cualitativamente, la respuesta eléctrica de esta celda de memoria es ideal para ser el elemento de arreglos de memoria cruzados (arreglos de lí-



neas cruzadas que forman una malla de renglones y columnas). La mezcla polimérica se unta como una película continua entre dos arreglos de electrodos y cualquier celda puede dirigirse mediante la aplicación de un voltaje en las líneas y columnas correspondientes. Las limitaciones actuales de estos elementos de memoria son el tiempo de lectura y de conmutación de estado: esto implica que los arreglos desarrollados con base en estos elementos estarían limitados a aplicaciones que requieran cantidades de datos pequeñas y velocidades bajas de transmisión. *Nature Materials*, julio de 2008.

### Fuente de luz cuántica

Hace poco un grupo de científicos suizos observó por primera vez un efecto óptico nuevo en nanotubos de carbón: la emisión predominantemente de un fotón a la vez en la fotoluminiscencia bajo condiciones criogénicas. Además de proporcionar mayor información sobre la física de este tipo de elementos, este estudio sugiere que los nanotubos pueden utilizarse para desarrollar un nuevo tipo de fuente de un solo fotón para aplicaciones de comunicaciones cuánticas a grandes distancias. El estudio se llevó a cabo con nanotubos de carbón con una densidad de un nanotubo por micrómetro cuadrado, lo cual permitió evaluar el comportamiento de un solo nanotubo a la vez. Las propiedades fotoluminiscentes fueron evaluadas a temperaturas dentro de un rango de 4.2 a 77 K. Con técnicas de correlación de fotones fue posible establecer que la probabilidad de emisión de dos fotones varía de esencialmente cero a 4.2 K hasta 15% a una temperatura de 25 K. A pesar de que se observaron evidencias de recombinaciones de Auger, el mecanismo a través del cual se produce la emisión de un solo fotón no ha sido completamente establecido, pues este tipo de procesos no están descritos por la teoría clásica de emisión de la luz. *Nature Photonics*, marzo de 2008.



## La invención del color

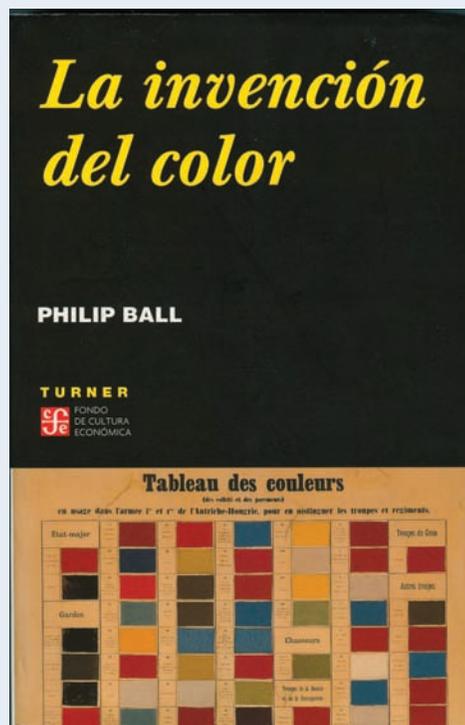
Enrique Lima

En este libro Philip Ball nos conduce a través de la fascinante historia del uso de los pigmentos en el arte. Anécdotas, interpretaciones erróneas del color y la luz, reinterpretaciones de esos fenómenos, controversias, explicaciones científicas no siempre del agrado de los artistas, como las teorías de Newton, Boyle o Maxwell; así transcurre la historia desde la perspectiva del color. Si usted, estimado lector, es físico o químico y le agrada la química cuántica seguramente no apreciará el resumen que el autor presenta del carácter dual del electrón o de algunas teorías en otras áreas de la química, pero no olvide que no se trata de un libro técnico.

En la actualidad se cuenta con una muy vasta gama de materiales a partir de los cuales los artistas crean sus obras de arte, pero no siempre fue así. Basta recordar que las pinturas rupestres realizadas en cuevas fueron hechas con carbón y algunas plantas como fuente de color; en este sentido, el autor sólo menciona de manera superflua las pinturas rupestres y al lector le queda la sensación de que falta mencionar un periodo entre los pigmentos rupestres y los industriales. En efecto, después de las pinturas rupestres se enfatiza la necesidad que tuvieron los artistas de manejar más fuentes de color, lo que provocó una revolución en la creación de pigmentos. Esta evolución quedó determinada, así, por factores artísticos, pero también la economía, la religión y la sociedad influyeron de manera definitiva; por ejemplo, Tiziano tenía fácil acceso a los pigmentos que llegaban al próspero puerto de Venecia y sus cuadros se llenaron de suntuosos rojos, azules, rosados y violetas; al respecto, Miguel Ángel comentó que era una pena que los venecianos no hubieran aprendido a dibujar mejor. No todos los pintores, sin embargo, tuvieron la suerte de Tiziano, ya que algunos pigmentos, en una u otra época, fueron más caros que el mismo oro, de ahí que algunos artistas evi-

### *El azul ultramarino llegó a ser el más caro de los pigmentos*

taron usar el azul ultramarino en un tiempo en que éste era el más costoso de los pigmentos. Estas anécdotas contribuyen a la comprensión de que tener ciertos pigmentos determinaba la “calidad” o la tendencia que algunos pintores se obligaban a seguir. Otros artistas demostraron ser más emprendedores y se aventuraron a preparar sus propios pigmentos; tal fue el caso del italiano Cennino Cennini, quien preparaba sus colores dependiendo de la técnica que iba a utilizar en la pintura. Cennini proponía pigmentos muy específicos para una de-



terminada superficie y describía su preparación a partir de diversas fuentes y puso en evidencia la necesidad de encontrar combinaciones de materiales, tanto sintéticos como naturales. Cennini decía: “trabajar con colores y pintar con ellos es la gloria de la profesión”; dar más detalles de sus pigmentos sería objeto de otra reseña.

Volviendo a la invención del color, la euforia por usar los nuevos pigmentos que los químicos sintetizaban causó cierta precipitación en algunos artistas, sobre todo durante el Renacimiento, y sus obras se desvanecieron a los pocos años porque los pigmentos no eran aptos para perdurar en el tiempo. Una vez más la ciencia tenía que responder a los artistas, crear materiales con color pero ahora estables frente a la luz y el medio ambiente, así, una a una, se sumaron exigencias a todo material con la posibilidad de calificar como pigmento. ¡Y llegaron los colores resistentes!, cuando se descubrieron tintes de antraquinona vinculados a la alizarina y el índigo, lo cual dio como resultado una nueva paleta de colores.

Los científicos también establecieron su propio arte: el de crear materiales con diferentes texturas, colores y matices. Y entonces llegaron los grandes físicos, químicos e incluso filósofos, desde Newton y Leonardo da Vinci hasta Goethe, para formular sus teorías del color y contribuir al conocimiento del color y de la luz, pero sobre todo de la percepción del color. Así se entendió el porqué las hojas de los árboles son verdes, por qué las montañas resplandecen con tonalidades rojizas al ser vistas desde cierta perspectiva o por qué la sangre es roja. Pero, lo más importante, se siguieron sintetizando pigmentos que acrecentaron los recursos de los artistas.



Tiziano. *La Bacanal*, óleo sobre tela (detalle).

Las reseñas de los fenómenos físicos pueden resultar tediosas y hasta cierto punto aburridas, pero el autor las considera necesarias para entender el color a través de diferentes épocas; esta comprensión logró establecer la jerarquía de los colores primarios.

El desarrollo de los pigmentos creó alternativas y el azul ultramarino, para uso exclusivo de los más connotados pintores en los siglos XIV y XV, ahora lo adquiere fácilmente cualquier estudiante. También surgieron los matices de cobalto, cadmio y cromo, propios de Matisse y a los que Picasso se refirió alguna vez con estas palabras: “si todos los artistas coloristas del siglo XX pudiesen componer un estandarte con sus colores favoritos, el resultado sería seguramente un Matisse”, es decir el uso de los pigmentos es el resultado de los avances de la química del siglo XIX.

## Los pigmentos actuales son el resultado de los avances de la química en el siglo XIX

El azul ultramarino es un pigmento muy conocido debido a que se encontró en importantes zonas arqueológicas de Egipto y el autor ofrece una excelente reseña de este antiguo pigmento, extraído de la roca lapislázuli. Sin embargo, se concreta a hablar del color azul sin añadir que actualmente existe toda una familia de pigmentos tipo azul ultramarino e igual podemos encontrar los análogos rosas. Además, en el caso de

los pigmentos antiguos, Ball ignora y no explica un pigmento tan fascinante como el azul maya, que es resistente incluso a ataques ácidos.

## La industria textil también contribuyó al desarrollo de los pigmentos

Por supuesto que el arte no fue la única motivación para desarrollar pigmentos. De hecho la textil fue la industria que más impulsó la creación de materiales para colorear, pero sin duda el arte y el color han recorrido juntos gran parte de la historia, en un ambiente simbiótico, según la metáfora de “¿qué fue primero, el huevo o la gallina?” Esto último sigue pasando en la época actual pero esta vez con una herramienta poderosa, la computadora, que permite crear pigmentos con un número de matices casi ilimitado y a través de ella se pueden imitar fácilmente los colores que alguna vez fueron “únicos” y, más aún, reproducir en cualquier textura obras de arte muy similares a las originales, lo cual por supuesto es una desventaja, no se olvide lo que dijo alguna vez Walter Benjamin: “hay un elemento que falta hasta en la más perfecta de las reproducciones de una obra de arte: su presencia en el tiempo y en el espacio... La presencia del original es el requisito del concepto de autenticidad”.

Philip Ball, *La invención del color*, Turner Publicaciones, Madrid, 2003.



Henri Matisse, 1926. *Decorative Figure on an Ornamental Ground*, óleo sobre tela (detalle).

# La alquimia, precursora de la química moderna

Nancy Martín-Guaregua,\* UAM-I-Departamento de Química, y Joaquín Pérez-Pariente, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica-CSIC, Madrid.

## Antecedentes

Durante la semana del 23 al 27 de abril de 2007, en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, tuve el placer de asistir al curso “La alquimia en los orígenes de la química” impartido por el profesor Joaquín Pérez-Pariente del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC) de España. De ahí surgió la idea de escribir el presente artículo, que representa una fracción muy pequeña de lo que abarcó el curso.

Lo primero es ofrecer una definición de alquimia: una antigua técnica cuyos objetivos principales eran descubrir una sustancia que transmutara los metales ordinarios en oro y plata y, por otro lado, encontrar los medios para descubrir el elixir de la inmortalidad. Esto se resumía en la búsqueda de la llamada “piedra filosofal”. Recordemos que una transmutación

se define como la separación de las partículas más pequeñas de un metal y su recombinación en otro. Esta piedra filosofal es un misterio, pues nunca fue un objeto físico en sí, sino más bien un supuesto camino de perfección humana, de conducta y de ética personales.

La palabra alquimia procede del árabe *al kimiya* o *al khimiya*, que se divide en dos partes, el artículo *al* y el término *khimiya*, que significa “echar juntos” o “verter juntos”. La palabra árabe *khimiya*, sin el artículo, dio lugar al término “química” en castellano y otras lenguas.

La alquimia se practicó desde el siglo IV a.C. hasta el surgimiento de la química y las ciencias naturales, bien entrado el siglo XVIII. Su época de esplendor fue la Edad Media, pero se sigue practicando hoy.



Julieta Aguinaco, 2007. Serie *Cactus*.

En el lenguaje popular, la alquimia se asocia con prácticas ocultas relacionadas con la magia y la hechicería, más que con la verdadera ciencia. En el lenguaje académico se reconoce como la precursora de la química moderna.

### Evolución histórica de la alquimia

En la figura 1 se muestra cómo se han correlacionado espiritismo, alquimia y química a través del tiempo.

Durante la etapa prehistórica llamada Neolítico ocurren muchos de los descubrimientos conocidos hasta la fecha, entre ellos la cerámica, la agricultura y la herbolaria, la extracción y la utilización de pigmentos para teñir telas y paredes, la fusión de los minerales, la extracción de los metales y la elaboración de vasijas, la fabricación de armas y corazas de bronce, la producción de cerveza y vino, la utilización de la madera y del barro cocido para la construcción, todo, por supuesto, gracias al dominio del fuego. Así se crearon los hornos del alfarero, que luego llevaron al descubrimiento de los metales contenidos en los minerales.

Tabla 1. Edades en la época primitiva

	Periodo
Edad de Hierro	200 años a.C
Edad de Bronce	4000 años a.C
Edad de Oro y Plata	5000 años a.C

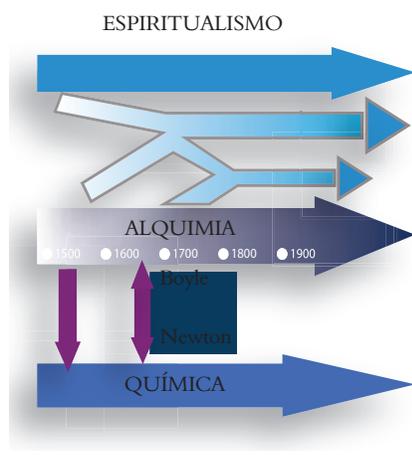


Figura 1. Evolución histórica de la alquimia.

Las observaciones de los fenómenos naturales, impregnadas de terror, se sumaron, para los hombres del Paleolítico y el Neolítico, a las correlaciones encontradas entre ellas: el relámpago, el ruido, el trueno, la lluvia o la tormenta. Asimismo, fenómenos como el surgimiento de plantas y hongos de la tierra humedecida y el descubrimiento de cómo en las plantas crecían primero las hojas, luego las flores y por último los frutos hicieron pensar en la presencia de algo divino.

El rayo y el trueno fueron identificados como manifestaciones de dioses masculinos que a través de la lluvia fecundaban la Tierra, madre de todos los animales y vegetales. De manera semejante, los meteoritos se asociaron con productos de una deidad masculina. El primer nombre dado a un meteorito fue An-bar, cuyo significado es cielo y fuego. De ahí que “metal celeste” fuera el primer nombre dado al hierro, metal obtenido de los meteoritos.

## Los alquimistas buscaban la piedra filosofal, que no era un objeto físico sino un camino de perfección

Entre los metales descubiertos estaban los que se hicieron famosos en la Antigüedad: oro, mercurio, plomo, cobre, hierro y estaño. Se creía que en las profundidades de la Tierra éstos sufrían una transformación natural, una especie de proceso embrionario, cuyo producto final era el oro.

En las primeras culturas de la cuenca mediterránea y Asia Menor, los mineros estaban convencidos de que en el proceso que incluye desde la extracción de un mineral hasta la obtención del metal se interrumpía un ciclo natural y sagrado, lo que implicaba asumir una gran responsabilidad ante la divinidad que les había permitido descubrir cómo hacerlo. Por lo tanto, el trabajo de los mineros y metalurgistas estuvo acompañado de ritos y conjuros para atraer la benevo-

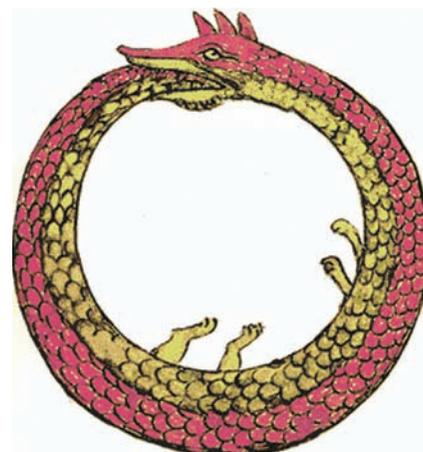


Figura 2. Ouroboros.

lencia de los dioses. Así, desde la Antigüedad hasta el Renacimiento, la magia estuvo entremezclada con los procesos de transformación, con la creencia de que se podía llegar a los dioses para conseguir los propósitos deseados.

Esta filosofía es la de la alquimia. Aparece así la figura de un dios creador y único, unidad de la que se deriva la diversidad. De lo que es único y primigenio se deriva todo lo demás, lo diverso, otros dioses o semidioses, ángeles y demonios, seres y cosas. Al morir, todo regresa a formar parte de la unidad original, del uno. Los alquimistas lo expresaron con su principio “todo es uno, uno es todo” y lo representaron con un símbolo: una serpiente mordiendo la cola, donde el final y derivado se une al principio y fuente, y vuelve a él; llamaron a este símbolo *ourobouros* (figura 2).

Se pueden describir tres periodos importantes en el desarrollo de la alquimia: de 1200 a 1300 de nuestra era, cuando se demostraba la capacidad manual para la coloración de los metales

haciendo creer que eran transmutaciones; de 1300 a 1600, periodo de auge de la alquimia entre personas cultas, basada en la búsqueda de la piedra filosofal, y del siglo XVII en adelante, cuando se identifica la piedra filosofal con Jesucristo y se produce la revolución científica.

Los primeros escritos sobre actividades relacionadas con la alquimia provienen de Egipto, China y Grecia. En la actualidad los principales documentos se encuentran en la Biblioteca Nacional de París y en Leiden, donde los textos alquímicos están ordenados en dos grandes grupos: aquellos de origen griego y los firmados por Jabir ibn-Hayyam, también llamado Geber.

### Grecia antigua

Los griegos, en particular Aristóteles, aceptaban la existencia de los cuatro elementos postulada por Empédocles. Todo está formado por partículas pequeñísimas de sólo cuatro clases fundamentales: aire, agua, fuego y tierra, y los tres principios elementales, sal, mercurio y azufre. Platón sugiere las formas que debían tener las cuatro partículas fundamentales: aire, octaedro; agua, icosaedro; fuego, tetraedro, y tierra, cubo (figura 3). Era posible alterar las proporciones de estos cuatro elementos en las piedras no perfectas hasta ajustarlas a la proporción áurea, es decir a la proporción perfecta y propia del oro.

La cultura griega se nutrió de otras culturas mediterráneas que la precedieron (persa, egipcia, asiria, maltesa, babilonia). Más tarde, los romanos lograron que parte de esta cultura se mezclara con la europea y llegara hasta el interior de Asia.

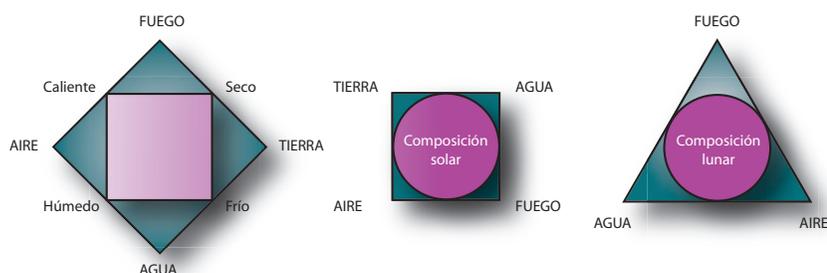


Figura 3. Los cuatro elementos aristotélicos.



Julietta Aguinaco, 2007. Serie Cuarzos.

### Alejandro

Con la fundación de Alejandría en el siglo I d. C., que fue capital de Egipto durante el reinado de Cleopatra, se da a conocer la alquimia, que se desarrolla en el siglo VI.

Desde antes, los artesanos alejandrinos tenían fama de excelentes falsificadores de joyas: practicaban el enchapado en oro y el coloreado de los metales mediante ácidos y barnices. Los egipcios calentaban los objetos de oro hasta el rojo vivo, con sulfato, alumbre y sal; de esta manera los ácidos sulfúrico y clorhídrico resultantes disolvían los metales bajos de la superficie de oro puro, que después de pulida, daba la impresión de que todo el objeto poseía idéntico grado de pureza. Por otra parte, aumentaban el peso del oro, a expensas de su calidad,

rebajándolo a una amalgama de otros metales.

Geber (Jabir ibn-Hayyam), que fue uno de los más célebres alquimistas árabes (siglos VIII-IX d.C.), admitió: “mis libros son numerosos y la ciencia está dispersa en ellos. Quien se ocupe de reunirlos, reunirá la ciencia, se encaminará a su meta y tendrá buen éxito, porque he descrito toda la ciencia sin guardar en secreto ninguna parte de ella; el único enigma está en su dispersión”. Podemos considerar el trabajo de Geber como el más antiguo tratado sobre química propiamente dicha, ya que es una recopilación de todo lo que se creía y se conocía entonces. En estos escritos se encuentra una infinidad de descripciones de sustancias descubiertas en la época, así como de técnicas experimentales usadas en los laboratorios. Las operaciones realizadas en el laboratorio, además de tener una finalidad práctica, tenían un fin místico: las operaciones en el laboratorio eran símbolos de la transformación de la persona. Geber consideró que los metales estaban constituidos de azufre y mercurio.

Los alquimistas árabes trabajaron también con oro, arsénico, sales y ácidos, y se familiarizaron con una gran



Julietta Aguinaco, 2007. Serie Cuarzos.

cantidad de reactivos químicos. Pensaban que los metales eran como semillas susceptibles de crecer, desarrollarse y multiplicarse en determinadas condiciones y que, incluso, poseían sexo. Consideraban que el mercurio, único metal líquido, era la matriz en la que se gestaban los demás metales, de ahí su amplio uso en la alquimia.

A los alquimistas árabes les debemos las “bebidas espirituosas” y las “esencias” de los perfumistas. Creían que el alcohol era el “espíritu” del vino y el perfume la “esencia” de la rosa. El alquimista Van Helmont nos legó la palabra “gas”, que era el “espíritu” (*geist*) de los minerales.

## Occidente

La alquimia, en la forma en que la conoció y la practicó la gente de la Edad Media occidental, tuvo su origen en la gran mezcla intercultural que se produjo en el imperio de Alejandro Magno. A través de Alejandría, los árabes transmitieron la alquimia a Europa. Fue así como se produjo en Occidente un gran auge en el cúmulo de conocimientos sobre alquimia, medicina, astronomía y filosofía. Sin embargo, la Edad Media occidental (entre los siglos X y XII) fue también heredera de una gran barbarie,

celta, visigoda, teutónica, eslava y de otros pueblos. Esta etapa fue llamada la Edad Tenebrosa y, aunque fue de total postración científica en el mundo occidental, está considerada como la más floreciente para la ciencia española (arábiga–judaica–cristiana): a mediados del siglo XII, en la escuela de Toledo, se tradujeron del árabe al latín los primeros textos alquímicos.

Por su parte, los papiros de Leiden y Estocolmo, fechados a finales del siglo III, constituyen hallazgos fundamentales para el estudio de la transmutación de los metales; en efecto, describen diferentes técnicas y fórmulas para la elaboración de oro y plata.

La piedra filosofal, capaz de catalizar la reacción que debía transformar el plomo en oro, se puso de moda en el siglo XV, pero en 1404 el parlamento inglés estableció que la producción alquímica de oro y plata era delito. Cincuenta años más tarde, Enrique VI autorizó la

que unas veces pesaba y otras levitaba.

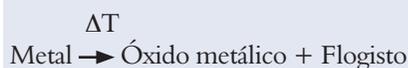
Más adelante, con los estudios de Lavoisier y su descubrimiento del oxígeno, hubo la necesidad de sustituir la teoría del flogisto por otra —ley de la conservación de la masa— que permitiera explicar mejor algunos hechos experimentales.

Usualmente, los alquimistas eran también médicos y poseían conocimientos de astrología y filosofía. Entre los más conocidos destacan: el alemán San Alberto Magno (1193-1280), el polígrafo mallorquín Ramón Llull (1232-1315), el monje y físico inglés Roger Bacon (c.1213-1294), el médico catalán Arnaldo Vilanova (c. 1250-1311) y el más célebre de todos, el médico suizo Paracelso (1493-1541), considerado como el iniciador de la medicina herméutica y la terapéutica química. Otros científicos famosos que practicaron el arte de la alquimia fueron Robert Boyle y sir Isaac Newton.

## *La piedra filosofal debía ser capaz de catalizar la reacción que transformaría el plomo en oro*

investigación de la piedra, con el fin de poder pagar la abultada deuda pública de la época.

En el siglo XVIII Emmanuel Kant consideró la teoría del flogisto como un “principio de la combustión” al que llamaba “azufre”. George Stahl, entre 1697 y 1718, propuso una tesis semejante cambiando el término “azufre” por “flogisto”. Se pensaba que el flogisto pasaba de una sustancia a otra durante la combustión:



Así pues, el flogisto era fuego oculto (fijo en las sustancias) que se hacía fuego evidente (liberado). Se pensaba que el flogisto era una sustancia anómala, ya

Por su parte, los emperadores Maximiliano II y Rodolfo II hicieron de Praga (la ciudad del golem y los cabalistas) la capital de la alquimia. Se dice que los mismos emperadores fueron testigos de la obtención de grandes cantidades de oro usando un misterioso polvo negro. En el Kunsthistorisches Museum de Viena se encuentra una medalla de oro alquímico que conmemora la transmutación efectuada ante el emperador Fernando III en Praga el 15 de enero de 1648.

La alquimia occidental siempre ha estado estrechamente relacionada con el hermetismo, un sistema filosófico–espiritual que tiene sus raíces en Hermes Trimegisto (tres veces grande), una deidad sincrética grecoegipcia y legendario alquimista. El símbolo de Hermes era el caduceo o vara de serpiente (figura



Figura 4. Hermes Trimegisto.



Figura 5. Tabla de Esmeralda.



Figura 6. Estrella alquímica de siete puntas.

4). La Tabla de Esmeralda o Hermética, de Hermes, sólo se conoce por traducciones griegas y árabes, y es la base de la filosofía y práctica de la alquimia occidental (figura 5). Tiene como base la interacción entre el macrocosmos y el microcosmos, en la que el cuerpo humano (microcosmos) se ve afectado por el mundo exterior (macrocosmos) que incluye a los cielos por medio de la astrología y a la Tierra a través de los elementos (figura 6).

La alquimia también llegó a establecer un lazo con los constructores de las catedrales de la Edad Media. Por ejemplo, en el pórtico central de la catedral de Notre Dame de París hay un cierto número de representaciones de la obra alquímica (figura 7). Se dice que de este lazo nace la masonería, como un ritual para preservar los secretos de la arquitectura, sociedad que acabó convirtiéndose en un factor de poder. Se ha escrito mucho sobre este simbolismo alquímico encontrado en las catedrales, palacios y hasta en casas señoriales.

Las disciplinas alquímicas influyeron también en el nacimiento de la sociedad esotérica llamada Fraternidad del Rosa Cruz, un importante movimiento del siglo XVII. En esta nueva ciencia no se operaba sobre los metales sino sobre las almas, para transmutarlas mágicamente.

El triángulo equilátero (el ojo divino que está en el dorso de los billetes

de dólar) simboliza los tres principios alquímicos de Paracelso: sal, mercurio y azufre. En la alquimia espiritual el alma se transmuta pasando por tres etapas llamadas putrefacción, piedra blanca y piedra roja. Cagliostro, Casanova y el conde de Saint Germain son algunos personajes que pertenecieron a esta fraternidad.

### La piedra filosofal

La piedra filosofal se definía como una sustancia con propiedades extraordinarias, como la capacidad de transmutar los metales vulgares en oro. Existían dos tipos de piedra: la roja, capaz de transmutar metales innobles en oro, y la blanca, cuyo uso transformaba dichos metales en plata. La roja se obtenía empleando la vía seca, la blanca, a través de la vía húmeda; en ambos casos el elemento de partida era la pirita de hierro.

La piedra filosofal se conocía como el elixir de la vida y se le suponían virtudes maravillosas, no sólo la de conseguir el oro sino la de curar algunas enfermedades y la de otorgar la inmortalidad. Se la imaginaba como un polvo seco, procedente de alguna piedra especial y de ahí que se le llamara piedra filosofal, ya que hasta el siglo XVIII a los científicos se les conocía como filósofos. Se creía que la piedra filosofal facilitaba el contacto con los espíritus.

Así, para la fabricación del oro se buscaba un material que facilitara la mezcla del mercurio con el azufre, porque se suponía que ese era el camino acertado. Las operaciones que practicaban para producir oro o plata tenían nombres como calcinación, putrefacción, sublimación, disolución, destilación, coagulación, extracción, digestión y fermentación. Aunque la mayoría de



Figura 7. Detalle en la catedral de Notre Dame de París.

estas técnicas se usan actualmente, las descripciones de aquella época resultan un poco diferentes de las actuales.

El *modus operandi* de las transmutaciones (figura 8) consistía de manera general en la reacción siguiente:

Metal (Hg, Pb, Sn, Cu) = Metal (Au o Ag)  
(en un horno)

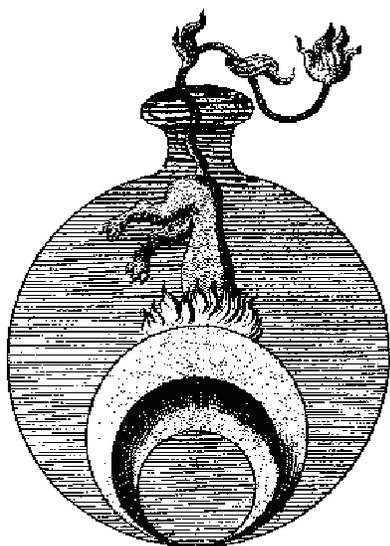


Figura 8. La transmutación opera gracias a la disolución de azufre filosofal.

Se partía de un peso inicial del metal ( $P_i$ ) más un peso ( $P_{pf}$ ) de la piedra filosofal y al final se obtenía un peso del metal transformado ( $P_{mM}$ ). Así se definió la llamada potencia transmutadora (PT):

$$PT = P_{mM} / P_{pf}$$

Entre 1600 y 1750 aparecen documentadas 112 transmutaciones. Algunas de ellas, como las de Van Helmont (1614), con una potencia transmutadora con un valor de hasta 19186.

Actualmente se describe la piedra filosofal como una sustancia que acelera una reacción, esto es lo que llamamos un "catalizador". Por lo tanto, en la época no se podía hablar de una sustancia única.

## Lenguaje alquímico

La lectura de una obra alquímica es complicada en extremo. El lenguaje alquímico parece abstracto, absurdo e incomprensible, pero más bien es místico. Hasta donde se sabe, en el simbolismo alquímico no existieron reglas fijas; todo se dejaba a la imaginación y a la creatividad de sus autores. De ahí que las interpretaciones y especulaciones filosóficas fuesen muchas; sin embargo, en la alquimia descriptiva y práctica, los antiguos maestros usaron un lenguaje figurado, basado en la mitología indoeuropea, que podía interpretarse según los conocimientos del lector.

La simbología alquímica fue enorme y abarcó muchos campos. Dentro de ella los metales estaban relacionados con los planetas: así, el oro era el Sol; la plata, la Luna en cuarto creciente; el mercurio, la Luna en cuarto menguante; el cobre, Venus; el plomo, Saturno; el hierro, Marte... Cuando se hablaba del matrimonio del Sol y la Luna se hacía referencia a la aleación oro-plata.

Por su parte, los instrumentos recibieron nombres de animales por analogía con sus formas: el pelícano alquímico, la cigüeña alquímica, el avestruz alquímico... que indicaban formas determinadas de las retortas, los matraces y los alambiques usados en diversas operaciones de laboratorio. Para los alquimistas, el huevo era el símbolo del atañor o alambique (figura 9), esto es el lugar donde se producía la cocción de los elementos destinados a la obtención de la piedra. Las operaciones alquímicas recibieron nombres que corresponden actualmente a signos astrológicos: la calcinación se designaba como Aries; la sublimación, como Libra; la fermentación, como Capricornio; la disolución, como Cáncer.

Los símbolos en la alquimia abarcan principalmente tres aspectos: físicos, místicos/religiosos y psíquicos. Entre los primeros podemos mencionar como ejemplo uno de los procedimientos alquímicos de sir Kenelm Digby (1603-1665), que se describe como sigue: "12 onzas de cinabrio común, 15 onzas de aceite de vitriolo, dos onzas de y una



Julieta Aguinaco, 2007. Serie *Cuarzos*.

onza de común precipitado, hecho mediante AF y reverberado hasta que esté rojo". El cinabrio común es el sulfuro de mercurio, el aceite de vitriolo es el ácido sulfúrico, el AF es el *aqua fortis* o ácido nítrico. La representación sería:

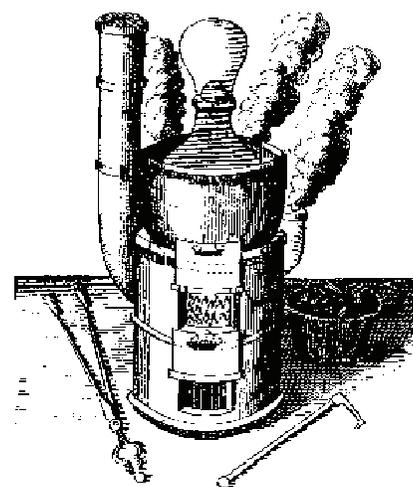
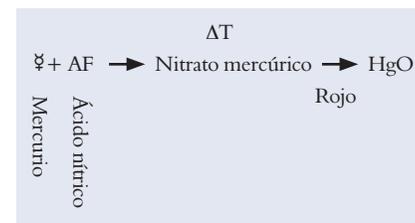
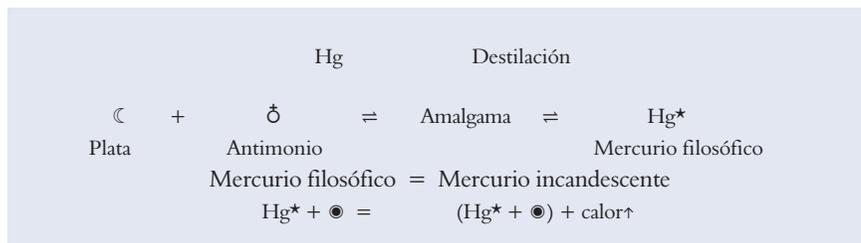


Figura 9. Horno de atañor.



Por su parte, George Starkey (1651) describió la obtención del mercurio filosófico según la fórmula de arriba.

Este proceso se basaba en la amalgamación de mercurio ordinario con una aleación de régulo estrellado de antimonio y plata. Según la nomenclatura de la “chymia” se denomina régulo estrellado de antimonio al antimonio metálico ob-

tenido mediante reducción de trisulfuro de antimonio natural (mineral stibnita) con hierro, generalmente en presencia de fundentes como nitrato o carbonato de potasio. Ese mercurio filosófico o animado debía amalgamarse con oro y la digestión de esta mezcla sometida a un calentamiento adecuado produciría la piedra filosofal. Este producto tendría propiedades sorprendentes, ya que hacía que el oro se hinchara y que crecieran piezas como árboles metálicos (mercurio incandescente).

## Hoy se describe la piedra filosofal como una sustancia que acelera una reacción

tenido mediante reducción de trisulfuro de antimonio natural (mineral stibnita) con hierro, generalmente en presencia de fundentes como nitrato o carbonato de potasio. Ese mercurio filosófico o animado debía amalgamarse con oro y la digestión de esta mezcla sometida a un calentamiento adecuado produciría la piedra filosofal. Este producto tendría propiedades sorprendentes, ya que hacía que el oro se hinchara y que crecieran piezas como árboles metálicos (mercurio incandescente).

Otro ejemplo de simbolismo alquímico es el que presenta Filaleteo, autor del *Speculum veritatis* en la figura 10, en la que se observa: en el lado izquierdo, un lobo devorando a un joven guerrero caído en el suelo con armadura y casco, empuñando una espada en la mano derecha. También se ve un árbol cubierto de hojas. En el centro, otro guerrero, de pie, más viejo y barbado, con una pata de palo, armadura y casco, empuña en la mano derecha un objeto flamígero que le confiere poder (principio) ígneo (ardiente) y, en la mano izquierda, un globo crucífero con una estrella en el

centro. Por encima de este globo, entre las nubes, un carnero tiene marcada sobre la espalda una estrella que se proyecta sobre el globo. En el lado derecho aparecen dos ancianos (alquimistas), uno de ellos recibiendo en las manos el globo crucífero que el guerrero le entrega; el otro observa atentamente. Se trata de una representación alegórica de

la primera obra de Filaleteo por la vía seca, es decir, la separación y las purificaciones con el fin de obtener el régulo marcial estrellado. El lobo representa el sujeto mineral, también conocido como dragón negro, hijo de Saturno; el lobo hambriento se come a todos los metales, igual que al joven guerrero. El lobo lo está devoran-



Julieta Aguinaco, 2007. Serie *Cuarzos*.

do con la ayuda de Vulcano, el dios del fuego, que se encuentra representado por el guerrero más viejo, cojo y con pata de palo, que representa a Marte. El globo crucífero, que Vulcano sujeta con la mano izquierda y va a entregar a los ancianos alquimistas, es el símbolo del sujeto mineral. La estrella que se ve en el centro del globo simboliza el régulo marcial estrellado, procedente de la separación y de las posteriores purificaciones realizadas por el fuego y la sal. Debajo del globo crucífero corre un riachuelo, que simboliza el agua viva, o sea el mercurio. El carnero o Aries simboliza astrológicamente la estación del año propicia para el comienzo de los trabajos, identificada por las hojas de los árboles. Además está la relación metálica de Aries con el mismo Marte.

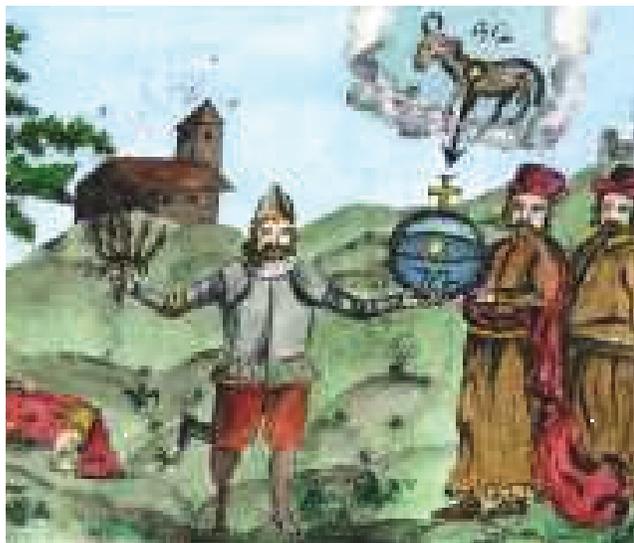


Figura 10. *Speculum veritatis* de Filaleteo.

### Alquimistas modernos

Después de Paracelso, los alquimistas prácticos o “espagóricos” emigraron en masa hacia la farmacia y formaron la escuela “iatroquímica”. Unos pasos más y aparecería Lavoisier (1756), quien sentó las bases de la química moderna como ciencia experimental y cuantitativa.

experimental. En la actualidad, sin embargo, la alquimia no ha desaparecido del todo.

En el transcurso de la época moderna, la alquimia dominante evolucionó hacia la actual química; sus aspectos místicos y herméticos se convirtieron en el centro de interés de una nueva alquimia

## Hoy se practica una nueva alquimia de transformaciones espirituales

Se dice que Fulcanelli (pseudónimo de un autor desconocido del siglo XX) fue el último alquimista y heredero de los constructores de catedrales del siglo anterior. Fue contemporáneo de Carl Gustav Jung, quien reivindicó la alquimia a la luz del psicoanálisis.

Los alquimistas nunca llegaron a desarrollar métodos propiamente científicos, por eso fue llamada pseudociencia y nunca se logró desvincular de lo mágico, lo sobrenatural y lo metafísico. Sus teorías sucumbieron ante el nacimiento de la ciencia moderna, basada en el método

espiritual, en la que las manipulaciones materiales son consideradas símbolos de transformaciones espirituales.

En el siglo XXI los físicos realizan transmutaciones, no del plomo en oro, pero sí convierten un elemento en otro empleando núcleos atómicos. Se ha logrado el bombardeo en forma controlada (fisión) de elementos de mayor número atómico que el oro, haciéndoles perder electrones o neutrones, hasta equipararlos con el número atómico del preciado metal. También se ha conseguido la fusión de elementos de menor



Julieta Aguinaco, 2007. Serie *Cuarzos*.

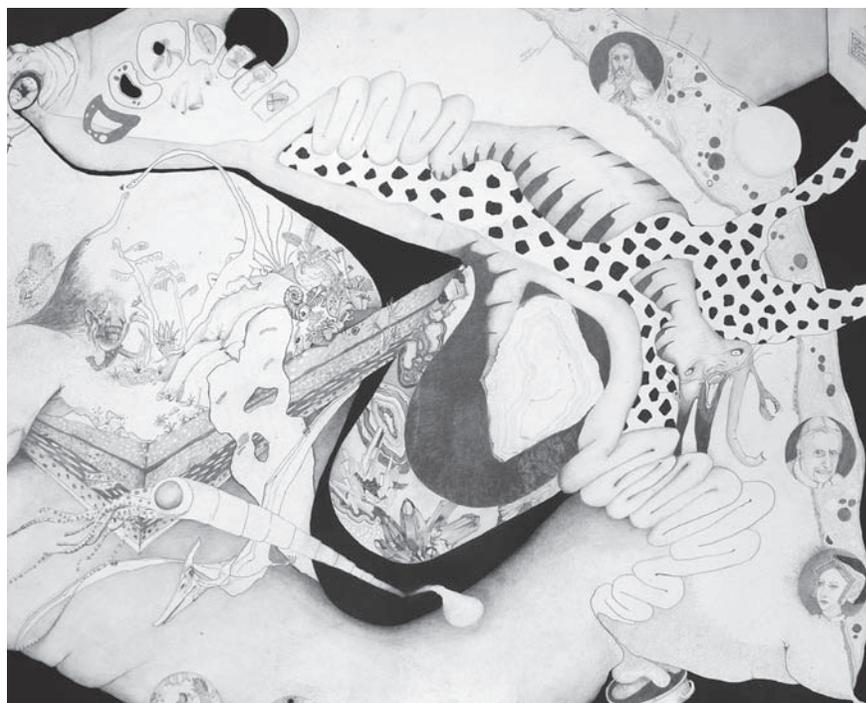
número atómico entre sí, hasta obtener el número atómico del oro.

### Conclusión

La alquimia ha contribuido de forma muy importante al progreso de la química en el laboratorio. Los sistemas de laboratorio que usamos actualmente, como el alambique, y técnicas como la destilación, la calcinación, la sublimación, etcétera, son de origen alquímico. La mayoría de los descubrimientos e ideales de los alquimistas son los pilares fundamentales de las filosofías actuales y de las industrias químicas y metalúrgicas. Por su parte, psicólogos y filósofos usan aún el simbolismo alquímico.

### Bibliografía

- A. Garritz, L. Gazque, A. Martínez, *Química universitaria*, Pearson Education, México, 2005.
- T. de la Selva, *De la alquimia a la química*, SEP-CFE (La ciencia para todos, 118), México, 2006.
- P. Capanna, *Los alquimistas*, Futuro, Suplemento de Ciencia, p. 12. <http://es.wikipedia.org/wiki/Alquimia> (consultada el 28/02/2007).
- J. Pérez-Pariente, “La alquimia de Newton y Boyle”, *Real Sociedad Española de Química*, 4 (2005), 63.



Julieta Aguinaco, 2007. Serie *Cactus*.

\*mgnc@xanum.uam.mx



## Diseño y prácticas sustentables en la industria de la construcción

El diseño sustentable en arquitectura y construcción es un proceso de creación en el que se establecen criterios de desarrollo sustentable,<sup>3</sup> como reducción de gastos en los recursos naturales empleados, disminución de la contaminación del suelo, el aire y el agua, mejoramiento de la comodidad y la calidad en el interior del edificio, ahorro económico y financiero en los proyectos constructivos, reducción de los desperdicios y de-

construcción, es decir en todo el ciclo de vida del material; además, estas estrategias contribuyen a la disminución de los costos y generan un impacto positivo en el sector socioeconómico y no sólo en el ambiental.

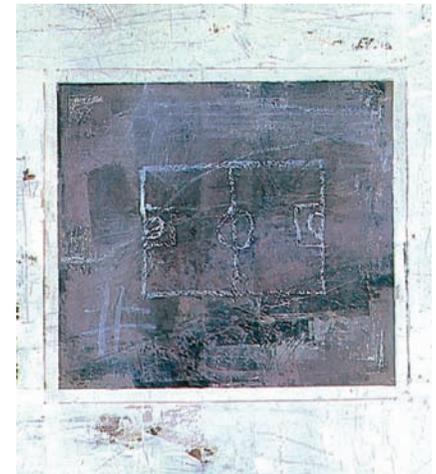
Estas prácticas sustentables en el sector de los materiales de construcción incluyen el uso de materiales de desecho, reciclados, de reuso, renovables, de la región, no tóxicos, económicos y duraderos. Todas estas características están encaminadas a tener materiales de bajo impacto ambiental.

## Los materiales sustentables son más económicos y no producen daños en el medio ambiente

sechos generados tanto en los procesos constructivo, de mantenimiento y de fin de la vida útil del edificio, como disminución de los desperdicios industriales producidos al fabricar los materiales constructivos y el equipo para edificios.<sup>4</sup> En este último punto, referente a la fabricación y producción de materiales constructivos, es muy importante establecer algunas estrategias de diseño sustentable para disminuir el impacto en el ambiente causado por los materiales desde su extracción, transporte, producción y aplicación en la industria de la

De forma general, el diseño sustentable reconoce que los productos y los procesos son interdependientes del medio ambiente, de la economía del lugar y de la sociedad en cuestión, es decir de un sistema sustentable; además, implementa las medidas para prevenir las afectaciones a dicho sistema y usa los recursos de manera eficiente previendo sus límites dentro del sistema.

En las industrias de la arquitectura y la construcción el diseño sustentable es una herramienta primordial para alcanzar tanto productos como procesos



Eugenia Benabib, 2002. *Juego verde*, óleo sobre tela, 90 × 100 cm (detalle).

sustentables. El diseño sustentable se apoya en métodos, técnicas y estrategias para lograr productos sustentables;<sup>5</sup> este artículo se centra en estrategias para alcanzar materiales constructivos sustentables. El diseño sustentable de productos está relacionado directamente con el diseño por ciclo de vida (DCV), lo cual se resume en las siguientes fases: diseño preliminar, diseño del proyecto, construcción, uso, mantenimiento y fin de la vida útil.<sup>6</sup> El diseño por ciclo de vida considera también que todos los elementos de un producto, proceso o edificio intervienen de manera sistémica en cada fase del ciclo de vida del producto, principalmente en las fases de operabilidad y uso del edificio en el caso de la arquitectura.

## Manejo sustentable de los materiales de construcción y sus desperdicios

Existen cuatro métodos principales para el manejo sustentable de los materiales de construcción y sus desperdicios: a) reuso, que significa volver a usar los materiales tal como se recuperan, sin invertir ningún recurso; b) reciclamiento: que implica invertir en la recuperación de un material por medio de una transformación física o química; c) refabricación, que es un proceso similar al reciclaje pero implica más de un producto para la elaboración de otro final y d) recupera-



Figura 1. El concreto armado con varillas de acero es el material más usado en estructuras para edificios (Fuente: The Partnership for Achieving Construction Excellence, 8, 2004).

ción de energía, que significa recuperar algún tipo de combustible que genere energía con base en los desperdicios de una construcción.

La aplicación de los métodos anteriores proporciona muchos beneficios, principalmente en la reducción del daño ambiental, pero también económicos y sociales, por lo que es conveniente su instrumentación en la industria de la construcción. Cabe destacar que en la fase de diseño preliminar es donde se evitan muchos problemas del futuro del edificio,<sup>7</sup> como un excesivo desperdicio de los materiales de construcción, la contaminación del medio ambiente (suelo, agua o aire) y el alto consumo de energía y agua en los edificios, entre otros.

### Caso del concreto de matriz de cemento Pórtland

El concreto de matriz de cemento Pórtland se utiliza con frecuencia en la industria de la construcción y entre los principales usos se cuentan estructuras, entrepisos, techos, muros, cimientos, pisos, pavimentos, puentes, guarniciones, presas y carreteras, pero, ¿cómo se puede hacer sustentable el material más usado en el mundo? La respuesta es buscar nuevos métodos, estrategias y prácticas sustentables para la elaboración del concreto, enfocados principalmente al manejo de las materias primas a utilizar y los procesos de producción (figura 2), sin afectar sus características para determinado uso y aplicación al que nor-



Eugenia Benabib, 2002. *Pizarrón-Billar*, óleo sobre tela, 120 × 110 cm (detalle).



Figura 2. Manejo de los materiales usados en los procesos de construcción de edificios (Fuente: The Partnership for Achieving Construction Excellence, 8 2004).

malmente está destinado el material.<sup>1</sup>

Para eso deben ponerse en práctica los métodos para el manejo sustentable de materiales de construcción descritos, aunados a nuevas estrategias y prácticas sustentables para el material en cuestión. Estas prácticas se resumen en los siguientes casos de producción de concreto:

a) Uso de cemento celular a base de cemento Pórtland y sólo con agregados finos y aditivos que, en aplicaciones como sistemas de muros y techos, requiere menor utilización de materias primas, por lo tanto afecta menos el ambiente debido a la extracción, transporte y fabricación del producto final; tal vez el único inconveniente es que el concreto celular o ligero es menos resistente que el concreto normal a base de agregados gruesos.

b) Concreto con contenido de cenizas volantes, producto del desperdicio de altos hornos y principalmente causado por la combustión de carbón mineral para la producción de electricidad en las plantas termoeléctricas. La ceniza volante puede utilizarse para la mezcla de concreto en una proporción de 15 a 20 % del volumen total de cemento, lo que aumenta notablemente la resistencia del material o producto final.

c) Concreto hecho a base de cemento producido en plantas que funcionan con energía renovable o alternativa es una buena opción para mitigar los efectos nocivos al medio ambiente en la producción de cemento y concreto; en México el empleo de recursos energéticos producto de desperdicios es aún muy difícil de realizar, pero en un futuro será una buena opción a tener en consideración. Es importante mencionar que no cualquier desperdicio encaminado a la producción de energía podría emplearse en los procesos de manufactura de materiales, debido a las normas reguladoras de dichos procesos. Hay que tomar en cuenta que todo combustible para la generación de energía produce emisiones contaminantes y que unos son más nocivos que otros.

d) Concreto reciclado para emplearse como agregado en la fabricación de concreto nuevo. Esta opción podría aplicarse en la fase de construcción con relativa facilidad y con un potencial de mediano a alto en el ahorro de materias primas, como agregado grueso; en este caso se beneficiarían directamente tanto el costo del proyecto como el medio ambiente, en el sentido de la reducción de la explotación de minas de agregados (grava y arena).

e) Agente para el curado del concreto con base en semilla de soya: esta opción consiste en un producto basado en la soya, que se usa como aditivo para el curado del concreto; más que acelerador, actúa como protector y conservador del hidratante, ya que mantiene fresco el concreto. Esta opción también se emplearía en la fase de construcción, es fácil de aplicar y con un potencial bajo de ahorro de recursos naturales en cantidad, pero en calidad se reduce de forma importante el uso de aditivos sintéticos de gran impacto ambiental. Los beneficios de esta acción van directamente al costo del proyecto y también a la disminución del daño al ambiente. Esta tecnología aún se encuentra en fase de experimentación, pero puede ser una alternativa para el futuro.

## El manejo sustentable incluye reuso, reciclaje, refabricación y recuperación de energía

f) Realizar la limpieza de la superficie del concreto aparente por medio de técnicas que no utilicen agua ni energía. Esta opción consiste en cepillar o barrer las impurezas del concreto para su limpieza sin usar agua. Esto tendría como consecuencia, en la etapa de la construcción, ahorro en el consumo de agua y evitar algunos productos químicos que producen grandes daños ambientales, mediante un método accesible, de bajo costo y de mediana a alta efectividad.

g) Establecer una norma y un método de selección del tipo de cemento o matriz de liga para que se puedan realizar las mezclas adecuadas de concreto sin afectar sus propiedades, principalmente para aplicaciones en estructuras de edificios que requieren resistencias mecánicas elevadas lo que, aunado a las estrategias anteriores, podría reducir mucho los costos y sobre todo el impacto al medio ambiente por utilización excesiva de materias primas nuevas, sobre todo el cemento.

## Conclusiones

Todos los materiales de construcción, en menor o mayor grado, producen contaminación e impacto ambiental a lo largo de su vida útil, desde su extracción, transporte, fabricación y hasta su uso; por lo tanto, para mitigar estos efectos nocivos, hay que emplear prácticas sustentables en el diseño de la construcción en todos los niveles, es decir desde la selección y fabricación de las materias primas hasta el diseño, el proyecto y la construcción.

Estas prácticas sustentables en el manejo y aplicación de materiales son opciones, métodos y estrategias que redundan en materiales amigables con el medio ambiente, mediante la adecuada tecnología y métodos de selección y evaluación de materias primas. En

el caso del cemento Pórtland, se proponen varias estrategias para hacer el concreto sustentable. Estas alternativas consisten básicamente en reducir la contaminación ambiental causada por la producción de materiales y su uso en el proyecto; también están enmarcadas dentro de los métodos básicos para el manejo y aprovechamiento sustentable de materiales de construcción: reuso, reciclaje, refabricación y recuperación de energía.

Se concluye también que es importante el manejo sustentable de materiales y desperdicios de construcción en todas las fases posibles del ciclo de vida del edificio o proyecto, principalmente en la fase de construcción.

## Bibliografía

<sup>1</sup> B.R.C. Villas, *Sustainable Development and the Advanced Materials*, Johnson Editor, Brasil, 1995.

<sup>2</sup> J.F. Shackelford, *Ciencia de materiales para ingenieros*, Pearson Education,

México, 1995.

<sup>3</sup> Whole Building Design Guide (WBDG), *Principios de diseño sustentable en edificación*, Gobierno de Estados Unidos, 2007. [www.wbdg.org](http://www.wbdg.org)

<sup>4</sup> R. Spiegel, *Green Buildings Materials, A Guide of Product Selection and Specification*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1999.

<sup>5</sup> BREEAM, *Método de evaluación medio-ambiental*, Modelo de Desarrollo Sustentable Europeo, Gobierno del Reino Unido, 1999.

<sup>6</sup> L.E. Alevantis et al., *Prácticas de edificación sustentable en el estado de California*, IX Conferencia Internacional sobre Calidad del Aire y Clima en el Interior de los Edificios, Monterey, California, 30 de junio a 5 de julio de 2002.

<sup>7</sup> National Association House Building (NAHB), *A Guide to Deconstruction; an Over View of Deconstruction with a Focus on Community Development Opportunities*, House Urban Department, 2000.

<sup>8</sup> The Partnership for Achieving Construction Excellence (PACE), *Field Guide for Sustainable Construction*, Universidad del Estado de Pennsylvania, 2004.

\*silverhm2002@yahoo.com.mx



Eugenia Benabib, 2003. *Pizarón con muro*, óleo sobre tela, 110 × 120 cm (detalle).

# Sensores a base de polímeros $\pi$ -conjugados

Juan Manuel Reyna González\* y Ernesto Rivera\* Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

## Introducción

Los polímeros se han utilizado tradicionalmente en aplicaciones eléctricas y electrónicas como aislantes, ya que presentan altas resistividades y excelentes propiedades dieléctricas; sin embargo, otras propiedades de estos materiales, como flexibilidad, estabilidad, elasticidad y fácil manejo, promovieron que se realizaran muchos estudios sobre ellos, que dieron como resultado el desarrollo de polímeros  $\pi$ -conjugados altamente conductores.<sup>1</sup>

Durante la década de los cincuenta, los semiconductores orgánicos se convirtieron en el foco de las investigaciones y se lograron obtener materiales que presentaban conductividades de hasta  $10^{-3}$  S/cm. En 1970 las investigaciones se multiplicaron notablemente al descubrirse que el poliacetileno podía oxidar-

se o reducirse a un estado altamente electroconductor.<sup>2</sup>

Los polímeros conductores y semiconductores son una nueva clase de materiales que exhiben la combinación inusual de propiedades típicas de los metales y los plásticos. El descubrimiento de estos polímeros, que son fuertes candidatos para sustituir a los conductores metálicos y semiconductores, provocó que un gran número de investigadores enfocara su interés en esta novedosa área, con el fin de obtener un polímero que presente propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y térmicas particulares. Los polímeros electroconductores son materiales que tienen en su estructura una secuencia conjugada alternada de enlaces sencillos y ( $C=C-C=C$ ), y se obtienen mediante reacciones de reducción u oxidación, seguidas de procesos de dopaje, lo que produce materiales



Kiyoto Ota, 2002. *Forma de fierro 1*, hierro colado, 60 × 45 × 18 cm.

con conductividades eléctricas de hasta  $10^5$  S/cm.<sup>2</sup>

Aunque muchos polímeros conductores presentan problemas de baja conductividad, dificultad de procesamiento y pobre estabilidad ambiental, se han utilizado en diversos aparatos, como baterías recargables, catalizadores, sensores químicos y biológicos (para medir radiación, gases tóxicos, humedad y pH), membranas para separación

magnéticas, inhibidores de corrosión y textiles conductores.<sup>3-6</sup> La tabla 1 muestra los diferentes usos de los polímeros conjugados que más se emplean en la industria.

### Sensores químicos

Un sensor es un dispositivo que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos, como energía, velocidad, tamaño, cantidad, etcétera.

## Muchos polímeros conductores tienen baja conductividad y pobre estabilidad ambiental, pero se utilizan ampliamente

de gases, dispositivos electro-ópticos, fotoconductores, electrocromáticos, semiconductores, fotovoltaicos, diodos electroluminiscentes, celdas solares, supercondensadores electroquímicos y transductores, superconductores, resistencias microelectrónicas y electro-

Puede decirse que un sensor es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro elemento. Por ejemplo, el termómetro de mercurio aprovecha la propiedad que posee el mercurio de

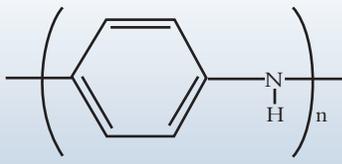
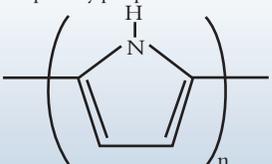
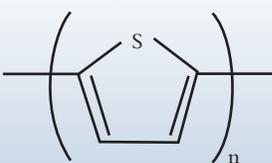


Kiyoto Ota, 2004. *Célula*, hierro colado, 80 × 55 × 30 cm.

dilatarse o contraerse por acción de la temperatura.<sup>8</sup>

Un sensor químico está formado por dos partes: un elemento de reconocimiento molecular que interactúa selectivamente con un determinado componente de la muestra y un elemento instrumental formado básicamente por un transductor (dispositivo capaz de transformar o convertir cierto tipo de energía de entrada en otra diferente de salida) de la señal producida cuando reconoce la molécula. Ambas partes pueden encontrarse físicamente separadas o integradas en el transductor. Éste, según el caso, convierte las señales primarias de reconocimiento (eléctricas, ópticas, térmicas o de masa) en señales secundarias, que normalmente son de campo eléctrico. Hay todo un espectro de posibilidades de inmovilización de receptores sobre los transductores, desde inmovilizaciones simples por adsorción, retención del receptor en un gel o una matriz polimérica o mediante entrecruzamientos de los receptores entre sí a través de agentes bifuncionales, hasta inmovilizaciones complejas logradas por la unión covalente entre el receptor y el transductor.<sup>8</sup>

Tabla 1. Aplicaciones de los polímeros conductores en dispositivos<sup>7</sup>

Polímeros conductores	Aplicación
Polianilina y polianilina sustituida 	Pantalla electrocromática Fotolitografía Batería recargable Condensadores electroquímicos Inhibidores de corrosión Sensores
Polipirrol y polipirroles sustituidos 	Pantalla electrocromática Baterías ligeras Sensores Celdas de energía solar
Politiofeno y politiofeno sustituido 	Electroluminiscencia Condensadores electroquímicos Material para el cátodo de baterías Sensores Microlitografía Inhibidores de corrosión

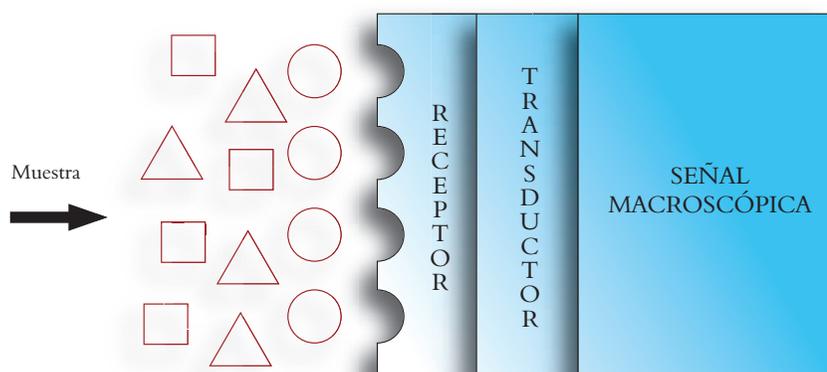


Figura 1 Principio del sensor químico.

La figura 1 muestra el principio de operación de un sensor químico: el receptor o elemento de reconocimiento molecular interactúa con la muestra y sólo reconoce un componente de ella a través de mecanismos físicos, químicos o biológicos. La señal proveniente del proceso de reconocimiento se convierte en una señal eléctrica mediante el transductor y se amplifica para producir una señal macroscópica.

### Clasificación de los sensores químicos

Los sensores químicos se clasifican,<sup>8</sup> según el mecanismo de transducción, en: a) dispositivos ópticos que transforman cambios de fenómenos ópticos, resultado de una interacción del analito con la parte receptora. Estos dispositivos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de propiedad medida, que puede ser absorbancia, reflectancia, luminiscencia, fluorescencia, índice de refracción, efecto termocrómico y dispersión de la luz.

b) Dispositivos electroquímicos que transforman en una señal útil el efecto de la interacción electroquímica entre el analito y el electrodo. Estos efectos pueden estimularse eléctricamente o ser el resultado de la interacción espontánea (en condiciones de corriente nula). Los sensores electroquímicos se clasifican en potenciométricos (monitoreo del voltaje), amperométricos (medición de la corriente) y conductimétricos (monitoreo de la conductividad o resistencia).

Los potenciométricos han demostrado su gran utilidad desde los años treinta debido a su simplicidad y bajo costo. Un exponente de la sencillez y utilidad de este tipo de electrodos es el de pH.

c) Dispositivos eléctricos basados en mediciones en las que no se llevan a cabo procesos electroquímicos y la señal se produce como consecuencia del cambio en las propiedades eléctricas causadas por la interacción del analito y el dispositivo. Es el caso de los sensores de metal-óxido-semiconductor, de semiconductor orgánico, de conductividad electrolítica y de permitividad eléctrica.

d) Dispositivos sensibles a la masa que transforman un cambio de masa sobre una superficie, especialmente modificada, en un cambio de una propiedad del material de soporte. El cambio de

masa se debe a la acumulación de analito. De este tipo son los dispositivos piezoeléctricos y los de onda acústica superficial.

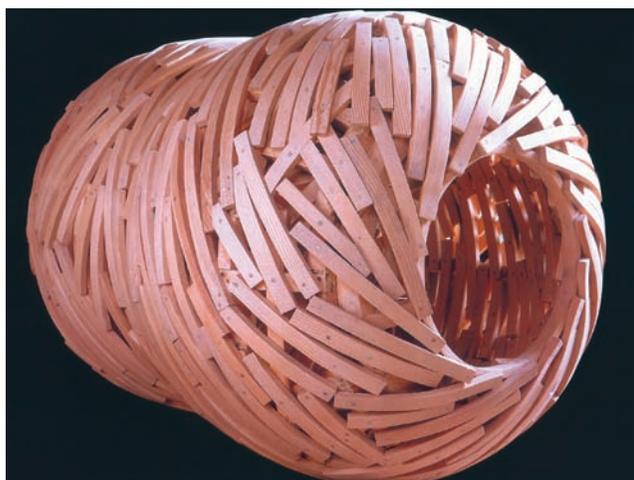
e) Dispositivos magnéticos que se basan en el cambio de las propiedades paramagnéticas del gas que se va a analizar.

f) Dispositivos termométricos que miden los efectos de calor de determinadas reacciones químicas o de adsorciones en las que interviene el analito.

g) Dispositivos radiométricos para la medición de las propiedades de las radiaciones, como por ejemplo rayos X, beta o gamma, que pueden ser la base de un sensor químico siempre que se utilicen para la determinación de la composición química.

### Polímeros $\pi$ -conjugados como sensores químicos

Los polímeros  $\pi$ -conjugados se han convertido en unos de los transductores más prometedores para la elaboración de sensores químicos. Esto está relacionado con las peculiares propiedades eléctricas, electroquímicas y ópticas de los polímeros conjugados en estado sólido que se emplean para convertir información química (concentración, actividad, presión parcial) en señales ópticas o eléctricas. Se sabe que los polímeros  $\pi$ -conjugados exhiben cambios en su espectro de absorción (cromismo) al provocar cambios conformacionales en ellos, ya sea al inducir la planaridad



Kiyoto Ota, 2004.  
Uteruz de pino,  
madera, 120 × 120 ×  
200 cm.

o torsiones mediante la aplicación de un estímulo externo. De acuerdo con el agente utilizado, el fenómeno puede denominarse termocromismo cuando es inducido por un cambio en la temperatura, fotocromismo cuando se promueve al irradiar con luz, ionocromismo cuando aparece con la presencia de iones, electrocromismo cuando se induce eléctricamente y afinitocromismo cuando resulta de la interacción del sistema  $\pi$ -conjugado con una especie química en particular. En este último tipo de cromismo se basan la elaboración de quimio y biosensores.<sup>9</sup>

La estructura básica de un sensor químico basado en un polímero  $\pi$ -conjugado o conductor está integrado principalmente por tres partes (figura 2): una cadena principal que consiste en un polímero  $\pi$ -conjugado con cierta libertad conformacional para que se produzcan rotaciones entre sus unidades repetitivas, un espaciador flexible y una entidad química unida al otro extremo del espaciador flexible capaz de reconocer, atrapar o fijar un compuesto químico o entidad bioquímica selectivamente. Al ocurrir la fijación química de la especie en cuestión por la unidad de reconocimiento, aumenta el efecto estérico, los grupos voluminosos se alejan por repulsión y el espaciador realiza un efecto de palanca sobre la cadena polimérica  $\pi$ -conjugada desviándola de la planaridad o torciéndola, lo que provoca cambios conformacionales amplificadas que se detectan.

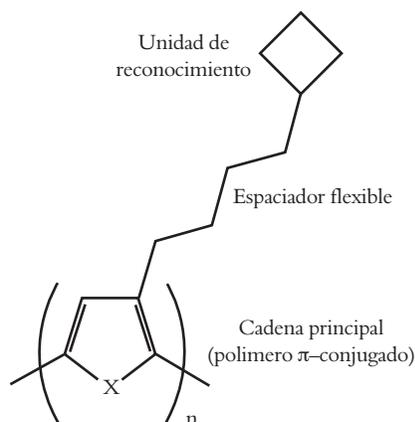
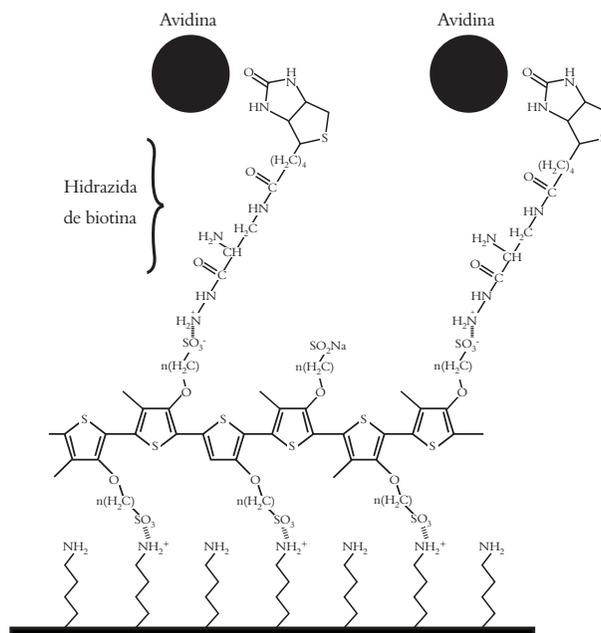


Figura 2. Estructura básica de un sensor químico que emplea un polímero  $\pi$ -conjugado.

Figura 3. Biosensor para detección de avidina.



### Biosensores

Los sensores químicos que incorporan materiales biológicos en su construcción se conocen como biosensores, por lo tanto biosensor no quiere decir un sensor de sustancias biológicas sino un sensor constituido por elementos biológicos. Un biosensor se puede considerar como la combinación de un biorreceptor, el componente biológico, y el transductor, es decir el método de

extenso en el control de la contaminación ambiental, ya que detectan gases tóxicos en la atmósfera y compuestos tóxicos solubles en el agua de los ríos: estos contaminantes incluyen metales pesados, nitratos, nitritos, herbicidas, pesticidas, etcétera.<sup>8,10</sup>

Un biosensor se muestra en la figura 3, en la que se aprecia la detección de la proteína avidina mediante una respuesta electroquímica de un electrodo

## Los polímeros $\pi$ -conjugados son transductores con mucho futuro para elaborar sensores químicos

detección. Esto es muy innovador, tanto en el campo de los sensores químicos como en la instrumentación analítica general. El efecto total de un biosensor es transformar un evento biológico en una señal eléctrica.

Actualmente los biosensores no son patrimonio exclusivo de la investigación biomédica, ya que la industria alimenticia demanda métodos rápidos para estimar la caducidad, el deterioro o la contaminación de los alimentos. Los biosensores también encuentran un uso

modificado. Este electrodo está compuesto de un sustrato sólido, que es el electrodo de óxido de estaño e indio (ITO) tratado con aminosilano, sobre el cual se encuentra una capa de poli(3-alcoxi-4-metil-tiofeno) modificado con un espaciador flexible conectado a una molécula de biotina, que es la unidad de reconocimiento que interactúa con la avidina.<sup>9</sup> La avidina es una proteína presente en la clara del huevo que se une a la biotina para impedir su absorción en el intestino, por lo que se debe con-

sumir perfectamente cocida. La avidina se desnaturaliza gracias al cocimiento y pierde su función. La biotina es una vitamina estable al calor, soluble en agua y alcohol, susceptible a la oxidación, que se encuentra ampliamente distribuida en los alimentos. La flora intestinal es capaz de sintetizar una cantidad considerable de biotina, que alivia los dolores musculares y la dermatitis, ayuda a combatir la depresión y la somnolencia, y es esencial para la síntesis y degradación de grasas y de ciertos aminoácidos; entre otros síntomas del déficit de biotina se encuentran la colitis, la anorexia y la anemia leve.

### Sensores de gases

La emisión de contaminantes gaseosos como el óxido de azufre, el óxido de nitrógeno y los gases tóxicos que desechan las industrias se ha convertido en un serio problema ambiental que nos concierne a todos. Los sensores se necesitan para detectar y medir la concentración de esos gases contaminantes. Para detectar gases y vapores peligrosos se emplean sensores amperométricos que consisten de una celda electroquímica en un flujo de gas, la cual responde a los gases y vapores que son electroquímicamente activos.<sup>10</sup> Este tipo de sensor consiste de un electrodo sensor (cátodo) y un electrodo contador (ánodo) separados por una capa delgada de electrolitos. El gas que se pone en contacto con el sensor reacciona en la superficie del electrodo



Kiyoto Ota, 2003. *Quinteto*, hierro colado, 200 × 85 × 23 cm.

provocando un mecanismo de oxidación o reducción (figura 4).

Los polímeros basados en compuestos heterocíclicos, como el polifurano, el politiofeno y el polipirrol, son conductores inherentes de la electricidad y sufren cambios en sus propiedades eléctricas y ópticas cuando se dopan con algún agente químico. Estos cambios en sus propiedades físicas se producen a temperatura ambiente cuando se exponen a pequeñas concentraciones de dopante, hecho que los hace candidatos muy atractivos como elementos detectores de gas. La conductividad eléctrica de los polímeros electroconductores

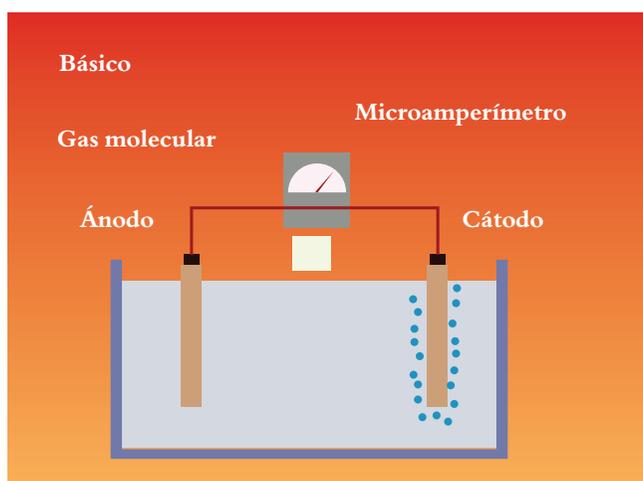


Figura 4. Sensor de gas.

disminuye cuando se exponen a gases nucleofílicos (amoníaco y etanol, vapores de etanol) y aumenta cuando están en presencia de gases electrofílicos ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ).<sup>10</sup>

### Sensores de pH

El pH indica la cantidad de iones hidrógeno presente en una solución. Debido a que el pH de una solución desempeña un papel trascendente en las reacciones químicas, su medición y control son muy importantes en muchas de las ciencias relacionadas con la química. El polímero más utilizado como sensor de pH en medios acuosos es la polianilina, que presenta cambios de color reversibles cuando cambia el pH de la solución, lo que se determina monitoreando la absorción a una longitud de onda fija o a la longitud de absorción máxima de la película.<sup>10</sup>

### Sensores selectivos de iones

Por lo general, los sensores de iones se han desarrollado tomando el polímero como el componente/sistema conductor o como la matriz para el sistema conductor. Cuando estos sistemas se ponen en contacto con el analito que se desea detectar, ocurre una interacción de intercambio iónico, que se transmite como una señal electrónica a un dispositivo. Los sensores de iones tienen una amplia utilización en análisis médicos, ambientales e industriales.<sup>10</sup> Dependiendo del tipo de ión que se quiera detectar será la unidad de reconocimiento, por ejemplo para el ión  $\text{Ag}(\text{I})$  se suele usar el éter corona hexatia-18-corona-6 (HTC),<sup>11</sup> para el ión  $\text{Cd}(\text{II})$  se emplea el éter dicitclohexano-18-corona-6 (DC)<sup>12</sup> y para el ión  $\text{Pb}(\text{II})$  el 1,10-bencil-1,10-diaza-18-corona-6 (BDC)<sup>13</sup> (figura 5).

La incorporación de estas unidades a un sensor basado en un polímero  $\pi$ -conjugado vía un espaciador flexible amplificará la señal, ya que éste actuará como palanca para ampliar la señal y aumentar el cambio conformacional en la cadena  $\pi$ -conjugada crómica-detectora, lo cual producirá mejores señales, más visibles y detectables y con menores concentraciones que si se usara la uni-

dad de detección directamente soportada sobre un electrodo.

### Sensores de alcohol

La determinación de alcohol es importante tanto en los análisis industriales y clínicos como en aplicaciones bioquímicas. Desde que los polímeros electroconductores empezaron a ganar popularidad como materiales para la fabricación de sensores para detectar vapo-

res orgánicos, se han publicado diversos artículos sobre el uso de la polianilina para construir sensores que detecten vapores de alcoholes, como metanol, etanol y propanol. Los polímeros derivados de la polianilina que se emplean como sensores para detectar vapores de alcoholes responden a éstos con un cambio en su resistencia.

## El pH, la determinación de alcohol o la medición de gases son importantes para muchas industrias

Mientras que la resistencia del polímero disminuye en presencia de alcoholes de cadena pequeña, como el metanol, etanol y propanol, ésta aumenta cuando se encuentra en presencia de vapores de butanol y heptanol. El cambio en la resistencia de los polímeros al exponerse

### Conclusiones

con estructuras muy variadas. Los sensores químicos basados en polímeros  $\pi$ -conjugados tienen un gran potencial para ayudar a resolver muchos de estos problemas ambientales que se producen todos los días. Además, estos materiales fortalecen notablemente la investigación científica, principalmente en el área biomédica.

### Bibliografía

- 1 R.W. Dyson, *Specialty Polymers*, Chapman & Hall, Londres, 1998.
- 2 H. Naarmann, *Ullmann's: Encyclopedia of Industrial Chemistry*, B. Elvers, S. Hawkins, G. Schulz (eds), Vol. A21, VCH,

Nueva York, 1992, pp. 429-445.

<sup>3</sup> D. Glatzhofer, S. Deshpande, G. Funkhouser, C. Neef, *Polymeric Materials Encyclopedia*, J. Salamone (ed.), Vol. 2, CRC Press, Nueva York, 1996, pp. 1439-1479.

<sup>4</sup> J. Kroschwitz, M. Howe-Grant (eds.), *Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 9, John Wiley & Sons, Nueva York, 1996, pp. 61-82.

<sup>5</sup> J. Perkins, *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, H. Mark, N. Bikales, C. Overberger, G. Menges (eds.), Vol. 5, John Wiley & Sons, Nueva York, 1989, pp. 462-501.

<sup>6</sup> D. Kumar, R.C. Sharma, "Advances in Conductive Polymers", *Eur. Polym.*, **34** [8] (1998), 1053-1060.

<sup>7</sup> K. Guranathan, A.V. Murugan, R. Marimuthu, U.P. Mulik, D.P. Amalnerkar, "Electrochemically synthesized conducting polymeric materials for applications towards technology in electronics, optoelectronics and energy storage devices", *Materials Chemistry and Physics*, **61** (1999), 173-191.

<sup>8</sup> M. Gómez, S. Alegret, "Los sensores químicos: una aportación a la instrumentación analítica", *Educación Química*, **8** [4] (1997), 191-196.

<sup>9</sup> M. Leclerc, "Optical and Electrochemical Transducers Based on Functionalized Conjugated Polymers", *Adv. Mater.*, **11** (1999), 1491-1498.

<sup>10</sup> B. Adhikari, S. Majumdar, "Polymer in sensor applications", *Prog. Polym. Sci.*, **29** (2004), 699-766.

<sup>11</sup> M. Mashhadizadeh, M. Shamsipur, "Silver (I)-selective membrane electrode based on hexathia-18-crown-6", *Anal. Chim. Acta*, **381** (1999), 111-116.

<sup>12</sup> V. Gupta, S. Chandra, R. Mangla, "Dicyclohexano-18-crown-6 as active material in PVC matrix membrane for the fabrication of cadmium selective potentiometric sensor", *Electrochim. Acta*, **47** (2002), 1579-1586.

<sup>13</sup> M. Mousavi, S. Sahari, N. Alizadeh, M. Shamsipur, "Lead ion-selective membrane electrode based on 1,10-dibenzyl-1,10-diaza-18-crown-6", *Anal. Chim. Acta* **414** (2000), 189-194.

\*jmrg76@hotmail.com

\*\*riverage@iim.unam.mx

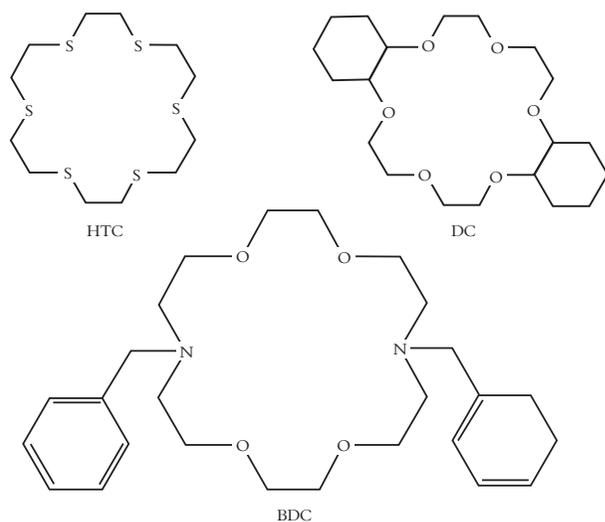


Figura 5. Unidades de reconocimiento HTC, DC y BDC, para detectar iones Ag (I), Cd (II) y Pb (II) respectivamente.

# Óptica no lineal en materiales orgánicos y polímeros

## México y Japón se unen con un mismo propósito

Ana Laura Pérez-Martínez\* y Takeshi Ogawa,\*\* Departamento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

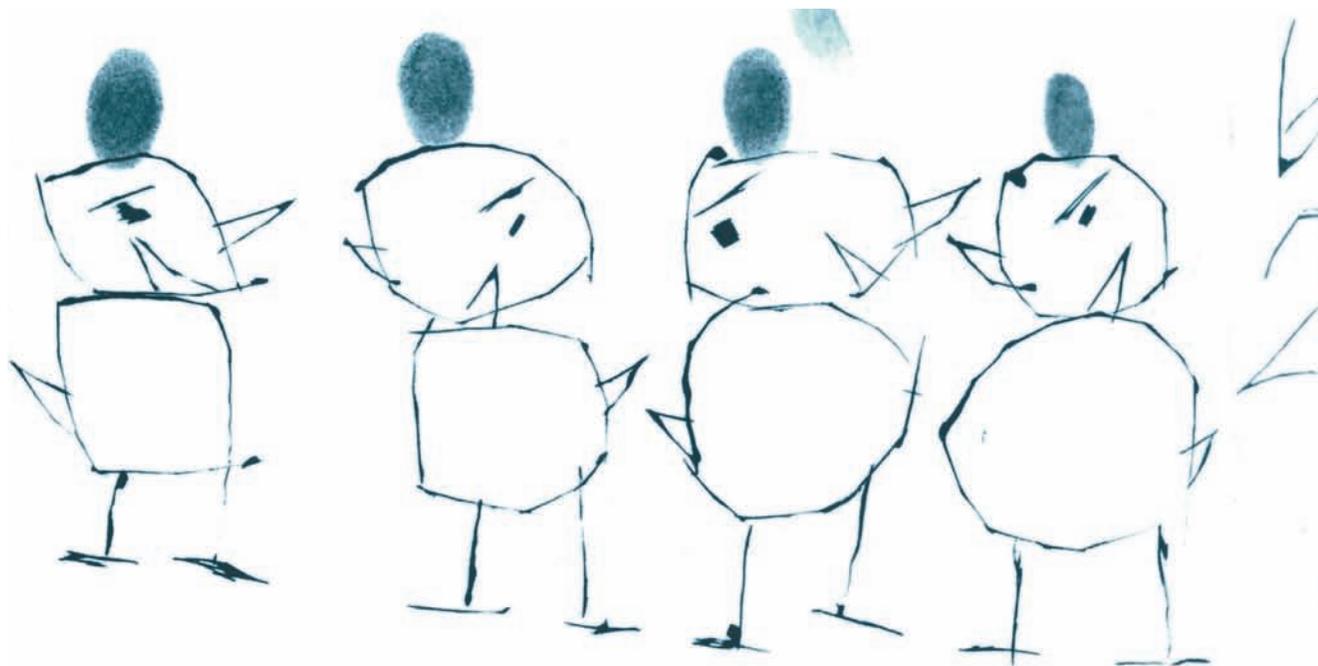
El presente artículo tiene la intención de dar al lector un panorama muy general de la óptica no lineal (ONL) de primer orden en polímeros y las ventajas que presentan estos materiales para aplicaciones en dispositivos fotónicos. Se ofrece un breve análisis de los principios de la óptica lineal, la no lineal y los fenómenos que ocurren como respuesta a la aplicación de campos eléctricos intensos, así como las principales características —estructurales y químicas— de los materiales poliméricos con tales propiedades, porque estos compuestos son de los más prometedores para aplicaciones prácticas.

### Resumen

En los últimos años se han llevado a cabo muchas investigaciones en materiales orgánicos que presentan propiedades

de ONL y están considerados como la base tecnológica para aplicaciones en fotónica<sup>1-5</sup> (control, generación y transmisión de la luz), gracias a las propiedades de estos materiales, que pueden generar nuevas frecuencias ópticas, modular, refractar y transmitir la luz de acuerdo con el índice de refracción del material, lo que los convierte en la parte medular de los dispositivos fotónicos.

De la misma forma que el microprocesador revolucionó la electrónica a partir de 1971,<sup>4</sup> la manipulación de información basada en las ciencias ópticas está a punto de convertirse en el motor de las futuras innovaciones tecnológicas. La fotónica tiene aplicaciones en casi todos los sectores industriales: tecnologías de la imagen, la información, las telecomunicaciones y la salud.



Carlos Vidal. Serie *Aviso de ocasión* (detalle).

Las ciencias ópticas, en particular la ONL, han tenido un desarrollo muy acelerado en los últimos años, principalmente con la invención del láser. Este hecho, aunado al desarrollo de materiales avanzados tanto orgánicos como inorgánicos, ha abierto la posibilidad de observar efectos de ONL con gran eficiencia, por lo que se ha convertido en una prioridad para la ingeniería de materiales.

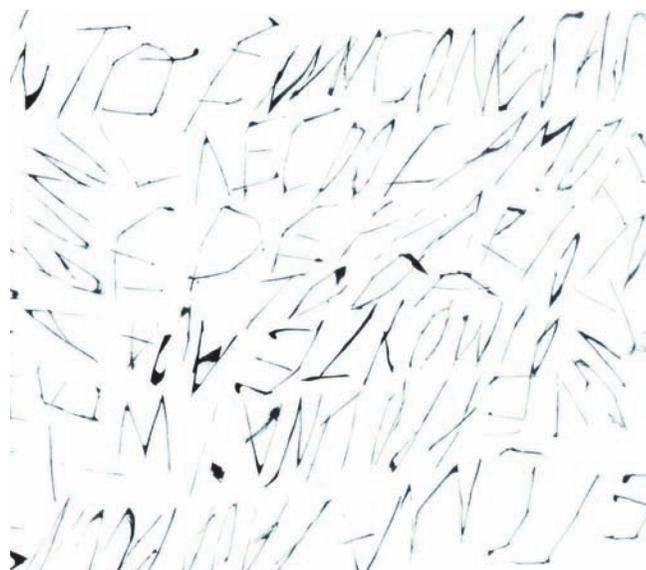
Dada la flexibilidad de la síntesis de compuestos orgánicos, la mayoría de los científicos especializados en este tema se ha abocado al estudio y desarrollo de nuevos materiales, cuyo parámetro de referencia son los materiales inorgánicos y sus respuestas ópticas.

### Óptica lineal y no lineal

#### La luz a través de un medio

La materia es un sistema molecular que posee cargas eléctricas que pueden interactuar con una onda electromagnética, de manera que el campo eléctrico de la luz ejerza una fuerza sobre las cargas

Carlos Vidal.  
Serie *Aviso de ocasión*  
(detalle).



energía hasta la detección en procesos de telecomunicaciones (por ejemplo, la fibra óptica).

La electrónica funciona con base en flujos electrónicos y es el principio

afecta al medio molecular con el cual interactúa. Al propagarse el campo eléctrico de la luz a través de la materia, ésta se comporta de forma cuántica y se produce un fenómeno de óptica lineal (refracción o absorción). La luz generada por fuentes comunes se propaga de manera lineal a través de medios homogéneos y transparentes. Así, ni las propiedades ópticas del material ni las de la luz (frecuencia e intensidad) se ven afectadas o transformadas. Existen, sin embargo, ocasiones en que al presentarse un campo eléctrico muy intenso (como un haz de luz producido por un láser, figura 2) el medio se modifica significativamente, muestra una sensibilidad al campo y se modifi-

## La óptica no lineal se volvió importante con la invención del láser en 1960

de la materia y sobre los dipolos, tanto de los átomos como de las moléculas, lo que provoca una vibración o una aceleración. Por tal motivo la luz transmitida y emitida, después de pasar por el material, tendrá ciertas modificaciones que dependerán del mecanismo que suceda durante la propagación de ésta a través del medio.

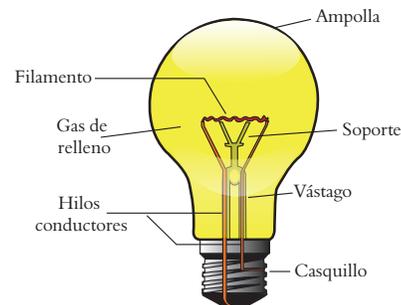
#### El futuro está en la fotónica

La fotónica es la ciencia que investiga y desarrolla la tecnología asociada principalmente con la generación y el control de la luz, cuya unidad cuántica es el fotón. Su propósito principal es la transmisión y manipulación de la información, usando los fotones como portadores de datos e instrucciones. El intervalo de aplicaciones de la fotónica se extiende desde la generación de

con el cual trabajan los aparatos correspondientes (radio, televisión, teléfonos, computadoras, etc.). Por otro lado, la fotónica se basa en el flujo de fotones. Algunos aparatos clásicos como cámaras fotográficas, telescopios, microscopios y otros más recientes como los lectores de códigos de barras o de CD y los apuntadores láser combinan una parte electrónica con otra fotónica y se conocen como aparatos optoelectrónicos, considerados como aparatos de transición en el mundo de la electrónica hacia una generación de aparatos puramente fotónicos.

### Óptica no lineal (ONL)

Generalmente la presencia de un campo óptico débil (como la luz producida por una lámpara incandescente, figura 1) no



Partes de un foco

Figura 1. Lámpara incandescente: es la fuente de luz artificial más próxima a la luz del día.

can sus propiedades, como el índice de refracción y la absorción, al pasar la luz a través del material. A su vez, el material puede modificar algunas características del haz, como su amplitud e incluso la generación de radiación a otras frecuencias (generación de armónicos); en estas situaciones se dice que se trata de un fenómeno óptico no lineal. Estos fenómenos de ONL no tuvieron mucha importancia hasta la invención del láser en 1960,<sup>7</sup> debido a la modificación de las propiedades ópticas de un material por la interacción de la materia simultáneamente con una o varias fuentes de radiación emitidas por láser.

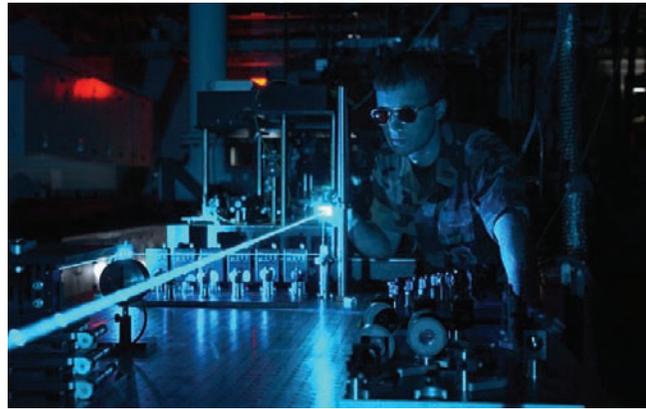
Al incidir un rayo de luz en el material puede suceder que la frecuencia del rayo sea igual a una frecuencia de transición entre dos niveles de energía del material, lo que da como resultado una emisión de luz o una absorción de radiación; sin embargo, si la frecuencia del campo electromagnético no corresponde a la frecuencia de resonancia del material, lo que sucederá es un desplazamiento de la distribución normal de las cargas eléctricas presentes en la materia; esto es lo que se conoce como polarización inducida. Si este efecto se presenta de forma no armónica da origen a los efectos de ONL. La luz tiene un campo eléctrico (E) que al interactuar con las cargas del material, como se dijo, provoca un desplazamiento de la densidad electrónica, lo cual resulta en un dipolo inducido con momento dipolar  $\mu$ . Lo anterior, para campos pequeños, se representa como sigue:

$$Polarización = \mu = \alpha E \quad [1]$$

donde  $\alpha$  es la polarizabilidad lineal del material. Este parámetro es una medida del grado de desplazamiento de los electrones bajo la presencia de un campo eléctrico (E).

Una respuesta lineal del material será aquella radiación que se reemite con la misma frecuencia ( $\omega$ ) que la de la radiación incidente (figura 3a) y una respuesta no lineal se producirá cuan-

Figura 2. Sistema láser. El láser es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente en un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados.



do la reemisión de la luz por medio del material tenga una frecuencia diferente, por ejemplo del doble ( $2\omega$ ) (figura 3b) o triple ( $3\omega$ ) de la frecuencia incidente. Los casos de respuestas no lineales se clasifican como generación de segundo ( $2\omega$ ) o tercer orden ( $3\omega$ ) y se denominan generación de segundo o tercer armónico respectivamente.

Si se tiene una respuesta óptica no lineal en el material debido a la interacción de la luz láser, ésta puede describirse con una serie de potencias (ecuación 2) para expresar el cambio inducido en el momento dipolar molecular en un material:

$$P(E) = \alpha E + \beta EE + \gamma EEE \quad [2]$$

donde P es la polarización electrónica, E el campo eléctrico aplicado,  $\alpha$  la polarizabilidad lineal,  $\beta$  la hiperpolarizabilidad lineal y  $\gamma$  la hiperpolarizabilidad cuadrática.

Ahora bien, si el material tiene un arreglo macroscópico, existirá una correspondiente polarización macroscópica en el bulto del material (ecuación 3), que puede expresarse en esta forma:

$$P(E) = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots + \dots \quad [3]$$

donde  $\chi^{(n)}$  es la susceptibilidad macroscópica. Este parámetro tiene una relación directa con los correspondientes términos moleculares ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ) y se obtiene mediante correcciones de interacciones moleculares y macroscópicas.

Al analizar la ecuación 3, el primer término se refiere a efectos de óptica lineal, el segundo corresponde a los siguientes fenómenos; por ser el primer término no lineal,  $\chi^{(2)}$  representa los términos no lineales de primer orden, es decir, generación de segundo armónico, suma de frecuencias, diferencia de frecuencias, rectificación óptica y efecto Pockels.

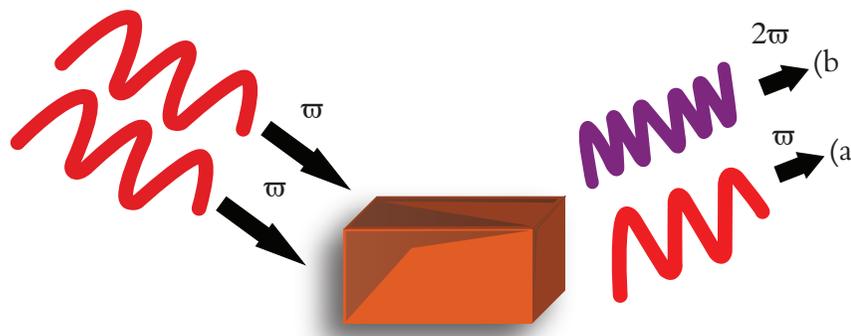


Figura 3. Procesos ópticos a) lineales y b) no lineales de primer orden (1-ONL).

Y el tercer término involucra los efectos de óptica no lineal de segundo orden: generación de tercer armónico, absorción de dos fotones, autoenfocamiento y efecto Kerr.

Los campos utilizados para que estos efectos se presenten se encuentran dentro del orden de  $10^3$  a  $10^6$  V/cm y con unas frecuencias que oscilan entre  $10^{15}$  y  $10^{18}$  Hz.<sup>8</sup>

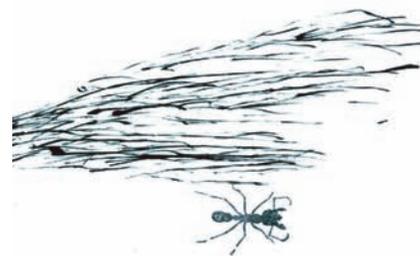
### Generación del segundo armónico (SHG)

La generación del segundo armónico es un proceso no lineal, en el cual los fotones interactúan efectivamente con un material no lineal, combinándose para formar nuevos fotones con el doble de energía y, por lo tanto, con el doble de la frecuencia y la mitad de la longitud de onda de los fotones iniciales. Este fenómeno se conoce como SHG por sus siglas en inglés (second harmonic generation).

miden), el término dominante de la polarización no lineal es generalmente el de primer orden, por esta razón, una condición para el estudio del segundo armónico es que el material a estudiar sea no isotrópico y no tenga centros de simetría.

### Materiales orgánicos para fotónica

En los últimos años ha crecido el interés por los materiales orgánicos con propiedades de ONL debido a que presentan gran versatilidad y son fácilmente adaptables para usos particulares. Un material ideal que podría tener usos potenciales en dispositivos fotónicos debe poseer una combinación de características fisicoquímicas que se enumeran a continuación:<sup>6</sup> gran eficiencia en la producción de algún efecto de ONL,  $\beta$  y  $\gamma$  elevadas, alto umbral de resistencia al daño del láser, respuesta óptica rápida, flexibilidad arquitectónica para diseño molecular y morfología, capacidad para



Carlos Vidal. Serie *Aviso de ocasión* (detalle).

## La respuesta no lineal se produce cuando la reemisión de luz por medio del material tiene una frecuencia diferente

La SHG se produce como una suma de frecuencias (ecuación 4), en la cual se suman dos ondas de luz con  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , que dan como resultado una onda con frecuencia  $\omega_3$ . Un caso especial para la SHG se presenta cuando ambas ondas de luz tienen la misma frecuencia  $\omega$  ( $\omega = \omega_1 = \omega_2$ ) e inciden sobre un material con propiedades de ONL de primer orden, lo que da como resultado la generación del doble de la frecuencia ( $2\omega = \omega_3$ ) (figura 3b).

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \quad [4]$$

Para sistemas no isotrópicos (la isotropía es la propiedad de ciertos cuerpos en los que uno o más parámetros no dependen de la dirección en que se

procesarse en forma de cristales, películas delgadas, etc., transparencia óptica, fácil fabricación (síntesis con reactivos no costosos), no tóxico, con alta resistencia a fuerzas mecánicas y estabilidad térmica.

Comparados con los materiales para ONL inorgánicos, los compuestos orgánicos pueden satisfacer todos los requisitos. Los materiales orgánicos ofrecen gran variedad de posibilidades para realizar modificaciones químicas y la mayoría de los inconvenientes que presentan otros materiales se pueden solucionar fácilmente con métodos físicos o químicos.

### Sistemas orgánicos para ONL

Desde 1964 diferentes grupos de investigadores han reportado en sus trabajos sobre ONL la generación del segundo

armónico (SHG), que se había observado en diferentes compuestos orgánicos; sin embargo fue en 1970<sup>9</sup> cuando Davydov y sus colaboradores reportaron una fuerte SHG en un compuesto orgánico que contenía un grupo aceptor y otro donador de electrones unidos por un anillo de benceno. Este descubrimiento creó el entendimiento básico de las estructuras orgánicas que pueden presentar grandes efectos de SHG y despertó gran interés en la búsqueda de nuevos materiales orgánicos que presentaran este fenómeno; este tipo de materiales son en la actualidad los compuestos más estudiados.<sup>10</sup>

Así, en general son tres los requisitos para tener actividad ONL en materiales orgánicos: polarizabilidad, se necesita una gran cantidad de electrones para perturbarse o desplazarse del estado de equilibrio; distribución de carga asimétrica (incorporación de grupos donadores (D) y aceptores (A) de electrones) y un ordenamiento de las moléculas sin centro de simetría.

Tales requisitos los cumplen los sistemas donador (D) y aceptor (A) de electrones unidos en las terminales opuestas por un sistema  $\pi$ -conjugado (figura 4). Los colorantes han sido moléculas claves para obtener este tipo de respuestas por contener regiones de distribución electrónica de carga deslo-

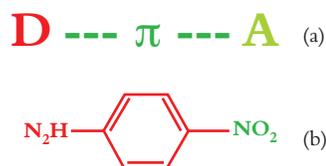
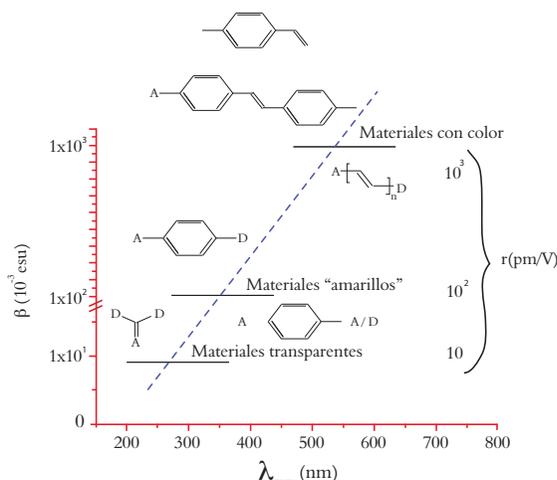


Figura 4. a) Ejemplo de la estructura de una molécula simple para aplicación en ONL, b) en el caso de la p-nitroanilina el NH<sub>2</sub> funciona como grupo donador y el NO<sub>2</sub> como grupo aceptor de electrones unidos por un sistema  $\pi$ -conjugado (anillo de benceno).

calizada (sistema  $\pi$ -conjugado), lo que permite gran movilidad de la densidad electrónica a lo largo de la molécula. Es deseable que el colorante empleado para ONL tenga una hiperpolarizabilidad  $\beta$  grande, que dependerá directamente de los grupos donadores y aceptores de electrones en cada extremo de la molécula, de la distribución electrónica, así como de la longitud de conjugación y la planaridad de la molécula, que es un factor importante en la actividad ONL (gráfica 1).

Levine y Oudar, así como Chemla<sup>10</sup> demostraron la importancia de  $\mu$  cuando calcularon la magnitud y señal de la  $\beta$  del nitrobenzono, la anilina y la p-nitroanilina (figura 5). En la tabla 1 se enlistan los valores de  $\beta$  para cada una de las estructuras moleculares donde claramente se nota la influencia intermolecular de los grupos donador-aceptor en el momento dipolar.

La posición de los grupos donador-aceptor en la p-nitroanilina la convierten en una molécula sin centro de simetría; las características de los grupos aceptor y donador de electrones resultan en una transferencia de carga. Todo esto en conjunto provoca que la molécula muestre un valor de  $\beta$  grande debido a la gran distribución asimétrica de carga



Gráfica 1. Se muestra la tendencia del diseño de las moléculas, donde se observa una tendencia lineal entre  $\beta$  y  $\lambda_{\max}$ . La conjugación de la molécula y la transferencia de carga en la misma influyen directamente en el color y la no linealidad de los compuestos moleculares;  $r$  es el coeficiente electro-óptico (EO).<sup>7</sup>

dada por la disposición de los electrones  $\pi$  en la molécula.<sup>10</sup>

Gracias a esta descripción puede verse la importancia de la estructura molecular, pues influye en la magnitud del valor de  $\beta$  y por lo tanto en la calidad de la molécula para aplicaciones en ONL.

En la tabla 2<sup>11</sup> se muestran algunos grupos funcionales con electrones  $\pi$  usados comúnmente para estudios de ONL, a los que se les puede agregar el sistema donador-aceptor de la tabla 3.

### ¿Por qué polímeros para ONL?

Existen varias razones para la incorporación de los polímeros a la ONL, pero entre las más importantes se encuentra la gran flexibilidad para añadirse a dispositivos. En estos materiales el efecto es eléctrico, lo cual asegura, en combinación con su baja constante dieléctrica (es decir, aislante), una alta velocidad de respuesta para los sistemas de comunicación del futuro. Además se han reportado coeficientes electro-ópticos (EO) (parámetros para saber qué tan eficiente es un material para dispositivos fotónicos) con valores superiores a 34 pm/V para polímeros funcionalizados con cromóforos que contienen propiedades de ONL orientados en una sola dirección, para que cumplan con el requisito de no isotropía. Mientras tanto, los valores reportados para materiales inorgánicos<sup>12</sup> se encuentran en alrededor de 32 pm/V, lo cual demuestra la ventaja de los com-

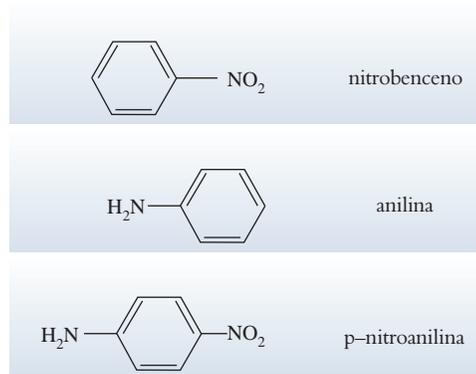


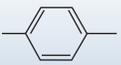
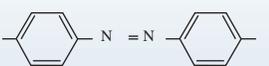
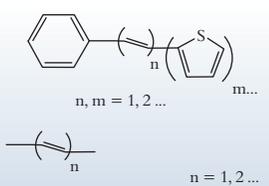
Figura 5. Importancia de los grupos donador-aceptor en la magnitud de la hiperpolarizabilidad.

Tabla 1. Hiperpolarizabilidades de nitrobenzono, anilina y p-nitroanilina

Molécula	Momento bipolar (D)	$\beta$ ( $10^{-30}$ esu*)	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
Nitrobenzono	3.93	1.97	1.318
		2.20	1.06
Anilina	1.56	7.9	1.318
		1.10	1.06
p-nitroanilina	6.29	21.1	1.318
		34.5	1.06

\* esu es una unidad electrostática que, para  $\beta$ , es el Sistema Internacional, equivale a  $\text{C}^3\text{m}^3/\text{J}^2$ .

Tabla 2. Grupos funcionales con electrones  $\pi$ 

Bencenos	
Estilbenos	
Azo-bencenos	
Tolanos	
Feniltiofenos Polienos	

puestos orgánicos sobre los inorgánicos. Aunado a esto, los polímeros, gracias a su gran versatilidad en la síntesis química, tienen la ventaja de su bajo costo de producción comparados con los cristales inorgánicos, buena calidad óptica (transparencia) y estabilidad física, mecánica, térmica y química.

El estudio de propiedades de ONL en materiales poliméricos se basó al principio en sistemas cristalinos de diacetilenos y rápidamente se extendió a materiales monocristalinos. En ambos casos, el origen del carácter de ONL se debe a la naturaleza de la molécula y en gran parte a la estructura del polímero. Los polímeros funcionalizados con  $D\pi A$  ( $D\pi A$  = sistema donador-sistema  $\pi$ -conjugado-aceptor) son una de las aproximaciones más prometedoras en el desarrollo de nuevos materiales para estas aplicaciones. En general existen tres estructuras de polímeros para utilizarse en ONL de primer orden; a continuación se presentan en orden creciente de estabilidad: sistemas dispersos, que son agregados de moléculas  $D\pi A$  sin una unión química con la matriz polimérica (sistemas receptor-huésped) (figura 6a); sistemas funcionalizados, con unión covalente entre los  $D\pi A$  y la cadena del polímero, que pueden estar como grupos colgantes o incluidos en

## Los polímeros, por su capacidad de repuesta, son los preferidos para los futuros sistemas de comunicación

la cadena principal del polímero (figura 6b) y sistemas entrecruzados de tipo covalente (figura 6c).

Una de las mayores desventajas de los sistemas dispersos es que tienen bajas temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), causadas por la incorporación del

$D\pi A$  y su distribución heterogénea en el polímero. Sin embargo se sigue haciendo uso de este tipo de sistemas debido a la facilidad para incorporar una variedad considerable de  $D\pi A$  a la matriz polimérica y la sencilla construcción de los dispositivos en diversos sustratos. Además ofrecen una baja constante dieléctrica y se puede trabajar en un amplio intervalo de frecuencias.

### Conclusión

Los sistemas funcionalizados ofrecen grandes ventajas, como el hecho de que pueden contener una alta concentración de  $D\pi A$ . Por medio del modelado químico se pueden hacer modificaciones en la molécula para obtener mayor respuesta, se pueden orientar los  $D\pi A$  con campos eléctricos para obtener una

menor relajación de esta orientación debido a la unión química que tienen con la cadena principal del polímero. La distribución del  $D\pi A$  es totalmente homogénea en una película delgada, lo que evita pérdidas por dispersión. Las ventajas son claras entre los sistemas

Tabla 3. Sistema donador-aceptor

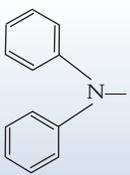
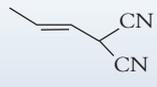
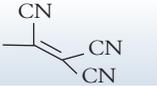
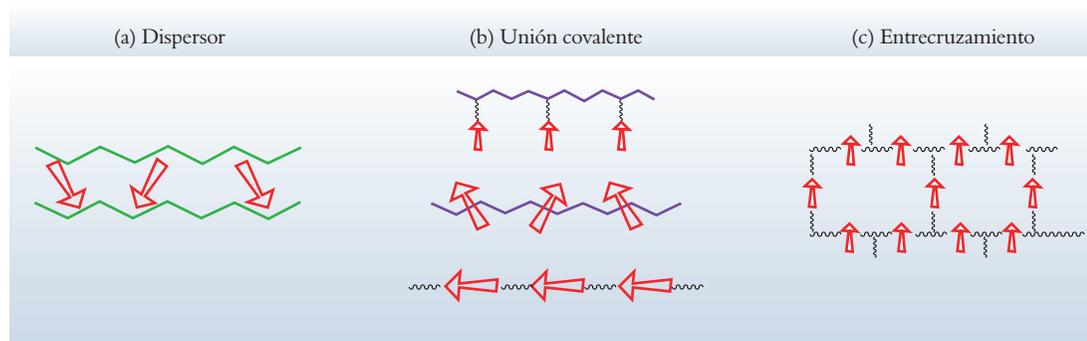
Donadores		Aceptores	
Nombre	Estructura	Nombre	Estructura
Aminio	$H_2N-$	Nitro	$NO_2$
Doialquilamino	$R_2N-$	Ciano	$-CN$
Difenilamino		Dicianoetileno	
Metoxi	$H_3CO-$	Tricianoetileno	

Figura 6. Los modelos más utilizados en la preparación de polímeros orientados, con propiedades de ONL de primer orden: a) sistema anfitrión-huésped, b) polímeros unidos covalentemente a cromóforos y c) polímeros reticulados.



dispersos y los funcionalizados, estos últimos muestran su superioridad.

Puede aumentarse la estabilidad en los sistemas funcionalizados por medio del entrecruzamiento de las cadenas principales del polímero, lo que permite obtener materiales muy estables física, mecánica, térmica y químicamente, y prolongar el tiempo de vida con respuesta ONL.

Muchos investigadores en todo el mundo han estudiado con gran interés el campo de la ONL en polímeros desde 1970 hasta el año 2000. Dichos estudios se han enfocado en que este tipo de materiales tiene la posibilidad de sustituir la tecnología electrónica por tecnología fotónica. Sin embargo, debido a problemas de baja estabilidad térmica y temporal y pobre susceptibilidad ONL no se han podido construir dispositivos eficientes. A pesar de estos problemas, recientemente en nuestro grupo hemos obtenido nuevos tipos de polímeros con excelente estabilidad y alta susceptibilidad ONL,<sup>13-15</sup> y esperamos que se utilicen en la construcción de dispositivos fotónicos.

La síntesis de nuevos y mejorados compuestos orgánicos para la construcción de dispositivos fotónicos parece inevitable. Efectivamente, hay un gran avance en materiales orgánicos y poliméricos, específicamente debido a la longitud de sus cadenas y su rápida respuesta no lineal. Sin embargo, construir cualquier dispositivo fotónico no es una tarea fácil, por lo que trabajar en equipos multidisciplinarios, donde la solución de múltiples problemas se pueda realizar en forma más eficiente por diversos

expertos, es lo más recomendable. En Japón se han hecho estudios sobre el tema y México tiene una colaboración bien establecida con los investigadores de ese país por medio de nuestro grupo de trabajo desde hace algunos años.

### Bibliografía

<sup>1</sup>Ye y T. Marks, "Synthesis of Molecular Arrays with Nonlinear Optical Properties. Second-Harmonic Generation by Covalently Functionalized Glassy Polymers", *Macromolecules*, **20** (1987), 2322-2324.

<sup>2</sup>K.D. Singer, M.G. Kuzyk, W.R. Holland, J.E. Sohn, S.J. Lalama, R.B. Comizoli, H.E. Katz, M.L. Schiling, "Electro-optic effects and second-harmonic generation in corona-poled polymer films", *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1988), 1800-1802.

<sup>3</sup>L. Arizmendi, "La física hoy", *Fotónica*, página de física de la UAM (<http://www.fisicahoy.com>)

<sup>4</sup>Revista *Tendencias Científicas* (<http://www.tendencias21.net>)

<sup>5</sup>F.A. Cruz Soto, Instituto Tecnológico de Costa Rica ([http://www.itcr.ac.cr/departamentos\\_escuelas/fisica/Boletin/Archivos/A2N5/Articulo1/ArticuloP1.htm](http://www.itcr.ac.cr/departamentos_escuelas/fisica/Boletin/Archivos/A2N5/Articulo1/ArticuloP1.htm))

<sup>6</sup>D.L. Wise, G.E. Wnek, D.J. Trantolo, T.M. Cooper, J.D. Gresser, *Electrical and Optical Polymer Systems*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

<sup>7</sup>H. Kuhn, J. Robillard, *Nonlinear Optical Materials*, CRC Press, Londres, 1992.

<sup>8</sup>S. Hernández, M.F. Beristain, T. Ogawa, "Diacytleno-containing polymers XII. Synthesis and characterization of dye-containing poly (hexa-2,4-

butadiynilenoxydibenzoates"; *Designed Monomers and Polymers*, **5** [1] (2002), 125-139.

<sup>9</sup>B.L. Davydov, L.D. Derkacheva, V.V. Dunina, M.E. Zhabotinskii, L.G. Kreneva, M.A. Samokhina, "Connection between charge transfer and laser second harmonic generation", *JEPT Lett.*, **12** (1970), 16.

<sup>10</sup>H.S. Nalwa, S. Miyata, *Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers*, CRC Press, Londres, 1997.

<sup>11</sup>J. Zyss, *Molecular Nonlinear Optics*, Academic Press, Londres, 1994.

<sup>12</sup>S.K. Yeshodha, Ch.K.S. Pillai, N. Tsutsumi, "Stable polymeric materials for nonlinear optics", *Prog. Polym. Sci.*, **29** (2004), 45-74.

<sup>13</sup>S. Hernández, T. Ogawa, T. Watanabe, S. Miyata, "Novel Diacytleno and Chromophore-Containing Polymers and their Second Order Nonlinear Optical Properties", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **374** (2002), 503-512.

<sup>14</sup>S. Hernández, H. Miura, M.F. Beristain, T. Ogawa, T. Watanabe, S. Miyata, "Novel Diacytleno-Containing Polymers for Second Order NLO Applications: Effect of Main Chain and Structure Property Relationships", *Macromol. Symp.*, **192** (2003), 123-133.

<sup>15</sup>A.L. Pérez-Martínez, G. Gómez-Sosa, T. Ogawa, "The Orientation Stability and UV Irradiation of Poly(hexa-2,4-diynilene-1,6-dioxy)benzoates and Cinnamates Containing Disperse Red 19", *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, **42** (2005), 1561-1572.

\*ana.laura@correo.unam.mx

\*\*ogawa@servidor.unam.mx

# PONA, S.A. DE C.V.

Equipo para Laboratorio  
Soporte Técnico  
Asesoría en Aplicación



#### MATRIZ

TREVIÑO 1233 PTE. CENTRO  
C.P. 64000 MONTERREY, N.L.  
TEL: (81) 83-74-18-50 FAX: (81) 83-75-62-66  
E-MAIL [pona@infosel.net.mx](mailto:pona@infosel.net.mx)

#### SUCURSAL MÉXICO

INSURGENTES CENTRO 132-303  
C.P. 06470 MÉXICO, D.F.  
TEL: (55) 55-66-48-50 FAX: (55) 55-66-44-66  
E-MAIL [ponamex@infosel.net.mx](mailto:ponamex@infosel.net.mx)

#### SUCURSAL GUADALAJARA

VIOLETA 226 INT. 8 COL. SAN CARLOS  
C.P. 44421 GUADALAJARA, JAL.  
TEL/FAX: (33) 36-50-04-50  
E-MAIL [ponagd@prodigy.net.mx](mailto:ponagd@prodigy.net.mx)

# Imágenes del interior de la materia

Alfonso Huanosta Tera, \* Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

---

## Introducción

En la investigación científica actual, una de las técnicas que más ha contribuido a la investigación y comprensión del mundo material es la microscopía electrónica. Su utilización se ha generalizado tanto que no es exagerado afirmar que, si no es indispensable, con frecuencia sí es necesaria. Mediante un microscopio electrónico puede obtenerse toda una gama de señales con las que se generan imágenes, pero también otro tipo de espectros provenientes de regiones sumamente pequeñas de los objetos que se quieren estudiar. Las fotografías de microscopía electrónica son casi cotidianas. La tecnología actual ofrece dos grandes vertientes de investigación con este medio: microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía electrónica de transmisión (MET). No es difícil establecer

una diferencia entre ambas: en el caso de la MEB, la información se recibe por el mismo lado de la muestra por donde llega el haz de electrones; un haz de electrones barre la superficie de la muestra, de modo parecido a lo que ocurre cuando se hace microscopía óptica por reflexión. En la MET, la información la llevan los electrones que atraviesan la muestra y salen por el lado opuesto al que entraron.

Una posible dificultad es que la información obtenida mediante un microscopio electrónico no siempre se comprende o interpreta correctamente. La razón es simple; no siempre se tiene una idea clara de cómo se genera la información en cada caso.

Desafortunadamente, este no es un tema que se incluya en aquellos programas de carreras en las que, algún día, será



Alfonso Huanosta Tera.

necesario utilizar la información proveniente de un microscopio electrónico.

La intención de este artículo no es describir la fenomenología involucrada en la investigación de materiales por medio de microscopía electrónica, pues el tema es amplio y complejo. Se abordan sólo algunos aspectos básicos relacionados con la formación de imágenes en un microscopio electrónico de transmisión. En la descripción utilizaremos resultados y conceptos conocidos de óptica clásica, óptica con luz blanca.

### ¿Cómo nos damos cuenta de que hay objetos frente a nosotros?

Comenzaré recordando algo simple, pero que tal vez por cotidiano no siempre se tiene presente. Recurrimos a imágenes, formadas en nuestro cerebro, para darnos cuenta de que hay objetos o gente a nuestro alrededor. Pero, ¿cuál es el fenómeno físico o el mecanismo que nos permite percatarnos de la presencia de algo?, ¿qué clase de vehículo transporta la información?, ¿qué origina la formación de imágenes en el cerebro?

Primero, lo que transporta la información necesaria para formar las imágenes es la luz que se dispersa en todas direcciones cuando choca con los objetos. Sabemos que la luz es radiación electromagnética, que posee la cualidad de comportarse como onda-partícula. Como onda, su movimiento ondulatorio tiene asociada una frecuencia ( $\nu$ ) de oscilación de entre  $0.4$  y  $1 \times 10^{15}$  Hz y se mueve a una velocidad ( $c$ ) límite,  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/seg. Las ondas que forman la luz tienen longitudes de onda diferentes, ya que  $\lambda_c = c/\nu$ . La importancia de esto último radica en que, como se sabe, la longitud de onda es la responsable del color y una de las características distintivas de una imagen es, precisamente, el color. Se sabe



Alfonso Huanosta Tera.

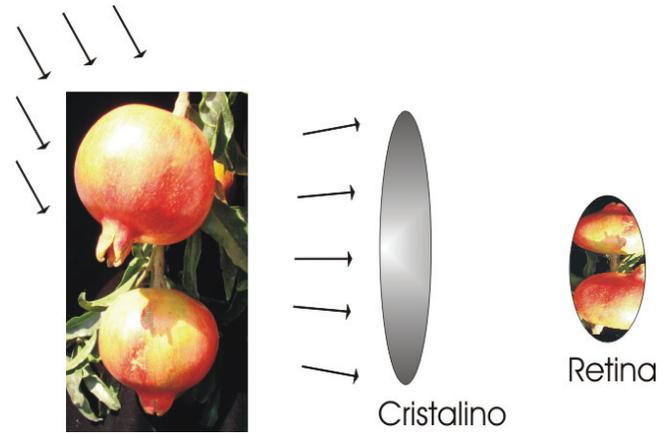


Figura 1. Formación en la retina de una imagen por medio del cristalino del ojo, nuestra lente maravillosa.

también que lo que percibimos como color rojo es radiación electromagnética con una cierta longitud de onda; el color verde tiene su propia longitud de onda, diferente de la del rojo o el azul. Las ondas luminosas, además, obedecen el principio de superposición; pueden interactuar entre ellas constructiva o destructivamente. El carácter de partícula (fotón) se manifiesta cuando la onda luminosa interactúa con un objeto.

Segundo, de la óptica clásica hemos aprendido que una lente es un dispositivo que se utiliza para colectar y cambiar la forma de un frente de una onda de luz. Esto puede hacerse a menudo con la intención de analizar la información óptica difundida a través de alguna región del espacio. Se aprende a reconocer la acción de las lentes simplemente formando imágenes, ya sea en una pantalla o en la retina de nuestros ojos. El ojo humano posee una lente maravillosa: el cristalino. Esta lente, que puede cambiar su distancia focal debido a requerimientos externos o por voluntad del hombre, es flexible y forma imágenes reales en una superficie sensible a la luz, la retina. La imagen, formada en la retina, la registra e interpreta el cerebro. El ojo humano es sensible a longitudes de onda entre 390 y 780 nm, aunque hay quienes pueden captar longitudes de onda entre 310 y 1050 nm.

### La iluminación

En la vida cotidiana se sintetiza la descripción de la interacción entre la luz y la materia con una sencilla palabra, "iluminar". Así que, cuando se ilumina un objeto, se provoca una interacción que afectará tanto al objeto como a la radiación electromagnética. Si permitimos que la luz del sol incida sobre un objeto, ésta se dispersará en todas direcciones, formando un complejo campo de radiación, como en la figura 1. La distribución espacial del campo de radiación debe ser una consecuencia de la forma en que ocurrió la interacción entre la luz y la materia. La radiación luminosa que se aleja del objeto debe portar, en forma codificada, información del objeto con el que interactuó; es decir, el patrón de radiación electromagnética

dispersada está determinado, necesariamente, por características propias del objeto dispersor.

Por otra parte, para reconocer la forma en que la radiación luminosa ha sido afectada por la interacción con la materia se requiere la presencia de dispositivos sensibles a las características de la luz. Un detector óptico, una pantalla, la retina del ojo humano son instrumentos de detección. Así, si el objeto sobre el que incide el haz de luz es una hoja de árbol, nos daremos cuenta de que la imagen es verde. Pero, ¿por qué? Porque los átomos o moléculas localizados en el lugar de incidencia de la luz tienen electrones susceptibles de cambiar de nivel energético si se les suministra una pequeña cantidad de energía. La radiación electromagnética incidente es portadora de la energía requerida. Para volver a sus estados naturales, estables, los átomos reemitirán radiación electromagnética de las mismas características, igual frecuencia de oscilación, de la que les cedió la energía para excitarse. En el caso de la hoja de árbol, la frecuencia de la radiación emitida corresponde al verde en el espectro visible, pero, ¿qué pasa con las otras frecuencias presentes en la luz? Puesto que en la hoja no existen átomos susceptibles de excitarse con otras frecuencias, entonces no habrá reemisión de luz con otras longitudes de onda que las correspondientes al verde y eso significa que las otras componentes ondulatorias de la luz han sido “absorbidas”. Este mecanismo de absorción de longitudes de onda se llama pigmentación.

### Las características de una imagen

Hay que hacer notar que el color que vemos de un objeto iluminado muy rara vez será puro. Esto se debe a que la luz dispersada por el objeto está formada, en realidad, por una



Alfonso Huanosta Tera.

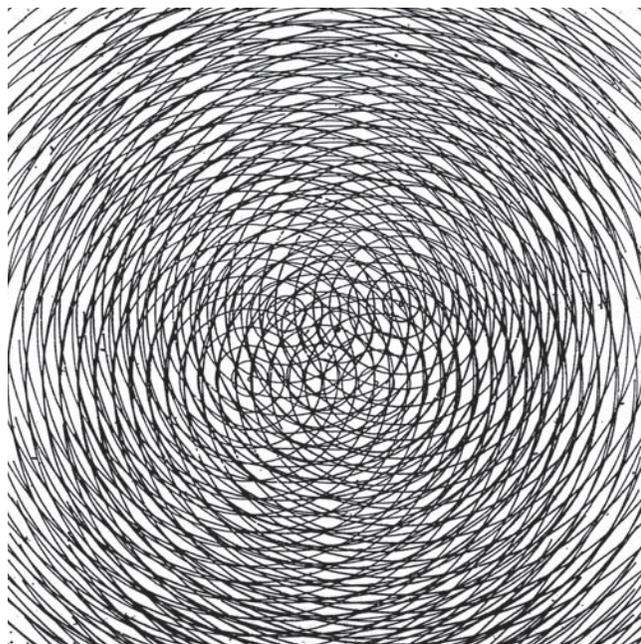


Figura 2. Descripción esquemática de la emisión de ondas luminosas desde un objeto donde ha incidido la luz. Nótese la compleja interacción ondulatoria para seis centros dispersores solamente.

mezcla de longitudes de onda, por un lado, como consecuencia de pequeñas diferencias en la frecuencia de oscilación de las componentes ondulatorias de la luz y, por otro, debido a que las ondas que abandonan el objeto iluminado interactúan entre sí, lo que altera la longitud de onda de la radiación dispersada y, en consecuencia, su cromaticidad. Cuando tiramos dos piedrecillas en un estanque con agua quieta ocurre que cada una de ellas genera un patrón circular de ondas que interactúan entre sí cuando se encuentran. El choque de las ondas produce un patrón de interferencia ondulatorio que modifica tanto la longitud de onda como la altura de las ondas. Esto mismo ocurre con las ondas luminosas, sólo que en este caso la cantidad de ondas involucradas es extraordinariamente grande y compleja, el evento llena el espacio de forma continua y produce imágenes que exhiben todos los detalles superficiales del objeto. En la figura 2 se ilustra la interacción de ondas generadas por seis centros de dispersión.

Es obvio que si una superficie es perfectamente plana, el aspecto de la imagen indicará que la superficie no tiene accidentes, no hay relieves que destacar, pero si la superficie tiene irregularidades, los detalles y tal vez el color de la luz dispersada reflejarán esas características. Lo mismo sucederá si el tipo de átomos o moléculas que forman la superficie son distintos en diferentes regiones. Si una región del objeto iluminado o todo absorbe todas las frecuencias de la onda luminosa incidente, entonces el objeto se “verá” negro; por otra parte, si la superficie iluminada reemite la radiación en ángulos que no favorezcan la captación de información en ciertos lugares del espacio, entonces la región correspondiente en la imagen se



Figura 3. La columna principal del microscopio electrónico de transmisión.

verá afectada en su apariencia visual. Existe una dependencia de la posición de observación: esta es la razón por la que es posible apreciar y estudiar detalles topográficos de un objeto iluminado y es también el origen de la perspectiva. Así, la descriptiva combinación de claros y oscuros, colores y matices, generados por la luz dispersada por un objeto iluminado es lo que se denomina imagen.<sup>1,2</sup>

### Los microscopios electrónicos de transmisión

El uso de la microscopía óptica ha rendido, sin duda, beneficios extraordinarios a la ciencia. Ahora, puesto que actualmente existe un interés creciente en la investigación de las características internas de la materia, se aprecian las limitaciones naturales que tiene este sistema. Una de ellas es que la energía de los haces de ondas de luz no son lo suficientemente energéticas como para penetrar en los materiales y poder extraer la información requerida. Un haz de luz natural no puede penetrar en una superficie sólida más que unos centésimos de nanómetro. Por supuesto, la tecnología actual pone a nuestra disposición una solución: los microscopios electrónicos. Un MET está formado principalmente por una columna óptica a muy alto vacío ( $\sim 10^{-6}$ - $10^{-7}$  Torr), que alberga las lentes de electrones, cuyas funciones se controlan desde el exterior; una lente de electrones es un dispositivo que puede cambiar la trayectoria de un haz de electrones. Las lentes formadoras de imagen en el MET utilizan campos magnéticos para deflectar los haces de electrones. Actualmente existen diversos cons-

tructores de microscopios electrónicos de transmisión, todos tienen un aspecto semejante al que se muestra en la figura 3.

Con estos equipos se puede acelerar un haz de electrones a velocidades del orden de  $c/2$ . Para un MET de 100kV, por ejemplo, la longitud de onda asociada al movimiento ondulatorio de los electrones es  $\lambda_e = 0.037 \text{ \AA}$ , del orden de cien veces más corta que  $\lambda_c$  de la luz y, en consecuencia, mucho más energética. Con la energía que alcanzan los electrones en el MET ( $v \sim 1.6 \times 10^8 \text{ m/seg}$ ) es posible penetrar en la materia sólida casi del orden de una micra,<sup>3</sup> de modo que, aunque de manera limitada, podemos iluminar el interior de los materiales (figura 4).

Los electrones pueden interactuar elásticamente o inelásticamente con los electrones y los núcleos de los átomos que forman el material. Como se mencionó, cuando hacemos microscopía electrónica de transmisión esperamos la información por el lado opuesto adonde penetran los electrones, por lo que es necesario preparar muestras cuyo espesor (no mayor de 1000  $\text{\AA}$ ) no limite la salida de las ondas de electrones que llevan la información. Aquí también se sintetiza la descripción de la interacción de los electrones con los átomos del material bombardeado con la palabra iluminación. Entonces, de igual forma que la dispersión de luz natural sirve como vehículo para darnos cuenta de las características de los objetos que tenemos delante, ahora utilizamos haces de electrones como forma de iluminación para tener un "panorama visual" del interior de la materia. Así, ¡podemos hacer fotografías del interior de la materia! Alguien dirá que esto no es novedoso. Quien ha tenido en sus manos una radiografía de alguna parte del cuerpo, habrá tenido la oportunidad de observar la forma de los huesos. La radiografía se obtiene "iluminando" el interior del cuerpo humano con rayos X; sin embargo los rayos X no son tan energéticos, su longitud de onda es más grande y su poder de penetración es inferior al de los electrones. Esta es la razón por la que se utilizan ondas de electrones para estudiar el interior de los materiales.

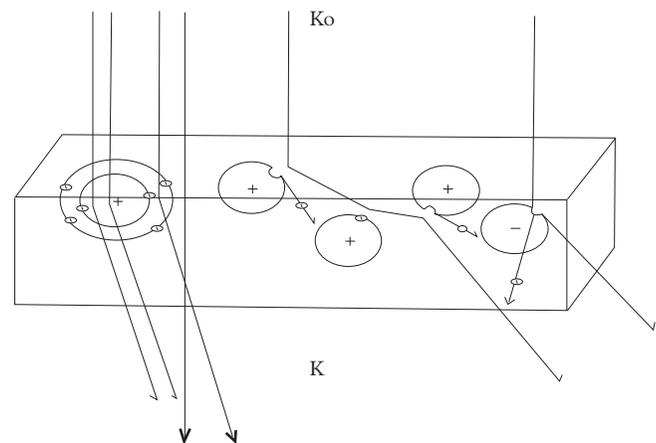


Figura 4. Un trozo minúsculo de material bombardeado con electrones previamente acelerados.

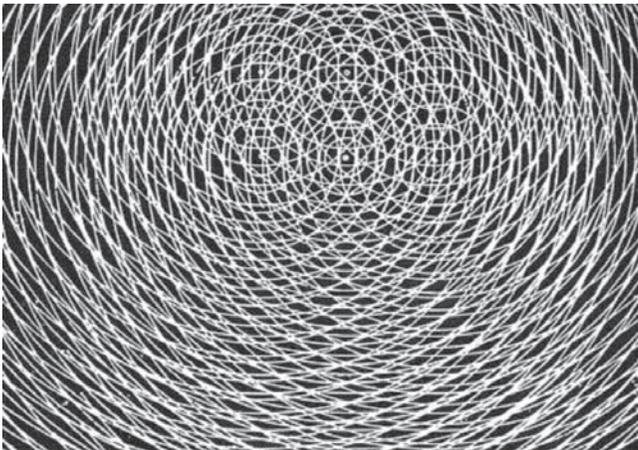


Figura 5. Iluminación del interior de un material cristalino. Las ondas viajeras se generan gracias a la interacción con seis centros dispersores colocados periódicamente en el espacio.

### Formación de la imagen en el MET

En una muestra que se observa en un MET, el haz de electrones puede verse como una sucesión de partículas cargadas o como un número grande de ondas viajando en el interior del material. Por una parte, estos haces exhiben un comportamiento dual, onda-partícula, como la luz; por otra, un hecho afortunado es que todos los tipos de radiación que se utilizan para la formación de imágenes poseen una característica unificadora: pueden estudiarse, entenderse o modelarse en términos de movimientos ondulatorios. Además, en el caso de los electrones, los esquemas teóricos desarrollados para la óptica clásica son válidos en la llamada óptica de electrones. De ahí que, al igual que en la óptica de luz común, un dispositivo que funcione como lente de electrones forma patrones de difracción de Fraunhofer de un objeto, a una distancia finita de la lente. Además, las lentes de electrones forman imágenes

en una relación uno a uno, entre los puntos que forman el objeto y los de la imagen. Una primera diferencia con respecto al caso en que se observan imágenes formadas por luz blanca, es que las imágenes con electrones son monocromáticas, ya que las ondas de electrones tienen un solo valor de longitud de onda.

Si la muestra que se estudia no es cristalina, entonces la información estará contenida en todo el campo de radiación emergente. Al penetrar en el interior del material, los electrones interactúan con los núcleos de los átomos que forman el material. Si para ilustrar este fenómeno imaginamos seis átomos del interior del material que sirvan como centros dispersores, entonces el tren de ondas emergente podría describirse mediante el dibujo de la figura 2. Las ondas de electrones que salen de la muestra transportan, en forma codificada, toda la información estructural del interior del objeto. Si la muestra es cristalina entonces la información puede captarse o registrarse en dos formas: primero, como una distribución angular de dispersión, formada por varios haces luminosos que deben satisfacer las condiciones de Bragg.

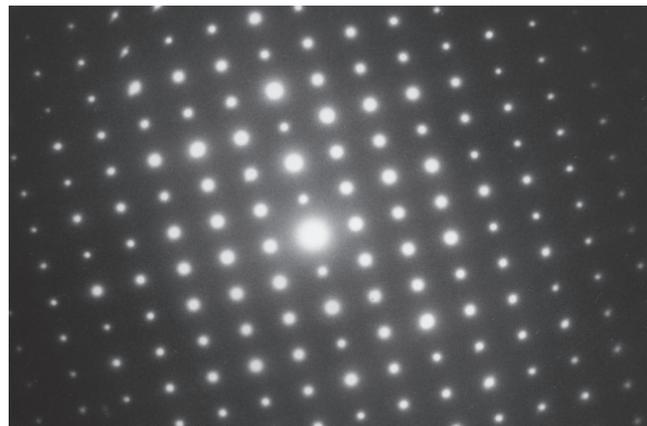


Figura 7. Patrón de difracción de un cristal cúbico, en la dirección cristalográfica [110].

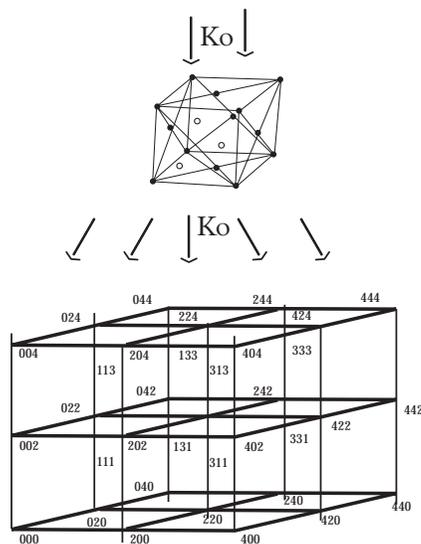


Figura 6. Distribución angular de intensidad dispersada (parte inferior) por una estructura cúbica centrada en las caras (parte superior).

Por supuesto, esto se debe a que el haz de electrones “ve” la red cristalina como una red de difracción. En la figura 5 las ondas de electrones interactúan con centros (núcleos atómicos) dispersores arreglados periódicamente en el espacio. Las ondas de electrones que salen del material poseen una distribución de valores de fase, relativos a la fase de la onda incidente. La distribución de fases dependerá de los valores del campo de potencial atravesado por las ondas en el material.<sup>4</sup> En ciertas direcciones, donde se cumplen las condiciones de Bragg, las ondas de electrones interactúan constructivamente y, en el espacio fuera de la muestra, se forman regiones con elevada intensidad electrónica dispersada.

La distribución angular de intensidad dispersada constituye lo que conocemos como red recíproca. A cada punto de esta red le corresponde una tríada de números; los índices de

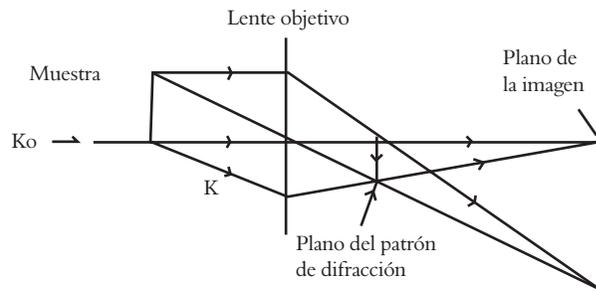


Figura 8. Formación de una imagen con haces de electrones mediante una lente magnética.  $K_0$  es el haz primario,  $K$  es un haz dispersado.

Miller. Así, la distribución de dispersión electrónica angular constituye un verdadero mapa de la red recíproca asociada con la estructura cristalina. Si el material estudiado tiene estructura cristalina cúbica centrada en las caras, por ejemplo, en la figura 6 se muestran algunos (no muchos) puntos de intensidad electrónica correspondientes a la distribución angular para esta estructura. En el trabajo de microscopía electrónica de transmisión, una sección transversal de esta red se conoce como patrón de difracción. En la figura 7 se muestra un patrón correspondiente al sistema cúbico, en la dirección cristalográfica [110].

Segundo, en el caso de la MET, también se puede obtener una distribución espacial de radiación dispersada que no sigue una distribución angular. Esta última clase de dispersión contribuye a formar imágenes. Tal como la interacción ondulatoria de haces de luz blanca nos ayudó a formar imágenes y distinguir detalles de los objetos que tenemos enfrente, la interacción ondulatoria que ocurre en un evento de dispersión de electrones nos permitirá conocer detalles de cómo está



Figura 9. En el eje vertical se grafica la intensidad que vería un observador parado en el plano normal, sección transversal, a la dirección de desplazamiento del haz de electrones.

constituida la materia. Esto es posible, por supuesto, debido a que la radiación dispersada está estrictamente determinada por los arreglos espaciales de los átomos que forman el material. En un MET, como en un microscopio óptico, la lente más importante es la lente objetiva.

En el esquema de la figura 8 se indican los lugares donde se formará el patrón de difracción y la imagen. La imagen se crea por recombinación de las ondas de electrones que formaron el patrón de difracción. Si otra lente del MET, en realidad un juego de ellas, utiliza el plano de la imagen como plano objeto y lo proyecta en la pantalla fluorescente del MET, veremos la imagen; pero si manipulamos el MET para que su lente intermedia utilice como plano objeto el plano del patrón de difracción, entonces veremos un patrón de puntos en la pan-

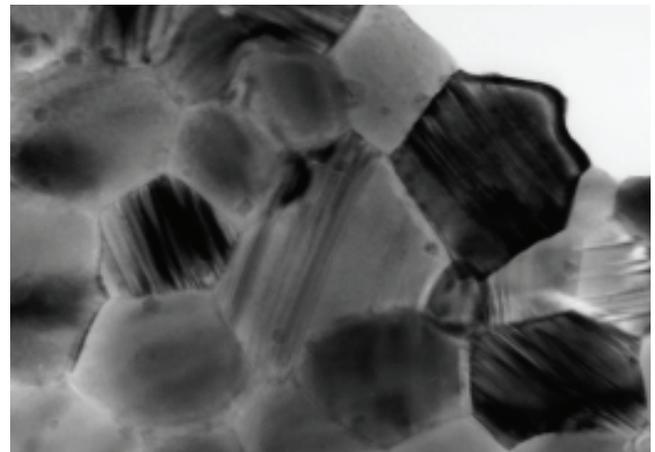


Figura 10. Estructura de granos de una aleación de níquel y cromo.

talla del MET. Si mediante algún mecanismo, por ejemplo interceptando con un diafragma, eliminamos los puntos de intensidad del patrón de difracción excepto uno de ellos, aún podemos obtener una imagen. Esto se debe a que en cada dirección de Bragg se dispersa una extraordinaria cantidad de ondas de electrones, de suerte que la “estructura fina” de cada punto del patrón de difracción debe poseer una cierta distribución de intensidad dispersada. Esto significa que si se grafica la intensidad dispersada en una dirección de Bragg, la gráfica podría verse como en la figura 9.

Si proyectamos esta distribución de intensidades sobre la pantalla del MET, la distribución de clarososcuros que se genere es precisamente la imagen. La combinación de clarososcuros forma un “mapa” detallado de la estructura cristalina en una dirección cristalográfica específica; la correspondiente al único haz que permitimos que formara una imagen. Entonces cuando se forma una imagen de MET sin limitar el número de haces del patrón de difracción la imagen correspondiente será, en realidad, una superposición de imágenes, una por cada punto del patrón de difracción. Si la imagen se forma utilizando el haz central del patrón de difracción, se dice que

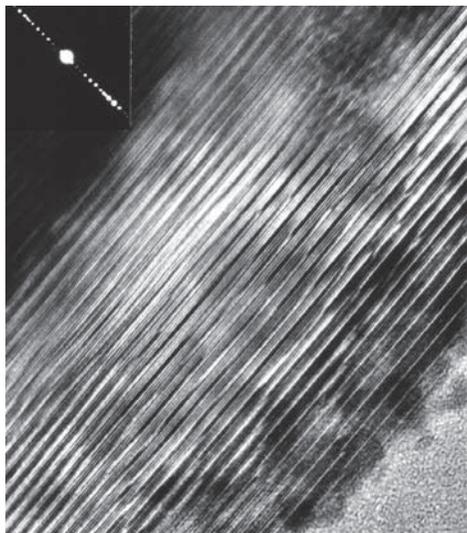


Figura 11.  
Fotografía de alta resolución de un compuesto de  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  adicionado con Ca.

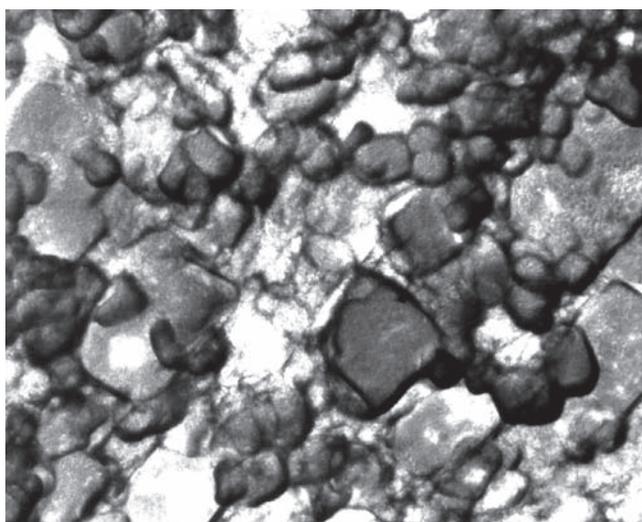


Figura 12. Aleación de Ni-Zn en la que se observa gran cantidad de precipitados.

la imagen es de campo claro, como la de la figura 10. Cuando se utilizan otros puntos del patrón para formar la imagen, se dice que ésta es de campo oscuro.

La interpretación de esto que llamamos imagen de microscopía electrónica de transmisión dependerá de nuestra habilidad y experiencia en este campo. De lo que no hay duda es que una fotografía, o una serie de ellas, puede ayudar a revelar detalles debidos a cualquier clase de anomalía en el arreglo espacial de los átomos que sirvieron como centros dispersores, tales como arreglos especiales de los átomos (fronteras de fase o fronteras de diversos tipos), pérdida de la periodicidad, defectos cristalinos (dislocaciones,...), ausencias masivas (fallas de apilamiento,...), conjuntos de átomos extraños (precipitados,...), etc. Esto es posible ya que un solo átomo, o un conjunto de ellos, puede dispersar un número suficientemente grande de ondas de electrones como para garantizar que ese

o esos átomos “harán sentir” su presencia en la imagen de MET.<sup>5</sup> Así, puede tenerse una idea clara de cómo está constituido el interior de la materia, de una manera semejante a como se distinguen detalles de las cosas que vemos en nuestro entorno.

En la figura 11 se muestra una fotografía de alta resolución de un compuesto de  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  adicionado con Ca. La estructura es de tipo aurivilus, basada en capas de  $(\text{Bi}_2\text{O}_2)_2^+$ , bandas oscuras en la fotografía. La imagen fue tomada cerca de la orientación [110]. Otra imagen de MET se muestra en la figura 12, esta es una aleación de Ni-Zn en la que se observa gran cantidad de precipitados.

El comentario final es que, por supuesto, no se han expuesto muchos detalles complejos, sobre todo matemáticos, del proceso de formación de imágenes en un MET, porque el esfuerzo se centró en una descripción comparativa con el proceso de formación de imágenes en la vida cotidiana. La literatura del tema es amplísima y el lector interesado no tendrá problema en localizar cuanta información requiera respecto a la técnica de microscopía electrónica de transmisión.

Antes de terminar, quiero agradecer los comentarios y el apoyo técnico de Carlos Flores y Raúl Reyes.

## Bibliografía

- <sup>1</sup> E. Hecht, A. Zajac, *Óptica*, Fondo Educativo Interamericano, México, 1977.
- <sup>2</sup> S. Freake, *An Introduction to Imaging. Imaging and information*, The Open University, Reino Unido, 1992.
- <sup>3</sup> P.B. Hirsch, A. Howie, R.B. Nicholson, D.W. Pashey, N.J. Whelan, *Electron Microscopy of Thin Crystals*, Butherwoth's, Londres, 1965.
- <sup>4</sup> L. Reimer, *Transmission Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer-Verlag, Alemania, 1997.
- <sup>5</sup> D.B. Williams, C.B. Carter, *Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science*, Plenum Press, Nueva York y Londres, 1996.

\*huanosta@servidor.unam.mx



Alfonso Huanosta Tera.



Programa de  
Maestría y Doctorado en

# CIENCIAS QUÍMICAS

Entidades participantes:

- Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán
- Facultad de Química
- Instituto de Ciencias Nucleares
- Instituto de Investigaciones en Materiales
- Instituto de Química

- Más de 130 tutores que realizan investigación en todas las áreas de la Química.
- Becas de CONACYT para alumnos con promedio mínimo de 8.
- Doctorado evaluado por el CONACYT como competente a Nivel Internacional.



Registro al examen de admisión  
en septiembre y mayo

Información detallada en:

<http://cienciasquímicas.posgrado.unam.mx>

# Premio 2007 a la mejor tesis doctoral en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales

---

El 28 de septiembre de 2007 se llevó a cabo, en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, la ceremonia de entrega del “Premio a la mejor tesis doctoral en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales 2007”, con la presencia del doctor René Drucker Colín, Coordinador de la Investigación Científica de la UNAM. El director del Instituto de Investigaciones en Materiales, el doctor Luis Enrique Sansores Cuevas, anunció que el jurado del certamen declaró ganadora a la doctora Erika Bustos Bustos por la tesis titulada: “Diseño, construcción y caracterización de superficies modificadas organizadamente con dendrímeros PAMAM y compuestos electro y foto-activos”.

La doctora Bustos Bustos realizó sus estudios de doctorado en electroquímica en el Centro de Investigación y Desarrollo

Tecnológico en Electroquímica, S.C., en Querétaro, bajo la dirección del doctor Luis Arturo Godínez Mora-Tovar, graduándose el 18 de enero de 2007.

El doctor Sansores Cuevas anunció que el jurado acordó otorgar, en esta ocasión, mención honorífica al doctor Víctor Tapio Rangel Kuoppa por la tesis titulada: “Electrical characterization of nitrogen containing III-V semiconductors”. El doctor Tapio Rangel realizó sus estudios de doctorado en ciencias (tecnología) en Helsinki University Technology, en Helsinki, Finlandia, bajo la dirección del doctor Antero Markku, y se graduó el 19 de marzo de 2007.

Durante la ceremonia el doctor Sansores Cuevas comentó que ésta es la duodécima ocasión en que se realiza el certamen, que tiene carácter nacional y que los participantes pueden ser



Gilda Castillo. Serie *Enmudeció mi playa*.

mexicanos o extranjeros; para los primeros se requiere que el doctorado lo hayan obtenido en cualquier universidad del mundo, mientras que para los segundos es necesario que lo hayan obtenido en una institución educativa mexicana. Recordó que en este certamen también se estimula al director de la tesis premiada, siempre y cuando éste se encuentre adscrito a una institución educativa mexicana. Por tal motivo, en esta ocasión, se hizo la entrega del premio al doctor Luis Arturo Godínez Mora-Tovar, del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, por la dirección de la tesis de la doctora Erika Bustos Bustos.

El jurado estuvo integrado por el doctor Dwight Roberto Acosta Najarro (Instituto de Física, UNAM), el doctor Edgar Enrique Camps Carvajal (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), el doctor Gerardo García Naumis (Instituto de Física, UNAM), el doctor Renato Lemus Casillas (Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM), el doctor Armando Ortiz Prado (Facultad de Ingeniería, UNAM), el doctor Manuel Salmón Salazar (Instituto de Química, UNAM), el doctor Rubén Santamaría Ortiz (Instituto de Física, UNAM).

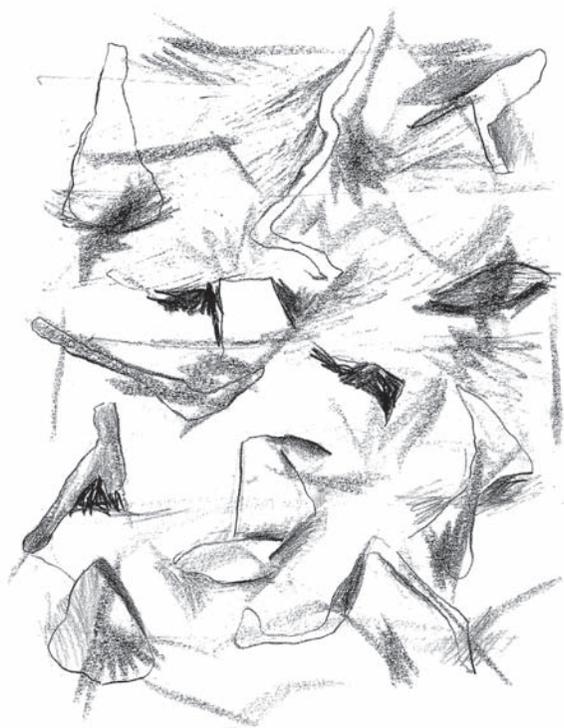
A continuación se presentan los resúmenes de las tesis galardonadas.

### **Diseño, construcción y caracterización de superficies modificadas organizadamente con dendrímeros PAMAM y compuestos electro y foto-activos de la doctora Erika Bustos Bustos**

Las superficies modificadas organizadamente se diseñan para maximizar las propiedades electro y fotocatalíticas de los procesos electroquímicos, con el fin de evitar fenómenos de saturación o pasivación de la superficie. En esta tesis se proponen superficies construidas de manera organizada con dendrímeros PAMAM, así como con compuestos electro y foto-activos para que los procesos de transferencia electrónica sean más eficientes.

### *Para evitar fenómenos de saturación de la superficie se diseñan superficies modificadas*

La tesis consta de cuatro capítulos: en el primero se presentan superficies de oro modificadas electrostática o covalentemente en presencia de dendrímeros PAMAM con grupos terminales aminados y carboxilados, sobre los cuales se preconcentra y organiza azul de Prusia, que sirve como electrocatalizador en la electro-oxidación del ácido ascórbico y la electrorreducción del peróxido de hidrógeno. En el segundo, se muestra la construcción de electrodos de carbón vítreo modificados con agregados de dendrímeros PAMAM,



Gilda Castillo. Serie *Enmudeció mi playa*.

nanopartículas metálicas de Ir, Os, Pd, Pt, Rh y Ru para llevar a cabo la detección electroquímica acoplada a la determinación espectrofotométrica de dopamina en muestras reales de orina, mediante la técnica de separación de la cromatografía de líquidos de alta resolución.

En el tercer capítulo se presenta la construcción de electrodos nanocristalinos semiconductores de  $\text{TiO}_2$  modificados con mono y multicapas de fullereno  $\text{C}_{60}$ , mediante un crecimiento dendrítico y lineal, para usarse como electrodos sensibilizados en celdas solares. En el cuarto, se estudia la interacción supramolecular entre superficies de oro modificadas con dendrímeros PAMAM con grupos ferroceno terminales y la  $\beta$ -ciclodextrina para formar complejos de inclusión a nivel interfacial, interacción que se comprobó mediante isotermas de adsorción tipo Frumkin.

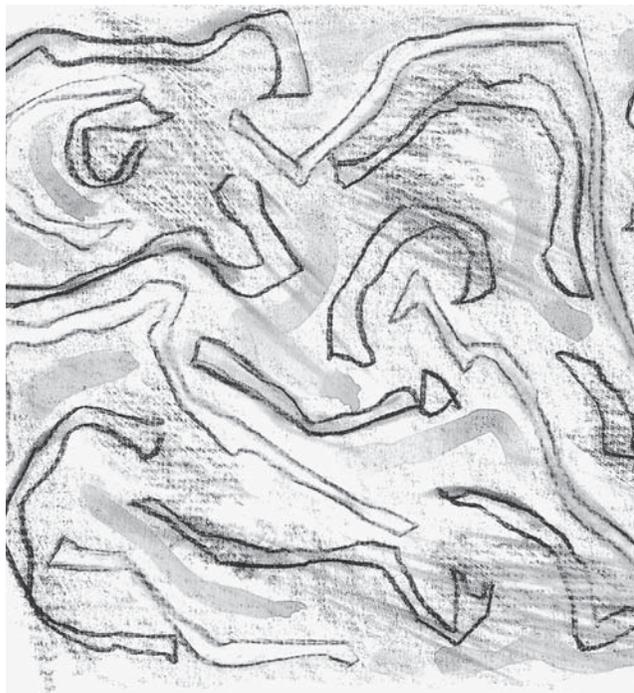
### **Electrical characterization of nitrogen containing III-V semiconductors del doctor Victor Tapio Rangel Kuoppa**

Es fundamental aumentar la velocidad de transmisión de datos; por ejemplo, los requerimientos de velocidad de transmisión de bits en redes locales han aumentado de 100 Mbps a 10 Gbps, y la única solución viable es el uso de la fibra óptica. En este ejemplo, la transmisión de información se hace a través

del envío de señales de luz y para aprovechar con eficiencia la fibra óptica deben usarse señales de luz con longitudes de onda de 850 nm, 1.3 y 1.55  $\mu\text{m}$ , porque para estos valores la fibra óptica tiene mínimos locales de atenuación (850 nm y 1.3  $\mu\text{m}$ ) y de dispersión (1.3 y 1.55  $\mu\text{m}$ ). Sólo láseres que emitan en estas longitudes de onda pueden controlar con precisión la duración y repetición del pulso para el envío de datos. Los láseres se construyen con semiconductores que tienen el ancho de banda indicado para emitir en esas longitudes de onda. En el caso que nos interesa (1.3 y 1.55  $\mu\text{m}$ ), esto corresponde a anchos de banda de 0.7 a 1 eV. El GaInAs, GaINAs y el InN cubren este requisito, por eso es fundamental conocer sus propiedades eléctricas.

En el trabajo se investiga la presencia de niveles profundos en el GaInAs y el GaINAs y el resultado fue que se encontraron tres niveles profundos en el GaInAs y hasta cinco en el GaINAs. También se estudia su comportamiento con respecto a tratamientos térmicos: la densidad de los niveles profundos depende mucho del dopaje del semiconductor y la temperatura del tratamiento térmico. Se espera que estos resultados sean útiles para los investigadores de láseres que usen estos materiales, puesto que proveen dos mecanismos (tratamiento térmico y dopaje) para controlar la presencia de los niveles profundos.

En cuanto al InN, es un material poco estudiado y para obtener mayor información es necesario hacer mediciones



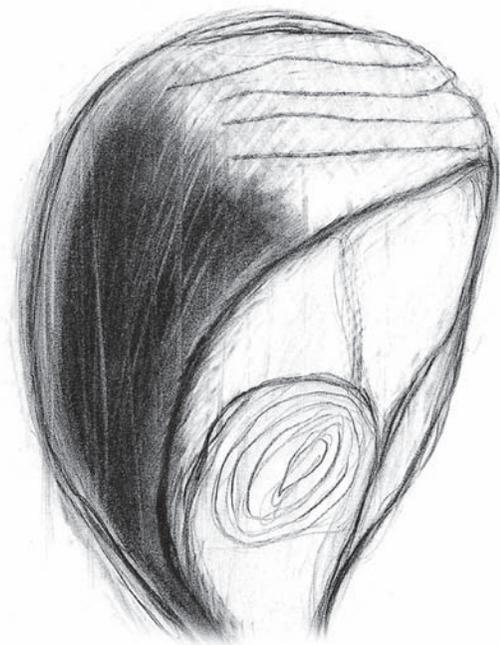
Gilda Castillo. Serie *Enmudeció mi playa*.

eléctricas de estructuras p-n o diodos Schottky. Hasta ahora ha sido imposible obtener material tipo p, por lo que la única opción es usar contactos Schottky. Se probaron varios contactos metálicos en el InN (Au, Ag, Pt, Pd, Cu, Ni, Ge, Ti, Cr y Al) y sólo el Pt y el Ge formaron contactos Schottky, aunque muy inestables; todos los demás metales produjeron contactos óhmicos.

Finalmente se prueba qué ocurre con los contactos de Al

## *La velocidad de transmisión de datos puede aumentar gracias a la fibra óptica*

cuando se tratan térmicamente. Un tratamiento de 550 °C durante un minuto genera comportamiento rectificante y esto se explica debido a la formación de una capa de AlInN con mayor ancho de banda entre el Al y el InN. Se espera que todos estos resultados resulten útiles para quienes investigan el InN: por una parte provee futuras herramientas para estudiar el material mediante contactos Schottky y, por otra, los contactos de Al tratados térmicamente podrían ser útiles para los interesados en utilizar el material en celdas solares, puesto que recientemente se ha sugerido hacer una estructura que evolucione del InN, con su pequeño ancho de banda (0.7 eV), hasta el AlN (con ancho de banda de 6 eV).



Gilda Castillo. Serie *Enmudeció mi playa*.

## SPECTRAMEX, S.A. DE C.V.

CTO. CIRCUNVALACIÓN PONIENTE NO. 1-302,  
CD. SATÉLITE, EDO. DE MÉXICO, CP. 53100, MÉXICO.

E-MAIL 1: [gpicco@compuserve.com](mailto:gpicco@compuserve.com)

E-MAIL 2: [spectramex@aol.com](mailto:spectramex@aol.com)

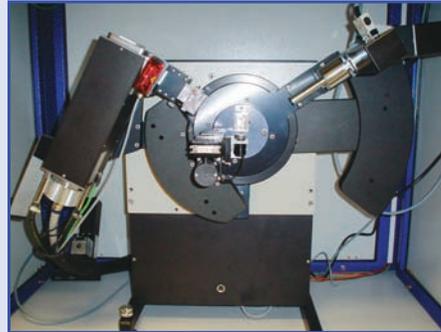
TEL: +52 (55) 55629289

FAX: +52 (55) 53930318



## VENTA Y SERVICIO DE EQUIPOS ANALÍTICOS DE RAYOS X

JEOL, GBC, OXFORD DIFFRACTION, ANTON PAAR, HERZOG, CLAISSE, EDMUND BÜHLER, KATANAX



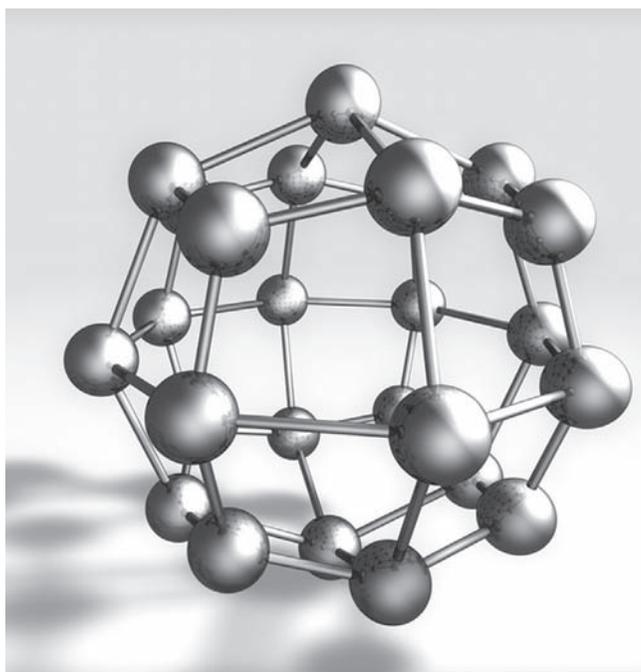
DIFRACTÓMETROS DE RAYOS X PARA SÓLIDOS, POLVOS, LÍQUIDOS, TERMODIFRACCIÓN  
DIFRACTÓMETROS DE RAYOS X MULTIPROPÓSITOS  
DIFRACTÓMETROS DE RAYOS X PARA MONOCRISTALES OXFORD DIFFRACTION  
DIFRACTÓMETROS DE RAYOS X PARA BAJO Y GRANDES ÁNGULOS  
DETECTORES SENSIBLES A LA POSICIÓN  
ESPECTRÓMETROS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X, MARCA JEOL  
EQUIPOS DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS (PRENSAS, MOLINOS Y EQUIPOS DE FUSIÓN)

# Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz

Enrique Sansones Cuevas

El 7 de marzo de este año fue entregado el reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz. En esta ocasión el Consejo Interno del Instituto de Investigaciones en Materiales decidió que le correspondía a la Técnica Académica I.Q. Aurelia María Leticia Baños López, por considerar que su trayectoria académica la hace merecedora de esta distinción.

Aurelia María Leticia Baños López nació en la ciudad de Oaxaca. Realizó estudios de licenciatura en química e ingeniería química y de maestría en ciencia de materiales en la Universidad Nacional Autónoma de México. Inició su carrera académica como tesista becaria del Instituto de Física de la UNAM. Se incorporó laboralmente a la Comisión Nacional de Energía Nuclear en 1965, al Consejo de Recursos Minerales en 1967 y al IIM en 1982, cuando el instituto adquirió un equipo de difracción de rayos X.



Actualmente se desempeña como Técnica Académica Titular B de tiempo completo en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, nivel D del PRIDE y nivel I del Sistema Nacional de Investigadores. Su formación académica se ha desarrollado en el área de la química, de la ingeniería química y del estudio de los materiales, y está especializada en el campo de los métodos analíticos, fluorescencia y difracción de rayos X, actividad iniciada con su trabajo de tesis y complementada a través de cursos de especialización tanto en el país como en el extranjero. En este campo desarrolla gran variedad de aplicaciones prácticas.

Su labor se ha enfocado a apoyar la investigación, la docencia y las actividades de difusión en el campo de la ciencia de los materiales. Es coautora de cincuenta artículos publicados y ha participado como coautora en más de 150 trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales. Ha impartido gran número de cursos en instituciones nacionales y también más allá de nuestras fronteras, lo que la ha llevado a ser ponente en Colombia y en Ecuador. Recientemente ha sido reconocida como Experto Técnico para América Latina por la Atomic International Energy Agency de la Organización de las Naciones Unidas. Su participación en asesorías para la industria, solicitadas al IIM-UNAM, ha sido muy importante, así como el apoyo que brinda a estudiantes asociados al IIM-UNAM, tanto de licenciatura como de posgrado.

El rector de la UNAM, José Narro Robles, entregó el reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz a 74 destacadas académicas que sobresalieron en los ámbitos de la investigación, la docencia y la difusión de la cultura en sus distintas ramas del conocimiento. Este es el quinto año en que la UNAM entrega este reconocimiento a las mujeres más destacadas de cada dependencia universitaria; la ceremonia se realizó en el Teatro Juan Ruiz de Alarcón, en el Centro Cultural Universitario, el 7 de marzo de 2008, fecha en que se conmemora el Día Internacional de la Mujer. El rector dijo que la inteligencia, la fuerza y la creatividad de las mujeres son primordiales para la excelencia académica y el avance de nuestra universidad.

# UNAM POSGRADO

## Ciencias e Ingeniería de Materiales



Universidad Nacional Autónoma de México  
Convoca a los aspirantes a ingresar al Programa de Estudios  
de Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales,  
Doctorado y Maestría  
Semestre Escolar 2009-1  
(del 11 de agosto al 11 de diciembre, 2008)  
El Posgrado cuenta con áreas de conocimiento en materiales:  
cerámicos, complejos, electrónicos, metálicos y poliméricos

#### Sedes:

- Ciudad Universitaria, ubicada en la Ciudad de México, Distrito Federal [pceim@www.posgrado.unam.mx](mailto:pceim@www.posgrado.unam.mx)
- Centro de Ciencias de la Materia Condensada, ubicado en la Ciudad de Ensenada, Estado de Baja California [heiras@ccmc.unam.mx](mailto:heiras@ccmc.unam.mx)
- Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, ubicado en Campus UNAM de Juriquilla, Qro. [castano@fata.unam.mx](mailto:castano@fata.unam.mx)
- Centro de Investigación en Energía, ubicado en la Ciudad de Temixco, Estado de Morelos. [wrgf@cie.unam.mx](mailto:wrgf@cie.unam.mx)

#### CALENDARIO

Publicación de la convocatoria: **febrero, 2008**  
Inscripción a cursos propedéuticos: **febrero, 2008**  
Inicio del semestre: **11 de agosto, 2008**  
Fin de curso: **11 de diciembre, 2008**

#### REGISTRO DE ASPIRANTES:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM,  
Ciudad Universitaria, Apdo. Postal 70-360, Coyoacán, 04510,  
México, D. F.  
Tel: 56224731, Fax: 56224730