



AVANCE Y PERSPECTIVA

Órgano de difusión del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.



9 770185 141010

Volumen 17
Septiembre-octubre de 1998
México ISSN 0185-1411
\$ 15 pesos

Química y
naturaleza

EL DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA ELECTRICA

Ofrece a los egresados de Mecánica,

Electrónica, Computación y carreras afines,

estudios de **Maestría y Doctorado** en

Ingeniería Eléctrica en la **especialidad** de



Áreas de investigación:

Mecanismos y Máquinas Inteligentes.

Ingeniería por Computadora.

Simulación Dinámica y Tiempo Real.

Celdas de Manufactura Flexible.



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV

DIRECTOR GENERAL

Adolfo Martínez Palomo
SECRETARIO ACADÉMICO
Manuel Méndez Nonell
SECRETARIO DE PLANEACIÓN
Luis Alfonso Torres
SECRETARIO DE RECURSOS
HUMANOS Y MATERIALES
Leonardo Contreras Gómez

AVANCE Y PERSPECTIVA

DIRECTOR EDITORIAL

Enrique Campesino Romeo
EDITORIA ASOCIADA
Gloria Novoa de Vitagliano
COORDINACIÓN EDITORIAL
Martha Aldape de Navarro
DISEÑO Y CUIDADO DE LA EDICIÓN
Rosario Morales Álvarez
APOYO
Sección Fotografía
del CINVESTAV
CAPTURA
Josefina Miranda López
Isabel Negrete
María Gabriela Reyna López

CONSEJO EDITORIAL

René Asomoza
INGENIERÍA ELÉCTRICA
J. Víctor Calderón Salinas
BIOQUÍMICA
Luis Capurro Filigrasso
UNIDAD MÉRIDA
Marcelino Cerejido
FISIOLOGÍA
Eugenio Frixione
BIOLOGÍA CELULAR
Jesús González
LAB. DE QUERÉTARO
Luis Herrera Estrella
UNIDAD Irapuato
María de Ibarrola
INVESTIGACIONES EDUCATIVAS
Eusebio Juaristi
QUÍMICA
Luis Moreno Armella
MATEMÁTICA EDUCATIVA
Miguel Ángel Pérez Angón
FÍSICA
Héctor M. Poggi
BIOTECNOLOGÍA
Gabino Torres Vega
FÍSICA

Consulte nuestra página
de Internet:

<http://www.cinvestav.mx/webselect/avance.htm>

RESPONSABLE

Valente Espinoza

AVANCE Y PERSPECTIVA

SUMARIO

Vol. 17

Septiembre-Octubre de 1998

- 267 *Química y naturaleza*
Robert Wolf
- 285 *La luz en la vida de las plantas*
Aída Martínez Hernández, Gustavo Acevedo y Luis Herrera Estrella
- 293 *La biorremediación como alternativa al tratamiento de suelos contaminados*
José Manuel Fernández, Graciela Ruiz y Refugio Rodríguez

PERSPECTIVAS

- 303 *Mitomanía de un escalafón*
Gerardo Herrera

DIALOGOS

- 311 *Los albores de la biología molecular*
Carlos Chimal

MATICES

- 318 *Así fue*
Laura Elena Morales

INNOVACIONES EDUCATIVAS

- 321 *Innovaciones en ciencias, matemáticas y educación tecnológica: un estudio de la OECD*
Edwyn James
- 329 *Innovaciones en el curriculum de ciencias: una mirada a una reforma del sistema*
María J. Sáez

Portada: Amplificación del centro de un copo de nieve con su patrón característico con simetría hexagonal radial, incluida por los enlaces del hidrógeno y el oxígeno en el agua.

Foto: Daniella Jo Nilva

Avance y Perspectiva, órgano de difusión del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV, es una publicación bimestral. El Número correspondiente a septiembre-octubre de 1998, volumen 17, se terminó de imprimir en julio de 1998. El tiraje consta de 8,000 ejemplares. **Editor responsable:** Enrique Campesino Romeo. Oficinas: Av. IPN No. 2508 esquina calzada Ticomán, apartado postal 14-740, 07000, México, D.F. Certificados de licitud del título No. 1728 y de contenido No. 1001 otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Reserva de Título No. 577-85 otorgado por la Dirección General del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Publicación periódica: Registro No. 01603-89, características 220221122, otorgado por el Servicio Postal Mexicano. **Negativos, impresión y encuadernación:** Litografía Electrónica, S.A. de C.V. calle Vicente Guerrero 20A Col. Barrio San Miguel, Iztapalapa, 09360, México, D.F. *Avance y Perspectiva* publica artículos de divulgación y notas sobre avances científicos y tecnológicos. Los artículos firmados son responsabilidad de los autores. Las instrucciones para los autores que deseen enviar contribuciones para su publicación aparecen en el número enero-febrero de 1997 página 64. Se autoriza la reproducción parcial o total del material publicado en *Avance y Perspectiva*, siempre que se cite la fuente. *Avance y Perspectiva* se distribuye en forma gratuita a los miembros de la comunidad del CINVESTAV y a las instituciones de educación superior. Suscripción personal por un año: \$ 90.00

ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE FÍSICA MEDICA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA MEDICA

ALFIM



CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE FÍSICA MEDICA

(CURSOS PRE-CONGRESO)

MÉXICO 98

SEDE: INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA

Ciudad de México, 22-25 de noviembre de 1998

INFORMES Y REGISTRO A CONGRESO Y CURSOS RECEPCIÓN DE RESÚMENES Y TRABAJOS COMPLETOS

Miguel Angel Pérez Pastenes
Departamento de Física
Instituto Nacional de Cancerología
Av. San Fernando 22, Tlalpan, 14000 México, D.F.
Tel. (52-5) 628-0455, Fax. (52-5) 513-5093
e-mail: alfim@cueyatl.uam.mx

Enrique Gaona,
Departamento El Hombre y su Ambiente,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Calz. Del Hueso 1100, 04960 México, D.F.
Fax: (52-5) 677-9184, 723-5469,
e-mail: gaen1310@cueyatl.uam.mx

RESERVACIONES Y EVENTOS SOCIALES

Carlos G. Martínez Avila
Palmira 41,
Col. Alamos, 03400 México, D.F.
Tel. Y Fax: (52-5) 530-8473 y 530-6417
Fax: (52-5) 273-0102
e-mail: radsa@ienfoces.com.mx

Consulta nuestra página electrónica
<http://cueyatl.uam.mx/~alfim> ó <http://cueyatl.uam.mx> (eventos)

Química y naturaleza

Robert Wolf

"Química y Naturaleza" es el tema propuesto para las XIV Olimpiadas de la Química (1998), un concurso destinado a los alumnos avanzados interesados en esta ciencia. La palabra química no nos sorprende. Por lo que toca a la naturaleza, una de las numerosas definiciones ofrecidas por el *Petit Larousse Grand Format* de 1995: "conjunto de seres y de cosas que constituyen el Universo", permite hablar de todo sin restricción. En Toulouse tuvimos recientemente la oportunidad de dar a los estudiantes una conferencia sobre este tema, y hemos presentado el punto de vista de un químico veterano.

En este artículo vamos a hablar del nacimiento y el uso de la tabla periódica de los elementos, así como de las posibilidades sin límite de las construcciones moleculares que dicha tabla permite. Intentaremos acercarnos a algunos fragmentos del saber contemporáneo sobre los seres vivos, a partir de aquellos que seleccionan determinados elementos y ciertas estructuras prefiriendo unos u otras en el inmenso conjunto de piezas sueltas que ofrece la química.

De Empédocles a Demócrito

Las sociedades humanas se interesan en la naturaleza desde el punto de vista de sus raíces culturales. Nuestras raíces se aferran fuertemente al mundo mediterráneo. Aun si estas ideas llegan de lejos, del mundo griego en particular, tienen todavía influencia sobre nuestra manera

*El Dr. Robert Wolf es investigador emérito del CNRS, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, Francia. La versión en francés de este texto apareció en *Fréquence Chimie*, noviembre de 1997. Traducción de Gloria Novoa de Vitagliano.*



de conocer nuestro entorno y el enfoque científico en particular.

Para el filósofo griego Empédocles (490-435 a.C.) la Naturaleza está formada de cuatro elementos: "El fuego, el agua, la tierra y la altura infinita del aire". La mezcla de estos elementos, inspirada por los dioses Polemos (el odio) y Eros (el amor) produce todos los cuerpos. Nuestro punto de vista actual es muy diferente, a pesar de que, por una curiosa coincidencia, esta visión del mundo considera tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso, y el fuego que aporta la noción de energía que permite pasar de un estado al otro. Esta manera de leer el pensamiento griego evoca muy bien la termoquímica.¹

Partiendo de esta definición de la naturaleza, los alquimistas han intentado demostrarla con la experiencia. Así, Jean Baptiste Von Helmont (1579-1644)

un médico flamenco de Bruselas, hizo hervir agua en un alambique durante varias semanas hasta obtener finalmente un polvo blanco en su aparato. Pensó haber demostrado el paso del agua a la tierra. Bastante tiempo más tarde, Lavoisier (1743-1794) pudo refutar esta afirmación mediante la demostración precisa de que el polvo blanco del fondo del matraz, un silicato, estaba formado por restos de material del alambique. El enfoque de Von Helmont fue científico en el sentido de que proponía una teoría basada en la comprobación de un experimento. Tres anécdotas sobre este protoquímico :

- le debemos la palabra "gas" que se forjó a partir de *caos* (en griego y en latín);
- eligió adecuadamente el uso del termómetro, el hielo y el agua hirviendo;
- tuvo la idea generosa pero un poco filosófica de buscar el medicamento universal capaz de curar todos los males.

Nuestro conocimiento ha aumentado, la ciencia no se ha circunscrito a los conceptos de Empédocles. De la misma fuente de cultura, pero con mayor anterioridad, Pitágoras piensa que los números "son los elementos de todas las cosas y el mundo entero no es sino armonía y aritmética". Este punto de vista fructificará en la concepción de la estructura de los átomos. Finalmente las ideas de Demócrito (nacido alrededor del año 460 a.C.) sugirieron que a pequeña escala existen granos de materia indivisibles, los átomos, y también que se pueden conocer las cosas por medio de imágenes; estos hechos forman parte integral de nuestro conocimiento actual.

Presentar una sola reseña histórica de la química y de los seres vivos que de ella emergen, y hacer uso de nuestros avances en el conocimiento de la primera para modificar el concepto que tenemos de la segunda, es un proceso interesante que corresponde bien al tema propuesto de "Química y Naturaleza". Varios autores han intentado describir este fabuloso escenario que va de la explosión primordial a la multiplicación de los seres. En este sentido hemos obtenido datos de libros magníficos que describen la parte bella de la química¹⁻³. Sin embargo, sería necesario ser astrofísico, astroquímico, geólogo y biólogo para poder comprender todas las facetas de estos conocimientos. Como somos solamente químicos, tomaremos un atajo entre las especialidades que no nos son familiares.

Tabla 1. Análisis de los elementos químicos de la corteza terrestre (porcentajes).

Oxígeno	46.6
Silicio	27.7
Aluminio	8.13
Hierro	5.0
Calcio	3.63
Sodio	2.83
Potasio	2.59
Magnesio	2.09
Titanio	0.44

La tabla periódica

El químico es un practicante de la tabla periódica, la carta fundadora de nuestra ciencia, la lista ordenada de 90 tipos de átomos, todos presentes en la corteza terrestre. Sabemos que son los componentes últimos de todo aquello que está en nuestro entorno. En otros términos, los análisis elementales de no importa qué: "una piedra, dos casas, tres ruinas, cuatro fosas, un jardín, flores, un mapache..." llevados a cabo hasta la última precisión de los métodos actuales, jamás nos darán otra cosa que no sean los elementos que figuran en esa tabla.

Esta clasificación de elementos se impuso en menos de un siglo y medio (1790-1920). Se ha profundizado en la corteza terrestre para conocer todos los datos contenidos en la pequeña película que cubre nuestro modesto planeta, objeto insignificante en un universo gigante, y es ahí donde la especie humana ha realizado esta hazaña.

La naturaleza y la abundancia de los elementos de la corteza terrestre, continental y marítima, estudiadas siguiendo los diferentes lugares y profundidades, han permitido proponer una composición química media en la cual los 90 elementos químicos están presentes (tabla 1). Nueve de ellos representan el 99% de la existencia total. Es decir, que los 81 elementos que quedan son raros en su porcentaje, una decena de ellos se extienden con un orden de magnitud de 0.15% para el hidrógeno a $3 \times 10^{-10}\%$ para el iridio. Agrupemos los porcentajes de tres elementos asociados al ser viviente: el hidrógeno

Tabla 2. Análisis de los elementos químicos de un ser humano o de un mapache (porcentajes).

Oxígeno	65.0
Carbono	18.5
Hidrógeno	9.5
Nitrógeno	3.3
Calcio	1.5
Fósforo	1.0
Potasio	0.4
Azufre	0.3
Cloro	0.2
Sodio	0.2
Magnesio	0.1

(0.15%), el carbono (0.03%) y el nitrógeno (0.000025%).

De hecho, la tabla periódica contiene 92 elementos, pero dos de ellos: el tecnecio ($n^{\circ} 43$) y el prometio ($n^{\circ} 61$, un lantánido), son inestables y están ausentes en la corteza terrestre. Se puede acceder a ellos solamente mediante las enormes máquinas construidas por los físicos, que permiten también preparar la larga familia de los transuránicos.

La corteza terrestre, con una densidad media de 2.8 t/m^3 , no es típica de la constitución de la tierra, que es mucho más densa (5.5 t/m^3). Un núcleo de hierro de un radio de 3300 km, sólido en su centro, está en el corazón de nuestro planeta cuyo radio es de 6700 km y que nació hace cerca de 4,6 millones de años.

Si se compara este análisis con los efectuados a un ser humano o un mapache (tabla 2), se podrá constatar que el ser viviente selecciona los elementos químicos de la corteza terrestre para su propio uso. En el ser viviente el hidrógeno es 60 veces más abundante, el carbono 600 veces, mientras que para el nitrógeno el factor es superior a 100 000. A la inversa, el silicio y el aluminio, que representan más de un tercio de la corteza terrestre, intervienen modestamente en la bioquímica de los seres (un poco de Si, nada de Al). Para tener completo este análisis, no nos sorprenda que los océanos sean esencialmente agua y cloruro de sodio, con unos cuantos residuos de todos los elementos de la clasificación

Tabla 3. Los primeros "elementos químicos".

Prehistoria	Carbono
Prehistoria	Azufre
Hacia 5000 a. C.	Cobre
Hacia 3000 a. C.	Oro
Hacia 3000 a. C.	Plata
Hacia 2500 a. C.	Hierro
Hacia 2100 a. C.	Estaño
Hacia 1600 a. C.	Antimonio
Hacia 1500 a. C.	Mercurio
Hacia 1000 a. C.	Plomo
Hacia 1250	Arsénico
Antes de 1500	Zinc
Hacia 1500	Bismuto

periódica (en porcentaje: O:85.8; H:10.7; Cl: 2.07; Na: 1.9 y Fe: 10⁻⁶). La atmósfera contiene 78.08% de nitrógeno, 20.95% de oxígeno, 0.93 de argón y 0.03 de bióxido de carbono. Este último, a pesar de su débil porcentaje, constituye la fuente de carbono utilizada por los organismos que se sirven de la fotosíntesis.

Antes de la "Chymie"...

Esta ortografía nos permite designar el largo camino que comienza cuando la humanidad aprende a hacer uso del fuego y va hasta mediados del siglo XVII. Durante este largo período, de 300 000 años por lo menos, los individuos cercanos a nosotros, los ancestros del hombre contemporáneo, han colectado y utilizado materiales y objetos notables por su duración, su brillo, belleza, densidad... del sílex al oro pasando por las conchas. El pájaro no hace otra cosa cuando reúne cerca de un establo una crin de caballo para tejer su nido. La gran diferencia es que nosotros hemos terminado por tener conciencia y hemos acumulado los frutos de nuestros andares. Algunos de los materiales colectados estaban, prácticamente por azar, constituidos de una misma especie de átomos.

¿Cuál fue el primer elemento descubierto? Los químicos frecuentemente quedan perplejos ante esta pregunta, y después constatan que la respuesta es evidente "pues claro, seguro que es así". Para esta ocasión

vamos a revisar una cocción alimentaria. Estando sumergidos en la lectura, un olor a quemado nos indica lo que está pasando. Por negligencia acabamos de descubrir el carbono, íntimamente ligado con el control del fuego. El descubrimiento del carbono es, pues, muy lejano. El carbón de madera no fue considerado seguramente como un elemento químico, sino como una herramienta para realizar otros descubrimientos por medio del fuego: tierra cocida, vitrificación de la arena, metalurgia del hierro ... ya que la afinidad del carbono por el oxígeno es más grande que la del hierro contenido en la limonita (Fe₂O₃) que, de manera fortuita se encontraba presente. Hacia 1600, los materiales conocidos que se etiquetarán como elementos químicos son cerca de quince. Esta lista de once metales y dos metaloides⁴ refleja bien la clasificación periódica que cuenta con 67 metales y 23 metaloides. Ningún elemento gaseoso es conocido: nitrógeno, oxígeno ... y menos aún los gases raros (Tabla 3).

Es nuevamente la práctica del fuego lo que permitió descubrir las metalurgias del plomo y del cobre que fueron desarrolladas a gran escala: el plomo en la época romana, el cobre en China alrededor de los años 1000. La contaminación de la atmósfera que de allí resulta se atestigua por el análisis de los trozos de hielo de Groenlandia. La fluorescencia atómica por excitación láser permite descubrir hasta 10⁻¹³ mg de plomo en un gramo de hielo! Parece que el plomo no tuvo ningún papel biológico, sin embargo, todos nosotros tenemos una centena de mg, principalmente en los huesos. Este debe ser un umbral inevitable y soportable: más allá, las sales de plomo son tóxicas y conducen al saturnismo. Hablaremos más sobre el hierro y el cobre después del descubrimiento de la combustión.

Una luminiscencia en 1669 ...

A finales de los años 1600 los alquimistas se encuentran tan activos (figura 1) que el azar no podía hacer otra cosa que recompensarlos, conduciéndolos al descubrimiento del fósforo: en 1669, en el curso de un proyecto de alquimia para descubrir la piedra filosofal, un comerciante arruinado de Hamburgo, Hennin Brandt, piroliza la orina concentrada a la temperatura más alta posible, esperando acercarse al oro. Lo que hizo sin saber fue la reducción de los fosfatos de la orina por el carbón

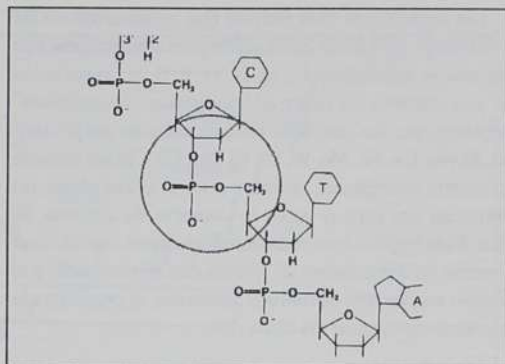


Figura 1. Diésteres fosfóricos.

proveniente de sus materias orgánicas, conjuntamente sin duda con polvo de cuerno y otros materiales agregados según su gusto. Obtuvo así el fósforo molecular P_4 que, al oxidarse en el aire enrarecido del alambique, produce una asombrosa luminiscencia. Al elemento se le atribuyó el nombre de fósforo (el que porta la luz).

La química del evento no podía ser comprendida pero el asombro fue general y en Europa se invitó a los protoquímicos a repetir en público esta fascinante experiencia. El descubrimiento aguijoneó las curiosidades y sugirió iniciativas interesantes, hasta proponer que el fósforo era "milagroso" como medicamento. Siendo tóxico el elemento, el remedio para algunas enfermedades fue de una píldora sin un mañana. Por la misma razón, los prestidigitadores con las manos iluminadas abandonaron rápidamente este efecto escénico. El nombre de H. Brandt ha permanecido y esto se convertirá en una costumbre: para cada elemento se retendrá el nombre de su descubridor, algunas veces de varios, asociados o en competencia.

En el siglo que siguió, la curiosidad de los protoquímicos que deseaban reencontrar esta extraordinaria luz, les permitió entrever el hecho que el fósforo está presente en los seres vivos. En todos los primeros diccionarios de química en francés⁶ aunque no en el primero (el de P. Macquer, 1718-1784, edición de 1766) se puede leer en el tema del ácido fosfórico: "El Sr. Margraf se aseguró que muchas de las materias vegetales, y particularmente los granos contienen bastante de este ácido para producir el fósforo... Así, se puede creer que este ácido se forma en el reino vegetal y animal, y que pasa del primero al segundo".

Ahora sabemos que esta observación es adecuada. Los ésteres y los anhídridos del ácido fosfórico H_3PO_4 son esenciales en el mundo viviente. En la cadena de los nucleósidos, el ácido está presente bajo la forma de *diésteres fosfóricos* (figura 1), así como en el ADN Acido DesoxiriboNucleico o en el ARN, Acido RiboNucleico. En el pH fisiológico, las funciones ésteres son protegidas de la hidrólisis por la carga aniónica residual conservada a causa del fósforo. Las reservas principales de la energía bioquímica son también derivados fosforados: el adenosina trifosfato, el ATP, el fosfato de creatina, el fosfoenol piruvato ... Los fosfatos controlan la actividad enzimática y la Adenosina Mono Fosfato cíclica, AMPc juega un papel esencial de comunicación química al interior de la célula tomando el relevo de estímulos recibidos sobre la superficie de la membrana (segundo mensajero). Para decirlo brevemente, *el ser viviente no ha encontrado reemplazos en los ésteres y anhídridos fosfóricos*.

Los organismos más simples que aparecieron en las condiciones primitivas han exigido para desarrollarse seis elementos esenciales: C, H, N, O, P, S, acompañados de una decena de otros denominados "inorgánicos" (adjetivo que no conviene en este caso en particular): Na, K, Mg, Ca, Fe, Mo, W, Se, Cl, No, Co... El ser viviente no puede reemplazar, al menos en el corto plazo, un elemento por otro o suplir la carencia de algunos de ellos. Esto implica que el desarrollo se frena cuando uno o varios de éstos faltan; el fósforo con el nitrógeno y el potasio son los tres elementos limitantes, el primero más frecuentemente que los otros dos.

Se puede ilustrar esta observación. En los océanos la concentración de fosfatos en la superficie es del orden de 0.2 a 0.5 micromoles por litro y aumenta con la profundidad hasta alcanzar valores 20 a 50 veces más altos. La parte del mar que recibe más luz, las centenas de primeros metros, es la menos rica en fósforo. La biósfera oceánica es menos prolífica que la de las zonas continentales. Sin embargo, existe una particularidad: las corrientes ascendentes suben a la superficie de aguas profundas ricas en fosfatos, particularmente en las zonas de las plataformas continentales que en consecuencia se vuelven más ricas en peces (centro y costas del Pacífico, Groenlandia, Antártica...). Se estima que la mitad de la pesca mundial se realiza sobre 0.1% de la superficie de los mares. Aun si se toman estas cifras con moderación, el número de factores es grande y es cierto que una de las causas esenciales de la débil productividad en biomasa de grandes zonas oceánicas proviene de la mala circulación de fosfatos en la biósfera.

Desde la perspectiva química, se comprende bien que es la "bocana fósforo" (*goulet phosphore*) la que limita el desarrollo de la vida. Al contrario del carbono, el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno, que circulan fácilmente en la atmósfera y la hidrósfera terrestres bajo la forma gaseosa (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2), el fósforo no tiene ni un derivado gaseoso no tóxico; circula pues, mal, aun siendo irremplazable. ¡Sobre este tema un corresponsal (R. J. P. W.¹) me ha hecho notar que los tiburones tienen los dientes con fosfatos... pero el esqueleto es de colágena!

La agricultura gigante de nuestro tiempo, que acopla la mecanización a la utilización de abonos en una escala antes jamás alcanzada, ilustra en sentido inverso el hecho de que el conocimiento de los elementos faltantes, los fosfatos en particular, y suministrados masivamente, ha

permitido en una centena de años disminuir en mucho la población campesina para asegurar la nutrición de los hombres. El número de éstos, que se ha situado durante mil años en una escala entre 500 millones y mil millones de individuos, se ha triplicado en menos de un siglo (cerca de 6 mil millones actualmente).

... y durante el siglo que siguió a 1669

Desde el descubrimiento del fósforo hasta 1770 se descubrieron cinco elementos nuevos: el platino, el cobalto y el níquel, el magnesio y el hidrógeno, todos ellos importantes, frutos de una incansable curiosidad y de innumerables experimentos, pero no se dispone efectivamente de un hilo conductor para aislarlos.

El platino, la pequeña plata, fue descubierto en estado natural en Hispanoamérica, en particular en las minas de Santa Fe y en las del Choco en Perú. Se caracteriza fácilmente por su densidad, más alta que la del oro ($21,45 \text{ t/m}^3$) y sobre todo por su asombroso punto de fusión (2045 K), temperatura difícilmente accesible con las técnicas de ese tiempo.

Otro progreso, el descubrimiento del cobalto. Conocemos nuestra fascinación por los colores, el azul de los vitrales nos ha causado admiración. El deseo de saber más de las "tierras de cobalto" utilizadas en la vitrificación hizo que se caracterizara este metal antes que los otros. La serie de conocimientos científicos sobre el ser viviente nos enseñará que el cobalto juega un papel esencial. Fueron las enfermedades de carencia de cobalto de los borregos australianos, alrededor de 1930, las que nos pusieron sobre la pista de la importancia de este metal. Está presente en la vitamina B12, la cual es sintetizada por las bacterias del intestino e interviene en una quincena de reacciones bioquímicas. En la alimentación animal ha sido necesario agregar complementos de cobalto directamente bajo la forma de la vitamina. Esta se prepara en fermentadores gigantes para los cuales la selección de bacteria a utilizar y la elección de los nutrientes presentan problemas difíciles e interesantes de investigación industrial. La débil abundancia del cobalto en los nutrientes accesibles obliga a los animales a economizarlo, por ejemplo recicándolo. Por esta razón, el conejo es coprófago. A

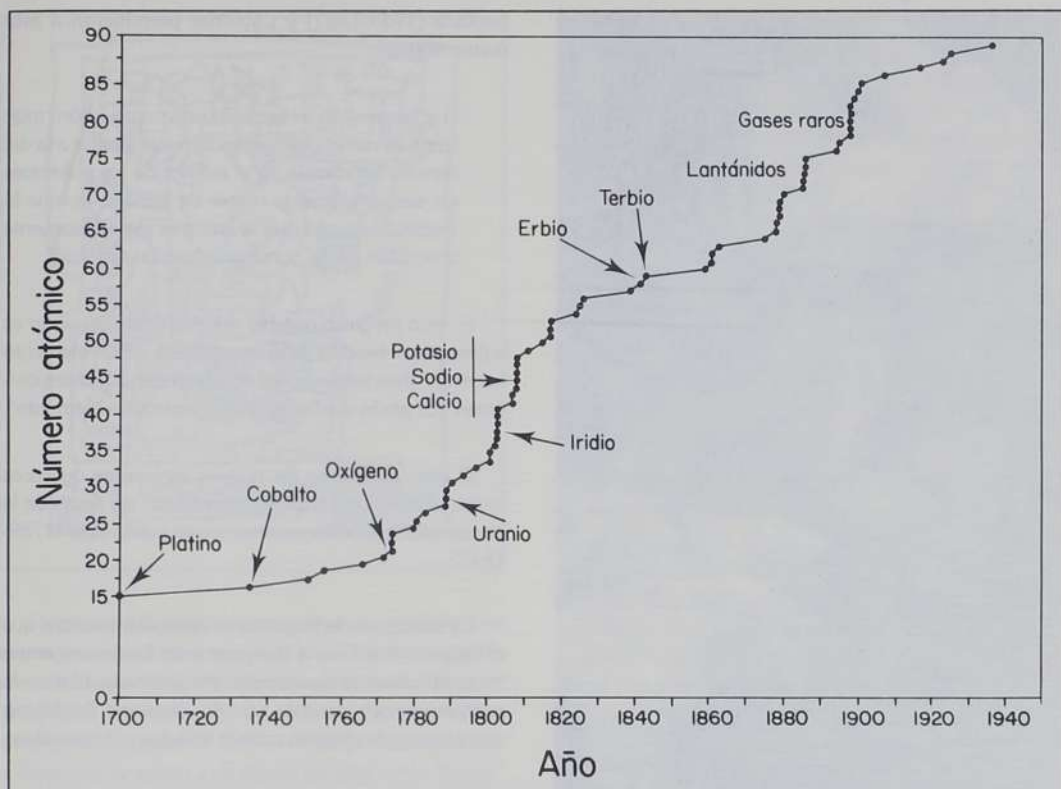


Figura 2. Algunos de los elementos citados en el texto. Dentro de esta escala, la fecha correspondiente al descubrimiento del fuego estaría uno 200 m a la izquierda del eje horizontal.

un amigo del CNRS, "Titi" Lestel, ingeniero en sistemas audiovisuales, le fue encargado filmar en la noche y a escondidas, a los conejos en su actividad de recuperación. De hecho, los conejos que fueron estudiados eran delicados y no consumían más que excrementos tomados directamente del ano, y no los excrementos que caían en la paja.

Flogística, combustión y glóbulos rojos

Los protoquímicos han tenido grandes dificultades para comprender la combustión. En ésta el oxígeno gaseoso no es visible y la materia que se quema parece desaparecer, la flama es observada: ioperan tantos factores desconcertantes para captar la química que

interviene! Para explicarla, se ha propuesto un concepto original, la flogística: *el principio inflamable más puro y el más simple*. Está basado en la observación siguiente: "ciertos cuerpos expuestos a la acción del fuego con el concurso del aire prenden fuego ellos mismos, *producen la flama*, aumentan por consecuencia el fuego, le sirven de alimento, mientras que otros en las mismas condiciones se vuelven rojos y luminosos pero *sin producir flama*, dejan de estar calientes y luminosos cuando ya no se les aplica un fuego exterior: los primeros son cuerpos combustibles y los otros incombustibles"⁶. Si se produce la flama tomando como criterio la flogística, no se puede comprender la oxidación. En la tradición del humor inglés, fue un pastor, Priestley (1733-1804), ardiente defensor de la flogística y admirador de la revolución francesa, quien descubrió en 1774 el aire "deflogisticado", que será el oxígeno (independientemente de C. W. Schelle en Uppsala, en Suecia).



El mismo año, Antoine Laurent de Lavoisier hizo progresar en forma definitiva nuestra comprensión de la combustión. La desaparición aparente de la materia en la flama no es más que una ilusión. La flama, visible ciertamente, no representa sino la combustión incandescente de productos gaseosos, pero no las reacciones químicas complejas que intervienen en el compuesto invisible del aire, que él llamará más tarde oxígeno, generador de ácido. El oxígeno reacciona químicamente con la materia para dar calor (reacción exotérmica) y los diversos productos resultantes de la oxidación. Las combustiones del hidrógeno o del grafito pueden dar cada una flama y, sin embargo, las reacciones químicas que intervienen no tienen nada en común. Este proceso lleva en sí la comprensión de la combustión sin flama que se lleva a cabo en el ser viviente. Las medidas calorimétricas efectuadas en el conejillo de Indias por

Laplace (1749-1827) y Lavoisier permitieron a este último afirmar:

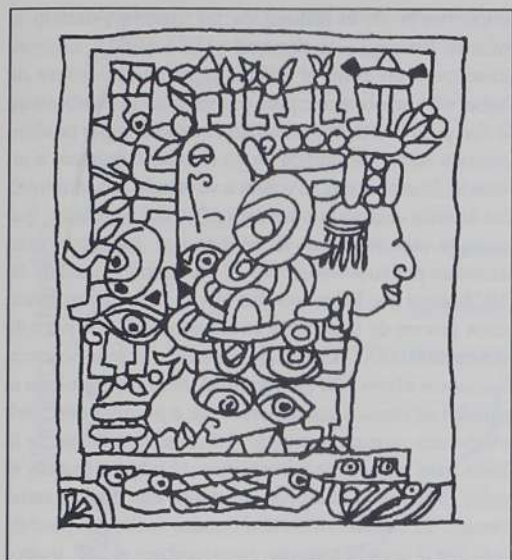
"La respiración es también una combustión, muy lenta, es cierto, pero perfectamente similar a la del carbón. Se efectúa en el interior de los pulmones sin desprendimiento visible de lumbre, porque la materia de fuego que se libera es inmediatamente absorbida por la humedad de estos órganos"

El otro progreso notable aportado por Lavoisier se refiere a la definición de lo que debería ser un elemento químico: "Toda sustancia que no hayamos podido descomponer por algún medio, es para nosotros un elemento".

El descubrimiento de nuevos elementos químicos recibe entonces un impulso asombroso: un tercio de la clasificación periódica se construye en medio siglo (1789-1843).

La historia de la flogística es ejemplar, muestra que el lenguaje nos lleva a designar todo fenómeno como "natural" antes de comprender el significado. El mundo contemporáneo, en este sentido, contiene flogísticos: veamos un solo ejemplo entre la química y la naturaleza.

Sobre todo para los varones, la conducta de la manta religiosa, que se come a su marido, no es muy bien acogida, así como tampoco el canibalismo de los renacuajos de algunos batracios. Hoy en día los biólogos nos han enseñado que estos hechos se deben a que los sujetos que carecen de recursos alimenticios se ven acorralados. ¡También se ha podido demostrar que los renacuajos no se comen estadísticamente los unos a los otros, sino que son preservados en cierta medida, dentro de las líneas de hermanos y primos que se reconocen por la comunicación química! Más aún, la conducta caníbal de las especies de pájaros estudiadas aparece por la falta de ciertos nutrientes. El fenómeno será, pues, natural y está ligado a carencias que impiden un desarrollo normal. Los historiadores asociados a los biólogos nos dirán un día si las masacres en las sociedades humanas, del mundo precolombino al África contemporánea, contienen mandatos que llevan a la "ferocidad", pasando por alto los que nos preservan. ¿Es éste un enfoque adecuado para pensar que estos dramas no tienen remedio?



Dejemos la flogística para regresar a Lavoisier. Este investigador seguramente se interesó mucho en saber cómo, en un animal, el oxígeno es dirigido al sitio de su utilización. Los biólogos nos proporcionan respuestas detalladas: viniendo de los pulmones por la respiración el dioxígeno se asocia a un átomo de hierro en el "hemo" de la hemoglobina, siendo transportado por el flujo sanguíneo hacia las células consumidoras.

Un químico siente un placer insólito en asociar el descubrimiento del hierro por los humanos (hacia 5000 años a. C.), a los 3 gramos de este metal, que son seleccionados por el ser viviente y que conducen en un ser humano al comburante que le permite quemar los alimentos y realizar la síntesis del adenosina trifosfato, fuente de energía de nuestras máquinas humanas. Este procedimiento se inició hace algunas decenas de millones de años.

En un estadio de cien mil espectadores, 300 kilos de hierro cumplen su papel con una fidelidad casi perfecta, en tal forma que ningún espectador se da cuenta, ya que todo el mundo está ocupado en ver su deseo cumplido: conseguir un buen marcador. La multitud se divide entonces en dos bandos (el signatario de este artículo en uno de ellos), y deja explotar su alegría o retiene su tristeza siguiendo las órdenes de alguna(s) molécula(s) específica(s) que pertenece(n) a la biología

de las pasiones. La misma observación vale para los 500 millones de telespectadores que, según se ha dicho, vieron la final del Mundial de 1998. Pero como la naturaleza es rica en diversidades, funciona igualmente para el soñador que señala Henri Michaux: "Pongo una manzana sobre mi mesa. Después me meto en la manzana. ¡Qué tranquilidad!".

La colecta de hierro por los organismos no es inmediata y después de cerca de cuatro meses de leales servicios los hematíes mueren y el hierro es reciclado y transportado por proteínas específicas, las ferritinas, que llevan hasta 4500 átomos de hierro cada una hacia los sitios adecuados en la médula.

La política y las instancias de salud pública no se desinteresan por el hierro. Estiman que existe carencia de este elemento y anualmente se añaden en la alimentación colectiva, por ejemplo en los Estados Unidos, 700 toneladas de hierro en las harinas, una buena parte en forma de sulfato ferroso.

El cobre figura también en la tabla de los elementos descubiertos desde hace mucho tiempo por los humanos y tiene su sitio en la circulación del dioxígeno en numerosos artrópodos. En este caso la estructura portadora es muy diferente, la molécula de dioxígeno se encuentra aprisionada entre dos átomos de cobre. Como la naturaleza realiza sus construcciones según las reglas de la economía, se notará que los artrópodos muy pequeños, digamos de menos de un *mm*, no tienen un sistema particular para transportar el oxígeno que se difunde a través del revestimiento exterior, la cutícula. Esta constante puede ser formulada de otra manera: en la evolución de los seres multicelulares, sólo a partir de un determinado tamaño es cuando necesitan construir un sistema particular de transporte.

Un tercio de los elementos químicos descubierto en cincuenta años

En los linderos del siglo XIX la comprensión de la oxidación fue un hecho decisivo para el desarrollo de la química. La clasificación periódica no era entonces más que una lista de elementos sin orden y diversos factores

se fueron agregando para enriquecerla. Primero, la definición más clara del elemento químico que ya hemos señalado. También los progresos recientes en electricidad: la electrólisis de la sosa y de la potasa que permitió a Davy descubrir el sodio y el potasio y otros tres elementos en dos años. Pudo quizá también intervenir otro factor que no se relaciona directamente con la ciencia: la población de Europa se había duplicado prácticamente en un siglo, un hecho que hizo que aumentara el número de hombres que tuvieron el privilegio de desarrollar el conocimiento. Una cosa es segura, la comunidad científica descubre en medio siglo una tercera parte de los elementos, una lista que va del uranio (U) aislado por Klaproth en Berlín (1789, número atómico 92), al terbio (Tb) debido a Mosander en Estocolmo (1843, n° 65).⁴

En esta cosecha muchos elementos forman parte de la química absolutamente necesaria en el surgimiento de la vida: sodio, potasio y calcio. Pero lo más notable es que todos, tan raros como puedan ser, han sido utilizados en el mundo contemporáneo. El terbio (Tb, n° 65) está presente en las lámparas fluorescentes, el erbio (Er, n° 68) se utiliza en las fibras ópticas que conducen la luz infrarroja, el rarísimo iridio está presente en el metro patrón y también en las bujías de los helicópteros.

Debemos dar a esta observación una importancia particular: si una quincena de elementos ha sido suficiente para permitir el comienzo de la vida, en el curso de la evolución, la de los seres vivos y la de la corteza terrestre que le sirve de soporte, un quincena de otros elementos se ha vuelto indispensable para ciertas especies. En resumen, una mitad de la clasificación periódica no ha sido utilizada en los procesos biológicos. Para hablar sin rodeos, una especie particular, la de los seres humanos, acompañada en su andar por algunas centenas de otros seres asociados domésticos, parásitos, tiene ante sí toda la clasificación periódica que está siendo utilizada en el presente. Esta constante puede ser vista como una hazaña que ha tomado cerca de 8.5 millones de años para llegar donde está: una bonita manera de ver las cosas.^{1,2}

Una sola química

Algunos diccionarios escrupulosos citan con el mismo cuidado el invento de un mechero de gas, hecho por Bunsen (1811-1899) y un acontecimiento de la mayor

importancia en la historia de las ciencias, debido al mismo Bunsen y a Kirchhoff (1824-1887), quienes inventaron en 1859 el análisis espectral. Después de haber sido un obstáculo para comprender la combustión, la flama de alta temperatura, tan incolora como posible, permite llevar los átomos de un elemento químico a un estado de excitación: al volver a su estado fundamental, los átomos emiten una luz específica del elemento, que permite caracterizarlos. El análisis por espectroscopía asombra por su sensibilidad. El *Magasin Pittoresque* de 1874 relata que la luz amarilla que se obtiene arrojando unos granos de cloruro de sodio en una flama permite dosificar 0.000000300 mg de sodio, ilo que nosotros llamamos ahora 300 picogramos! Muy rápidamente el estudio de numerosos minerales va a permitir descubrir elementos nuevos que serán bautizados a partir de la línea más intensa de su espectro: el rubidio (rubis), el indio (indigo), el tallio (verde, del griego thallos, rama verde). El método es de una riqueza sin límite: permite estudiar la corteza terrestre, pero también el Sol⁵ y otros objetos luminosos de nuestro Universo pueden ser estudiados por los químicos y por los astrónomos. Un elemento químico fue descubierto en el Sol (el helio) mientras que los químicos "terrestres" sólo habían supuesto su presencia en la atmósfera. Con el tiempo se sabrá explotar el método en toda la extensión del espectro electromagnético. La aplicación de la espectrometría en el estudio del Universo conduce al más sorprendente descubrimiento, resumido en una nota de William Huggins (1824-1910), un astrónomo aficionado inglés que había construido su propio observatorio: "Una meta importante de esta investigación espectroscópica original sobre la luz de las estrellas y otros cuerpos celestes, es descubrir si los elementos químicos de nuestra tierra están presentes en todo el Universo; esta meta se alcanza en forma satisfactoria, la respuesta es positiva, una misma química existe para todo el Universo" (1864).

Este conocimiento fundamental es propuesto cuando la tabla periódica todavía no se ha establecido, y se comienza a sospechar que el inventario de los elementos conocidos no es un bazar heteróclito sin orden ni clasificación.

En la misma década, en 1869, Dimitri Mendeléyev (1834-1907), a partir de analogías y de parecidos fundados en los datos experimentales de los químicos,

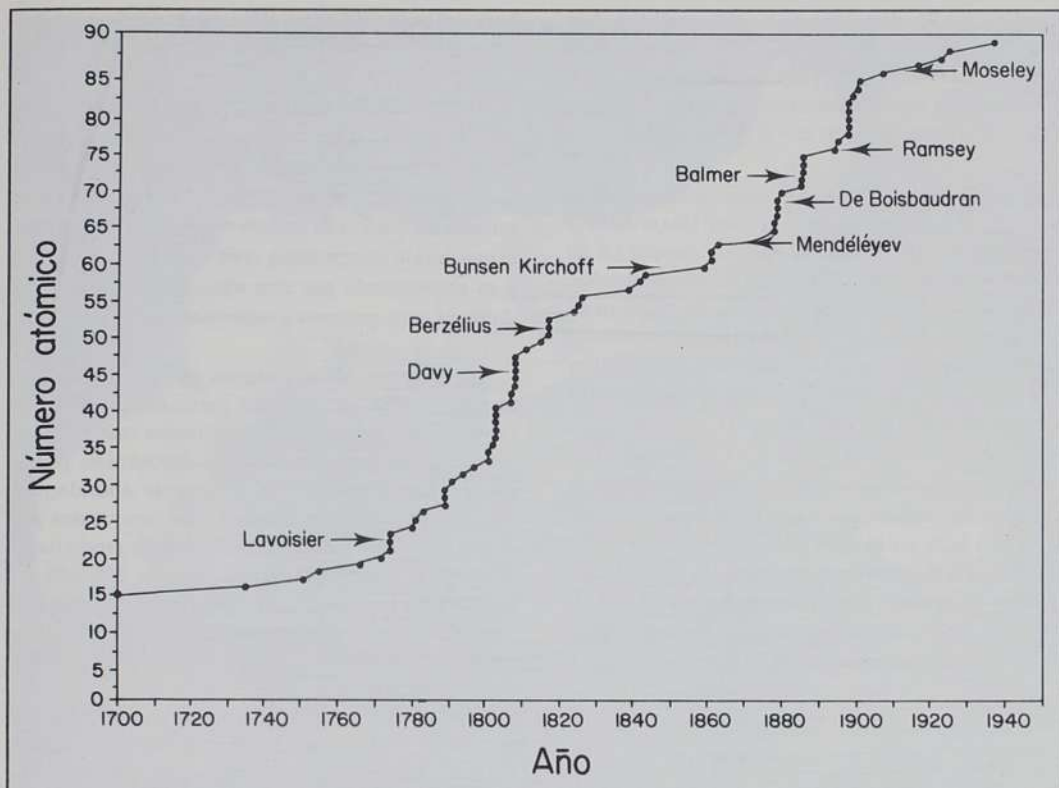


Figura 3. Algunos constructores de la clasificación periódica de los elementos.

propone una clasificación, un orden, que no puede ser otro que el reflejo de estructuras fundamentalmente regulares, dando nuevamente sentido al concepto de números que les había dado Pitágoras. Con los 67 elementos entonces conocidos, descubre los períodos que reagrupan los elementos que tienen propiedades análogas. Cuando el orden esperado no acude a la cita, el aporte original de Mendeléyev es afirmar simplemente que el elemento no es todavía conocido. Es así como nacieron el Eka Boro, el Eka Aluminio, el Eka Silicio. Estos elementos tienen su lugar en una tabla periódica futura, antes de ser descubiertos. La previsión es justa y la historia los encontrará y sus descubridores les darán otros nombres para bautizarlos. Estos son, respectivamente el scandium (Sc, 1879, Nilson en Suecia, n° atómico 21), el galio (Ga, 1875, De Boisbaudran en París, n° 31), el germanio (Ge, 1886, Winkler en Alemania, n°32).

La periodicidad en química va a ser puesta en evidencia de otra manera completamente diferente, utilizando los números de onda de las líneas del espectro del hidrógeno. Si se pide a una calculadora encontrar una fórmula simple y elegante que relacione cuatro números como: 15233, 20565, 23032 y 24373 la informática permitirá hacer el cálculo fácilmente y la respuesta será fácil. Es la misma que supo hacer "a mano" en 1815 Johann Jacob Balmer, profesor de matemáticas en el Liceo para Señoritas de Bâle. La simple y elegante fórmula que descubrió hubiera podido no tener importancia. Sin embargo, haciendo uso de los progresos de la óptica se nota que el espectro del hidrógeno pasa de 4 a 16 líneas, la fórmula se aplica otra vez a los 12 nuevos números de onda descubiertos. La periodicidad en química parece relacionarse con una ley natural ligada a la estructura profunda de los átomos. Se dispone ahora de todas las herramientas para

completar los 92 elementos de la tabla periódica. Los hechos más importantes consistirán en completar la gran familia de los lantanidos (14 elementos), los actínidos y situar la familia de los 6 gases raros comenzando con el argón (1894) y terminando con el radón (1900).

En 1913 tuvo lugar la demostración experimental de la periodicidad en química. Henry Gwyn-Jeffreys Moseley (1887-1915), muerto antes de cumplir los 30 años de edad en Gallipoli, al oeste de los Dardanelos, estableció la clasificación de los elementos químicos en función de la frecuencia de los rayos X emitidos (inúevamente Pitágoras!). Corrigió dos inversiones (Co/Ni) y (Te/I) y demostró que 6 elementos quedaban por descubrir entre el aluminio y el uranio.

Comienza entonces la fascinante historia de la estructura de los átomos en una tabla periódica construida con base en lo esencial. El descubrimiento del electrón y los radioisótopos abre otra vez nuevas perspectivas. Se aprende a establecer fechas: la edad de la Tierra, las rocas más antiguas, el surgimiento de la vida, el paso de una atmósfera reductora a una oxidante...

¿Cómo se forja la química?

En 1915 los investigadores en astronomía disponen de los espectros de 225,300 estrellas y pueden esbozar una historia del Universo. El químico queda admirado ante el escenario que relata cómo se forjó la tabla periódica. En principio, tomó un tiempo decidir que la energía del Sol no podía ser de naturaleza química y descubrir que la energía de una estrella es producida sobre todo por la fusión de 4 elementos de hidrógeno para dar el helio. El Universo está formado por 87% de hidrógeno y 12% de helio; a esta escala, el lugar que ocupan los otros 90 elementos es muy modesto...

El Universo surge de una explosión inicial que tuvo lugar hace 16 mil millones de años y ha estado en expansión. Este Big-Bang ha producido partículas: protones, electrones, neutrones... En unos pocos minutos se formó cerca del 25% de peso del helio, acompañado de muy pequeñas cantidades de deuterio y de ${}^7\text{Li}$. Todos los otros elementos, con excepción del berilio y del boro, provienen de reacciones nucleares en las estrellas. El

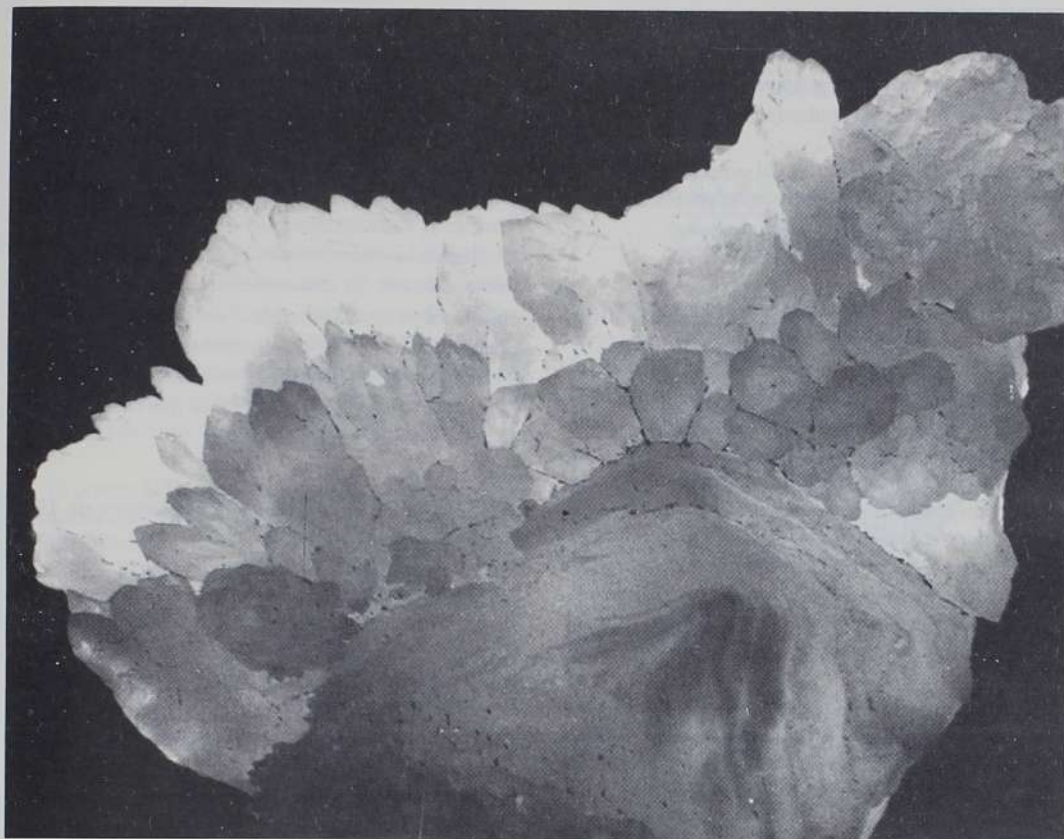
boro y el berilio, así como el ${}^6\text{Li}$ resultaron de colisiones altamente energéticas, en los rayos cósmicos.

El conocimiento de las reacciones nucleares permite comprender el origen y las cantidades relativas de los diferentes elementos, ofreciendo esquemas plausibles para el paso de un elemento a otro. En el corazón de las estrellas los núcleos se forman a temperatura muy alta, la interacción electrostática entre protones es repelente y es compensada por una atracción fuerte a corta distancia entre protones y neutrones.

Durante las últimas etapas de la vida de una estrella intervienen procesos particulares de fusión, proveyendo cada etapa de elementos más pesados al utilizar las "cenizas" de las nucleosíntesis precedentes. Los elementos relativamente abundantes, como el carbono y el oxígeno, son producidos por fusión del helio; los otros elementos, llegando hasta el hierro, resultan de estos mecanismos. Más allá del hierro los elementos más pesados se forman por capturas sucesivas de neutrones, raramente de protones.

El equilibrio que de allí resulta permite explicar por qué el ${}^{56}\text{Fe}$ es el más estable de todos los núcleos. Para los núcleos ligeros, es favorable energéticamente fusionarse para formar los núcleos más pesados, para acercarse al hierro. Los elementos pesados, al emitir radiación alfa, regresan hacia los elementos más ligeros y finalmente hacia el hierro.

Para acabar pronto, las estrellas masivas terminan su vida en gigantescas explosiones —las supernovas— proyectando hacia el espacio los productos de sus reacciones nucleares: los elementos del sistema periódico, con el hidrógeno y el helio que no habían reaccionado. Teniendo en cuenta las temperaturas en juego, los núcleos que intervienen son despojados de sus electrones, conservan el nombre del elemento, pero no se trata del átomo que es familiar al químico, con su cortejo electrónico. La interpretación de estos hechos ha sido difícil durante mucho tiempo y eran conocidos únicamente por espectroscopía. En el pasado el espectro del "nebulio", que se creyó que era un elemento nuevo, fue de hecho el espectro de átomos de oxígeno ionizados, y nos podemos imaginar la tristeza de los decepcionados investigadores al saberlo.



¿Dónde comienza la química?

La química comienza cuando la existencia de la(s) ligadura(s) entre átomos se hace posible. En el verano de 1997 la prensa hizo un gran alboroto por el descubrimiento de moléculas de agua en la superficie del Sol. Esta superficie, que tiene una temperatura del orden de 6000 K, puede admitir que, en las zonas relativamente "frías", subsistan ligaduras covalentes H-O. En el Universo, es decir en la centena de miles de millones de galaxias observables, la química podría existir a partir de 5000 K hasta las zonas más frías correspondientes a una radiación de fondo de 2.7 K. En tal escala, el intervalo de temperatura en el que evoluciona un ser viviente, es más que modesto.

Con la explosión gigantesca de las estrellas masivas son lanzadas nubes gigantes de gas y de polvos interestelares, que forman un reservorio de elementos, a partir del cual pueden nacer otras estrellas y otros sistemas planetarios. Por nubes gigantes debemos entender grandes bolas de cientos de años luz de diámetro, heterogéneas bajo tres aspectos: la temperatura, la densidad de las moléculas presentes y la naturaleza de éstas. Estas nubes son más frecuentes en los brazos espirales de nuestra galaxia, donde juegan el papel de "guarderías de estrellas".

En las zonas relevantes de la química muchas moléculas y muchos iones contienen C, H, N, O, P, N, Si... como elementos acompañados de grandes sólidos ricos en carbono, pero que contienen también metales

y silicatos. Como orden de magnitud de las zonas frías, alrededor de 80 K, que son las más fáciles de detectar y de estudiar, las concentraciones moleculares están estimadas en 40 objetos moleculares por cm^3 .

En la lista de las moléculas del espacio interestelar, algunas son intrigantes; la más larga es penta-acetilénica:



la más "prebiótica" es la glicina $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{NCOOH}$. No falta el alcohol etílico, pero en las condiciones originales. La dilución es muy grande (algunas moléculas por cm^3), y el alcohol está acompañado por mucha agua (ilústima!). Sin embargo, si se tiene en cuenta el tamaño de la nube, el volumen de este alcohol condensado será cuando menos de cientos de veces el tamaño de la Tierra. Recordemos que la concentración en moléculas de nuestra atmósfera es del orden de 3×10^{19} por cm^3 . Si se tienen en cuenta las condiciones particulares del espacio interestelar (temperatura, débil presión) los objetos químicos que allí se encuentran tienen frecuentemente estructuras originales y prácticamente inaccesibles en la Tierra.

La astroquímica puede parecer muy distante de nuestras preocupaciones; sin embargo, puede ser fuente de ideas originales. El premio Nobel 1996 fue otorgado a H. W. Kroto, R. F. Curl y R. E. Smalley por haber caracterizado el fullereno, C_{60} , en espectrometría de masas (1985) y haber abierto el camino hacia un filón muy rico de la química orgánica y la química de materiales.

Harold Kroto tenía como línea de investigación "las moléculas semi-estables en el laboratorio y en el espacio". Brevemente, el espacio interestelar ayuda a descubrir temas nuevos de investigación, pero es nuestra Tierra el sitio ideal para hacer química, la prueba está en la soberbia aventura del ser viviente, el último tema que abordaremos...

La célula, complejidad y autoensamble

El subtítulo de este pasaje podría ser: tres hechos que desconciertan a un químico al tratar de tener una idea

sobre la célula de una bacteria. La célula es la unidad del mundo viviente, en analogía al elemento químico en la tabla periódica, con la sola diferencia de que las complejidades respectivas no son para nada del mismo orden. En las bibliotecas universitarias, los libros destinados a los alumnos, que llevan el simple título: "La Célula", muchas veces sobrepasan las mil páginas⁸.

Una de las más "simples" y la más estudiada es la *Escherichia coli*. Es una bacteria procariote (sin núcleo celular ni compartimentos), un organismo que se encuentra frecuentemente presente y que ocupa numerosos nichos ecológicos, en particular el intestino de los mamíferos (¡esto quiere decir que nos presta sus servicios cotidianamente!).

La revista *Science* publicó en septiembre de 1997 un artículo firmado por 17 autores que presenta la secuencia completa del genoma de *Escherichia coli* K 12. Lleva 4 639 221 pares de bases y 4288 genes que codifican proteínas. ¡En su gran mayoría, los químicos manipulan durante su vida moléculas un millón de veces más pequeñas y esto no siempre es fácil! ¡Al observar estas cifras el asombro se convierte en desaliento cuando se sabe que las células humanas contienen un genoma mil veces más complejo!

El volumen celular de la bacteria es del orden de algunas micras cúbicas y el genoma no es sino un objeto molecular único en su especie, que se encuentra en el interior de la membrana. Contiene toda la información necesaria para construir, dirigir, controlar todas las máquinas de la células formadas esencialmente de proteínas. Estas últimas son construidas por cerca de 15000 ribosomas, talleres destinados a sintetizarlas. Para hacerlo se utilizan 1000 ARN de tipos diferentes. Los enlaces peptídicos entre alfa-aminoácidos se forman al ritmo de 5 a 7 soldaduras por segundo y por ribosoma. La *Escherichia coli* sabe también cómo construirse motores que aseguren el movimiento de los flagelos. Estos, al servicio de los receptores, dirigen la célula hacia los nutrimentos o bien la alejan de productos tóxicos. Los motores funcionan con un flujo de 5 a 600 protones por segundo. Todas estas máquinas funcionales "giran" en una solución de 70% de agua y necesitan cerca de 500 intermediarios (coenzimas, ácidos dicarboxílicos...).

Cuando tratamos de descubrir alguna sencillez en este edificio químico, notamos que todas las grandes moléculas del sistema: proteínas, nucleótidos, lípidos, polisacáridos, son formados por seis elementos solamente: C, H, N, O, P y S, y sobre todo que la bacteria sabe duplicarse en condiciones casi primitivas, a partir de un menú frugal. Le basta una solución acuosa vivamente aerada, que contenga glucosa para tener carbón y energía y una decena de iones inorgánicos, fosfatos, cloruros, sulfatos, sales de amonio, sodio, potasio, Mg, Cu, Co, Zn, Mo, la mayor parte en proporciones mínimas. Estas cantidades son tan pequeñas que el microbiólogo estará de acuerdo que el agua de la llave las contiene a todas: en la práctica sólo el agua destilada inhibe su desarrollo.

El primer hecho que sorprende al químico es el de constatar que la bacteria conserva la posibilidad de sintetizar todo a partir de elementos muy simples. Sin embargo, en el intestino humano se encuentran accesibles todas las arquitecturas moleculares y pueden servir de punto de partida para la multiplicación de las bacterias, aun de las más económicas. Un bacteriólogo nos da una luz sobre este hecho admirable: "los organismos más simples y los más viejos son no solamente los ancestros y el substrato real del conjunto de los seres vivos sobre la Tierra, sino que también están dispuestos a extenderse y a modificarse, a ellos mismos y a los otros, en el caso en que nosotros, los hombres, los organismos más "elevados", cometiéramos la locura de aniquilarnos".

Bajo este aspecto el ser viviente da la impresión de haber multiplicado las precauciones. En algunas reservas, a 2000 metros en el fondo del mar (Galápagos) o en una gruta en Rumania (Movilé) se encuentran bacterias que saben sintetizar, a partir de CO_2 y H_2S , la glucosa necesaria para tener una autonomía aún más grande: son llamadas quimio-autótrofas. Sus mínimas exigencias las vuelven poco vulnerables. Pero los microbiólogos dicen que son menos arcaicas de lo que parecen.

Antes de dejar aparte a la *Escherichia coli*, señalemos que sabe construir la vitamina B_{12} , para lo cual en la primera síntesis total en un laboratorio se necesitaron 70 etapas.

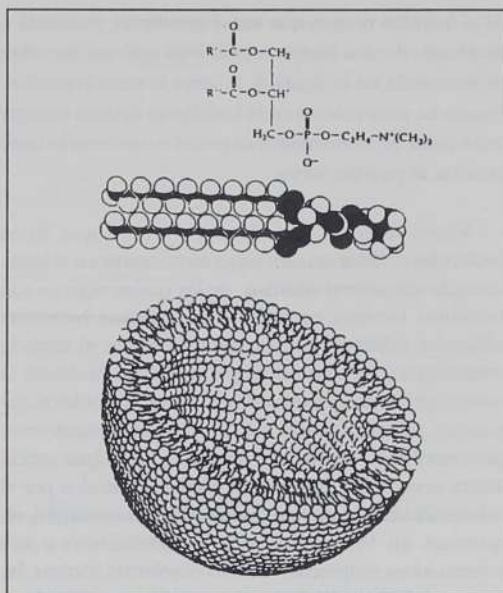


Figura 4. Autoasociación de moléculas anfífilas.

La actividad química de una bacteria se lleva a cabo en un pequeño saco de un volumen mínimo limitado por una membrana. El volumen debe ser pequeño para responder a una exigencia: disponer de una superficie relativamente grande que permita los intercambios de iones y de moléculas. Sabemos que mil esferas idénticas ofrecen una superficie de cambio 10 veces más grande que una sola esfera que tenga el mismo volumen total. Es, pues, sobre este hecho favorable que la célula ha sido construida. Las membranas están formadas esencialmente de lípidos que delimitan los medios acuosos, el citoplasma y el exterior. En el curso de la evolución, la naturaleza de los lípidos membranales ha evolucionado, pero todos poseen las mismas características moleculares: una de las extremidades de la molécula es soluble en agua, es hidrófila, la otra extremidad es una larga cadena formada por numerosos átomos de carbono, insoluble en agua, hidrófoba.

La figura 4 muestra la estructura de un lípido membranar con una cabeza hidrófila formada por un grupo fosfato, colocada entre un glicol diesterificado por dos ácidos grasos por una parte, y por otra parte la colina.

Si el químico tuviera que ser el arquitecto, molécula a molécula, de una bicapa membranal esférica, su mitad representada en la figura 4, la tarea le sería imposible. En efecto, para colocar cada fosfolípido debería escoger entre miles de conformaciones posibles y solamente unas cuantas le podrían servir.

Ahora bien, la experiencia muestra que estas moléculas anfífilas se unen espontáneamente en el agua, creando estructuras diversas, de las cuales algunas son vesículas bicapas cerradas, con cabezas hidrófilas alineadas adelante y atrás; algunas tienen el tamaño micrométrico de una célula y son visibles mediante el microscopio óptico. Estas estructuras son los objetos que pueden ser estudiados: sus propiedades mecánicas, permeabilidad, cambio de forma... Esta observación ilustra uno de los asombrosos hechos utilizados por el ser viviente. Las únicas fuerzas que intervienen en química en la construcción de moléculas y sus interacciones recíprocas, uniones covalentes, iónicas, las fuerzas de Van der Waals, interacciones supramoleculares de todas suertes, proporcionan a veces extraordinarias estructuras complejas listas para usarse. Los químicos orgánicos conocen este tipo de hallazgo, ellos que a menudo sufren durante años para construir una molécula inalcanzable, mientras que lo inesperado les ofrece a veces extraordinarias estructuras simplemente al calentar dos productos en un mismo recipiente.

La autoasociación no es el límite de lo que la química "inerte" puede aportar a la estructuración del ser viviente. Nos asombra cada vez más el ejemplo de un virus, disasociado en sus partes y que se autoreconstruye quedando nuevamente en estado funcional.

El virus del mosaico del tabaco es una partícula cilíndrica en forma de bastón de 3000 Å de largo y 180 Å de diámetro. Encierra un ARN monocatenario de cerca de 6400 bases así como 2130 copias de una misma proteína constituida por 158 aminoácidos. Cuando se mezclan en solución los elementos del virus "desmontado" se constata una reconstrucción espontánea. La figura 5 da una idea del fenómeno. Primero las unidades proteicas forman un pequeño cilindro que con un pequeño "click" pasa de ser un disco a ser una arandela abierta semejante a la utilizada por los mecánicos de automóviles. Este será el elemento de

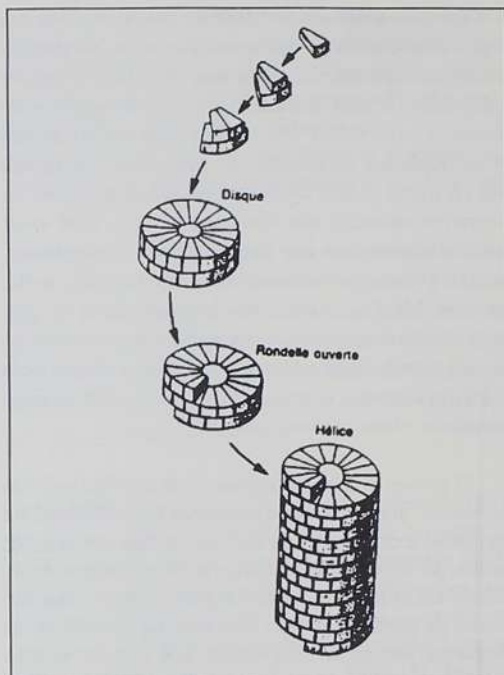


Figura 5. Autoensamblaje de un virus.

construcción helicoidal en donde cada vuelta de la hélice contiene 16.33 unidades proteicas. El ARN se enrolla a través de estas unidades sobre un radio de 40 Å, dejando tres nucleótidos asociados a cada una de las subunidades. Este autoensamblaje podría ser un ejemplo más de autoasociación y, en efecto, el virus, reconstruido con su ARN es funcional.

Estos ejemplos muestran que la "química de los químicos", por su naturaleza misma, posee inmensas posibilidades que han permitido el surgimiento del ser viviente, la química de los biólogos.

Ante la complejidad de ésta, los químicos no pueden contener su admiración y sus deseos de imitación. Por el momento, la calidad de sus logros está muy, muy lejos de poderse comparar con las hazañas de los seres vivientes. Sin embargo, las moléculas que "saben hacer alguna cosa", analizar, ensamblar, capturar, elegir, cerrar, memorizar, abrir, rechazar, seleccionar... comienzan a multiplicarse en la literatura.

Esta marcha posiblemente conducirá, basándose en el talento y en hechos imprevistos, a etapas borrosas de la construcción primitiva de los seres vivientes. Por la belleza de la historia habremos de notar que tres facetas de las señales luminosas: la luminiscencia del fósforo, la flama y la combustión, y ahora la flama por la universalidad de los elementos químicos, han desempeñado un papel decisivo para ampliar nuestro conocimiento.

Agradecimientos

Mis amigas y amigos me ayudaron a corregir errores, subsanar hechos que ignoraba, embellecer el texto... Se los agradezco cordialmente.



Notas

1. R. J. P. Williams y J. J. R. Frausto da Silva, *The Natural Selection of the Chemical Elements* (Clarendon Press - Oxford, 1997).
2. J. J. R. Frausto da Silva y R. P. J. Williams, *Biological Chemistry of the Elements* (Clarendon Press, Oxford, 1991).
3. S. F. Mason, *Chemical Evolution. Origins of the Elements, Molecules and Living Systems* (Clarendon Press - Oxford, 1991).

4. J. Emsley, *Les Eléments Chimiques* (Ed. Française, Polytechnica, 1992).

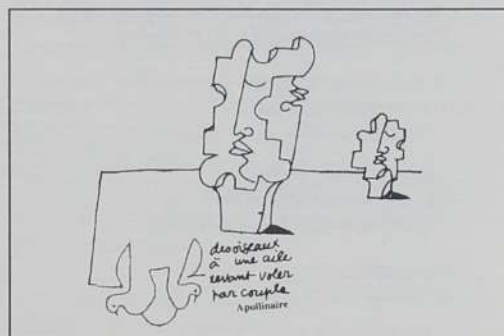
5. H.W. Prinzler, *Summa Destillationis*, (VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 1983).

6. *Dictionnaire de Chymie* (1976). El autor P. Macquer (1718) no fue mencionado, lo que era costumbre de la época, por razones de censura. Su nombre se encuentra en los catálogos especializados conocidos por los libreros. En París, en la Librería Lacombe, Quais de Conti, en dos volúmenes, 16 y 686 pp.

7. P.A. Cox, *The Elements* (Oxford University Press, 1990).

8. J. Darnell, H. Lodish y D. Baltimore, *La Cellule, Biologie Moléculaire* (Ed. Vigot, Paris, 1988).

9. L. Margulis, *L'Univers Bactériel* (1986).



CENTRO DE INVESTIGACION EN POLIMEROS

Programa de Apoyo a la Formación de Recursos Humanos

Con el fin de apoyar y estimular las actividades de las instituciones mexicanas de educación superior dirigidas al desarrollo académico y a la formación de científicos en las áreas que a continuación se detallan, así como para fortalecer la interacción del Centro de Investigación en Polímeros (CIP) con universidades y centros de investigación nacionales o extranjeros con intereses afines al CIP, éste ha desarrollado un programa que contempla:

- A.** Entregar **galardones** a estudiantes sobresalientes que realizan estudios de maestría y doctorado.
- B.** Ofrecer a investigadores con prestigio académico, apoyo completo para realizar **estancias de trabajo** o **año sabático** en el CIP.
- C.** Ofrecer vinculación académica con investigadores universitarios notables a través de **asesorías** a los proyectos de investigación del CIP.
- D.** Copatrocinar **estancias de trabajo** externas al CIP de **profesores visitantes distinguidos**, nacionales o extranjeros en instituciones nacionales de educación

Las solicitudes de beca-galardón, colaboración, apoyo para año sabático, estancias de trabajo en el CIP, asesorías universitarias y estancias de profesores visitantes del extranjero, se reciben en cualquier época del año.

El Centro de Investigación en Polímeros es una institución creada en 1992 por iniciativa del grupo COMEX para realizar investigación tecnológica en áreas relevantes a la industria de pinturas y recubrimientos.

Dirigir las propuestas al domicilio postal del CIP:
Programa Formación de Recursos Humanos
Centro de Investigación en Polímeros

Campos Elíseos No.400-1601
Lomas de Chapultepec
11000 México, D.F.

Ubicación del Centro:
Marcos Achar Lobatón No.2
55885 Tepexpan, Edo. De México

[Http://www.cip.org](http://www.cip.org)
E-mail: cipac@cip.org

GRUPO COMEX



La luz en la vida de las plantas

**Aída Martínez Hernández,
Gustavo Acevedo Hernández,
Luis Herrera Estrella**

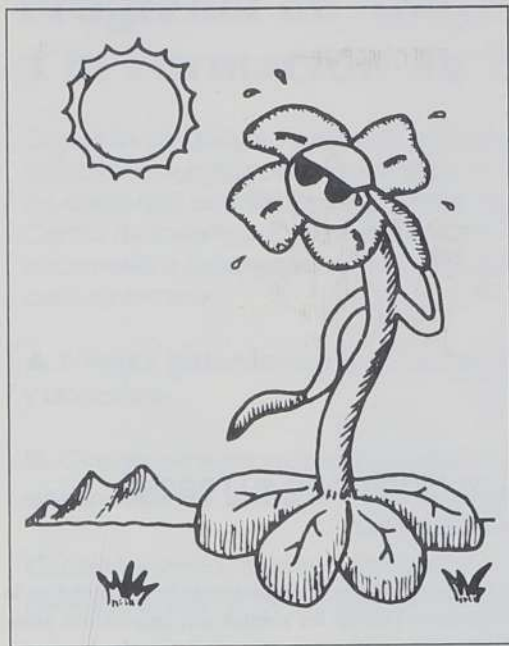
Las plantas en su medio ambiente

El reino vegetal es de importancia fundamental en la naturaleza porque las plantas son organismos autótrofos fotosintéticos; es decir, sintetizan las sustancias que necesitan para su propio desarrollo utilizando la energía de la luz solar. Esto las convierte, junto con las algas macroscópicas y el citoplancton, en el pilar medular de la pirámide alimenticia, ya que la vida de todos los organismos heterotróficos, quienes obtienen su energía alimentándose de otros seres vivos y entre los cuales quedamos incluidos los seres humanos, depende directa o indirectamente de las plantas.

Para que las plantas se desarrollen óptimamente requieren, al igual que todos los seres vivos, percibir información proveniente de su entorno; para ello, cuentan con "sentidos" a través de los cuales monitorean lo que sucede en el medio ambiente circundante. Sin embargo, como las plantas no pueden moverse de un lugar a otro en busca de condiciones favorables para su desarrollo, tienen que adaptar su crecimiento, su morfología e incluso sus ciclos biológicos en función de la disponibilidad de los elementos necesarios para su crecimiento como son el agua, la luz y los nutrientes minerales presentes en el lugar donde germinan. Por lo tanto, los mecanismos de monitoreo del medio ambiente son de vital importancia para las plantas.

Los autores son investigadores de la Departamento de Ingeniería Genética de Plantas de la Unidad Irapuato del Cinvestav. El Dr. Luis Herrera Estrella es miembro del Consejo Editorial de *Avance y Perspectiva*.

Demos un breve viaje a través del fascinante y dinámico mundo interno de las plantas para conocer



los procesos y mecanismos que les permiten a ellas, y a nosotros en segunda instancia, vivir aprovechando la energía de la luz solar.

La fotosíntesis

Las plantas son capaces de absorber y transformar energía luminosa en energía química, mediante el proceso denominado fotosíntesis. La luz que las plantas usan en la fotosíntesis está en el intervalo longitud de onda de 400-700 nm, lo que coincide con el espectro electromagnético en la región visible para los humanos. Los pigmentos que absorben la luz están asociados con proteínas que se encuentran inmersas en las membranas internas de los cloroplastos, los organelos o compartimientos subcelulares donde se realiza la fotosíntesis. El más importante de dichos pigmentos es la clorofila *a*, que se encuentra unida a las proteínas "cab" (por sus siglas en inglés *chlorophyll a binding proteins*). Además, existen otros pigmentos accesorios como la clorofila *b* y varios carotenoides de color amarillo-naranja. Una característica de los pigmentos de las plantas es que no son capaces de absorber la luz verde, que es reflejada, por lo cual los humanos vemos a las plantas de dicho color.

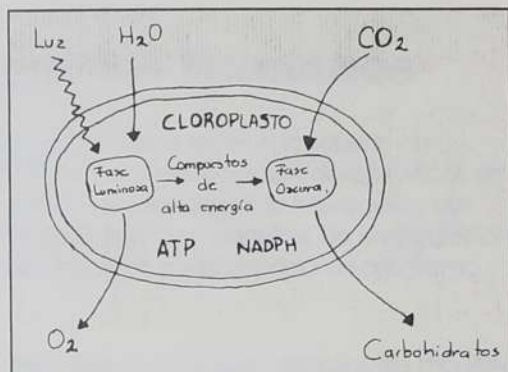


Figura 1. Ciclo de Calvin.

Para captar la luz, la clorofila unida a proteínas se organizan en complejos sistemas llamados "antenas cosechadoras de luz", que incluyen de 50 a 1000 moléculas de clorofila. Al absorber la luz, algunos electrones de las moléculas de clorofila se "excitan" incrementándose su nivel de energía; queda así, la energía luminosa momentáneamente atrapada en las moléculas de clorofila. Posteriormente, las moléculas de clorofila transmiten la energía captada, a través de las moléculas vecinas del complejo antena, hacia el denominado "centro de reacción". Dicho centro es una molécula de clorofila a la cual libera un electrón al confluir la energía captada por las otras moléculas de clorofila. El electrón liberado es recuperado mediante una reacción química que convierte agua en oxígeno, y es transferido a través de una serie de compuestos denominados "transportadores" de electrones. Al pasar por dicha cadena transportadora, el electrón va liberando la energía almacenada, la cual es aprovechada para sintetizar compuestos de "alta energía" (energía química).

La energía química generada durante esta primera fase "luminosa" y almacenada en compuestos de alta energía, se utiliza en la llamada fase "oscura" de la fotosíntesis para la producción de carbohidratos a partir de CO_2 (Fig. 1). En el primer paso de esta fase oscura, también llamada ciclo de Calvin, la fijación de una molécula de CO_2 es catalizada por la proteína más abundante de la tierra, la enzima ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa o Rubisco, la cual constituye hasta el 50% de la proteína soluble total de una hoja. La fijación de carbono, en conjunto con la asimilación de nutrientes minerales del suelo, provee a las plantas de los insumos



necesarios para su crecimiento y para procesos vitales como la reproducción.

La plasticidad de las plantas

Como resulta evidente, la fotosíntesis es de importancia fundamental para las plantas; por lo que la captación de luz, su fuente de energía básica, es prioritaria para su existencia. Tal vez por ello, las plantas han desarrollado un sistema sensorial que les permite percibir la calidad (amplitud y composición espectral) e intensidad (número de fotones por unidad de tiempo y área) de la luz que está a su disposición¹. Dependiendo de la calidad e intensidad de la luz, se reduce o acelera la velocidad de crecimiento de las plantas e incluso su forma para captar la mayor cantidad posible de fotones. Por ejemplo, las plantas son capaces de detectar si existen otros individuos a su alrededor compitiendo por la fuente de luz y responden a ello acelerando su crecimiento, para emerger de entre sus competidores². Las plantas tienen además la capacidad de percibir la dirección de la cual proviene la luz, lo que les permite dirigir su crecimiento hacia la fuente luminosa para recibir una mayor cantidad de luz. Estos procesos de cambio en el crecimiento u orientación de las hojas y flores son también conocidos como fototropismos, un claro ejemplo es el caso de los girasoles, los cuales rotan la posición de sus flores hasta 180 grados siguiendo al sol (Fig. 2).



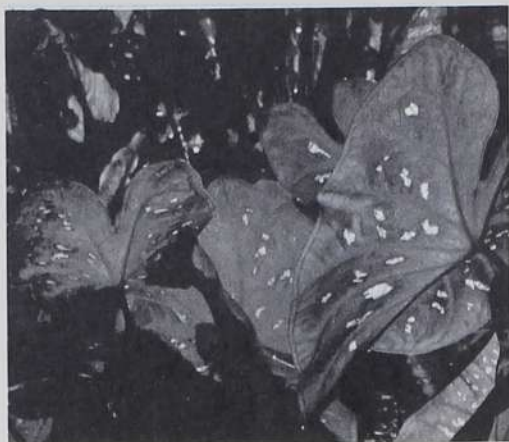
Figura 2. Fototropismo.

Sin embargo, a pesar de que la luz es fundamental para la vida de las plantas, un exceso de ésta puede sobresaturar los complejos antena, los cuales, al permanecer excitados por mucho tiempo, interactúan con el oxígeno produciendo radicales libres, que a su vez destruyen los pigmentos y eventualmente al cloroplasto. Por esta razón las plantas también han desarrollado respuestas de defensa como son la producción de enzimas que las protegen de los radicales libres, la producción de pigmentos protectores como las antocianinas y los carotenos, o incluso movimientos en las hojas para alinearse en la dirección de los rayos luminosos y así evitar su incidencia.

Todos los mecanismos que han surgido evolutivamente en las plantas logran, en conjunto, que éstas sean capaces de sobrevivir en diferentes ambientes, a veces extremos y continuamente fluctuantes, y de los cuales no pueden escapar. Gracias a esto, el reino vegetal ha logrado conquistar desde el frío Ártico hasta calurosos desiertos, y desde las soleadas zonas tropicales hasta los más oscuros bosques y selvas.

Fotorregulación

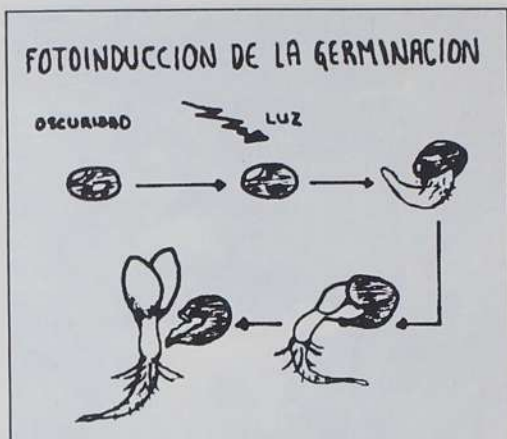
La luz no sólo es la principal fuente de energía para las plantas, sino que además es la señal ambiental más importante que regula sus actividades biológicas, sincronizándolas con su entorno. Existen muchos procesos



en las plantas que son inducidos por estímulos luminosos, los cuales incluyen desde la germinación hasta la senescencia y muerte de las plantas anuales. La luz también afecta la vida de las plantas a través de la duración del período luminoso o ciclo circadiano el cual, por ejemplo, indica a las plantas cuándo es el período estacional adecuado para su floración; a qué hora del día abrir o cerrar sus estomas; o bien, a nivel molecular, cuándo es adecuado iniciar la síntesis de proteínas que participan en la fotosíntesis, como las proteínas *cab* y *rubisco*.

Todos los procesos anteriormente descritos son considerados como procesos fotorregulados. Como es claro, estos procesos son de radical importancia en el funcionamiento de las plantas, por lo que se hace necesaria la comprensión de los mecanismos a través de los cuales la luz regula las actividades biológicas de las mismas³.

La fotomorfogénesis es uno de los ejemplos más dramáticos de los efectos de la luz sobre el desarrollo de las plantas; este proceso se induce cuando las plantas germinan en luz, dando como resultado un organismo fotosintéticamente activo. En las plantas fotomorfogénicas el hipocotilo es grueso, los cotiledones se separan y se expanden, la plántula enverdece por el desarrollo de cloroplastos, se incrementa el número de estomas, y se desarrollan hojas fotosintéticamente activas. A diferencia de lo descrito anteriormente, cuando las plantas germinan en obscuridad se desarrollan etioladas; es decir, el hipocotilo se alarga, los cotiledones permanecen



cerrados y en forma de gancho protegiendo el tejido meristemático, y las plántulas son blancas porque no hay síntesis de clorofila ni desarrollo de cloroplastos. Este patrón de desarrollo permite a la plántula que germina bajo la tierra, es decir en la obscuridad, utilizar las reservas energéticas de la semilla exclusivamente para elongarse y emerger del suelo, hasta encontrar las condiciones luminosas adecuadas para su desarrollo fotosintético.

Aunque los procesos fotorregulados son muy complejos y macroscópicos, se deben en primera instancia a cambios tanto bioquímicos como moleculares en las células vegetales. Dichos cambios son inducidos por un estímulo luminoso.



Caracterización

Mediante estudios fisiológicos, bioquímicos, genéticos y moleculares, se han logrado avances importantes en la comprensión del mecanismo de la fotorregulación en plantas, principalmente en la caracterización del sistema de fotorrecepción con el que cuentan. Actualmente se sabe que en las plantas existen tres clases de fotorreceptores: los fitocromos (absorben luz roja), los criptocromos (absorben luz azul) y los receptores de luz ultravioleta. En conjunto, estos fotorreceptores permiten la percepción de un amplio espectro de luz que va desde la luz rojo lejano hasta la luz ultravioleta. Cada clase de fotorreceptor está constituida por una familia de proteínas que contienen una molécula de pigmento (cromóforo), el cual absorbe un tipo particular de luz. En algunos procesos fotorregulados están involucrados varios receptores, incluso de diferente clase, mientras que otros parecen ser mediados por un solo fotorreceptor⁵.

A pesar de los avances logrados hasta la fecha, aún no se ha logrado establecer el mecanismo molecular a través del cual los fotorreceptores transmiten la información percibida ni con qué moléculas interactúan directamente; así que falta mucho para determinar cuál o cuáles son las vías a través de las cuales se transmite la información del estímulo hacia el interior celular; o a qué nivel se integra la información que los fotorreceptores perciben diferencialmente, para dar lugar a una respuesta gradual.

Por lo tanto, existe, un amplio campo para abordar el estudio de la fotorregulación en plantas, ya que un proceso se puede estudiar a diferentes niveles, como por ejemplo a nivel morfológico, fisiológico, bioquímico, o a nivel de la regulación de la expresión génica. En este último caso, hay que tener en cuenta que en general, para que se exprese la información contenida en el ADN, como respuesta a un estímulo externo, se requiere de distintos pasos a través de los cuales un gen da lugar a la síntesis de una proteína y finalmente a la realización de una función. La regulación de esta expresión se puede dar en distintos niveles a lo largo de este proceso. Puede ser a nivel transcripcional, controlando el número de ARN mensajeros que son sintetizados a partir de cada gen, o bien a nivel post-transcripcional, determinado principalmente por la estabilidad de los mensajeros ya formados o por su capacidad de ser traducidos a proteínas.

La gran mayoría de los genes cuya expresión es afectada por estímulos luminosos, presentan cambios en la abundancia de sus ARN mensajeros en respuesta a estos estímulos. Por tal razón se considera que la fotorregulación de la expresión génica ocurre principalmente a nivel transcripcional, y debido a esto se han estudiado las regiones del ADN responsables de regular la transcripción de genes involucrados en la fotosíntesis.

El estudio de la regulación a nivel transcripcional de la expresión de un gen implica el análisis de su promotor. Un promotor es una región del ADN que tiene un sitio de unión para la ARN polimerasa, además de regiones regulatorias que determinan dónde y cuándo el gen correspondiente debe ser expresado. Estas regiones contienen secuencias de unos cuantos nucleótidos, a las cuales se unen factores protéicos llamados factores de transcripción. Estos factores pueden interactuar con el complejo de la transcripción, modificando la actividad de éste ya sea de manera positiva o negativa, lo que se ve reflejado en los niveles de expresión del gen adyacente al promotor⁶.

Cuando se analiza el funcionamiento de un promotor, la estrategia más empleada es utilizar un gen reportero, el cual es un gen conocido cuyo producto o actividad pueden ser fácilmente detectados y cuantificados. Este gen reportero se fusiona al promotor en estudio quedando bajo su control, de manera que se puede analizar la actividad del promotor y sus características de regulación y de expresión con la detección del gen reportero. Habiendo estudiado de esta forma el promotor completo, se procede a eliminar progresivamente regiones de éste para determinar si son o no importantes en su funcionamiento (análisis de delecciones). También pueden tomarse algunas regiones del promotor para investigar si por sí solas son capaces de controlar la expresión de un gen reportero que normalmente no se expresa (análisis de ganancia de función).

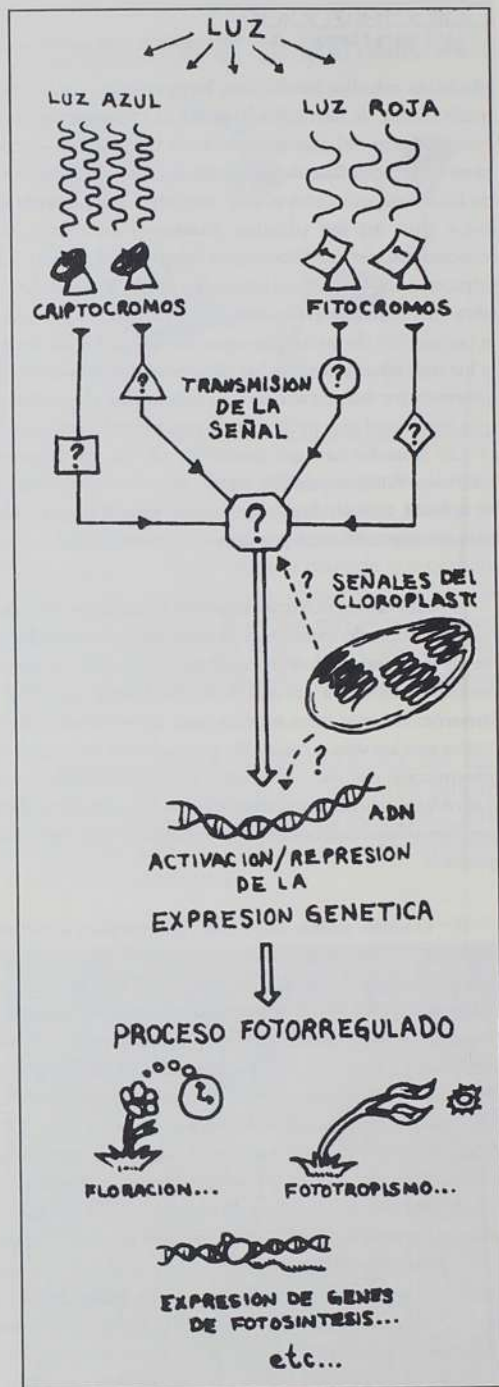
Simplificar hasta el mínimo

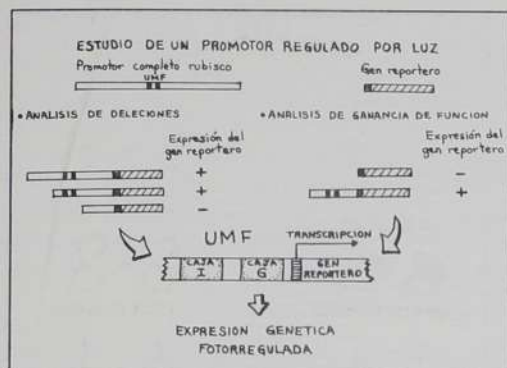
En el laboratorio de Regulación de la Expresión Génica de la Unidad Irapuato del Cinvestav, hemos analizado la región regulatoria del gen de rubisco empleando las estrategias mencionadas. Esto nos ha permitido delimitar una región muy pequeña del ADN que ha demostrado

ser suficiente y necesaria para conferir expresión fotorregulada, por lo que se le ha denominado Unidad Mínima de Fotorrespuesta (UMF). Tomando como base el hecho de que esta unidad mínima es capaz de conferir por sí sola regulación por luz, se plantea la hipótesis de que la(s) señal(e)s necesarias para producir esta respuesta, convergen en esta región de tan sólo 52 pares de bases de longitud. Analizando esta unidad mínima, se observa que contiene algunas secuencias que se encuentran conservadas en muchos promotores fotorregulados, las denominadas caja I y caja G. Ha sido difícil determinar cuál de los dos elementos es el responsable de manera específica de conferir la característica de responder a la luz, porque se ha visto que la presencia de ambos es indispensable para que se obtenga esta respuesta. Por tal motivo, se ha planteado que no existe un elemento aislado que funcione como «interruptor» de la expresión fotorregulada, sino que ésta se determina por arreglos de secuencias que actúan como «módulos», en los que cada componente es necesario para la funcionalidad de esta unidad⁷.

Existen diferentes líneas de investigación enfocadas a estudiar los factores involucrados en el proceso de la regulación de la expresión genética en respuesta a estímulos luminosos, que giran alrededor de la unidad mínima I-G ya mencionada, ya que al ser ésta una secuencia de tamaño tan reducido permite estudiar de manera muy simplificada la fotorregulación a nivel molecular. Una parte de este análisis involucra el empleo de plantas mutantes que presentan alteraciones en distintas etapas de la vía a través de la cual se transmite la señal del estímulo luminoso, provocando que exhiban respuestas fotomorfogénicas peculiares. El empleo de estas mutantes permite determinar el efecto que tiene cada una de las rutas correspondientes a cada fotorreceptor sobre la expresión dirigida por la unidad mínima I-G. Este enfoque permite determinar si esta unidad mínima es capaz de responder a los diferentes fotorreceptores o sólo a algunos de ellos, y además permite establecer si existe un punto de convergencia entre las redes de comunicación química que hace que un elemento tan pequeño responda a tan variados estímulos.

También pretendemos estudiar el papel que tiene el desarrollo de los cloroplastos en el proceso de fotorregulación, por lo que se han realizado experimentos empleando el herbicida norflurazón. Este compuesto afecta la síntesis de carotenos, provocando la fotooxidación de los pigmentos fotosintéticos y la destrucción de los





cloroplastos. Las plantas tratadas con norflurazón permiten estudiar la fotorregulación en ausencia de estos organelos, lo que facilita determinar su importancia en el proceso.

Nuestros resultados sugieren que la unidad mínima I-G es capaz de responder a estímulos percibidos por al menos dos de los sistemas de fotorrecepción, los fitocromos y los criptocromos, además de que es suficiente para reconocer las señales provenientes del cloroplasto y las cuales determinan que su expresión se limite a tejidos fotosintéticos. Estas observaciones resultan muy interesantes desde el punto de vista evolutivo, ya que esta unidad mínima de fotorrespuesta parece tener un origen muy remoto, al ser capaz de integrar y responder a varios tipos de estímulos luminosos, así como a señales de desarrollo y específicas del tejido.

Además de esto, estamos empleando técnicas de biología molecular para estudiar la arquitectura de la unidad I-G. Resulta de particular interés determinar si las secuencias adyacentes a las cajas que la componen son importantes para su funcionamiento, así como la trascendencia que pudiera tener la distancia entre ellas. Este último punto es de especial importancia, ya que la distancia entre estos elementos implica cierta posición en la estructura tridimensional del ADN. Probablemente la distancia entre estos componentes permite que ambos se encuentren sobre la misma cara de la doble hélice para facilitar algún tipo de interacción entre los factores que se unen a estas cajas.

Parece ser que los elementos de la caja I que componen esta unidad, son parte del componente crítico para la regulación por luz, ya que son los únicos



elementos comunes a todas las regiones fotorresponsivas conocidas de los genes involucrados en la fotosíntesis. Por otro lado, la caja G parece actuar como un elemento acoplador que permite adaptar la respuesta a otras señales ambientales o de desarrollo. Sin embargo, como se ha mencionado, la fotorregulación requiere de la presencia de ambas cajas para llevarse a cabo.

Con el propósito de profundizar en el papel específico de la caja I en el proceso de la regulación por luz, se está trabajando en la clonación de factores proteicos que sean capaces de unirse a este elemento. La proteína o proteínas que se unan a esta secuencia podrían actuar como factores de transcripción que sean capaces de integrar las distintas señales a las que responde la unidad mínima y de esta forma controlar la expresión de los genes fotorregulados, aunque aún no se tienen indicios de cuál podría ser su papel en el proceso en conjunto.

Perspectivas

Como vemos, el estudio de la fotorregulación en plantas es un campo fascinante y complejo, que además nos permite ampliar los conocimientos generales de la biología de estos organismos, los cuales presentan desde

sutiles hasta grandes diferencias con otros reinos. Así, es posible aplicar el conocimiento de los mecanismos de regulación génica, obtenido de otros sistemas como bacterias y levaduras, para estudiar un fenómeno particular de las plantas como es la fotorregulación de la expresión de genes fotosintéticos, y a la vez generar conocimiento acerca de las vías de transducción de señales en plantas, de los cuales a la fecha se desconoce qué tanto son semejantes o disímiles a los mecanismos de transducción en animales.

Y mientras este conocimiento se genera, no dejemos de voltear hacia la más cercana ventana para admirar y reflexionar acerca de este maravilloso grupo de organismos generadores de vida, que aunque no se desplazan ni emiten sonidos, guardan en su dinámico interior múltiples secretos dignos de ser escudriñados.



Notas:

1. X. Deng, "Fresh View of Light Signal Transduction in Plants". *Cell*. **76**, 423 (1994).

2. J. Chory, "Out of darkness: mutants reveal pathways controlling light-regulated development in plants", *TIG* **9**, 167 (1993).

3. R. E. Kendrick y G. H. M. Kronenberg, Editors. *Photomorphogenesis in Plants* (Kluwer Academic Publ. 2nd. Ed. 1994).

4. W. B. Terzaghi y A. R. Cashmore, "Light-Regulated

Transcription", *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **46**, 445 (1995).

5. C. Bowler y N. Chua, "Emerging Themes of Plant Signal Transduction", *The Plant Cell*. **6**, 1529 (1994).

6. W. F. Thompson y M. J. White, "Physiological and Molecular Studies of Light-Regulated Nuclear Genes in Plants", *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **42**, 423 (1991).

7. G. Argüello-Astorga y L. Herrera-Estrella, "Theoretical and experimental delimitation of minimal photoresponsive elements in *cab* and *rbcS* genes", *Current Issues in Plant Molecular and Cellular Biology*, 501 (1995).



La biorremediación como alternativa al tratamiento de suelos contaminados

**José Manuel Fernández Sánchez,
Graciela Ruiz Aguilar y
Refugio Rodríguez Vázquez**

Uno de los principales problemas de hoy en día es la contaminación del suelo y sus efectos adversos en el medio ambiente. Esta contaminación puede ocurrir por diferentes vías, entre ellas las operaciones industriales, como las emisiones, fugas y derrames accidentales, descargas de efluentes y residuos. Estas operaciones involucran frecuentemente mezclas complejas de compuestos químicos, por ejemplo el aceite crudo, el aceite refinado, los bifenilos policlorados (BPC) y algunos contaminantes que son combinaciones indefinidas de aceites, pesticidas, compuestos orgánicos e inorgánicos y metales pesados. Asimismo, la contaminación del suelo puede ocurrir como resultado de un fenómeno natural, como lo es el depósito de materiales debido a inundaciones, derrumbes o por procesos de mineralización que determinan la composición natural de los suelos.

Los daños en el ambiente pueden ser a corto o largo plazo, dependiendo del tipo de contaminante, su distribución, la concentración y las características hidrogeológicas del suelo. Los daños a corto plazo incluyen el contacto directo, la inhalación de polvo y de gases tóxicos o el riesgo a fuego o explosivos. La migración de los contaminantes a través del agua de lluvia, y su subsecuente infiltración en las aguas subterráneas (mantos freáticos), resulta un peligro a largo plazo por la posible ingestión del agua contaminada.

El grave problema de la contaminación ambiental continúa incrementándose debido a la toxicidad y a la persistencia en el ambiente de todos estos conta-

La Dra. Refugio Rodríguez Vázquez es investigadora titular del Departamento de Biotecnología y Bioingeniería de Cinvestav. La acompañan como colaboradores del presente artículo estudiantes del programa de doctorado de este departamento.

Tabla 1. Comparación de costos entre tratamientos².

Método	Costo (Dólares)
Incineración	530*
Solidificación	115
Rehabilitación de suelos	670
Desorción térmica	200
Biorremediación	175

*Costo anual por tratamiento de una yarda cúbica

minantes. Se establece entonces la necesidad de desarrollar una amplia variedad de tratamientos químicos, físicos y biológicos que eliminen o reduzcan la presencia de ellos en el ambiente. Los métodos más empleados para la limpieza de los suelos contaminados son el lavado del suelo y la excavación, seguidos de la transferencia del agua o del suelo a recipientes para su almacenamiento o bien para su incineración. Estas tecnologías básicamente transportan el contaminante de un sitio a otro y son frecuentemente caras o ineficaces para tratar mezclas complejas de contaminantes.

Uno de los procesos más efectivos y costeables para la restauración de los suelos contaminados es la biorremediación. La biorremediación es un proceso que utiliza organismos vivos, principalmente bacterias y hongos, y entre ellos las bacterias han sido principalmente empleadas para transformar los contaminantes en compuestos no peligrosos¹. El costo de la biorremediación es menor que el de otras técnicas (tabla 1), las cuales dependen de las características del sitio a tratar.

Ventajas y desventajas

La principal ventaja del método de biorremediación está asociada a que las transformaciones son generalmente llevadas a cabo por los microorganismos que habitan en el sitio de contaminación (proceso natural). Los residuos o subproductos del proceso biológico (bióxido de carbono y agua) son usualmente integrados geoquímicamente en el ambiente como productos inocuos. Las bacterias y los hongos tienen una gran habilidad para metabolizar (transformar) diferentes

compuestos químicos. Cuando es posible, se utilizan y aumenta la producción microbiana presente en el sitio contaminado con el fin de acelerar su actividad para transformar los componentes tóxicos, mediante la adición de nutrientes o por la introducción de otros microorganismos al sistema a tratar. El tratamiento en el sitio de contaminación de los suelos, lodos y mantos freáticos es más barato y menos destructivo que otras opciones frecuentemente utilizadas para su tratamiento, tales como la excavación seguida de la incineración o el tratamiento de suelos.

La transformación por métodos biológicos está sujeta al tiempo que se le dé al proceso y de las condiciones químicas y biológicas. La biorremediación depende de la tolerancia de los microorganismos a la concentración del contaminante y de las características del suelo, por lo que no se recomienda su aplicación en sitios que contengan compuestos radiactivos, metales pesados y cuando las condiciones microambientales sean desfavorables⁴.

Condiciones para su aplicación

Para determinar el empleo de la biorremediación en la eliminación de contaminantes se consideran:

- (1) El objetivo de la acción de restauración (remediación) tomando en cuenta el tipo y grado de contaminación.
- (2) La amenaza que representa la contaminación.
- (3) El uso futuro del suelo.
- (4) La disposición de una solución técnica a los objetivos planteados.
- (5) Los factores económicos y sociales involucrados.

Requerimientos

Los requerimientos para la biorremediación son presentados en orden de importancia en la figura 1. En primer lugar existen microorganismos que pueden desarrollarse y tener la capacidad de producir enzimas bajo condiciones ambientales extremas, es decir, orga-

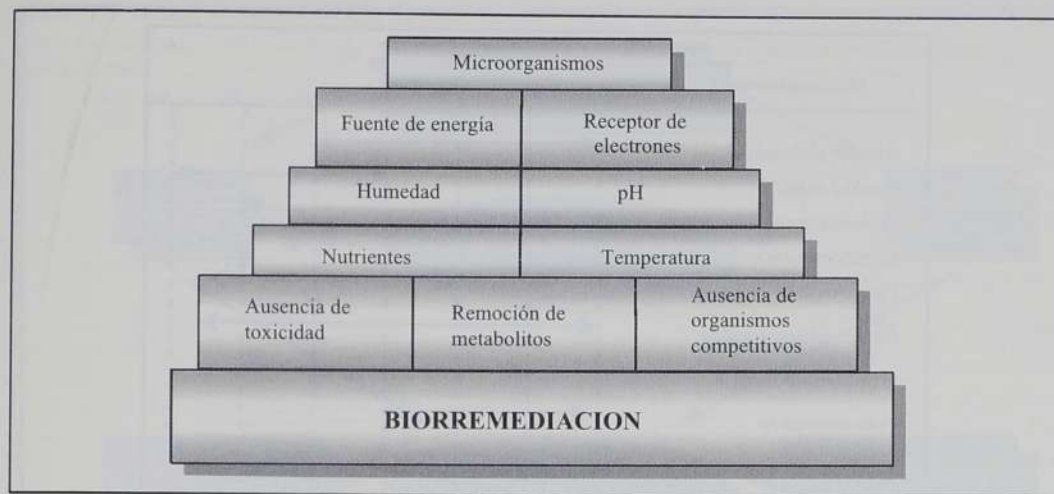


Figura 1. Requerimientos para llevar a cabo la biorremediación.

nismos que toleran disolventes orgánicos, que crecen en condiciones alcalinas o a altas temperaturas. Esto es importante porque muchos de los contaminantes no se encuentran en los ambientes propicios para el desarrollo de los microorganismos.

La fuente de energía y los receptores de electrones son incorporados por cada microorganismo a través de las reacciones de óxido-reducción; por ejemplo, la materia orgánica en los residuos es usada como sustrato por los microorganismos, los cuales la estabilizan; todos los compuestos orgánicos son fuentes de carbono y energía, que son donadores de electrones. Por otro lado, el tipo de receptor de electrones establece el metabolismo y por lo tanto las reacciones específicas de degradación. Los receptores de electrones más importantes son: oxígeno, nitratos (NO_3), sulfatos (SO_4), bióxido de carbono (CO_2) y algunos compuestos orgánicos.

La humedad es una variable importante para la biorremediación. El contenido de humedad en el suelo afecta la disponibilidad del contaminante, la transferencia de gases, los movimientos y etapas de crecimiento de microorganismos y la distribución de especies. Asimismo, el agua disuelve los nutrientes que pasan fácilmente a través de las membranas de las células. Durante la biorremediación, si el contenido de agua es alto, será difícil que el oxígeno atmosférico penetre al suelo y éste puede ser un factor limitante en el desarrollo de los

microorganismos. El pH del suelo es una de las medidas más indicativas de las propiedades químicas del suelo y varía considerablemente de un área geográfica a otra. Por fortuna muchas bacterias crecen mejor a un pH neutro o ligeramente alcalino. En general, la degradación de hidrocarburos es más eficaz a valores de pH 7 que con pH 5. El crecimiento de los hongos es favorecido a pH ácidos.

La temperatura tiene una marcada influencia sobre la velocidad de biorremediación. La velocidad de degradación es una función directa de la temperatura. Muchas bacterias detienen su actividad metabólica a temperaturas cerca del punto de congelación. Cada microorganismo tiene una temperatura mínima a la cual su crecimiento no ocurre; sin embargo, existen microorganismos que se adaptan a los cambios de temperatura. Los microorganismos que se ha encontrado que son efectivos para los procesos de biorremediación se desarrollan en un intervalo de -10 a 40°C (figura 2). La aereación es un requisito en la mayoría de los casos, porque provee del oxígeno necesario para el desarrollo de microorganismos aerobios. Es un mecanismo de intercambio de gases en las tierras, que evita la escasez de oxígeno y la toxicidad del bióxido de carbono. Se considera que un suelo tiene una aereación adecuada cuando tiene suficiente aire entre los espacios porosos y además hay agua presente. La eliminación del aire en los poros debido a la saturación de humedad o

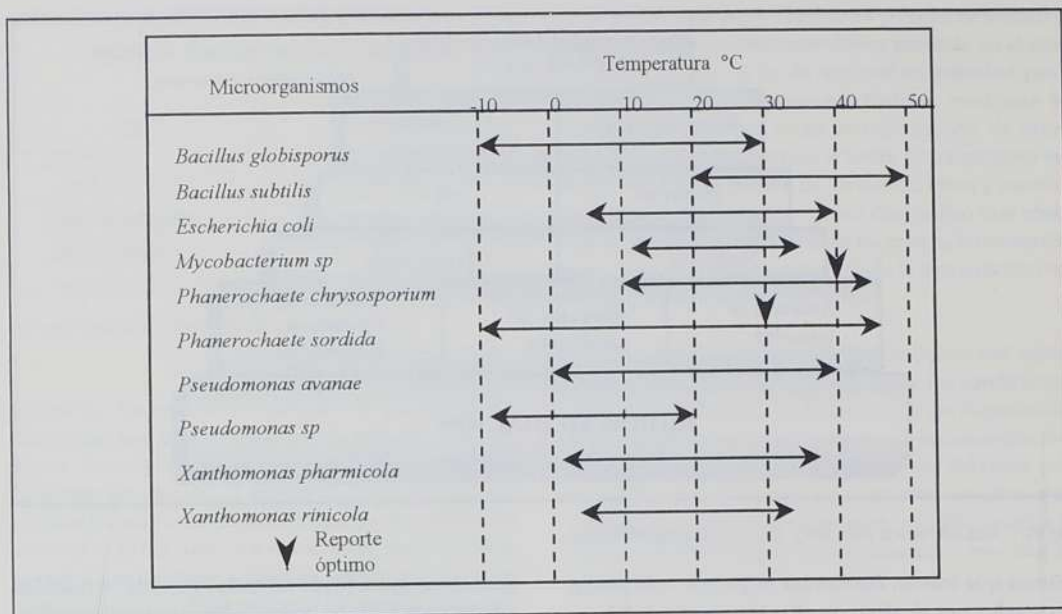


Figura 2: Intervalo de la temperatura de crecimiento de algunos microorganismos.

compactación del suelo, reduce la transferencia de oxígeno y hace que el proceso sea más lento.

Procesos de biorremediación

Cuando un sitio con residuos peligrosos está confinado, los residuos pueden degradarse de manera natural (biodegradación natural). Muchos de los contaminantes orgánicos, son eventualmente transformados o degradados en tiempos adecuados y los sitios que los contienen regresan a su estado natural. El tipo de tratamiento a usar depende de la factibilidad de aplicación de los métodos de tratamiento de suelos, de la disposición de instalaciones especiales, como en el caso de los sistemas de biorreactores, y de la oportunidad de aumentar los procesos biológicos específicos del suelo. En la figura 3 se muestran los diversos tipos de tratamientos biológicos.

La fitorremediación, en la cual se emplean a las plantas para la remoción de contaminantes, se considera como una etapa final del proceso de saneamiento. En este tratamiento, parte de los residuos son usualmente acumulados en los tejidos de las plantas, para luego ser

cosechados y removidos. El tipo de tratamiento que se aplicaría a un sitio depende de la clase de contaminante presente, de las opciones de tratamiento disponibles y a la disposición final de las plantas removidas.

Por otro lado, en la biorremediación se involucran la bioaumentación —en la cual se adicionan microorganismos ajenos al suelo o sitio contaminado, los cuales han sido adaptados o manipulados genéticamente para la degradación de contaminantes— y la bioestimulación, que consiste en la suplementación de los nutrientes necesarios para estimular el crecimiento de los microorganismos nativos del suelo.

El tratamiento de materiales peligrosos puede realizarse en el sitio contaminado (*in situ*) o fuera del sitio contaminado (*ex situ*). Un tratamiento *in situ* se ve afectado por las restricciones locales, regulaciones del estado, densidad poblacional o por otras causas que impidan su aplicación. Cuando esto ocurre, el residuo peligroso y el suelo o agua contaminada son llevados a otra parte para su tratamiento (*ex situ*). Tanto en el tratamiento *in situ* como en el *ex situ*, se debe evitar la actividad humana y de animales en el lugar donde se aplica⁴.

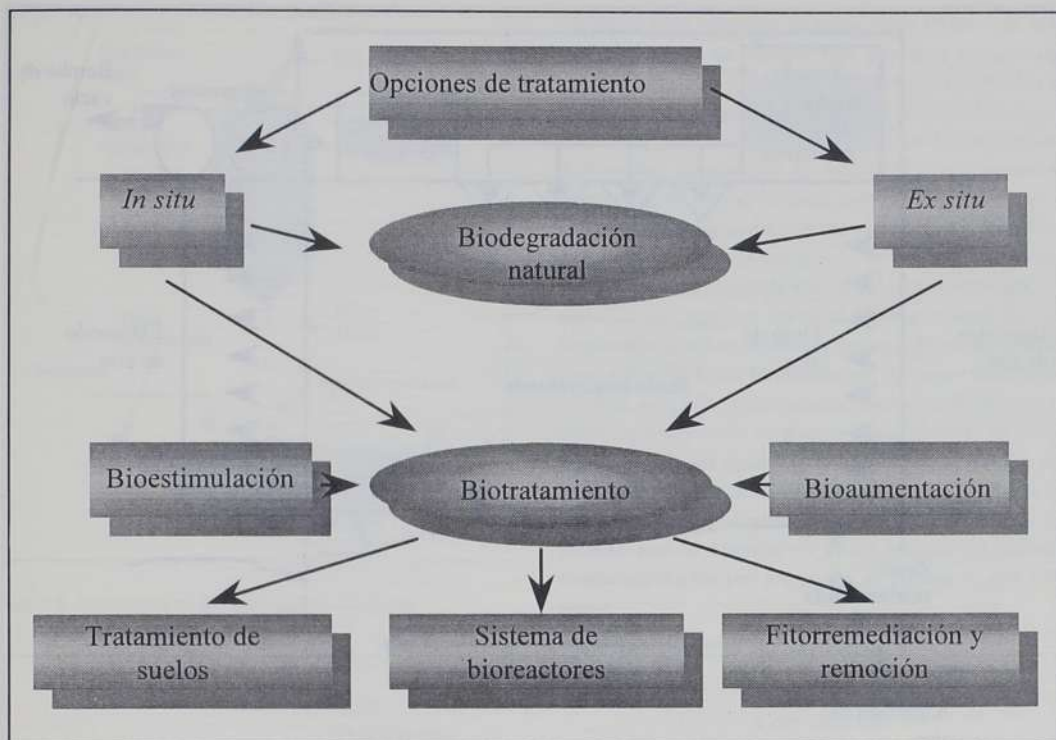


Figura 3. Las diferentes opciones en la biorremediación.

Biorremediación *in situ*

La biorremediación *in situ* generalmente involucra un proceso de bioestimulación (figura 4). Aunque la estimulación de la actividad microbiana en el suelo o la selección natural de poblaciones de microorganismos del mismo suelo presenta una alternativa de tratamiento para muchos residuos orgánicos peligrosos, muchas veces no es capaz de degradar ciertos tipos de compuestos. En otros casos, es muy difícil desarrollar una cantidad suficiente de microorganismos sobre el sitio contaminado bajo concentraciones limitadas del sustrato para degradar de manera rápida el residuo. En estas condiciones, se adicionan al suelo microorganismos ajenos al sitio. La degradación de compuestos fenólicos, pesticidas y muchos compuestos clorados se ha demostrado a nivel laboratorio, inoculando los suelos con microorganismos específicos⁵.

La presencia en el ambiente de ciertos disolventes alifáticos clorinados, como el tricloroetano y el tricloroetileno, requiere de la adición de gas natural (o metano) y aire para provocar el crecimiento de las poblaciones microbianas y aumentar el cometabolismo de estos compuestos. El cometabolismo se define como la transformación fortuita de una sustancia por microorganismos que se alimentan de otro sustrato. La sustancia cometabolizada no se utiliza como la fuente de carbono y energía y sólo se transforma parcialmente. Los organismos metanótrofos son organismos que utilizan el metano como fuente de carbono y energía, ya que contienen enzimas capaces de oxidar el metano y a una gama de alcanos, alquenos y metanos halogenados. Como ejemplo de los disolventes alifáticos clorados metabolizados por este medio se tienen: el tetracloro etileno, tricloroetileno, tricloroetano, dicloroetano, tetracloruro de carbono y cloroformo.

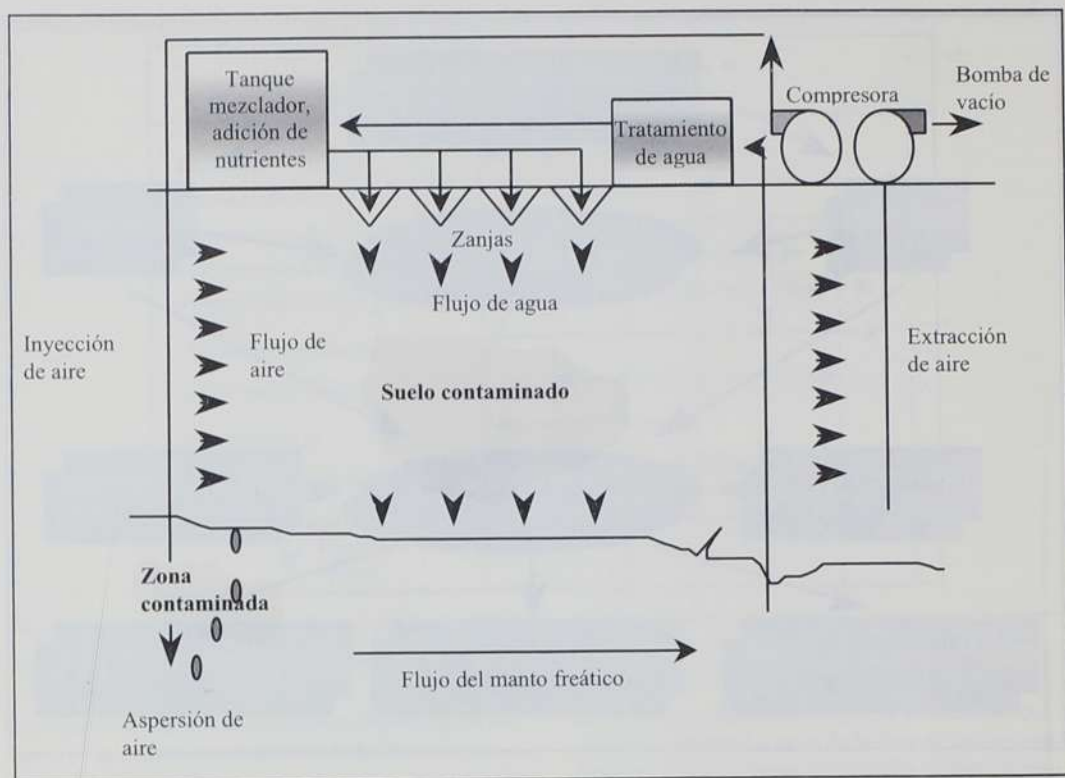


Figura 4. Biorremediación *in situ*.

Existen tres tipos de sistemas que se aplican en la biorremediación *in situ*, en los cuales generalmente se hace circular aire y nutrientes a través de la región contaminada para promover el crecimiento de microorganismos aerobios (requieren oxígeno para su desarrollo) con el fin de degradar los compuestos contaminantes. El primero de ellos es el bioventeo, que provee el oxígeno por medio de bombas de vacío y los nutrientes por medio de inyectores a la zona afectada. Los otros sistemas consisten en tratar las regiones que se encuentran por arriba o por debajo del manto freático. En el primer caso, se distribuye el oxígeno en forma de peróxido de hidrógeno y los nutrientes por medio de un inyector. En el otro, denominado aspersor de aire, se administra el oxígeno directamente en el manto freático y los nutrientes se distribuyen en el suelo con ayuda de inyectores.

Biorremediación *ex situ*

En la biorremediación *ex situ*, los métodos que se emplean son los bioreactores, unidades de tratamiento de suelos, pilas de composteo y las biopilas. Los sistemas de bioreactores son principalmente usados para residuos líquidos (figura 5a). La velocidad de degradación se favorece con el empleo de bioreactores con los tratamientos en el campo, porque se pueden controlar las condiciones de operación del sistema. La desventaja de estos sistemas es su costo, que generalmente es elevado e involucra altas inversiones de capital, gastos de operación y de mantenimiento. Las unidades de tratamiento de suelo (figura 6a) consisten en mezclar el suelo agua con nutrientes, y la posible adición de microorganismos al suelo. Estos tratamientos son eco-

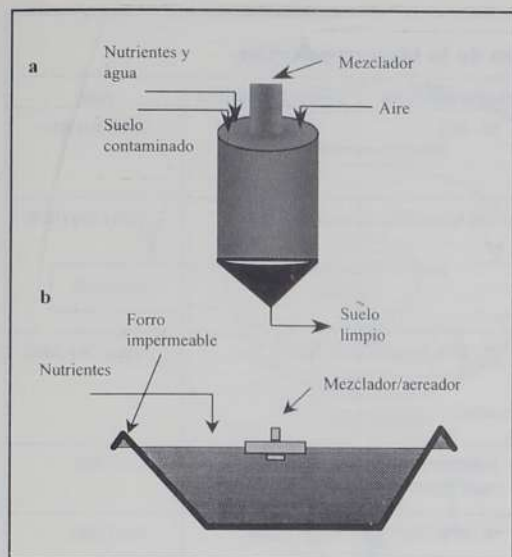


Figura 5. Tratamiento ex situ. a Bioreactor. b Laguna.

nómicos, pero requieren grandes áreas de terreno por períodos largos de tiempo. Los procesos pueden ser usados para degradar residuos sólidos, semisólidos y líquidos. Su aplicación depende de la velocidad de carga del residuo y de los métodos disponibles. En las pilas de composteo (figura 6b) se adiciona algún material lignocelulósico como: bagazo, paja, viruta, pastos, etc., con el fin de aumentar la porosidad de la pila y favorecer la transferencia de oxígeno. Actualmente se ha encontrado que se puede adicionar hongos ligninolíticos crecidos en residuos lignocelulósicos a suelos contaminados, con lo que disminuye considerablemente la concentración de contaminantes de tipo aromático. Para obtener una adecuada relación carbono/nitrógeno se adicionan nutrientes orgánicos e inorgánicos. El composteo puede ser aerobio o anaerobio (en ausencia de oxígeno), estos últimos se utilizan generalmente para residuos volátiles altamente peligrosos. Las biopilas se forman por montículos de suelo que en su interior contienen ductos por los cuales se provee el aire y el agua⁶.

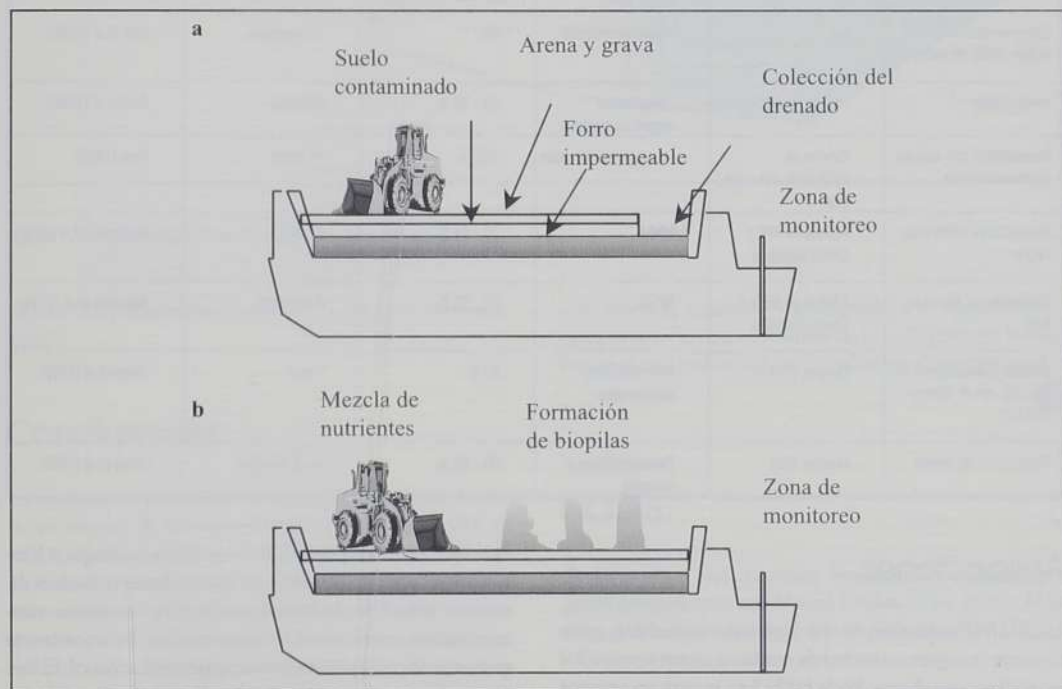


Figura 6. Técnicas de biorremediación ex situ. a Unidades de tratamiento suelo. b Pilas de composteo

Tabla 2. Ejemplos de aplicación de la biorremediación.

Tipo de remediación	Lugar	Contaminante	Nivel de degradación	Duración del tratamiento	Autor
Adición de receptores de electrones (amonio y fosfatos)	NR	Aceite de refinería	50 - 70 %	300 días	Dott <i>et al</i> (1995)
Adición de aceptores de electrones (perclorato de hierro (III), nitrato de hierro (III) y peróxido de hidrógeno)	Suelo contaminado artificialmente	Diesel	> 99 %	1 hora	Watts y Dilly (1996)
Adición de aceptores de electrones (sulfato de hierro (III) y (II) y percolato de hierro (III))	Suelo contaminado artificialmente	Diesel	70 - 80 %	1 hora	Watts y Dilly (1996)
Bioaumentación con <i>Arthrobacter</i>	Fábrica de herbicidas, Arkansas, EUA	Pentaclorofenol	Reducción de la vida media del tóxico	15 horas	Finn (1983)
Bioaumentación con bacterias y aplicación de fertilizantes	Exxon Valdez, Alaska	Derrame de aceite contaminado con hidrocarburos polinucleares aromáticos y alifáticos	60 - 90 %	20 - 30 días	Atlas (1995)
Bioaumentación con un cultivo mixto de bacterias	NR	Aceite de refinería	NR	10 semanas	Dott <i>et al</i> (1995)
Bioreactores	Fábrica de pesticidas	Compuestos orgánicos clorados	20 - 90 %	300 días	Dott <i>et al</i> (1995)
Bioreactores con adición de <i>Pseudomonas</i>	Fábrica de herbicidas, Arkansas, EUA	Compuestos clorados	100 %	14 horas	Finn (1983)
Bioreactores, nivel laboratorio	Fábrica de BPCs, Checoslovaquia	BPCs	70 - 94 %	22 días	Kastanek <i>et al</i> (1995)
Biorreactores, planta piloto	Fábrica de BPCs, Checoslovaquia	BPCs	75 - 85 %	5 semanas	Kastanek <i>et al</i> (1995)
Reactor sólido/líquido inoculado con <i>P. Chrysosporium</i>	Oregon, EUA	Hidrocarburos policlorados	83 %	1 mes	Stroo <i>et al</i> (1989)
Tratamiento de suelos	Oregon, EUA	Pentaclorofenol y creosota	80 - 99 %	4 - 8 semanas	Stroo <i>et al</i> (1989)

Aplicaciones

La biorremediación se ha aplicado con éxito para eliminar una gran variedad de contaminantes contenidos en suelos y acuíferos. En la tabla 2 se muestran algunos casos donde se han aplicado procesos de biorreme-

diación. En el Departamento de Biotecnología y Bioingeniería del Cinvestav se están desarrollando diversos estudios de biorremediación de suelos contaminados con bifenilos policlorados, hidrocarburos poliaromáticos, benzo[a]pireno y pentaclorofenol. El tipo de procesos que se aplican son *ex situ*, utilizando las técnicas de bioestimulación y bioaumentación, esta

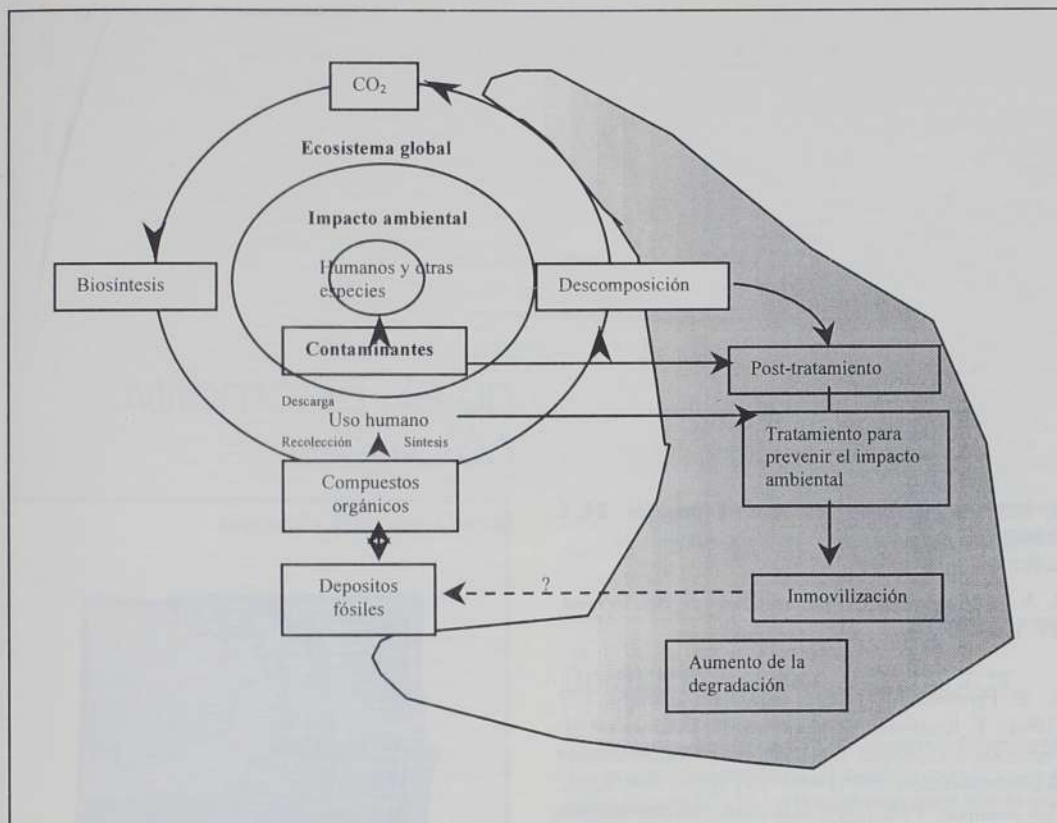


Figura 7. La biorremediación apoyando a la naturaleza.

última con diferentes especies de hongos ligninolíticos⁷.

Conclusiones

La contaminación ambiental puede ser disminuida con la tecnología de biorremediación (figura 7). Como en muchas enfermedades, se requiere evaluar cada caso para dar un remedio. La biorremediación de diferentes contaminantes deberá estar basada en el tipo de químico presente, el uso de microorganismos y el desarrollo de las condiciones ambientales más importantes. Requiere de un equipo multidisciplinario, donde su base principal es la microbiología. Para desarrollar un plan de biorremedia-

ción efectivo, costeable y ambientalmente seguro, es necesario tener un conocimiento de la ecología y de la evolución de las poblaciones microbianas degradativas⁸.



NOTAS

1. D.L. Wise, D.J. Trantolo, *Remediation of hazardous waste contaminated soil* (Marcel Dekker, EUA, 1994); M.R. Atlas, *I. Biodeterioration & Biodegradation*, 317 (1995).
2. J.T. Cookson, *Bioremediation Engineering, Design and application* (McGraw-Hill, EUA, 1995).

3. S. Saval, *Ingeniería y Ciencias Ambientales* **34**, 6 (1998).

4. A.J. McDonald, E.B. Rittmann, *Environ. Sci. Technol.* **27**, 1974 (1993).

5. E. Figuerola, J. Nebot, *Ingeniería Química*, 139 (1994); F. Kastánek, G. Kuncová, K. Demnerová, J. Pazlarova, J. Burkhard, Y. Maléterová, *I. Biodeterioration & Biodegradation*, 287 (1995); F.H. Stroo, A.M. Jurek, A.J. Bumpus, F.M. Torpy, D.S. Aust, "Bioremediation of wood preserving gastes using the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*," en *American Wood-Preserves Association*, 1 (1989).

6. K.R. Finn, *Experientia* **39**, 1231 (1983); L.R. Chaney, P.D. Oliver, "Sources, potencial adverse effects and remediation of agricultural soil contaminants", en *Contaminants and the soil environment in the Australasia-Pacific Region*, Ed. por R. Naidu, et al. (Kluwer Academic Londres; 1996).

7. CINVESTAV-Colegio de Posgraduados de Chapingo, Fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, CONACyT 3707P-B9608 (1997); CINVESTAV-IMP, Biodegradación de bifenilos policlorados, Proyecto FIES 95-106-VI (1995).

8. G. Hammer, *Trends in Biotechnol.* **11**, 317 (1993).



Mitomanía de un escalafón

Gerardo Herrera Corral

Los científicos son personas de temperamentos muy distintos que hacen diversas cosas de maneras muy diferentes.

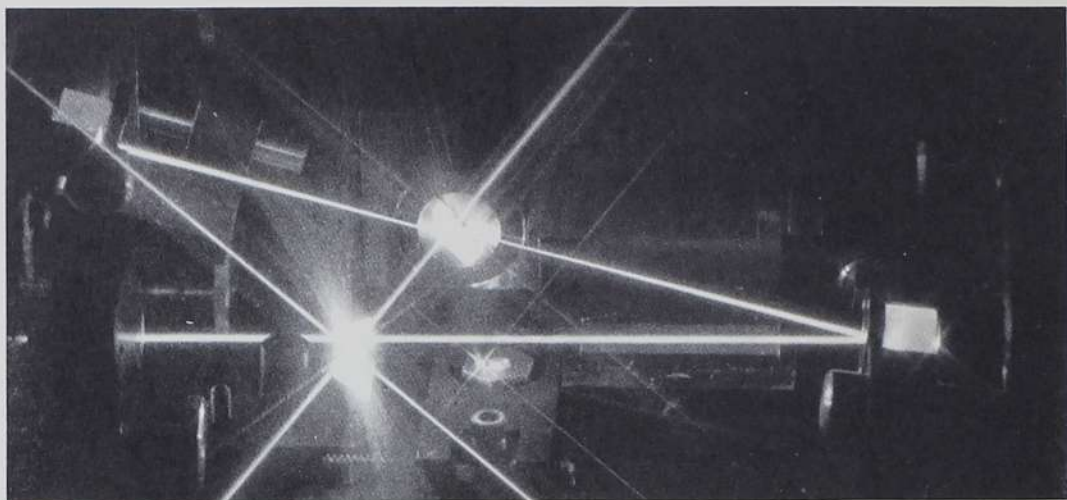
P. B. Medawar¹

Resfriado común y partituras

Todos hemos escuchado en algún momento frases como: "... la medicina moderna ni siquiera puede curar el resfriado común". Todos también sabemos que lo relevante y ofensivo de una frase como ésta no es su valor verdadero en el sentido lógico de su estructura, sino su implicación. Al juzgar un área de investigación, como se juzga al desarrollo de la medicina en una frase así, se incurre en evidente ligereza haciendo uso retórico de una "lógica de ocasión". La afirmación es irresponsable y el grado de respeto que se le pueda conferir es tan alto como superficiales sean nuestros conocimientos en medicina.

Quiero presentar aquí una serie de reflexiones que más que ayudar a nuestra comunidad a ampliar su conocimiento sobre el modo de operar de áreas diferentes a la propia, lo lleven a adoptar una actitud más cuidadosa, comprensiva y crítica. No pretende ser un análisis completo sino complementario en el debate que se ha venido desarrollando en periódicos, revistas y corredores. Más que convertirme en apologista explícito de mis logros quiero opinar sobre este insidioso aspecto de la vida, convencido de que detrás de cualquier acto de defensa

El Dr. Gerardo Herrera Corral es investigador titular del Departamento de Física del Cinvestav. Dirección electrónica: gherrera@fis.cinvestav.mx



está la sobrevivencia en nuestro país de muchas disciplinas científicas que, como la que practico, no encajan en la visión que nuestros colegas viejos tienen sobre la manera de hacer ciencia.

Los sistemas nacionales de evaluación (SNI y otros) basan sus criterios en los logros del investigador. En el acto, y de manera casi inevitable, adquieren un carácter jerárquico en el que generalmente los más altos peldaños son ocupados por los más viejos. Los comités a cargo de la evaluación están formados por aquellos investigadores que, cubiertos de gloria o no, han llegado a las máximas categorías. El sistema admite así la gerontocracia como régimen en el que, además de la sabiduría que dan los años, la frustración y la decrepitud compiten en la votación de anacronismos.

Si bien la manera de mejorar esta situación no es fácil, las consecuencias de un sistema vetusto son obvias. ¿Qué hacer con un joven que llega al país con la esperanza de practicar una actividad científica hasta entonces ausente en el panorama nacional? ¿Cómo evaluar sus logros?

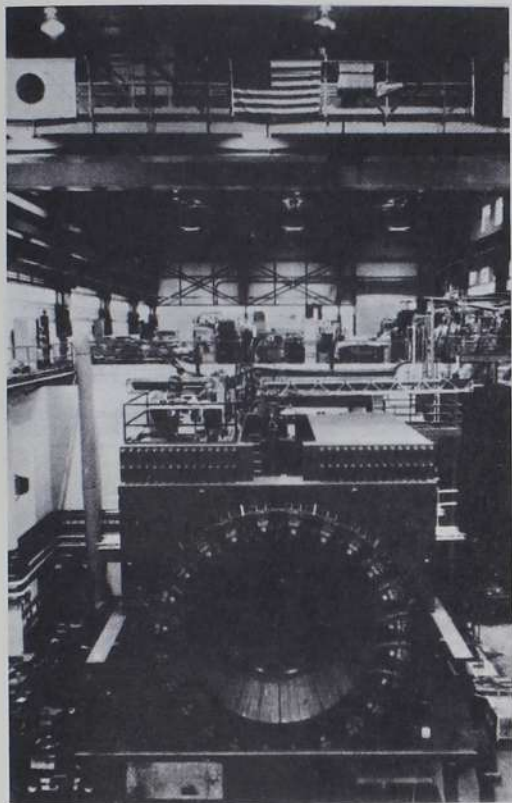
La manera de hacer ciencia ha cambiado rápidamente y, para fortuna o desventura de muchos, sigue cambiando. Para un sistema de evaluación esto no sería un inconveniente si no fuera porque la escala del cambio es mucho menor que las edades de los miembros de un comité. Uno de los elementos relativamente nuevos en

el quehacer científico es el trabajo desarrollado en grupos de investigadores. Si bien esta modalidad ha existido ya por algún tiempo, es en las últimas décadas que se ha intensificado de manera considerable.

En el artículo "Evaluación académica: ¿el ocaso de los criterios numéricos?", Bogdan Mielnik² manifiesta el sentir de colegas teóricos. Aunque claramente muestra su esfuerzo por entender la actividad científica experimental, en particular en el campo de la física experimental de partículas elementales, no logra hacerlo en sus detalles y de esa manera incurre en imprecisiones que creo conveniente enmendar.

Ciertamente que los tiempos han cambiado y Levi-Strauss advierte³:

"¿Seremos nosotros en ese punto prisioneros de una perspectiva científica heredada del siglo XIX, cuando cada campo de pensamiento estaba lo suficientemente restringido para que un hombre con cultura general, vivacidad y claridad, espíritu lógico y talento literario llegase a abarcarlo por entero y, trabajando de manera aislada, consiguiese repensarlo todo por cuenta propia y presentar una síntesis? Nos alegremos o lo deploramos, la ciencia moderna ya no permite esa exploración artesanal. Ahí donde bastaba un especialista para ilustrar su país, es necesario un ejército, que nos falta; las bibliotecas personales se transformaron en curiosidades



museográficas; pero nuestras bibliotecas públicas, sin locales, sin crédito, sin personal documentalista e incluso sin número suficiente de sillas para los lectores, desaniman a los investigadores en lugar de servirlos. En fin, la creación científica representa hoy una realización colectiva y ampliamente anónima para la que estamos lo menos preparados posible, habiéndonos ocupado demasiado en prolongar más allá de su tiempo los hechos fáciles de nuestros viejos virtuosos. ¿Estos continuarán creyendo por mucho tiempo que un estilo a toda prueba puede remediar la falta de partitura?"

La escala del conocimiento

A principios de 1970 la física de partículas, basada en aceleradores, había alcanzado un alto grado de madurez. Los experimentos, más que aparatos de mesa comen-

zaron a demandar áreas experimentales tan grandes como los hangares de un aeropuerto. Por esos tiempos existían ya 15 grandes laboratorios con aceleradores de altas energías en operación; de éstos, 8 estaban en los Estados Unidos, 3 en la Unión Soviética y 3 en Europa, aparte del multinacional CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) en Ginebra, Suiza.

Este crecimiento, y la sofisticación asociada, no apareció sólo en la física de partículas. Pronto, y en ocasiones como resultado del desarrollo de esta área de la física, surgieron laboratorios con aceleradores y tecnologías similares pero con objetivos diferentes. La utilidad de la radiación de sincrotrón en la física de estado sólido y en la biología, por ejemplo, adquirió grados similares de complejidad y grupos grandes de investigadores comenzaron a colaborar. Actualmente existen proyectos en medicina con decenas de colaboradores como el de la angiografía coronaria no invasiva con radiación de sincrotrón, o programas de biología molecular estructural, por mencionar sólo algunos.

Sin embargo, la evaluación del trabajo científico realizado por grandes grupos de investigadores nunca considera que el tamaño del grupo de investigación está determinado por la tarea a desarrollar. Si se requiere construir un gran detector de partículas radiactivas o analizar una gran cantidad de datos, el grupo necesariamente constará de decenas o centenas de investigadores. Ningún investigador aislado observará jamás al quark top, ni se enfrascará en la búsqueda del bosón de Higgs o intentará codificar las infinitas secuencias de DNA. La colaboración es pues necesaria hoy en día.

La balsa, el demonio y los detalles

En sus comentarios sobre el trabajo colectivo, Bogdan Mielnik² parte de una situación, si bien poco utópica, es analizada con poca precisión y mucha falta de conocimiento del trabajo realizado en colaboración. Imagina dos grupos de científicos, cada uno con 10 investigadores. El primer grupo consta sólo de investigadores con proyectos individuales (*sic*). En el lapso de 2 años el grupo tendrá alrededor de 15 trabajos, calcula. En el segundo grupo prevalece el trabajo colectivo (*sic*). Cada investigador genera una idea de trabajo; no obstante,

desarrolla sólo un fragmento del proyecto, invitando a los demás a colaborar como autores. Después de 2 años el segundo grupo, al que Bogdan denomina la "balsa", tendrá un total de 10 publicaciones y cada miembro reportará que tiene 10 publicaciones. De esta manera, afirma, las comisiones evaluadoras obtendrán una idea falsa de la productividad de los involucrados.

El análisis así planteado es de una simplicidad extrema, que se torna sospechosa cuando más adelante, y en otro contexto, el autor nos previene: "el demonio está en los detalles". Alertados por esta observación y tentados por el mal veamos los detalles de la balsa.

Sinergia es la razón existencial del trabajo colectivo. Por lo mismo no debería pasar desapercibida en ningún análisis del trabajo en grupo. La sinergia de las colaboraciones es conocida no sólo en el medio de los grandes grupos. Entre los investigadores *solipsistas* se dan con frecuencia lo que llamaremos aquí colaboraciones puntuales. Estas consisten en pequeños grupos de dos, tres o más individuos en los que se comparten ideas y se trabajan ciertos tópicos. El carácter de las colaboraciones puntuales es tal que deja en libertad a los participantes de unirse a otros grupos de otras universidades y países. El resultado beneficia a todos y la razón es simple: se desarrolla una dinámica de intercambio y discusión de ideas en una atmósfera en la que la sinergia es esencial. Como resultado se logra una gran productividad que en muchas ocasiones llega a ser similar al de las "colaboraciones extensas" (en contraposición a puntual).

Al respecto citamos la opinión de una *autoridad en la materia* que, además de ser laureado Nobel, confiesa⁴:

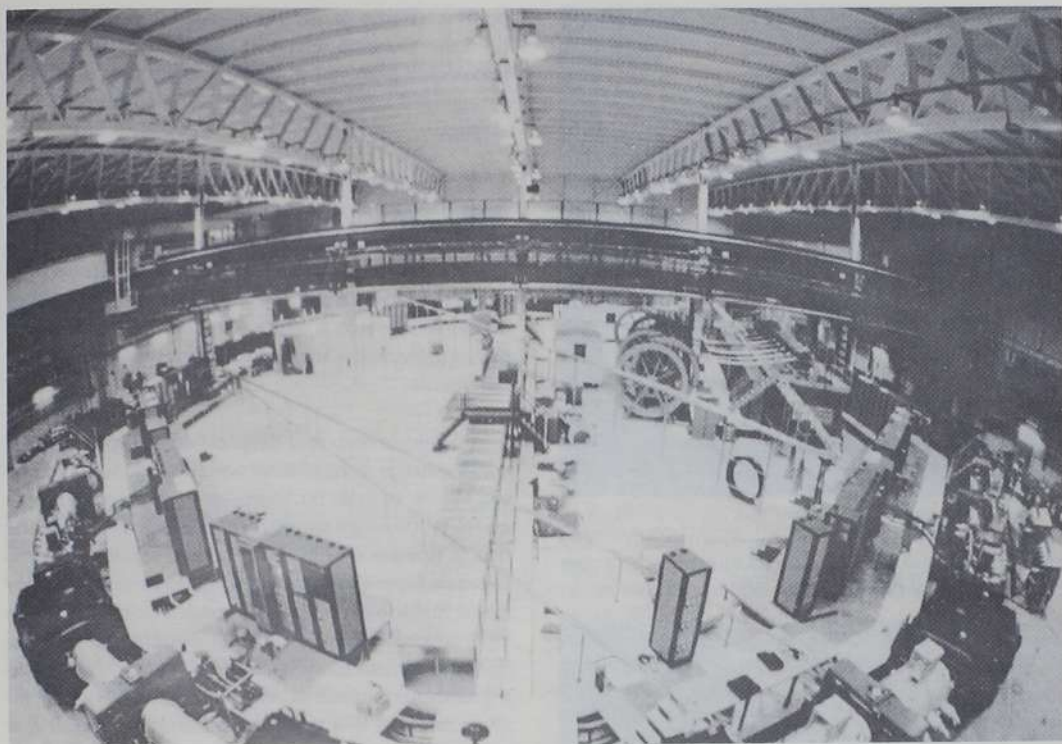
"Como casi toda mi labor científica ha sido efectuada en colaboración, yo me considero una autoridad en la materia. La colaboración científica no se parece en nada a dos cocineros que, a codazos, tratan de apartarse uno al otro del perol con caldo; tampoco es como artistas trabajando en un mismo lienzo, o ingenieros calculando cómo empezar a construir un túnel simultáneamente desde ambos lados de una montaña, de manera que los contratistas no los despidan al surgir, independientemente, en extremos opuestos.



"Es más bien en la etapa de planeación, como una sesión de escritores de chistes, pues aun cuando cada uno sabe, como lo saben todos los científicos, que tener una idea —una ocurrencia— sólo puede ser un acontecimiento personal, cada uno sabe también que puede crearse una atmósfera en que uno de los miembros del equipo inspire a los demás, de modo que todos puedan desarrollar las ideas de otros y edificar sobre ellas. Al final, nadie está muy seguro de quién pensó qué. Lo principal fue que algo se pensara. Un joven científico que sienta una gran necesidad de decir '¿Esta idea fue mía, sabe usted?', o bien, 'ahora que los he convencido a todos ustedes...' no sirve para un trabajo en colaboración y a él y a sus colegas les irá mejor si él trabaja por su cuenta. Los viejos siempre felicitarán a un principiante por una idea brillante que fue genuinamente suya y no producto de la sinergia espiritual que tales sesiones promueven. Sinergia es la palabra clave en la colaboración —indica que el esfuerzo conjunto es mayor que la suma de las diversas aportaciones— pero la colaboración no es obligatoria, por muchos pomposos pronunciamientos que puedan hacerse respecto a la superioridad del equipo sobre el individuo. La colaboración es un gozo cuando funciona bien, pero muchos científicos pueden desempeñarse muy bien trabajando por su cuenta".

Exigencia interna

Otra característica del trabajo en grandes grupos es la *exigencia interna*. Es común que los trabajos experi-



mentales en la física de altas energías enfrenen pocos problemas para ser publicados en revistas del más alto impacto. La razón no es única, pero sin duda el grado de exigencia del grupo es una de las más importantes. Para que dentro del grupo se acepte como viable la publicación de algún resultado es necesario pasar por el difícil proceso de convencer a sus miembros al nivel más alto de especialización posible. Tal es el grado de revisión interno en las grandes colaboraciones que se ha llegado a proponer la publicación de los resultados en su versión de *preprints* sin que éstos tengan que pasar por un proceso de refereo que sólo retrasa los tiempos de publicación.⁵

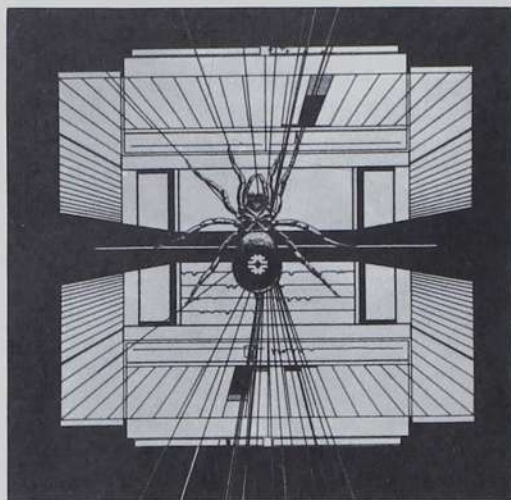
Si tan sólo consideramos los efectos sinérgicos uno puede esperar que eventualmente no sean 10 sino 20 publicaciones las de la balsa. Sin embargo, al tomar en cuenta el alto grado de autoexigencia del grupo puede uno entender porqué no serán 20 sino sólo 10 artículos en los 2 años de observación. Los números han quedado invariantes pero ciertamente que a la luz de este simple

ejercicio podemos entender porqué los artículos de la balsa se publicarán en las revistas de más alto impacto (como *Physical Review Letters*) y porqué tendrán no sólo algunas citas sino cientos de ellas.

Riesgo y aventura

Después de todo no debería ser sorprendente la superioridad del trabajo en equipo: diez balsistas inevitablemente llegarán más lejos que diez nadadores independientes. Otro aspecto importante de los trabajos colectivos es el tiempo que les toma a los 10 investigadores de la balsa el construirla, más concretamente me refiero a los tiempos de publicación.

El resultado de observar durante dos años al grupo de 10 investigadores individuales no cambiará los resultados al variar el tiempo de inicio de la observación pero sí lo hará en el caso de los balsistas. Si, por ejemplo, el inicio de la observación coincide con los dos o quizá



tres años de construcción de la instrumentación utilizada en el experimento, el resultado será muy próximo a cero publicaciones. No será así si el periodo de observación coincide con la etapa de análisis y publicación de resultados.

Los experimentos en física de altas energías manejan escalas de tiempo tan largas o cortas como alto o bajo es el grado de sofisticación del experimento y puede ir de 1 a 20 años o aún periodos mayores. Al respecto podemos referir el caso de los proyectos que desde hace 5 años fueron aprobados para correr en el año 2005 en el *Large Hadron Collider* (LHC) que se construye en el CERN en Ginebra, Suiza. Por supuesto, para ser aprobados los estudios que llevaron a la propuesta final comenzaron con mucho tiempo de anticipación.

El riesgo que implica construir una balsa que no llegará muy lejos por deficiencias en el diseño o construcción representa una peculiaridad más del trabajo colectivo. *Riesgo y aventura* son la parte medular de la actividad científica y están presentes tanto en los escritorios como en los laboratorios, pero la importancia que éstos tienen en el resultado final no es de la misma magnitud.

Como consecuencia de la diversidad humana, habrá siempre diferentes grados de exigencia. En el grupo de los 10 investigadores individuales tendremos algunos que por su elevada autoexigencia publicarán sólo un artículo en 2 años, mientras que otros publicarán cada dos meses

por el solo hecho de manejar niveles de calidad menores. La balsa no escapa a esta realidad de diversidad psicológica, pero en cambio está sujeta por criterios de unanimidad a seguir la opinión de los más exigentes en el grupo.

La amplitud del trabajo en grupo, o de los proyectos que se propone, fuerza a sus colaboradores a abarcar más en el conocimiento de otras áreas. Un físico experimental necesariamente debe estar al día en los adelantos tecnológicos y el desarrollo teórico que ofrece en ocasiones la pauta a seguir. Al pedir a éstos contribuciones individuales se debe considerar este punto muy seriamente.

Un balsista no puede darse el lujo de esperar años y correr el riesgo de no obtener nada cuando sus objetivos son vanos; es más, no tiene siquiera la posibilidad de que su proyecto sea aprobado en esas condiciones. Sabe que la manera de obtener fondos y aglutinar talento capaz de llevar el barco a buen puerto es imponiéndose metas ambiciosas. El balsista mexicano, obligado a la internacionalización escapa de ese círculo nacional donde la comodidad ha llevado a nuestros académicos a publicar dos veces al año para garantizar la sobrevivencia en el SNI y seguir cobrando las becas que premian un promedio y no una ambición. No estaría mal, parafraseando a Levi-Strauss³, que nuestros comités formados por *viejos virtuosos, empeñados en prolongar sus logros fáciles*, se detuvieran a pensar en cómo premiar la ruptura.

En países como el nuestro es deprimente ver la condición humillante de nuestros investigadores que se ven obligados a hacer trabajos oscuros, cercados por una cultura donde el ejercicio de la profesión no garantiza el mañana ni da prestigio.

En términos generales las metas de los solipsistas son pobres. Carecen de la exigencia de un grupo que busca como un todo justificar las grandes inversiones, los periodos largos de espera y el gran riesgo.

La evaluación, al ser ejecutada por seres humanos, es una actividad de tipo social. Su éxito se logra por medio de presentimiento, de visión y de intuición. Vivimos en un mundo de diferencias y predilecciones humanas; pero extrapolar este hecho para transformarlo

en una teoría con límites rígidos constituye ya una ideología con seguidores y perseguidos y ahí está el peligro.

Nunca, bajo ninguna circunstancia, será sabio desalentar a jóvenes que tienen la iniciativa, el coraje y el valor de probarse fuera, donde los vicios de una academia como la nuestra no juegan ningún papel.

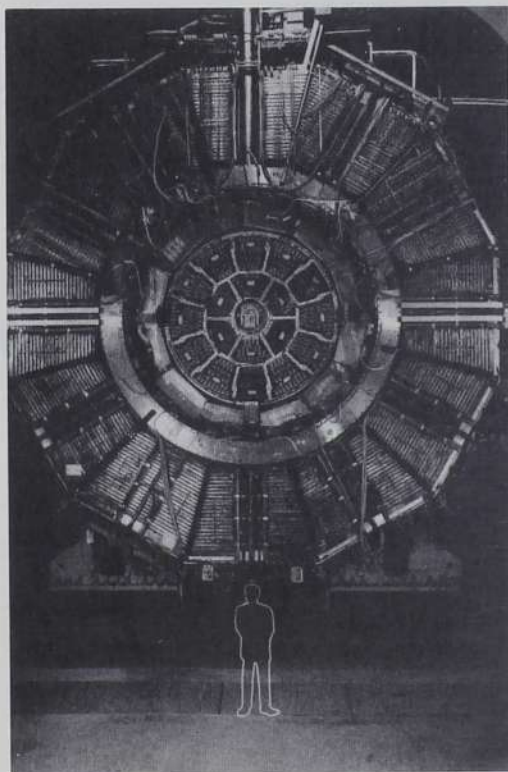
Después de todo, si la preocupación está en los premios, no olvidemos que al final siempre quedarán nuestras conciencias en esas noches de insomnio, mirándose al espejo.



Notas

1. P. B. Medawar, "The Art of the Soluble", en: *Pluto's Republic: Incorporating the Art of the Soluble and Induction Intuition in Scientific Thought* (Oxford Univ. Press., 1984).
2. B. Mielnik, "Evaluación académica: ¿el ocaso de los criterios numéricos?", *Avance y Perspectiva* **17**, 93 (1998).
3. C. Lévi-Strauss, *Tristes Tropiques* (Compahia das letras, 1996).
4. P. B. Medawar, *Consejos a un joven científico* (Fondo de Cultura Económica, 1982).

5. R. W. Poultney, *Europhysics News* 27 (Feb. 1996), *CERN Courier* (Jul. 1997), *Avance y Perspectiva* **16**, 408, (1997).



BECAS PARA ESTUDIANTES Y EGRESADOS DE POSGRADOS EN:

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) con el apoyo de la CFE y del CONACYT, ofrece becas para desarrollar la tesis de maestría o doctorado, en nuestras instalaciones y laboratorios, en alguno de los proyectos de investigación tecnológica de nuestro instituto.

- FÍSICA
- INFORMÁTICA
- INGENIERÍA CIVIL, EN COMPUTACIÓN Y SISTEMAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES, MECÁNICA, NUCLEAR Y QUÍMICA
- MATEMÁTICAS APLICADAS
- QUÍMICA
- OTRAS

BECAS PARA REALIZAR TESIS

MAESTRÍA DOCTORADO

BENEFICIOS

- Beca económica
- Asesoría de investigadores
- Asistencia a cursos de capacitación
- Posibilidad de asistencia a seminarios y/o congresos internos
- Posibilidad de contratación en el IIE como investigador al término exitoso de su estancia
- Promoción en la bolsa de trabajo del IIE al término de su estancia
- Acceso a utilizar la infraestructura institucional, relacionada con su programa de trabajo

REQUISITOS

- Promedio general no inferior a 80/100
- Buen desempeño académico
- Ser mexicano
- Haber acreditado las materias del programa de maestría y doctorado y tener la aprobación de su institución para comenzar la tesis
- No tener más de 18 meses de haber iniciado el programa de maestría

Los albores de la biología molecular

Carlos Chimal

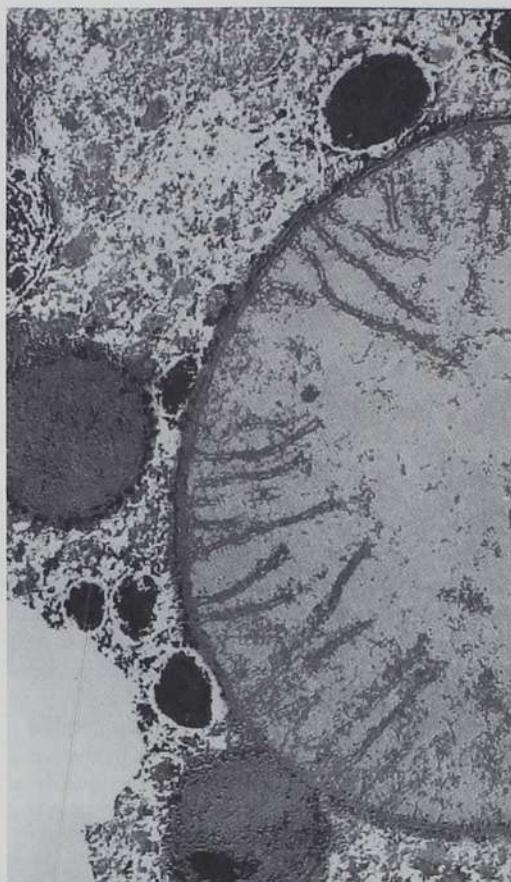
Cristales de hemoglobina

Hace poco más de 50 años, el Medical Research Council (MRC) de Inglaterra estableció en Cambridge una unidad para el estudio de la estructura molecular de los seres vivos. Desde entonces ha sido uno de los laboratorios más productivos del mundo. Pero, ¿cómo surgió?, ¿cuál fue su desarrollo inicial?, ¿cuáles eran los desafíos y cuáles fueron los primeros logros? *Avance y Perspectiva* estuvo en esa pequeña ciudad inglesa para platicar con los protagonistas de este enorme campo, de vital importancia para el futuro de la humanidad.

Es el profesor Max Perutz quien nos relata en esta ocasión el nacimiento de la biología molecular y su propia experiencia en medio de una pléyade de investigadores. Max Perutz ganó el Premio Nobel de Química en 1962, junto con Sir John Kendrew, por sus contribuciones al campo, en particular por haber descubierto la estructura de la mioglobina y la hemoglobina mediante difracción de rayos X. Perutz es un hombre pequeño que come de pie y se sienta de hinojos debido a una vieja lesión de la Segunda Guerra, cuando el barco en el que viajaba, expulsado de Inglaterra por ser ciudadano austriaco, fue atacado y hundido por un submarino nazi.

“En septiembre de 1936”, nos dice el profesor Perutz, “dejé Viena para ir a Cambridge en busca de un doctorado en cristalografía de rayos X, con J. D. Bernal, quien se encontraba en el Laboratorio Cavendish. La

Carlos Chimal, escritor interesado en la comprensión pública de la ciencia, es colaborador de *Avance y Perspectiva*.



recepción no fue precisamente cálida, ya que yo me declaré católico romano en medio de ingleses rabiosos porque el Papa Pío XI había dado su apoyo al general Franco durante la Guerra Civil española. Además, Bernal viajaba constantemente y no pude entrevistarme con él sino varias semanas más tarde.

"Entonces le pedí que me sugiriera un problema relacionado con cristales. Pero, para mi mala fortuna, Bernal no tenía nada de interés biológico relacionado con cristales. En su lugar, me dijo que podía trabajar con algunos horribles y aburridos silicatos. Era una lástima, pues el trabajo de Bernal y Dorothy Crowfoot (ahora Hodgkin) sobre la pepsina había abierto las puertas al análisis de rayos X de proteínas cristalinas. Todos los intentos previos de obtener patrones de

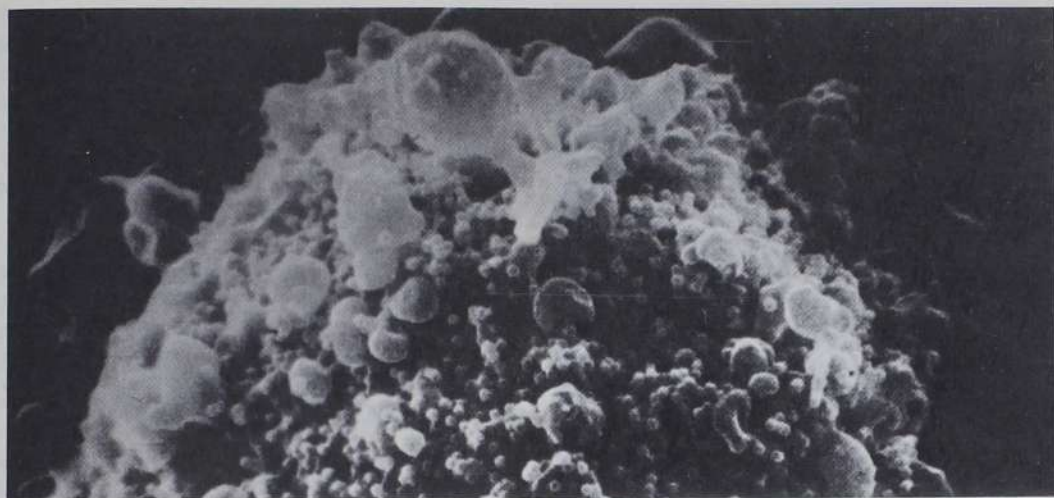
difracción por rayos X de este tipo de proteínas habían fracasado, pues se utilizaban cristales secos y éstos producían imágenes borrosas.

"Bernal representaba a la vieja guardia de autoridades en mineralogía de Cambridge. En su largo y antiguo microscopio petrográfico de prismas rotatorios pudo ver, en efecto, 'algo' de la birrefringencia (doble refracción) de los cristales de pepsina en una solución de sulfato de amonio. Pero cuando los dejaba secarse en el porta objetos, la doble refracción desaparecía y los cristales se rompían. Al menos, una placa de rayos X nos dejaba ver una vaga mancha negruzca. Entonces se le ocurrió mojar un cristal con su licor favorito dentro de un tubo de Lindemann. A través de vidrio delgado del tubo, Bernal y Dorothy descubrieron no sólo cientos de reflejos sino, mejor, que sus distancias atómicas podían anotarse.

"Si había alguien charlador, ése era Bernal. Una vez me dijo que, cuando era chico, solía leer un libro diario. Lo apodábamos el 'sabio' porque sabía de todo y tenía opiniones realmente interesantes y originales sobre infinidad de tópicos, desde la física hasta la historia de los humanos. En sus seminarios de cristalografía para nosotros, los estudiantes de doctorado, se hablaba de todo, y en realidad eran reconfortantes. No digo que fueran fáciles ni dispersos; por el contrario. Sólo que no se detenía en obviedades. Tal vez por eso un compañero no había tomado más que la siguiente nota en toda la clase: 'La maldita manía de Bernal'.

"Cuando regresé a Austria durante las vacaciones del verano de 1937 aún no sabía cuál sería el tema de mi tesis. Entonces, una prima de Praga, casada con un bioquímico, me llevó con su marido para platicar sobre el asunto. Le dije que me parecía original dilucidar la constitución química del agrupamiento hemo, pero me dijo que eso ya había sido estudiado por Hans Fischer. Sin embargo, recuerdo que también me mencionó el nombre de un fisiólogo de Cambridge, adonde habría de regresar en pocas semanas. 'Creo que deberías abordar la estructura de la hemoglobina', me dijo. 'Busca a Gilbert Adair y él te enseñará cómo hacer crecer cristales de hemoglobina'.

"Así lo hice. En esa época excéntricos como Adair no tenían una extensión telefónica en su laboratorio o buzón electrónico, así que para hablar con alguien como



él siempre había que concertar una cita. Finalmente, una mañana de esas, una amiga común, la hija de F. G. Hopkins, Barbara Holmes, arregló un almuerzo en el que lo conocí. Semanas más tarde, tenía en mis manos unos hermosos cristales de hemoglobina de caballo. Su patrón de difracción era espléndido y su simetría prometía un buen análisis por rayos X.

"Adair era un cuáquero, un experimentador meticuloso y un brillante matemático. En 1927, había determinado por primera vez el peso molecular correcto de la hemoglobina y otras proteínas mediante presión osmótica. A pesar de que no era fácil trabajar con él, me enseñó cómo hacer crecer cristales y eso me permitió trabajar con David Keilin, profesor de biología en el Instituto Molteno de la calle Downing. Keilin fue uno de los grandes bioquímicos y parasitólogos de este siglo. A él y a Hopkins los aprecié mucho. No puedo ocultar mi simpatía hacia Keilin, quien había nacido en Moscú, fue a la escuela en Praga, hizo estudios superiores en París y llegó a Cambridge en 1912. Era un hombre muy fino, en ambos sentidos de la palabra, y su inglés con acento polaco era encantador.

Biología molecular

"Nunca olvidaré ese verano de 1937. Lord Rutherford murió, de manera que W. L. Bragg fue nombrado en su

ausencia. Por lo tanto, P. M. S. Blackett tomó el puesto de Bragg en Manchester y Bernal heredó la cátedra de Blackett en Birkbeck College, adonde se movería el verano del año siguiente. Me dijo que le hubiera gustado llevarme con él a Londres pero que, por desgracia, no contaba con recursos suficientes.

"Entonces, una mañana de marzo de 1938 Hitler invadió Austria. Eso cambió mi visado; de huésped pasé a ser refugiado y, más tarde, sospechoso de espionaje. Ya le he platicado antes a usted mi travesía de América y mi aventura por la libertad¹. Así que esperé el mejor momento para hablar con Bragg en el Laboratorio de Cristalografía. Seis semanas después tomé aire y le llamé a la que fuera oficina de Rutherford, en el viejo edificio victoriano de Free School Lane. Cuando le mostré las placas de la hemoglobina a través de los rayos X se dio cuenta de la magnitud del hallazgo, pues este análisis podía extenderse a otras moléculas gigantescas de las células vivas. Bragg consiguió un donativo de la Fundación Rockefeller y me nombró su asistente de investigación. Eso salvó mi carrera científica y me permitió traer a mis padres a Inglaterra antes del holocausto.

"La Fundación Rockefeller también me permitió comprar un tubo de rayos X y se me asignó un dinerillo extra. Hay investigadores que se quejan demasiado de lo difícil que es conseguir recursos para la investigación hoy pero olvidan que hubo días en los que no se contaba



El laboratorio Cavendish en Cambridge.

prácticamente con nada. Fue Warren Weaver, el director de ciencias naturales de dicha Fundación, quien acuñó el término 'biología molecular', pues ellos financiaron a todos los pioneros del campo, como Teo Svedberg, Arne Tiselius, Kaj Linderstrom Lang, Bill Atsby y David Keilin. Tal vez suene anticuado pero no puedo dejar de asombrarme cuando pienso en el primer espectrofotómetro Beckman que le compraron a Keilin.

"En el otoño de 1945, un joven con uniforme de comandante del aire se apareció en el Cavendish de Free School Lane² y dijo que quería hacer un doctorado en cristalografía de proteínas. Lo mandaron a mi oficina, cosa que me hizo sentir muy bien, pues no había tenido antes alumnos de doctorado, pero al mismo tiempo me puso a pensar. Preocupado porque no se me ocurría un problema interesante a resolver en los próximos tres años, fui a ver a Sir Joseph Barcroft, fisiólogo y un hombre en quien podía uno confiar en esos momentos.

"En efecto, Barcroft me ayudó. En esa época, él estaba más interesado en la fisiología fetal, de manera que me sugirió llevar a cabo un estudio comparativo de la hemoglobina en diversos estados, fetal y adulta. El muchacho (John Kendrew que, como se sabe, fue uno de los actores en el desarrollo de la biología molecular) dijo que aceptaba pero que, si se podía, prefería empezar por una proteína más simple, la mioglobina.

"Kendrew tenía derecho a parte de un donativo que había quedado en suspenso al estallar la Segunda Guerra y yo a una beca por tres años. Pero no era suficiente, ya que, además, las autoridades universitarias no estaban muy convencidas de que un químico estuviese trabajando en el Departamento de Física, ¡en un problema biológico!"

Me permito interrumpir al profesor Perutz para citar al populacho, que canta: "Those were the days...". Le digo que, en realidad, nada ha cambiado en un siglo. Las simbiosis, las ciencias heterodoxas han proliferado a lo largo de estos años.

"Así es. Pero no nos engañemos. En todas las épocas, desde que el humano es humano, cuando uno siente inseguridad en su posición frente al mundo, trata de salvarse. Me pasó en medio del Océano Atlántico, torpedeados por un submarino nazi, me pasó en los laboratorios del Cavendish, me pasó en el MRC, cuando tuvimos que crecer."

Francis Crick, James Watson...

Le pido que continúe su relato, a propósito del MRC.

"Hablé con Keilin de mis temores; estaba dispuesto a conseguirme un empleo en la industria, si era necesario. Entonces Keilin fue a ver a Bragg para pedirle que buscara una alternativa a esta ciencia en gestación, tal vez en el MRC, ya que Bragg era amigo del secretario entonces, el nutriólogo Sir Edward Mellanby. Ellos sabían que, debido a la aparición de la penicilina, el MRC recibiría mucho más apoyo y que tarde o temprano Mellanby requeriría de nuevas unidades de investigación. Bragg encontró un día a Mellanby en el Ateneo y le explicó que Kendrew y yo andábamos en busca de un tesoro con remotas posibilidades de encontrarlo pero que teníamos algunas buenas cartas de navegación.

Mellanby aceptó arriesgarse. Así, en octubre de 1947, Kendrew y yo nos convertimos en la Unidad del MRC para el estudio de la estructura molecular de los sistemas biológicos”

La cosa estaba hecha. Pero, ¿cómo fue que se reunió tanta gente de talento entonces?

“Por la guerra, es un hecho. El interés de Kendrew por la cristalografía de proteínas no era gratuito ni espontáneo en un comandante; él había conocido a Bernal en el Lejano Oriente, durante la Segunda Guerra. Además, si puede ver usted la asociación y la ironía del asunto, un día de 1948 un matemático alemán, otro excéntrico como Adair, vino a verme para pedirme que aceptara a un amigo suyo como estudiante de doctorado. Entonces llegaron Francis Crick, su espíritu alto y sus risas.

“Crick había estudiado física en University College de Londres antes de la Segunda Guerra y había iniciado su doctorado estudiando la viscosidad del agua arriba de los 100 °C, cuando vino la guerra. Entonces se unió a la Marina para trabajar en minas. Ahora quería trabajar en la estructura de las moléculas biológicas o del cerebro, no sabía bien cuáles. Un año más tarde llegó Hugh Huxley como estudiante de Kendrew. ¿Qué unía a estos muchachos? La guerra. Todos tenían experiencia en ciencia aplicada a la guerra, cosa que los había acostumbrado a pensar más duro. Por eso sobresalían de los alumnos regulares. A Kendrew y a mí nos dio grandes esperanzas, como lo vimos al cabo de 50 años, de que la física y la química podían contribuir decisivamente en la comprensión del fenómeno de la vida.

“En 1950 nuestra suerte comenzó a crecer. La cabeza extraña de un muchacho con el cabello a rape y ojos saltones se apareció en la puerta de mi laboratorio y me preguntó: ‘Hola, ¿puedo pasar y trabajar aquí?’ Le dije que sí, porque supuse que se trataba del joven investigador que Salvador Luria había recomendado a Kendrew, James Watson.”

Ahora sabemos que la llegada de Watson al MRC fue muy importante, ya que los llevó a plantearse problemas más fundamentales.

Annun mirabilis

“Hasta ese momento”, continúa el profesor Perutz, “sólo éramos un grupo de químicos y físicos inspirados por bioquímicos y fisiólogos interesados en la función de las proteínas pero nunca, excepto Crick, nos habíamos preguntado de dónde venían estas proteínas. Watson, en efecto, no sólo potenció las ideas de Crick sino que nos llevó a plantearnos los problemas esenciales de la biología. Recuerdo que entonces Watson asistió a una conferencia en Cold Spring Harbor y, a su regreso, me contó cómo Alfred Hershey y Martha Chase habían mostrado que un virus bacteriano inyecta sólo su ADN en su víctima, una bacteria *coli*, y deja la proteína afuera, de manera que ésta muere, un poco como la abeja después de encajar su aguijón.

“El tercer año de la década de 1950 fue *annum mirabilis*. La reina (Isabel II) fue coronada, se llegó a la cima del Everest; se dilucidó la estructura del ADN; Huxley y el finado Jean Hanson, entonces en MIT, descubrieron el mecanismo deslizante³ de la contracción muscular. Ese año encontré una forma de descifrar los patrones de las proteínas cristalinas. Pocos, excepto Linus Pauling, dudaban que la investigación básica en biología se estuviese haciendo en Cambridge.

“No obstante, mi trabajo se puso en riesgo. En el otoño de 1953 Bragg dejó el Cavendish para asumir la dirección de la Royal Institution en Londres; quería que nos fuéramos Kendrew y yo con él; además, el nuevo director estaba preocupado por la sobrepoblación del Cavendish, y nos pidió que buscáramos otro sitio. Nosotros, en cambio, consideramos que era vital quedarnos en Cambridge para garantizar la continuidad de la unidad. Y nos quedamos.

Juicio y poder de decisión

“El espacio era crítico. Un día se desocupó una casucha enfrente del Cavendish y la pedimos a las autoridades. Pero éstas se negaron, aduciendo que iba a demolerse. El nuevo director del laboratorio, Nevil Mott, nos ayudó y finalmente pudimos ocupar la casa, que aún puede verse en Free School Lane. En 1956 Sidney Brenner llegó a la unidad desde Johannesburg. El y Crick se habían conocido tres años antes, cuando Jack Dunitz y

Leslie Orgel, de Oxford, se reunieron con él para examinar el nuevo modelo del ADN. En su libro, *The Eighth Day of Creation*, Horace Judson incluyó algo de la interesante correspondencia que mantuvieron Brenner, quien hubo de regresar a Sudáfrica, y Crick. Ese año, 1956, Crick vino a verme para pedir una beca del MRC en favor de Brenner.

"Las cosas eran más fáciles en esos días. Tenía sólo que ir a ver al secretario ejecutivo del MRC y platicarle brevemente el caso. El dijo: '¿por qué no lo contratamos?'. Y eso era todo, nada de paneles, árbitros, sistemas de evaluación sobre el desempeño académico ni entrevistas, ni tampoco interminables reportes. Sólo unos cuantos tipos con juicio y poder de decisión.

"Ya desde que Kendrew dilucidara la estructura de la mioglobina se había planteado la posibilidad de construir un edificio propio pero yo creí que era una idea prematura, sobre todo porque estábamos débiles en nuestra química. Por eso buscamos acercarnos a Fred Sanger, quien había empezado en el sótano y luego en un cobertizo de la Escuela de Bioquímica en Tennis Court Road. De inmediato le escribí una carta al nuevo secretario del MRC, Sir Harold Himsworth, quien había tomado el puesto de Mellanby. Vino a vernos con Quintin Hogg (más tarde Lord Hailsham), quien a la sazón era el Presidente de los Lores y, por tanto, era el responsable ante el Parlamento de los consejos de investigación. Ambos eran personas muy astutas y vieron las posibilidades brillantes de nuestro programa.

"A principios de 1958 el consejo del instituto me pidió un informe sobre nuestra actuación y perspectivas en el MRC. Días después de haberlo entregado, varios miembros del consejo de investigación me dijeron que mi memorando sobre los más 'recientes avances en Biología Molecular' era el documento más interesante que habían leído en años. Me sentí aliviado, la batalla había sido ganada antes de empezar. La mañana siguiente Himsworth vino a decirme que nuestro programa de investigación había sido aprobado por el consejo del MRC.

"Todavía necesitábamos un edificio propio y, desde luego, la aprobación de la universidad. Esto sería más difícil que convencer al consejo del MRC. Los admi-



nistradores universitarios se oponían a nuestro programa y, además, nosotros queríamos un sitio en el centro de Cambridge para mantener estrecho contacto con otros colegas. Al final, tuvimos que aceptar un espacio en el nuevo edificio para la Escuela de Médicos Posgraduados, del profesor Joseph Mitchell. En marzo de 1962 finalmente nos mudamos. La Reina vino a inaugurar el edificio y, mientras Crick y Brenner tuvieron algo que hacer fuera de la ciudad, Jim Watson voló especialmente desde los Estados Unidos para estar en el acto. Creo que Crick y Brenner se equivocaron, pues la Reina entendía perfectamente de lo que estábamos

hablando en el momento en que le mostrábamos nuestra investigación. Hasta los más enconados enemigos de la Corona caían rendidos ante su simpatía e inteligencia."

¿Cómo definiría su paso por el MRC?

"No podría definirlo. Pero es como los padres que, al darse cuenta del talento de sus hijos, sólo los impulsan y se aseguran que nadie dilapide lo que la naturaleza ha dado. Eso es el MRC, un lugar donde mucha gente dotada se ha reunido para resolver preguntas básicas. Cada uno contribuyó a desarrollar la pregunta del otro; yo sólo me concreté a ayudarlos a encontrar lo que necesitaban."



Notas

1. Véase *Vuelta* núm. 198, mayo de 1993.
2. Como se sabe, en los años de 1960 el viejo edificio victoriano no sólo estaba saturado de gente y automóviles sobre los niveles permitidos de radiación nuclear. Finalmente fue evacuado, limpiado y ahora lo ocupan los estudiantes de licenciatura, áreas documentales y de computación, así como el conocido Departamento de Filosofía de la Ciencia, donde están jóvenes y maduros pensadores de Inglaterra. Me atrevería a decir, por ejemplo, que el profesor George Steiner, célebre personalidad de la crítica literaria de Churchill College, con quien platiqué recientemente, tiene un punto de vista entusiasta

de la ciencia a finales del siglo, en gran parte debido a los relatos generados por los nuevos filósofos y, sin duda, al auge de la divulgación científica entre los lectores de libros. El nuevo Cavendish está en las afueras de Cambridge.

3. Según este modelo, los filamentos que constituyen los músculos esqueléticos siempre tienen una longitud esencialmente constante. Antes se creía que un músculo era como el hule, que se contrae cuando se calienta ya que sus largas cadenas moleculares tienden a enrollarse. Huxley y Hanson encontraron que el acortamiento activo se produce mediante un proceso en el que conjuntos de filamentos delgados son tirados o "corridos" hacia los filamentos más gruesos. Se cree que la superposición resultante tiene lugar debido a una fuerza deslizando desarrollada entre los filamentos delgados y gruesos por la acción de los puentes transversales. Estos puentes, que contienen la parte enzimática activa de las moléculas de miosina, pueden hidrolizar ATP cuando interactúan con acatina, liberando de esta manera la energía necesaria para la superposición y la contracción.

Así fue

Laura Elena Morales

No era necesario decirlo pero una cierta emoción coloreaba mis palabras que sobrecogidas de olvido iban esculpiendo en mi mente ruidos de ausencia que la memoria al reconocer por costumbre deletrea. Tampoco lo escribí pero quise entrar con delicadeza a mi antiguo descaro y a mi antiguo pudor paseando lentamente mi imaginación por una de esas sospechas que fluyen parecidas al desencanto cuando alguien apagó la vela de mi desconcierto, con la que dibujaba el mundo aprovechando la migración de ciertos peces, y no llega la hora en que pueda reconocirme.

Mas no me volveré tormenta para no admitir que estoy en calma.

Mientras, correré tras las sombras que se disipan sobre mis pasos (donde extravié la cuenta de las estrellas y de las hormigas) hasta tropezarme con la realidad.

Que debía hacerlo comprendí pues me movió el desear lo que buscaba a sacudir el cielo con mis manos para obtener los frutos designados por una ociosidad sin pretensiones.

Pero fue una fluctuación indeterminada, como un arrepentimiento tardío o como una necesidad de lavar en voz baja, como cuando llovizna y se ha escuchado al viento detenerse de pronto ahí donde su mirada se queda sin respiración, la que me situó irremediabilmente cerca de la cordura que al perderse ya era otra y que no me contempla ni me espera.

La Dra. Laura Elena Morales es investigadora en el Departamento de Matemáticas del Cinvestav.

Y quise hacer de lado el sabor de lo irreal dejándome llevar por las alianzas de sus imágenes pero tampoco lo hice. Y no dije entonces que sentí la culpa de quien ve la danza de los siete velos velada por la transparencia del dilema ni que el sonido se lima las uñas en el lugar preciso donde el silencio camina guiando las pisadas de todo lo nocturno, ni que observé con atención la luz universal de esa blanca superficie vacía atrapada en el agujero en que se ha convertido.

Y en esa inmovilidad de estar con un pie allá, y otro en el tiempo que aún falta, la resurrección presente (sin llevar prisa) fingiendo no recordar que conduce al extraño estímulo de la esperanza al abrir la cerradura de ese espacio en el que la luz y la sombra no se representan ni se excluyen y el conjunto faltante es intersección y complemento.

No, los hechos no se mueven del sitio donde la acción los ha vencido y lo que no desordena no bebe en sus ríos, crea sus propios fantasmas, se quema en la llamarada de la duda y yo, que nunca consulté con el destino si me tocaba seguirlo, como una de esas palabras que no aceptan su significado, simplemente, me fui.





Biotecnología

Maestría y Doctorado

Padrón de posgrados de excelencia del CONACYT

Objetivo

Formación de recursos humanos a través de su incorporación en proyectos de investigación interdisciplinarios en Biotecnología.

REQUISITOS DE INGRESO AL POSGRADO

- Promedio mínimo de ocho.
Acreditar los exámenes de admisión en agosto de cada año.
- Entrevistarse con el coordinador académico y requisitar todos los documentos que se soliciten.
- Estudios de licenciatura concluidos dentro de las áreas de Biología, Ingeniería Química, Biotecnología y afines.

BECAS

Los estudiantes admitidos recibirán el apoyo Departamental para solicitar becas ante el CONACYT.

INFORMES E INSCRIPCIONES

Coordinación Académica del
Departamento de Biotecnología y Bioingeniería

Av. IPN No. 2508. Col. San Pedro Zacatenco,
México, D.F., C.P. 07300

Tels. 747 7000, 747 7001 ext. 3906 y 3918
Fax: 747 7000 ext. 3905, 747 7002
E-mail: csantoyo@mvax1.red.cinvestav.mx

Innovaciones en ciencias, matemáticas y educación tecnológica: un estudio de la OECD

Edwyn James

Cuando México ingresó a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) en 1994, ya se había iniciado el estudio *Innovaciones en Ciencias, Matemáticas y Educación Tecnológica (SMTE*, por sus siglas en inglés)¹. Este se había iniciado alrededor de 1990, con la participación de muchos países que habían mostrado un gran interés, porque los temas del estudio se consideraban vitales para la prosperidad económica futura. Se creía que los jóvenes debían tener la oportunidad de acceder a cierto nivel de comprensión de los temas de estudio, para beneficio propio y para el bienestar de la sociedad. Paradójicamente, los temas del estudio se consideraban relativamente impopulares.

Se hizo un estudio de casos en escuelas, desarrollado por 23 grupos de investigación en 13 países, siendo este estudio el mayor que se ha emprendido en este género. Es necesario resaltar que estos países no hicieron un mal papel, según se vio en comparaciones internacionales, pero aun así se reconoció la necesidad de buscar nuevas propuestas que acrecentaran el interés y el compromiso de los jóvenes. Algunas veces las innovaciones fueron sugeridas por los gobiernos, algunas otras provinieron de grupos entusiastas o de personas. Independientemente de la fuente de donde provenían, los diversos estudios fueron diseñados para dar un mayor atractivo a la experiencia del aprendizaje. Todos los estudios enviados a la Secretaría de la OECD en agosto de 1995, según el reporte *Changing the Subject*,¹ fueron publicados en abril de 1996, con la correspondiente versión en español que está accesible. Durante los dos

El profesor Edwyn James es consultor de la OECD. La versión en inglés del presente texto será publicada en las memorias de la Conferencia OECD de Oaxtepec, octubre de 1997. Traducción de Gloria Novoa de Vitagliano.



últimos años, culminando en la presente conferencia para países latinoamericanos, se llevó a cabo una importante serie de reuniones internacionales para diseminar los resultados encontrados y promover discusiones ulteriores para tratar de mejorar la calidad de la educación que se ofrece. Esta conferencia proporciona una extraordinaria oportunidad para aplicar los resultados del proyecto en un ámbito en el que se necesitan y se buscan urgentemente más amplias oportunidades educativas.

Motivación para la reforma (OHP3)¹

Necesidades de economía. Los informes de más de un tercio de las innovaciones que estudiamos explícitamente citaban el desempeño económico de sus países ... (*Cambiando el tema*, p. 30)¹.

Descontento. A los muchachos ya no les gustan las

cosas que había antes: nosotros estudiábamos las ondas luminosas, las ondas de sonido, se estudiaban las células, se hablaba de oceanografía... pero nunca se hacían conexiones... con las vidas de los muchachos (US Mimi).

Derechos de los futuros ciudadanos... para asegurar, en vista del arribo del siglo veintiuno, el desarrollo de las personas sensibles que sean capaces de hacer frente a los cambios de nuestra sociedad tales como la internacionalización en diferentes sectores y la propagación de los medios de información (Japan Science).

Integración. El hecho de que cada niño sea diferente significa que nuestra enseñanza debe tomar en cuenta este hecho, no como un obstáculo, sino más bien como un reto (España).

Evidentemente existe una necesidad de cambio. No podemos cubrir las necesidades de la economía si no es a partir de que los jóvenes estén motivados para hacer estudios de ciencias, matemáticas y tecnología. Cuando



expresamos inquietud por la falta de interés de nuestros estudiantes debemos cuestionarnos sobre la naturaleza del currículum que se les ofrece, y tomar medidas para hacer una reforma apropiada. Los jóvenes no se sentirán motivados a menos que lo que se les ofrezca se relacione bien con su modo de vida, sus ansiedades y circunstancias, y a partir de la percepción de lo que es importante, se les respete como individuos. En muchos de los estudios hechos en el SMTE se consideró necesario tener un enfoque integrado, validado mediante la estrecha relación con los productos de la vida contemporánea, en un contexto de responsabilidad ecológica y conciencia social. Esta integración permite que la ciencia estudiada en la escuela sea más cercana a la ciencia que es practicada por los científicos e ingenieros contemporáneos. Así, por ejemplo, los desarrollos modernos en genética o cirugía de trasplantes, comunicaciones o cultivos agrícolas hechos en forma intensiva, no se pueden ubicar satisfactoriamente dentro de las fronteras tradicionales del tema, sino que deben incorporar diversos elementos, tales como los que provienen de la ética y la economía. La ciencia en la escuela debe reflejar estas tendencias.

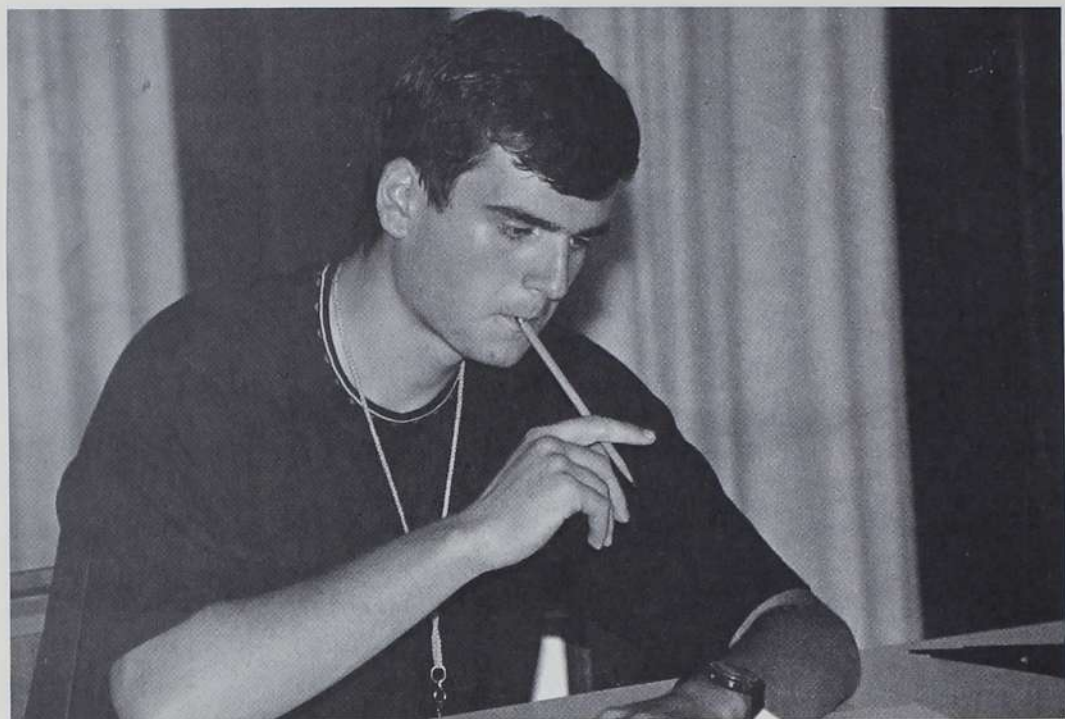
Curriculum y enseñanza (OHP5)¹

Contemporánea. Todo estudiante... debería... por lo menos ser capaz de interpretar los fenómenos científicos y la tecnología que se desarrolla a su alrededor... entendido esto en forma tal que le permita moverse en el mundo del siglo veintiuno (España).

Integrada... la ciencia básica... como una combinación de tareas de la vida común, temas que son relevantes para la vida real, y una orientación hacia la naturaleza basada en la acción responsable... En contraste, una madre en un curso de física tradicional preguntó si los niños irían a aprender a desatornillar un foco para quitarlo de una lámpara... El profesor respondió: "eso no es parte del curso" (Alemania).

Aplicada y adecuada para resolver problemas. A mí me gustaría que los chicos fueran capaces de pensar matemáticamente... considerar un problema y plantearse a sí mismos preguntas que los llevaran hacia la solución o el entendimiento del problema, y no que mecánica y ciegamente dijeran, necesito esta fórmula... y no sé por qué (US UMC).

Esta propuesta, revisada para enseñar y aprender, se basa en gran parte en cada estudiante, que es visto como un sujeto que tiene derecho a iniciarse en el mundo de la ciencia, la matemática y la tecnología, y que éstas sean ofrecidas en forma tal que promuevan el interés personal y el compromiso del estudiante. La experiencia del aprendizaje debe ser agradable y el SMTE ofrece muchos ejemplos en los que es así. La evaluación debe usarse para beneficio del estudiante mientras tiene lugar el aprendizaje, aportando una retroalimentación positiva y exponiendo problemas que permitan una solución y una renovada motivación - en vez de que sean vistos como un obstáculo a ser superado (o más como una posibilidad de fallar). En paralelo con estos derechos, el estudiante será visto cada vez más como un individuo responsable, que puede contribuir en el diseño de un curso y en asesorías personales, que se involucra en discusiones con sus pares y por lo tanto obtiene un conocimiento personal muy claro de por qué es importante estar en la escuela.



Aprendizaje del estudiante y evaluaciones (OHP)¹

Disfrute. La serie de videos presenta exitosamente la ciencia como una empresa que es apasionante, a veces divertida y que siempre tiene un propósito determinado ... la motivación para hacer ciencia —esto es, para convertirse en un científico— viene de querer encontrar respuestas y del deseo de ayudar a los demás (US Mimi).

Involucramiento. ... realmente me ha asombrado que (los estudiantes) me digan ahora que encuentran pautas en todo. ... Si no hubiera sido por este enfoque centrado en el estudiante, no creo que ellos hablaran o, más aún, que pensarán así acerca de estos temas. Sienten que hay una especie de poder matemático que pueden alcanzar.

Responsabilidad. En este terreno muchos (estudiantes) han experimentado un buen desarrollo. Ven lo que les puede ser de utilidad y son honestos e inteligentes

cuando tratan de obtener la información que necesitan. Como resultado de esto entienden que deben tener la responsabilidad de aprender por sí mismos (Norway Maths).

(Las innovaciones) hubieran sido más efectivas si se hubiera pensado cómo la evaluación formativa podría ayudar a lograr cambios específicos en el aprendizaje ... (*Changing the Subject* ... p. 119).

El profesor es sumamente importante en la medida en que contribuya a acrecentar la disposición del estudiante, no sólo a nivel de su desempeño en el salón de clases (lo cual es el pináculo del proceso), sino durante la planeación y el desarrollo previos. Dentro del SMTE se tienen ejemplos de profesores con la visión y el interés para realizar innovaciones pioneras exitosas y trabajar de cerca con otros para llevarlas a cabo. Debe señalarse que hay otros ejemplos en donde los intentos de reforma fueron impuestos por los gobiernos; los maestros estaban confundidos sobre cómo debían proceder y los resultados no fueron satisfactorios. El SMTE enfa-



tizó el profesionalismo del maestro como una componente fundamental en cualquier intento por mejorar la calidad de la educación. Más aún, es deseable que haya una mejor estructura en la carrera de los profesores dentro de la cual se reconozca la capacidad intelectual y pueda ser ampliamente desarrollado el talento de los profesores.

Educación y entrenamiento de los profesores (OPH7)¹

¿Qué quiere decir ser un profesor? El SMTE muestra al profesor: en el salón de clases...

- ampliando las habilidades del sujeto
- manejando situaciones no tradicionales de aprendizaje
- desarrollando habilidades pedagógicas y de evaluación

... y más allá del salón de clases

- encabezando innovaciones
- poniendo en juego mecanismos claves para la adopción y el desarrollo de actitudes importantes y roles adoptados (*exercising key development/adoption roles*)
- estableciendo relaciones con otros para obtener ayuda mutua
- trabajando con investigadores con respeto mutuo.

Los profesores en el SMTE están interesados en el desarrollo curricular y la evaluación: incorporan exitosamente tecnología electrónica... se relacionan con sus pares, con investigadores universitarios y con la gente que hace la política, una pertenencia común...

El maestro como profesional debe estar comprometido durante toda su vida con el aprendizaje, debe tener buenos vínculos sociales, y por lo tanto debe ser un modelo para el estudiante, para que éste se convierta en el futuro ciudadano informado y comprometido.

Dentro de la estructura profesional, ¿cómo deben estar equipados los maestros para desempeñar estos papeles nuevos y más exigentes? Es posible que el maestro de matemáticas o ciencias bien calificado no se sienta a gusto si tiene que trabajar en áreas diferentes a la suya o en formas no tradicionales, y podrá necesitar ayuda para adquirir otras habilidades y competencias. El SMTE ha enseñado a los maestros a compartir experiencias con sus colegas, para beneficio mutuo, y para sacar provecho de la interacción con universidades y con la amplia comunidad fuera de la escuela. La educación no es privilegio exclusivo de los expertos, y debe ser vista como una empresa que depende del apoyo de la sociedad. Corresponde al sistema educativo desempeñar su parte identificando prioridades de financiamiento, facilitando

los nexos entre las escuelas y todos aquellos que estén interesados en la educación y promoviendo el desarrollo de la carrera profesional de los maestros.

Educación y entrenamiento de los maestros (OPH8)¹ : ¿cómo se deben satisfacer las necesidades de los maestros?

Compañerismo... el maestro necesita tener el apoyo de la administración de la escuela, que a su vez necesita contar con el apoyo de un sistema más amplio, y así sucesivamente (Australia).

La preparación del cuerpo docente se ha logrado proporcionando desarrollo profesional dentro de la escuela y apoyando el desarrollo profesional amplio de los maestros (Australia).

Los profesores visitantes con más experiencia ayudaron a sus colegas de otras escuelas para llegar a ser profesores de física (excelente para ambos casos), pero encontraron después de dos años ... que no existía una estructura firme que proveyera de un ulterior desarrollo en su carrera. Se deben crear vínculos entre los profesores visitantes y sus colegas de universidades e instituciones de formación que ofrecen cursos de iniciación y de desarrollo para profesores en servicio.

Prioridades políticas

- identificar y ordenar las necesidades
- alentar el compañerismo
- proveer tiempo y recursos
- aspirar a un desarrollo de una carrera de largo plazo.



Nota

1. Todas las citas están tomadas de *Changing the Subject: Innovations in Science, Mathematics and Technology Education* (Black de Atkin, Londres, OECD, 1996).



1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA BIOMÉDICA

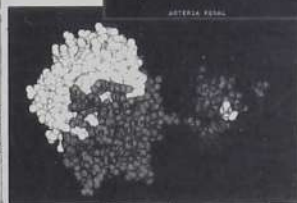
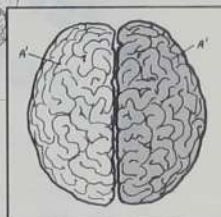
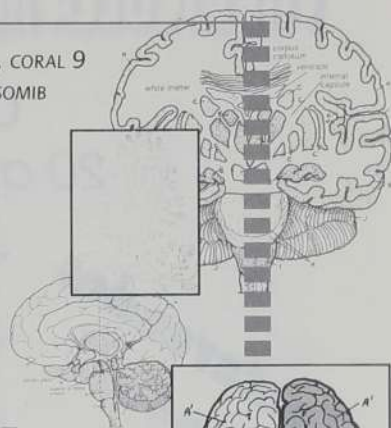
Mazatlán
98

REUNIÓN DEL CONSEJO REGIONAL DE INGENIERÍA BIOMÉDICA PARA AMÉRICA LATINA, CORAL 9
XXI CONGRESO NACIONAL DE LA SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA, SOMIB
1^{era} REUNIÓN DE IEEE-EMBS REGIÓN 9
EXPOTECNOMED 98

11 al 14 de noviembre de 1998
Mazatlán, Sinaloa. México

TEMAS

Administración y Evaluación de Tecnología Médica
Aspectos Profesionales y Educativos
Bioelectromagnetismo
Biofísica y Fisiología
Biomecánica y Rehabilitación
Biónica y Robótica
Biosensores
Computación aplicada a la Medicina
Física Médica
Imágenes Médicas
Ingeniería Clínica y Hospitalaria
Instrumentación para Monitoreo y Diagnóstico
Microelectrónica
Modelos y Simulación
Óptica Biomédica
Procesamiento de Señales
Prótesis y Órganos Artificiales
Redes Neuronales e Inteligencia Artificial
Telemetría y Telemedicina



SOMIB



CORAL



IEEE



EMBS



IFMBE



OPS

VIII ESCUELA MEXICANA DE PARTICULAS Y CAMPOS

Oaxaca de Juárez, Oax.
20 al 28 de noviembre de 1998

Conferencias Invitadas

- Instrumentation in Cosmic Ray Physics
A. Campos, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Brasil.
- Lattice QCD
R. Gupta, Los Alamos National Laboratory, EUA.
- Structure, Fragmentation and Fracture Functions in QCD.
C. García-Canal, La Plata, Argentina.
- Parton Distributions in Heavy Nuclei
L. McLerran, University of Minnesota, EUA.
- Neutrino Physics
R. Peccei, University of California at Los Angeles, EUA.
- Astroparticle Physics
G. Raffelt, Max Planck Institute, Munich, Germany.
- String Theory
C. Núñez, IAFE, Buenos Aires, Argentina.
- Black Holes
M. Bañados, Universidad de Zaragoza, España
- Duality
E. Kiritsis, European Laboratory for Particle Physics, CERN, Suiza

Mayor Información

Alejandro Ayala
Instituto de Ciencias Naturales, UNAM
ayala@nuclecu.unam.mx

Myriam Mondragón
Instituto de Física, UNAM
myriam@ft.ifisicacu.unam.mx

Gabriel López Castro
CINVESTAV
glopez@fis.cinvestav.mx

EMPC98@nuclecu.unam.mx

Innovaciones en el currículum de ciencias: una mirada a una reforma del sistema

María J. Sáez

La reforma general del sistema educativo en España se inició a mediados de los años 80. En esta reforma del sistema se han llevado a cabo simultáneamente tres grandes cambios: estructural, organizacional y curricular. Dentro de ese marco, en este artículo se señalan algunos de los principales resultados del estudio evaluatorio de la reforma española cuya innovación ha sido propuesta por medio de la metodología de estudio de caso. Este estudio se enfoca en el currículum de ciencias en la escuela secundaria del territorio supervisado por el Ministerio de Educación y muestra la complejidad de los cambios propuestos desde la perspectiva de los actores involucrados. Los casos seleccionados emergieron durante el proceso de investigación, una vez que el trabajo de campo se hubo terminado.

El nivel de escuela secundaria, en el cual se organizaron los planes de reforma, ha sido organizado en dos ciclos, para estudiantes de 12 a 14 años y de 14 a 16 años. Este nuevo nivel educativo significa mezclar dos tipos de profesores con diferente preparación en la estructura del currículum para cada ciclo. Durante el primer ciclo, el tronco común es más importante y no existe espacio para otras opciones; las motivaciones y los intereses se manejan dentro de las metas del salón de clase. En el segundo ciclo, la estructura y organización del currículum es más compleja y el espacio de opciones se va extendiendo conforme progresan los cursos. El currículum para este nivel, determinado en 1991, establece los requerimientos mínimos de enseñanza, fija

La profesora María J. Sáez es investigadora de la Universidad de Valladolid, España. La versión en inglés del presente texto será publicada en las memorias de la Conferencia de la OECD que tuvo lugar en Oaxtepec, Mor., México, en octubre de 1997. Traducción de Gloria Novoa de Vitagliano.



los objetivos generales y los contenidos de cada área, así como los criterios para evaluación para ser implantados a nivel nacional.

El resultado presentado a la OECD (noviembre de 1995) se basa en cinco estudios de caso llevados a cabo en cinco escuelas. Estas fueron seleccionadas de acuerdo a rasgos particulares que se esperaba reflejaran los aspectos más relevantes para ser explorados en la mencionada reforma educativa.

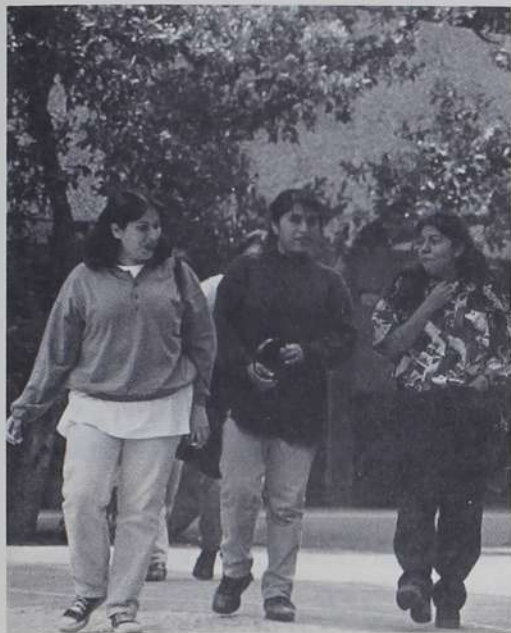
La reforma del currículum

En la reforma el currículum de ciencias en este nivel educativo se organiza como un tema llamado "Ciencias Naturales" para los primeros tres años, en el cuarto la ciencia es optativa. Esto quiere decir que en los años en los que el tema es obligatorio, solamente se da una calificación a los estudiantes. Debido a la organización interna del currículum y de las escuelas, los departa-

mentos tienen cierta autonomía en la escuela, los profesores trabajan de la misma manera y el tercer curso se divide en dos semestres, con pocas conexiones entre ellos. En nuestra investigación encontramos que algunos profesores apoyaron fuertemente el "enfoque de ciencia integrada" para este nivel y que el curso no debería ser impartido por dos profesores diferentes. En la mayoría de las escuelas esto es lo que sucede, porque los defensores de la idea no tienen suficientes razones para convencer a los otros profesores. La solución adoptada es una forma de colaboración sobre capacidad, criterios de evaluación, etc., manteniendo los dos temas separados en vez de pensar en preparar un curso integral de ciencia. El acuerdo adoptado por muchos profesores para distribuir los dos temas en períodos de cuatro meses, no ha sido visto muy positivamente por los estudiantes. Por tal razón, algunos profesores que no están conformes arguyen que en la secundaria dar entrenamiento es tan importante como proporcionar información.

Algunos profesores que provienen de todos los niveles y disciplinas en educación han estado trabajando como consejeros técnicos en el Departamento de Reforma Educativa MEC desde el principio de la Reforma Educativa. La persona que ha diseñado la política de las áreas de ciencias en el nivel educativo que se está estudiando, ha usado la experiencia adquirida durante años como maestra, así como en los diferentes trabajos y puestos que ha desempeñado, para llevar a cabo la Reforma. Dicha persona tiene una idea precisa de lo que debe ser la ciencia en este nivel educativo, y lo expresa de la siguiente forma:

"Todo estudiante que termina la educación secundaria obligatoria debe tener una educación en ciencias tal que, como ciudadano pueda interpretar por lo menos los fenómenos científicos y tecnológicos que ocurren a su alrededor, tener su propia opinión sobre cosas como fertilización *in vitro*, sin que necesite conocer precisamente cómo trabaja el sistema reproductivo, pero entendiendo cuáles son los problemas éticos y científicos, en tal forma que sea capaz de moverse en el siglo XXI. Creo que debe haber ciencia para todos. Creo que para interpretar el mundo actual necesita uno tener ciertas herramientas científicas mínimas, lo que no necesariamente tiene que ser ciencia académica en el estricto sentido del término."



La formulación de la "cultura científica" que propone acarrea implícitamente muchas suposiciones, desde a quién está dirigida, hasta cuál es el concepto de ciencia que se desea transmitir y con qué propósito. Puede igualmente deducirse que los propios profesores piensen que el objetivo principal de la enseñanza de la ciencia es ayudar a los estudiantes a entender los conceptos científicos básicos. Se piensa que la Reforma trata de proveer a los estudiantes con una cultura científica que pueda ofrecerles recursos, no sólo conceptos, sino también procedimientos y actitudes, de tal manera que puedan entender e interpretar el papel fundamental que la ciencia juega en el mundo contemporáneo. Esto incluye también la introducción de tópicos científicos con un impacto social (SIDA, el medio ambiente, etc.), además del conocimiento de un programa de ciencia básica. Así, para aquellos profesores que asumen las premisas de la Reforma, que hacer "un Asimov al estilo de Cela"¹ es lo ideal en el estudio de la ciencia, sería también ideal que los adolescentes fuesen capaces de leer trabajos sobre temas científicos de la misma forma como pueden leer trabajos literarios. El problema que aparece es si el currículum central es tan básico en términos de contenido y provee tan poco tiempo de enseñanza que no puede ser aumentado, modificado o

profundizado de acuerdo al ritmo de aprendizaje de los alumnos, y esto resulta en un currículum mucho más ajustado que lo que es deseable. El dilema de tener que escoger entre tales explicaciones y el conocimiento de los conceptos se resuelve en favor de esto último.

Se ha recomendado la idea de enseñar "ciencia integrada" con el objeto de convertirla en disciplinas individuales al final del nivel y se ha argumentado a favor en documentos ministeriales; en términos del desarrollo psicológico de los estudiantes debe entenderse bajo la premisa de ciencia para todos. Desde el punto de vista de los profesores surge otro elemento: que el objetivo es la ciencia integrada per se, y se debate desde un punto de vista muy académico, en lugar de un conocimiento general de la realidad, que es lo que se trata de proporcionar a los estudiantes. Una profesora de física formuló su concepto de la ciencia para este nivel en la siguiente forma:

"La idea que yo tengo es transmitir una idea básica sobre lo que es la ciencia. Para esto necesitamos desarrollar habilidades intelectuales que, quizá en otros temas, no pueden ser tratadas. Por ello, mi objetivo es que (los estudiantes) aprendan a razonar científicamente, lo cual yo creo que consiste en que tomen un concepto específico y lo transformen en algo concreto para sí mismos. Si esto se logra, el concepto puede ser aplicado en una situación específica, pueden tomar diferentes caminos, uno de los cuales puede ser la solución del problema que tienen, y pueden entonces extraer las consecuencias de los resultados o relacionarlos con situaciones diversas."

El reto de este currículum es, por lo tanto, crear un sistema en el cual los profesores puedan satisfacer adecuadamente las necesidades de aprendizaje de todos, desde el punto de vista de la diversidad, porque es necesario razonar y porque es necesario dejar atrás la idea de la uniformidad que siempre ha caracterizado a las políticas educativas previas. Desde el punto de vista de hacer política:

"La diversidad es una idea relevante tal como lo es la que combina la mayoría de los elementos de la insistencia en la educación, sobre todo en los primeros años de secundaria donde se ve cla-

ramente la necesidad de proveer para diferentes habilidades, tanto motivación como intereses. El hecho de que cada muchacho es diferente indica que debemos pensar cómo debemos llevar a cabo nuestras actividades usando diferentes técnicas, de tal manera que algunos alumnos aprendan en una forma y otros en otra. Pienso que éste es uno de los elementos más innovadores al alcance de las escuelas. La idea de un currículum abierto y flexible es válida solamente si se entiende que su objetivo es asegurar que la respuesta educativa que se alcance en cada escuela esté estrechamente relacionada con las características de los estudiantes y el contexto en el cual está situada."

A los ojos de los maestros, el reto más complejo que deben enfrentar en el marco de los cambios es aquél que se relaciona con la diversidad de los estudiantes. Todos los profesores están de acuerdo en la dificultad que confrontan cuando deben hacer adaptaciones curriculares. El jefe de un departamento de ciencias naturales lo expresó de esta manera:

"El área en la cual estamos experimentando las mayores dificultades es la adaptación curricular, porque esto implica tener a nuestro alcance materiales similares en el salón de clases, y por mucho que hemos intentado, no nos ha sido posible lograrlo. A pesar de que hemos tratado de atender a todos los estudiantes dentro del salón de clases, para formalizar dentro de nuestros materiales curriculares todas y cada una de las unidades didácticas en una forma diversa para distintos ritmos de trabajo, esto ha estado más allá de nuestras posibilidades."

Este estilo de enseñanza lo describen claramente los estudiantes:

"La profesora trata de hacernos ver cosas, de entenderlas en una forma sencilla. Yo creo que esta forma es mejor que aquella en la cual lo que tú recibes es teoría; nos dan muchos ejemplos y esto al menos hace que se ponga más atención... La profesora hace un gran esfuerzo. Si ve que alguien no está concentrado o se da cuenta de que no está poniendo atención, bueno, se detiene hasta que está segura de que tú has entendido; lo hace muy frecuentemente."



La reflexión final: abrir las puertas a las acciones

Hay muchos propósitos para las evaluaciones, en este proyecto la preocupación principal era entender las tendencias que emergen a nivel del salón de clase en situaciones de innovaciones significativas en la ciencia, pero el propósito a nivel nacional era el de contribuir al proceso de cambio que el sistema educativo ha emprendido como parte del cambio general en la sociedad española desde hace aproximadamente 20 años.

Señalar las dificultades, los logros, las equivocaciones, la falta de apoyo, las buenas experiencias, etc., del currículum de ciencias fue una parte del deseo de subrayar los hechos principales de esta estrategia política de cambio en el citado nivel educativo. Por ello, organizamos y llevamos a cabo una conferencia de diseminación, con base en el caso español y otros casos internacionales, con la intención de dar una oportunidad de tener una ventaja de esta investigación. Pensando así, el reporte no se terminó con conclusiones, sino con algunas cuestiones sustantivas que emergieron de la investigación, simulando y enfocando futuras reflexiones, desarrollos y decisiones para todos los educadores involucrados en el currículum de ciencias en este nivel educativo y contribuyendo a crear un diálogo entre los diferentes sectores involucrados en implementar y en innovar. Sabemos que el cambio es un proceso lento,

que necesita participación y responsabilidades compartidas para ser exitoso. Veamos entonces algunas de las preguntas que surgieron como producto de nuestra investigación y que pueden ser punto de partida para un diálogo:

* ¿Los cambios en la organización han sido instrumentados en las escuelas aportando ayuda suficiente para consolidar la colaboración emergente entre los maestros?

* ¿Existe suficiente conciencia entre aquéllos involucrados en la reforma para poder entender la cultura científica como la base para una sociedad democrática futura?

* ¿Hasta qué punto la meta del MEC de "ciencia para todos" toma en consideración los modos de aprendizaje personal de los estudiantes?

* ¿Hasta qué punto ayuda la ciencia integrada a los estudiantes a adquirir un punto de vista científico al interpretar la realidad?

* ¿Las "actividades", formuladas como experiencias de aprendizaje, son desarrolladas para ayudar a los alumnos a entender la discrepancia entre la ciencia estudiada en la escuela y la vida diaria?

* ¿Que tipo de ayuda necesitan las escuelas para actuar como una comunidad educativa que propone el

adiestramiento de los estudiantes en una forma integrada como una respuesta a las condiciones que nos rodean?

* ¿Los nuevos libros de texto ayudan a los profesores a elaborar materiales del currículum que tratan de la diversidad de los estudiantes (adaptaciones del currículum) y son autoevaluadores en términos del aprendizaje de los estudiantes?



Nota

1. Camilo José Cela es un escritor ganador del premio Nobel, muy popular entre los estudiantes.



Información para autores

La Revista Avance y Perspectiva (A y P), órgano de difusión del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), es una publicación bimestral con artículos de divulgación y notas sobre avances científicos y tecnológicos. Los artículos o notas que se propongan para ser publicados en A y P deben enviarse por triplicado a :

Director Editorial, Avance y Perspectiva
CINVESTAV

Apdo. Postal 14-740

07000 México, D.F.

Tel. 747 7000-01 ext. 2536

Fax: 747 7076

Los artículos y notas recibidos serán evaluados por especialistas seleccionados por el Consejo Editorial. Los artículos de divulgación deben dar cuenta de los logros o avances obtenidos en las especialidades que se cultivan en el CINVESTAV. Se buscará que su contenido sea ameno y novedoso. Deberán ser escritos a máquina, a doble espacio, con márgenes amplios y extensión máxima de 20 cuartillas. El lenguaje debe ser accesible a estudiantes de licenciatura sin perjuicio de la información científica o académica contenida en el artículo. Cuando sea necesario el uso de tecnicismos, deberá explicarse su significado con la amplitud conveniente. Se recomienda la inclusión de recuadros que aclaren el significado de conceptos de difícil comprensión. Dentro de lo posible, se evitará el uso de fórmulas y ecuaciones. Los artículos pueden tener subtítulos o incisos y un resumen al principio no mayor de cinco líneas, a manera de introducción, que atraiga el interés del lector. Las referencias bibliográficas aparecerán completas al final del artículo; cuando se mencionen en el artículo deberán indicarse con un superíndice y estar numeradas por orden de aparición. Deberán enviarse los originales de las figuras, gráficas o fotografías que acompañen el texto. Las figuras y gráficas se deben preparar por computadora a línea sin pantallas o con tinta china sobre papel albanene con buena calidad. Los autores recibirán las pruebas de galera de sus artículos con la debida anticipación. Sin embargo, para evitar retrasos en el proceso de publicación, los autores que usen un procesador de textos en microcomputadora, además del texto impreso en papel, deben enviar su texto grabado en un disco flexible. Los procesadores de texto útiles para este propósito son: Microsoft Word, Word Perfect, Ami Pro, Xy Writer, Wordstar y Multimate, guardando el documento con la extensión DOC.

LATINCORR 98

3rd. NACE Latin American Region Corrosion Congress
6º Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección

Marriott Casa Magna
Cancún, México

August 30 - September 4, 1998

- Atmospheric corrosion
- Coatings and linings
- CO₂ and H₂S corrosion
- Corrosion in power stations
- CYTED meetings of DURAR, PATINA, BIOCORR and RICORR
- Electrochemical testing and monitoring in industry
- Environmental assisted cracking
- High temperature corrosion
- Industrial experiences in cathodic protection
- Inhibitors
- Lead, heavy metals and toxic solvents in paints
- Localized corrosion
- Materials performance in marine environments
- Microbially induced corrosion
- MIC-biodeterioration
- Modern spectroscopy in corrosion science
- Modification of metal surfaces
- Paints for the nuclear industry
- Plastic deformation interactions in SCC
- Reinforced concrete durability and rehabilitation
- Transport industry

Organizers:

NACE Latin American Region
Asociación Iberoamericana de Corrosión y Protección

Section Mexico of NACE
Academia Mexicana de Ciencia de Materiales, A. C.

Simultaneous with the International Materials Research Congress 1998



**LA UNIDAD
DE BIOTECNOLOGÍA
E INGENIERÍA GENÉTICA
DE PLANTAS DEL
CINVESTAV-IPN**

**OFRECE:
MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN BIOTECNOLOGÍA DE PLANTAS**

- Maestría
- Doctorado directo (después de la licenciatura)
- Doctorado tradicional (después de la maestría)

**Becas CONACYT para todos los estudiantes
nacionales admitidos.**

**Examen de admisión:
enero y julio de cada año.**

Para mayores informes dirigirse a:

Coordinación Académica

Centro de Investigación y de Estudios

**Avanzados del IPN (CINVESTAV) Unidad Irapuato,
Km. 9.6 Libramiento norte carretera Irapuato-León
Apdó. Postal 629, 36500 Irapuato, Gto., México**

Tel: (462) 39600 y 39606

Fax: (462) 45849

Correo Electrónico:

coordina@irapuato.ira.cinvestav.mx



El Colegio Nacional

Pablo Rudomín
OBRA CIENTÍFICA I, II, III, IV, V

Beatriz de la Fuente
LA ESCULTURA DE PALENQUE

Gabriel Zaid
OBRAS I Y II

Arturo Rosenblueth
OBRA CIENTÍFICA I, II Y III

Ramón Xirau
DE LA PRESENCIA

Salvador Elizondo
OBRAS I, II Y III

Ignacio Chávez
OBRA COMPLETA

MEMORIA DE EL COLEGIO NACIONAL Se publica Anualmente

Marcos Mazari
HACIA EL TERCER MILENIO

Leopoldo García-Colín
ENERGÍA AMBIENTE
Y DESARROLLO SUSTENTABLE
(el caso de México)

Adolfo Martínez Palomo
OBRAS II: CIENCIA, SALUD Y
DESARROLLO

Marcos Moshinsky
OBRAS I: REFLEXIONES SOBRE
EDUCACIÓN, CIENCIA Y SOCIEDAD

Alfonso Reyes
MÁS PÁGINAS SOBRE
ALFONSO REYES
de Alfonso Rangel Guerra



**ofrece los títulos de sus miembros
e invita a visitar su Biblioteca**

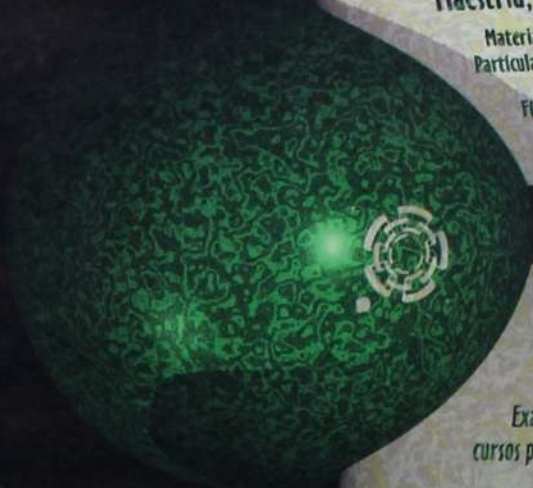
Luis González Obregón núm. 23, Centro Histórico, Tel. 789 43 30 Fax. 702 17 79

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN

Departamento de Física

Maestría, Doctorado, Posdoctorado

Materia Condensada (teórica y experimental)
Partículas Elementales (teórica y experimental)
Física Matemática y Gravitación
Física Estadística (teórica y experimental)
Física Nuclear



Examen de admisión a maestría y
cursos propedéuticos en marzo y mayo 31

Inscripciones al doctorado en cualquier época del año

BECAS de Conacyt a estudiantes nacionales admitidos

Coordinación de admisión
Departamento de Física, Cinvestav
Apdo. postal 74-740, 07000 México, D.F.
Tel./Fax: (52-5) 747 3831, 747 3838
admision@fis.cinvestav.mx
<http://www.fis.cinvestav.mx>

