

La Química en el siglo XX y lo que nos depara el siglo XXI

Por la celebración de
nuestros primeros diez
años.

La Química de la segunda mitad del siglo XX

Andoni Garritz*

Abstract (Chemistry at the Second Half of the 21st Century)

Some of the seminal developments in the science of chemistry during the second half of 20th Century are described in the following pages. The resulting historical perspective is a selective distillation. The facts were chosen because they, in some way, changed the direction or conceptions in chemistry. These developments cover a broad perspective, including materials science, biological, energy and environmental chemistry.

Introducción

Hacia 1950, la química se encontraba firmemente sustentada por un cuerpo teórico moderno. Habían transcurrido ya las tres revoluciones a las que se refiere Jensen (1998), es decir,

- 1) La primera, que encabeza Lavoisier entre 1772 y 1789, con el trabajo cuantitativo a conciencia que conduce al concepto de composición química;
- 2) La segunda, que inicia en 1852 con Frankland y su teoría de la valencia, atraviesa por el ordenamiento de pesos atómicos de Cannizzaro y concluye con la tabla periódica de Meyer y Mendeleiev, así como con la propuesta de van't Hoff, en 1874, acerca de la geometría tetraédrica del carbono;
- 3) La tercera, entre 1904 y 1923, que se inicia con la sugerencia de Abegg de la existencia de una correlación entre la tabla periódica y el número de electrones de valencia, y culmina con la aparición del libro de Lewis *Valence and the Structure of Atoms and Molecules*.

Algunos autores opinan que, para ese entonces, se habían resuelto todos los problemas básicos de la química. Linus Pauling es uno de ellos, pues en una entrevista en 1992 (Horgan, 1996) expresa que hacia mediados de 1930 la química orgánica estaba firmemente asentada, lo mismo que la inorgánica, con algunas pocas excepciones. Ello le permite es-

cribir en su tratado (Pauling, 1939) —uno de los libros que más han influido en esta ciencia— que “todas las interacciones químicas pueden entenderse ahora en términos de la mecánica cuántica”.

Por su parte, años antes Stent (1969) había mencionado que “aunque el número total posible de reacciones químicas es muy grande, al igual que la variedad de ellas, el objetivo de la química en cuanto a entender los principios de comportamiento de tales moléculas está claramente alcanzado y es limitado”.

Estos puntos de vista, reduccionistas por una parte y fatalistas en cierto sentido, por la otra, son motivo actual de amplia polémica. Este trabajo recoge algunas muestras sobresalientes del avance de la química en los últimos 50 años, y se intenta mostrar que ésta no es una ciencia acabada sino, por el contrario, una en pleno proceso de descubrimiento y racionalización, en la que falta mucho por decir y acomodar aún.

Hemos ordenado el material clasificándolo en unos cuantos rubros que conforman las secciones de este escrito. Haremos oscilar el péndulo del tiempo varias veces entre 1950 y el presente.

Química sintética

La habilidad de sintetizar nuevas moléculas se encuentra en el corazón de la química y sin duda se desarrolló notablemente durante los últimos cincuenta años. Su expresión más clara se da sin duda en la química orgánica, área en la cual ya se había abierto brecha en las décadas anteriores con el estudio de los mecanismos de reacción. Hans Fischer, premio Nobel 1930, logró la complicada síntesis del grupo hemo, gracias a todo el conocimiento acumulado (James, 1993).

Ya en la segunda mitad del siglo, el artífice del análisis conformacional orgánico fue Derek H.R. Barton (Chimal, 1997; ilustración 1), galardonado con el premio Nobel en 1969. Esta área del conocimiento indaga las consecuencias químicas que tiene la estructura tridimensional de las moléculas, mediante una combinación de estereoquímica, cinética y fisicoquímica. Barton ha anotado que “ahora todo mundo intenta ver las cosas cuidadosamente en tres dimensiones. Cuando yo era estudiante, nadie se

*Facultad de Química, UNAM. México, D.F. 04510.



Ilustración 1. Derek Barton, durante una visita reciente a México. El profesor Barton, que obtuvo el premio Nobel de química en 1969, murió en 1997.

molestaba en ello". Aportes notables fueron el descubrimiento de algunas barreras rotacionales (para empezar, la barrera sutil de 12 kJ/mol que existe entre etano alternado y eclipsado) y las conformaciones especiales de los esteroides cuando rotan alrededor de los enlaces sencillos C–C, que lo condujeron posteriormente a la biosíntesis y a decir que “lo único nuevo está en las grandes moléculas. No creo que nadie vaya a revolucionar la química estudiando moléculas pequeñas”. Sus contribuciones abrieron el camino para el entendimiento de la reactividad en bioquímica (enzimas, sitios activos, biología molecular, etcétera).

Elias J. Corey (ilustración 2), premio Nobel 1990, reúne y sistematiza en los años sesenta el análisis retrosintético, que tanta influencia ha tenido en la enseñanza de la química orgánica. De lo que se



Ilustración 2. E.J. Corey había hecho contribuciones notables a la síntesis orgánica desde los años cincuenta, pero recibió el premio Nobel casi 40 años después. D. Herschbach, químico alemán laureado cuatro años antes que Corey se refirió a éste como “el químico que ha cambiado por completo el camino por el que se hace la química moderna”.

trata es de establecer el árbol de síntesis que muestre las trayectorias e intermediarios para alcanzar alguna molécula determinada a partir de ciertos reactivos.

En los años cincuenta fueron notables los descubrimientos de moléculas con actividad farmacológica. La química sintética esteroideal tuvo grandes avances en México durante esa década y la anterior (Syntex, 1967), con la síntesis industrial propuesta por Russell Marker de la progesterona a partir de la diosgenina, un esteroide vegetal. La carrera por la píldora anticonceptiva culmina ya en esta segunda mitad del siglo, con la síntesis de la noretindrona (ilustración 3) en 1951 por Carl Djerassi (ilustración 4) en los laboratorios mexicanos de la empresa

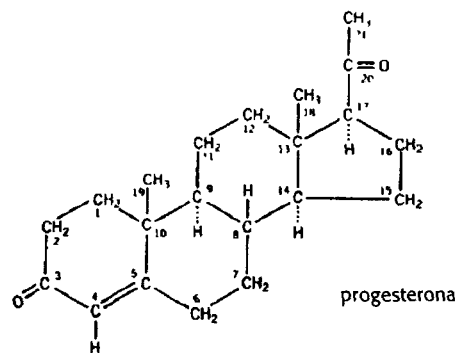
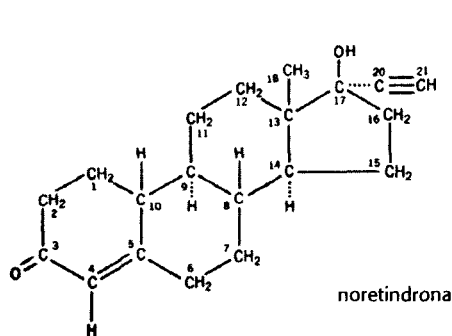


Ilustración 3. Estructura molecular de la noretindrona y la progesterona (la hormona del embarazo). Para obtener la primera se parte de la segunda, pero debe eliminarse el carbono 19 (ligado al carbono 10) y modificar el acetilo ligado al carbono 17. Estos cambios químicos hacen más eficaz la propiedad de la progesterona de preparar y mantener la gestación, por lo que la noretindrona se convirtió en la primera píldora para la anticoncepción.



Ilustración 4. Carl Djerassi. En el mismo año logró la síntesis de la noretindrona y de la cortisona, el potente antiinflamatorio que fue explotado comercialmente luego por los laboratorios Upjohn. Ambos descubrimientos fueron hechos en México y en el último participó también el químico mexicano Jesús Romo Armería. En la empresa Syntex trabajó posteriormente un notable químico uruguayo, el doctor Zaffaroni.

Syntex. Ni duda cabe que la especie humana es otra antes y después de la píldora... Otro ejemplo notable es el del antiinflamatorio llamado cortisona, cuya síntesis logró el mismo Djerassi, también en 1951, o el de la penicilina V (ilustración 5), alcanzado en 1957 por John C. Sheehan.

Las herramientas teóricas desarrolladas para la síntesis orgánica permitieron resolver paulatinamente una serie de retos hasta obtener toda una serie de hidrocarburos con enlaces C—C—C tensionados. A diferencia del adamantano (ilustración 6), extraído por primera vez del petróleo en 1933 —que muestra los ángulos tetraédricos normales—, los químicos se

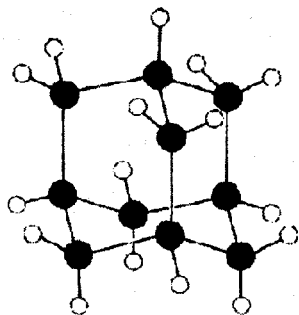


Ilustración 6. Estructura del adamantano, $C_{10}H_{16}$, cuya estructura de carbonos refleja una porción de la estructura del diamante (*adamas* significa diamante, en griego). Fue aislado del petróleo en 1933 por dos químicos checoslovacos, Landa y Machacek.

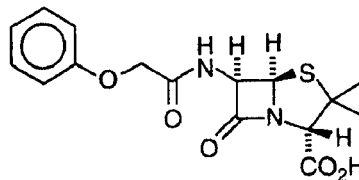


Ilustración 5. Fórmula molecular de la penicilina V, sintetizada artificialmente en 1957, lo que impulsó la ampliación de su mercado y la disminución de su costo.

plantearon la síntesis del cubano, con ocho carbonos en los vértices de un cubo y, por ende, con todos sus enlaces C—C—C de 90° (ilustración 7). En 1964 Cole e Eaton, en Chicago lograron el reto en un proceso de nueve pasos (ilustración 8) que parte de un reactivo que en nada se parece a un cubo, pero que en las primeras dos reacciones ya ha construido muchas de sus aristas. Un poco más trabajo tomó la síntesis del dodecaedro (ilustración 9) en 1981.

Gracias al entendimiento de los mecanismos por los cuales proceden las reacciones y las conformaciones que las moléculas orgánicas tienden a adoptar, en años recientes varios ejercicios sintéticos excepcionales han demostrado que prácticamente no hay reto que los químicos orgánicos no estén dispuestos a resolver. Son notables los casos de la vitamina B-12 (ilustración 10), de la palitoxina, con su enorme complicación quiral (ilustración 11), o de la brevetoxina (ilustración 12).

No pueden dejar de citarse en este apartado varios avances clave en el terreno de la química organometálica (Borman, 1998), como la reacción de Wittig de 1954 (le valió el premio Nobel de 1979), que forma un doble enlace carbono-carbono a partir del enlace carbono-oxígeno de una cetona o aldehído; o la catálisis homogénea mediante la cual Geoffrey Wilkinson logra la hidrogenación de dobles enlaces en olefinas, sin afectar ninguna otra

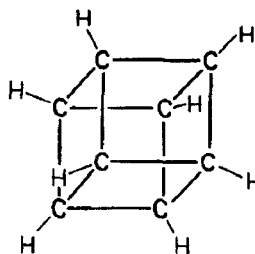


Ilustración 7. Cubano, C_8H_8 . Todo un reto de síntesis resuelto en 1964 por Eaton y su equipo de trabajo.

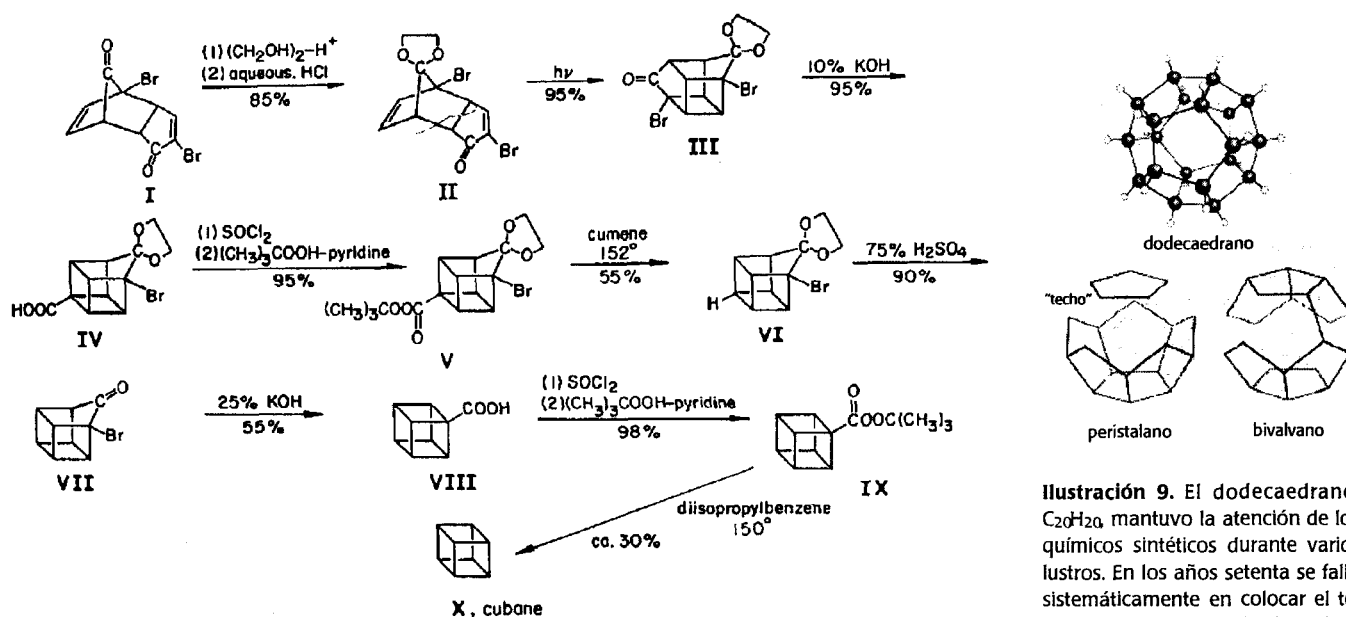


Ilustración 9. El dodecaedro, $C_{20}H_{20}$ mantuvo la atención de los químicos sintéticos durante varios lustros. En los años setenta se falló sistemáticamente en colocar el techo pentagonal al peristalano, hasta que en 1981 Leo Paquette logró cerrar el hidrocarburo tipo almeja llamado bivalvano.

Ilustración 8. Mecanismo sintético por el que Cole e Eaton lograron la síntesis del cubano. En cada flecha de reacción se incluye el reactivo necesario para lograr la transformación y el porcentaje de rendimiento obtenido. Hay que recordar que cada uno de los nueve pasos involucra unos cinco a veinte procedimientos físicos: pesado, disolución, mezclado, agitación, calentamiento, filtración, destilación, cristalización, desecación, etcétera, así como los tediosos procesos analíticos para lograr la identificación certera de los productos de reacción.

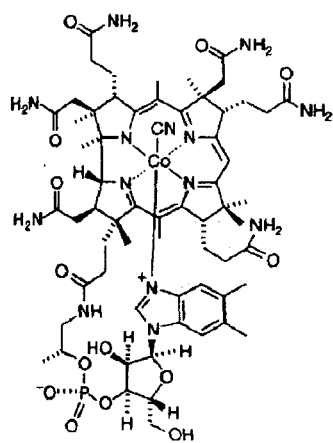


Ilustración 10. Un campanazo notable fue la síntesis de la vitamina B-12 por Robert B. Woodward y Albert Eschenmoser, en 1973.

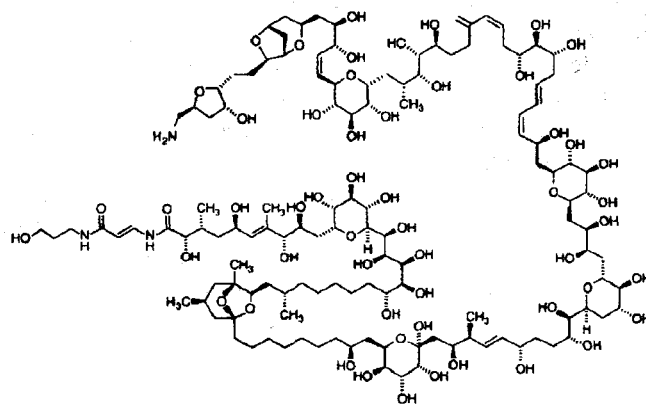


Ilustración 11. Yoshito Kishi logra en 1989 la síntesis de la palitoxina, con 64 centros asimétricos. Se trata quizá del compuesto más tóxico y más complicado de sintetizar.

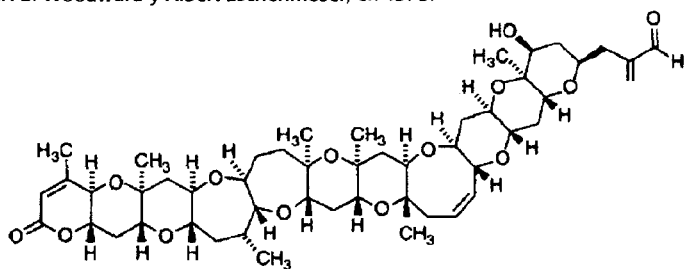


Ilustración 12. En 1995, K.C. Nicolaou alcanza la síntesis de la brevetoxina B, con once anillos fundidos.

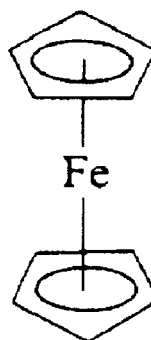


Ilustración 13. La molécula del ferroceno, elucidada en 1952, dio paso a una nueva química organometálica, con el reconocimiento del enlace entre los electrones π del ciclopentadienilo con los electrones d del metal. Los metallocenos y sus compuestos relacionados son usados actualmente como catalizadores importantes en procesos industriales y de investigación.

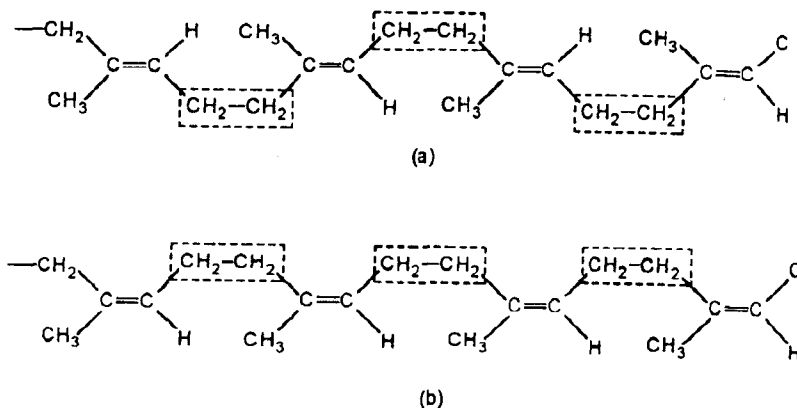


Ilustración 14. Isómeros del poliisopreno. *a)* Todo-*trans*. Los grupos $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ están arreglados en direcciones alternadas con respecto a cada doble ligadura; *b)* Todo-*cis*. Estos grupos están todos orientados hacia el mismo lado. Éste es el hule natural que se obtiene del *hevea brasiliensis*.

porción de la molécula (se le otorgó el premio Nobel en 1973). Este hecho marca la pauta de muchas reacciones estereoselectivas actuales, en las que ligantes quirales juegan el papel principal en procesos de síntesis asimétrica. El mismo Wilkinson había identificado en 1952 la extraordinaria estructura del ferroceno (ilustración 13), abriendo con ello una nueva rama de esta especialidad.

Química de materiales

La gran época de los polímeros había pasado antes de 1950. La bakelita y el nylon ya eran historia. No obstante, es en 1953 cuando Karl Ziegler descubre el catalizador (compuestos de alquilaluminio combinados con complejos de metales de transición) para la síntesis del etileno a baja temperatura y presión y, un año más tarde, Giulio Natta inventa la polimerización estereoespecífica del propileno (logra que los grupos metilo laterales queden todos del mismo lado

en la cadena polimérica, todo-*cis*, o alternados uno a uno, todo-*trans*). A ambos se les otorga el premio Nobel en 1963, al lograr que en un laboratorio se pudiera sintetizar por primera vez el duplicado exacto del hule natural, el poliisopreno todo-*cis* (ilustración 14).

Los cristales líquidos ya habían aparecido. En 1924, el alemán Daniel Vorlander mostró que los materiales líquidos cristalinos estaban compuestos de moléculas largas de forma tubular. Mostró asimismo varias fases en las que estas sustancias podían expresar su ordenamiento (ilustración 15). Ya en la segunda mitad del siglo se encontraron cristales líquidos en muchas sustancias naturales. La ilustración 16 muestra dos de ellos.

Mucho es lo que se ha adelantado en los últimos cincuenta años en cuanto al uso de catalizadores, aunque nos resta todavía conocer la manera como actúan muchos de ellos. Un ejemplo realmente im-

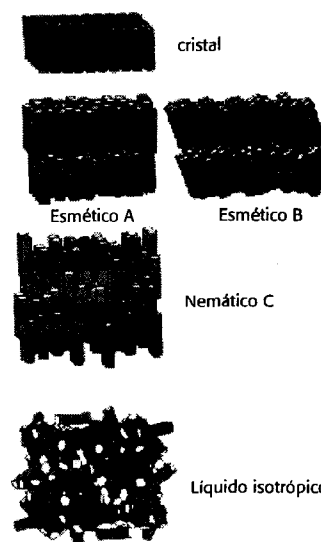


Ilustración 15. Estructura de las fases sólida, líquida y de cristal líquido formadas a partir de moléculas con forma de barra.

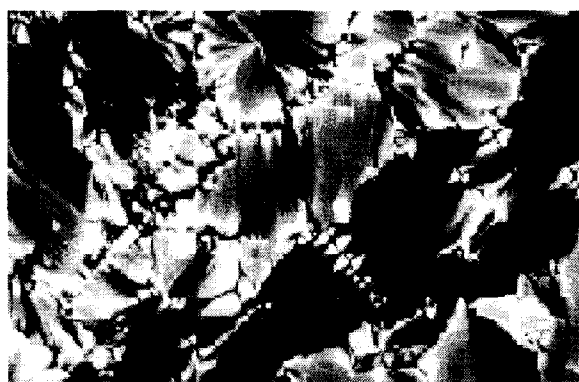


Ilustración 16. Dos cristales líquidos birrefringentes. Al primero se le utiliza en las carátulas digitales de los relojes modernos, ya que cambia de color con el paso cercano de un campo eléctrico. El segundo está tomado del ala de un insecto.

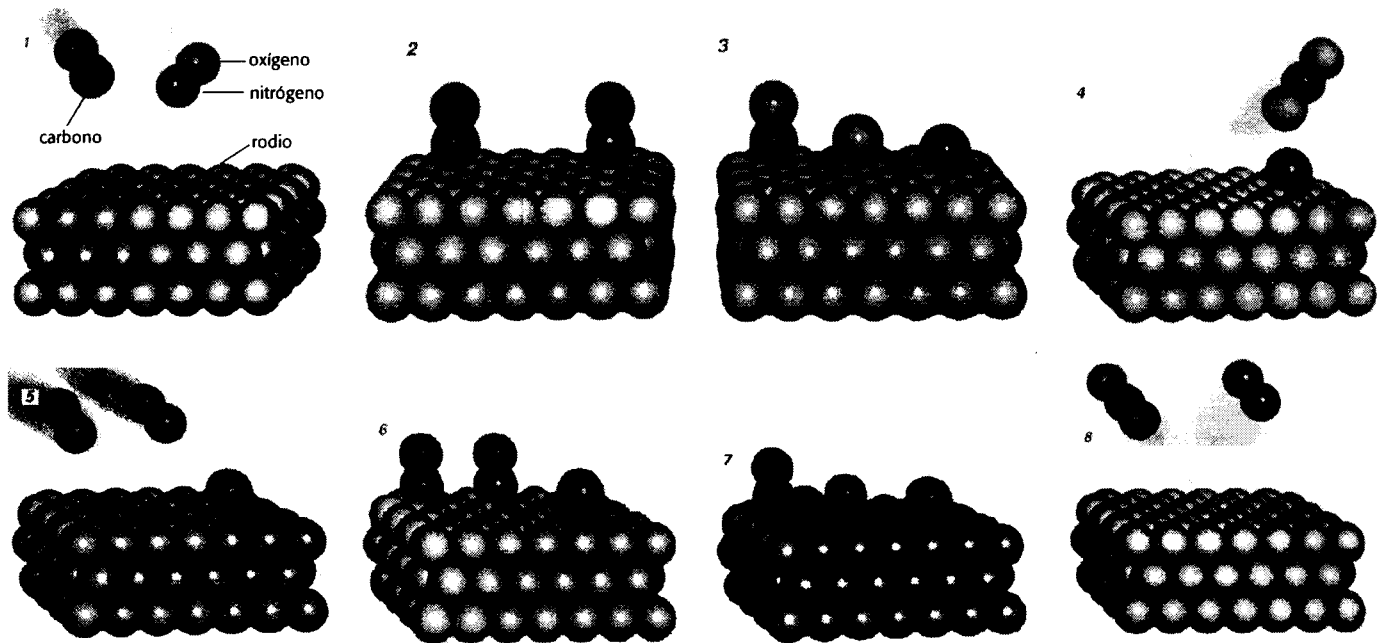


Ilustración 17. Acción del catalizador metálico de un convertidor catalítico automotriz. El rodio promueve que dos moléculas peligrosas, los monóxidos de carbono y de nitrógeno, se transformen en dos moléculas más nobles, dióxido de carbono y nitrógeno.

presionante de lo que puede lograrse a través de la catálisis es el del convertidor catalítico automotriz actual (ilustración 17).

Un segundo ejemplo de importancia es el de las zeolitas (Bosch, 1988). La estructura de estos aluminosilicatos fantásticos fue informada en 1956 por los investigadores de la Union Carbide (ilustración 18).

Los usos de las zeolitas están íntimamente relacionados con el tamaño del poro o ventana que presentan en su estructura. Ello determina que puedan utilizarse como mallas moleculares, para el secado de gases, para separar hidrocarburos (ilustración 19) o para llevar a cabo reacciones químicas catalíticas en el proceso de ruptura catalítica del petróleo.

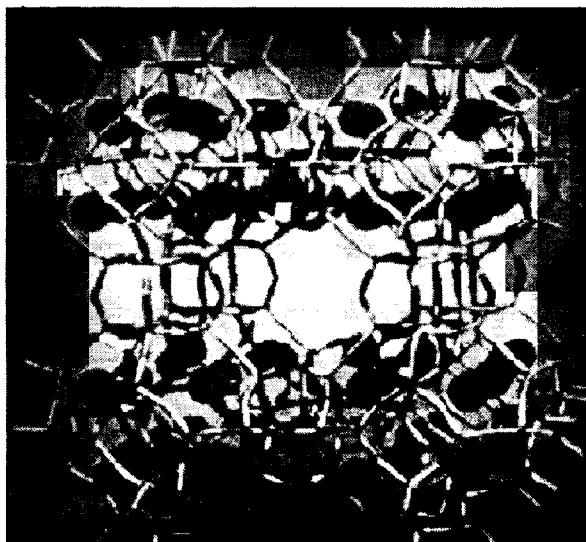


Ilustración 18. Una zeolita tal cual fue presentada por los químicos de Union Carbide en 1956.

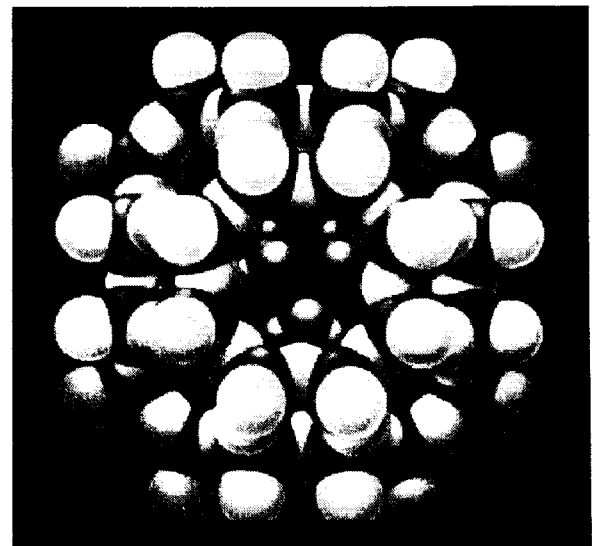


Ilustración 19. Los hidrocarburos ramificados pueden no entrar en la ventana de una zeolita, mientras que los lineales sí, lo cual nos permite separarlos.



Ilustración 20. Foto del primer transistor construido por los premios Nobel de física de 1956, W. Shockley, J. Bardeen y W.H. Brattain.

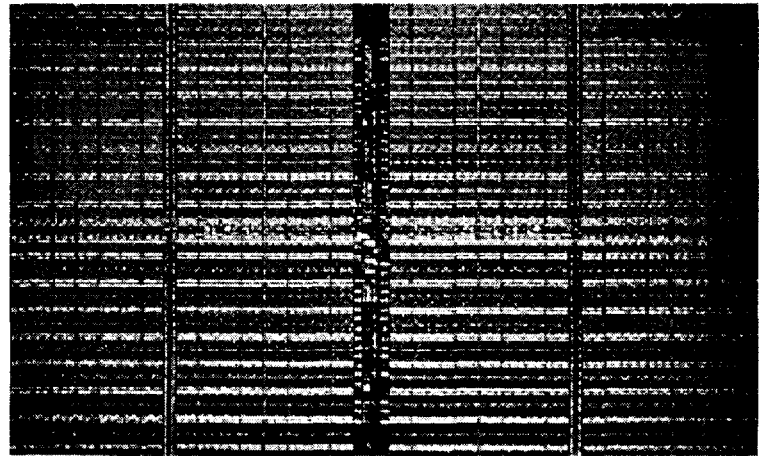


Ilustración 21. Microchip contemporáneo.

Las tecnologías de la información son posibles gracias al desarrollo de circuitos integrados, fibras ópticas, medios magnéticos y fotovoltaicos. Debido a que los procesos químicos son los medios por los cuales se establecen las propiedades físicas y las cuestiones estructurales de dichos materiales, la industria química ha sesgado su atención hacia ellos, a partir de la aparición del primer transistor (ilustración 20) hasta la manufactura de microchips (ilustraciones 21 y 22). El mercado mundial de dichos materiales ha crecido monstruosamente en los últimos años (véase la tabla 1).

Tabla 1. Mercado mundial de materiales y artefactos para el almacenamiento y el manejo de información (miles de millones de dólares de 1986).

Tecnología	1985	1990	1995
Semiconductores electrónicos	25	60	160
Fibra y aparatos ópticos	1	3	5.5
Materiales de reproducción	7	20	55
Interconexiones	10	21	58
Fotovoltaicos	0.3	0.8	0.3
Total	397	550	n.d.

Superconductores

La superconductividad, que consiste en que un material conduzca la corriente eléctrica sin resistencia, no nos deja de sorprender desde su nacimiento en 1911. Kamerlingh Onnes, quien por primera vez licuara el helio, se dedicó a investigar las propiedades de conducción de los metales y encontró dicho fenómeno en el mercurio. Hasta 1980 la máxima temperatura crítica de un superconductor había sido menor a los 25K y es entonces cuando ocurre la "revolución cerámica". Este fenómeno fue descubierto por J. Georg Bednorz y K. Alex Müller en óxidos de cobre que se volvían superconductores a temperaturas relativamente altas y que tenían una estructura similar a la de la perovskita, una cerámica común (ilustración 23). En 1987 Paul C.W. Chu encontró el primer superconductor de alta temperatura, que requiere ser enfriado a temperaturas de nitrógeno líquido para mostrar superconductividad (ilustración 24).



Ilustración 22. Microestructura de un circuito integrado.

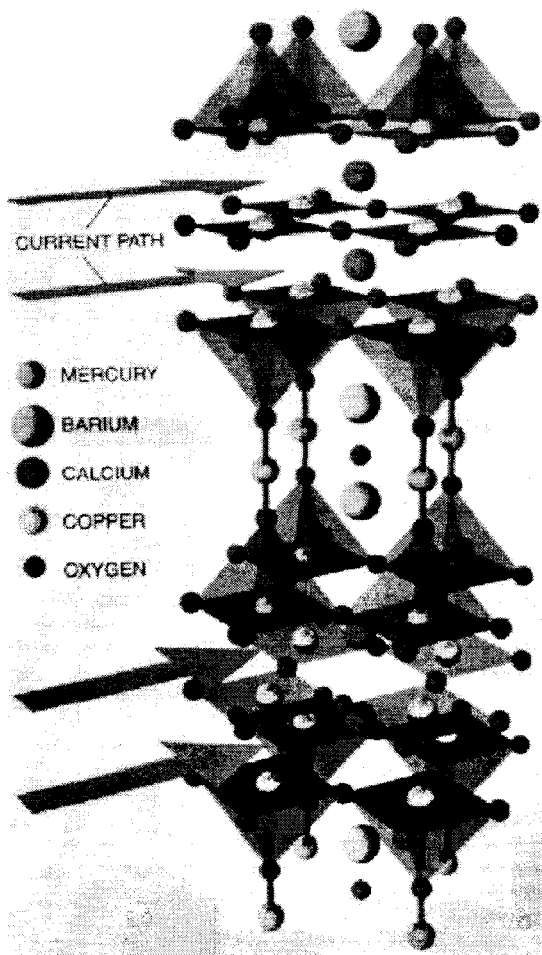


Ilustración 23. Microestructura de una perovskita superconductor. Se sabe que la corriente circula por el plano que contiene átomos de cobre y de oxígeno.

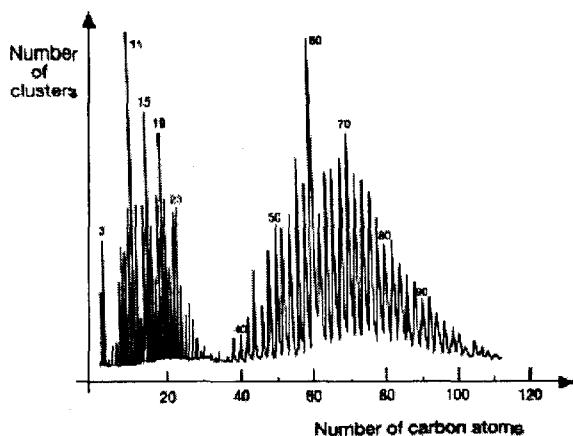


Ilustración 25. Espectro de masas de los cúmulos de carbono producido por los investigadores en la ciudad de Exxon en 1984.

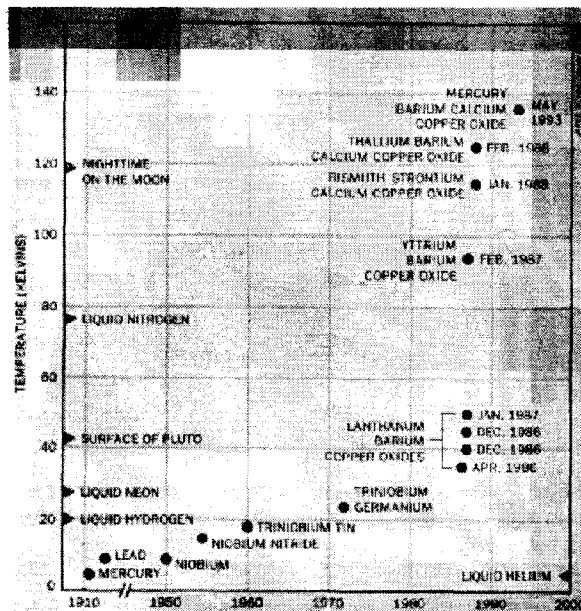


Ilustración 24. Gráfica de las temperaturas críticas de superconductividad y los compuestos que las manifiestan, de 1911 a la fecha.

Este último descubrimiento abrió la especulación sobre el uso de tecnologías a bajas temperaturas como, por ejemplo, la levitación magnética de vehículos, cuestiones que años más tarde ya no percibimos posibles.

En los años noventa apareció un superconductor más, el fullereno C_{60} , dopado con átomos de potasio. Conviene, antes de presentarlo, introducir la aparición del fullereno mismo, que fue motivo para otorgar el premio Nobel, en 1996, a Smaley, Kroto y Curl. Estos investigadores encontraron un cúmulo de sesenta átomos de carbono como la especie más estable después de enviar un rayo láser sobre la superficie del grafito (ilustración 25).

Dado su espectro de resonancia magnética nuclear de ^{13}C su estructura debiera ser sumamente simétrica, por lo que Curl y Kroto propusieron que se trataba de sesenta carbonos colocados en los vértices de un balón de fútbol (ilustración 26). Se trataba, entonces, de una especie alotrópica más del carbono, que al recibir en sus espacios intersticiales tres átomos de potasio se vuelve un superconductor hasta temperaturas críticas de 18K (ilustración 27).

Química teórica

En el periodo se ha reconocido a cuatro investigadores de la química teórica con el premio Nobel. En 1981 a Kenichi Fukui (ilustración 28) y Roald

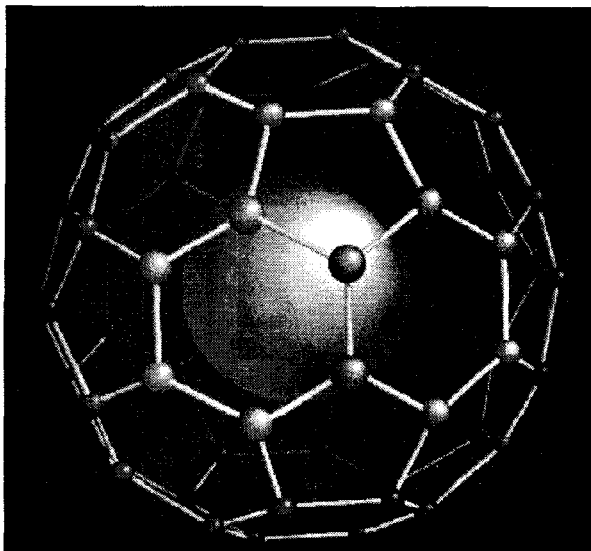


Ilustración 26. Estructura del cúmulo de 60 átomos de carbono. Recibió el nombre de fullereno en honor a Ricardo Buckminster Fuller, arquitecto que ideó el domo geodésico.

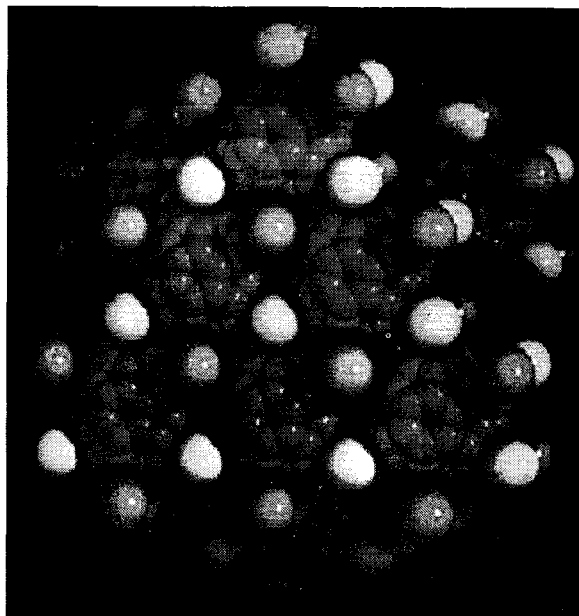


Ilustración 27. Estructura del K_3C_{60} que superconduce a 18K.

Hoffmann (ilustración 29) y en 1998 a Walter Kohn y John Pople. La idea de que la física daría sustento y explicación a todos los fenómenos químicos ha quedado atrás. Los químicos han debido esperar no sólo el impulso teórico sino el crecimiento tecnológico de las computadoras y el de los algoritmos apropiados para garantizar que los resultados fuesen confiables, tanto en el sentido de su robustez teórica como en el de su precisión numérica. Éstas han mejorado notablemente en los últimos años, como para permitir a los químicos establecer consolidadas líneas de investigación en química teórica.

Química biológica

Quizá la rama de la química que más desarrollo ha tenido en los últimos años es la química biológica.



Ilustración 28. Kenichi Fukui, padre de la teoría de orbitales frontera.

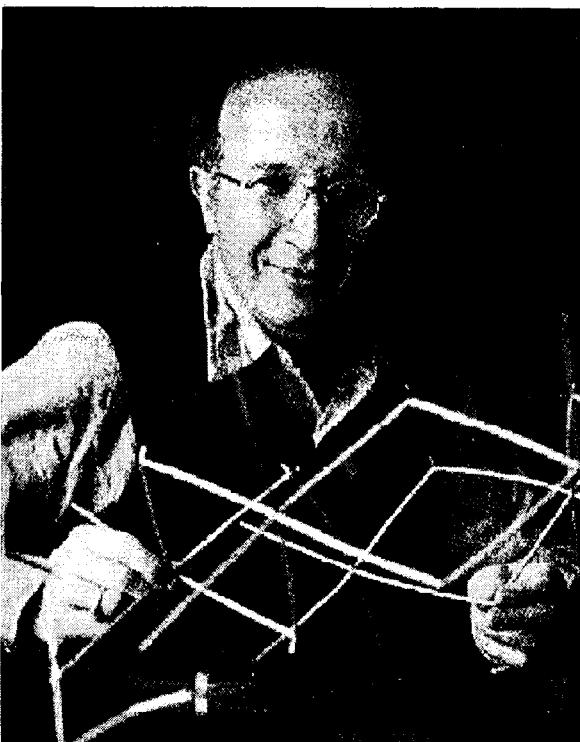


Ilustración 29. Roald Hoffmann, quien avanzó en el establecimiento de parámetros para que una reacción química se lleve a

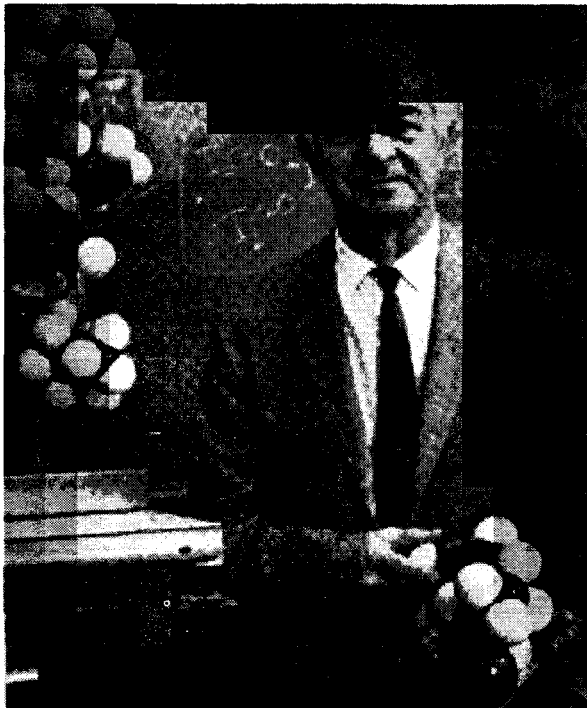


Ilustración 30. Linus Pauling con un modelo de su hélice α .



Ilustración 31. Stanley Miller con su matraz de reacción.

Empezamos en 1950 cuando Linus Pauling propone una estructura tipo hélice para los residuos de aminoácidos en las proteínas (ilustración 30). En 1953, Stanley Miller produce aminoácidos a partir de una mezcla gaseosa supuestamente correspondiente a la de la atmósfera primitiva terrestre sujeta a descargas

eléctricas, con lo cual soporta la hipótesis de A. Oparin sobre el origen de la vida (ilustración 31). En



Ilustración 32. Watson y Crick contemplan un modelo de su propuesta con la estructura helicoidal doble para el ADN.

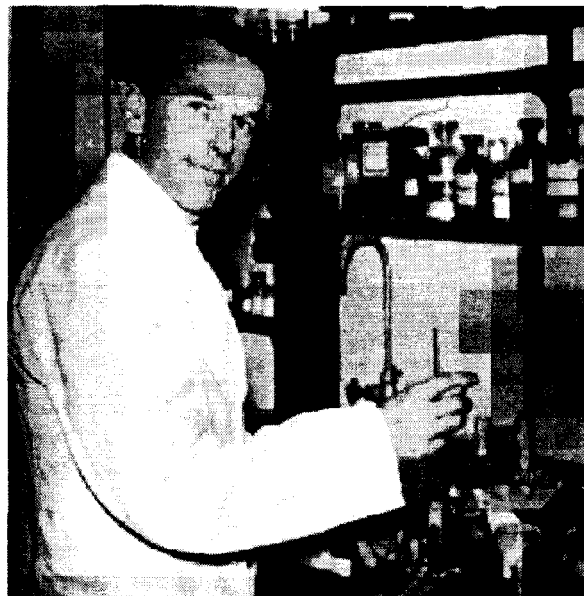


Ilustración 33. En 1961 Heinrich Matthaei descubrió la primera palabra del código genético a partir de modelos moleculares de los tripletes de bases púricas y pirimídicas como el que aquí muestra Marshall Nirenberg.

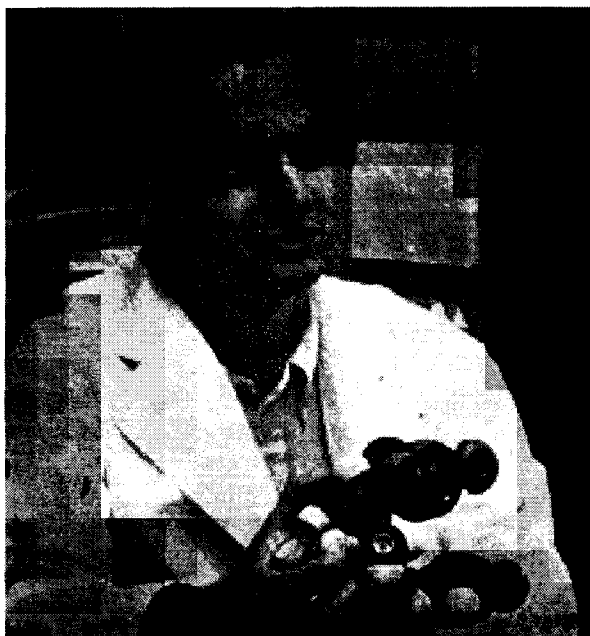


Ilustración 34. Desde 1953 Frederick Sanger determinó la primera secuencia completa de aminoácidos de una proteína.

ese mismo año Watson y Crick proponen la estructura de hélice doble para el ADN (ilustración 32). Prosperan las propuestas sobre la duplicación del ADN, así como el conocimiento del código genético (ilustración 33). Se obtienen las primeras estructuras completas de las secuencias de aminoácidos de una proteína (ilustración 34).

De esta manera, nuestro conocimiento de la química biológica fue prosperando rápidamente, lo que condujo al descubrimiento de enzimas de restricción, que permiten cortar pequeñas piezas del

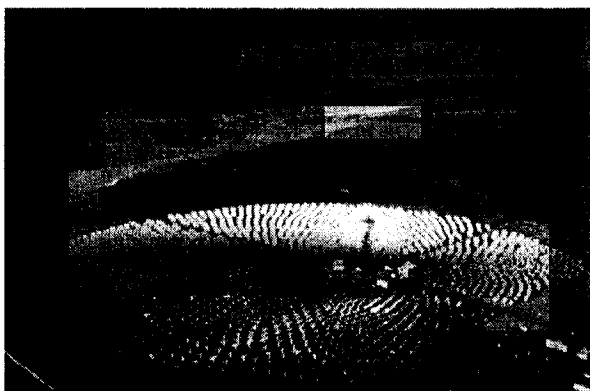


Ilustración 36. La transformación de energía solar en energía eléctrica es perfectamente posible. El problema es que no compete económicamente con las formas tradicionales de aprovechar los combustibles fósiles.



Ilustración 35. Bomba atómica.

ADN para manipular los genes formando ADN recombinante. Nos referimos a la ingeniería genética, a partir de la cual podemos, por ejemplo, insertar un gene humano en una bacteria para que ésta produzca lo que la información del gene disponga. El manejo del ADN recombinante generó varias pequeñas industrias en un nuevo campo, el de la biotecnología.

Química y energía

El gran proyecto de energía antes del inicio de esta segunda mitad del siglo fue el desarrollo de la bomba atómica (ilustración 36). A partir de ese momento los químicos nos hemos enfocado a procesos "limpios", como el de esta granja de energía fotovoltaica (ilustración 36).

La novedad ahora viene del lado de los físicos, que han logrado la fusión nuclear durante algunos segundos en el reactor toroidal europeo (ilustración 37) desde 1992.

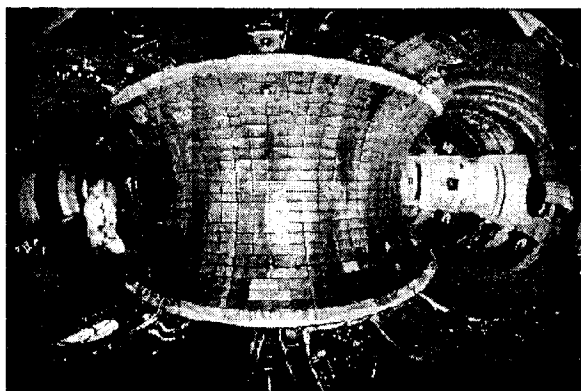


Ilustración 37. Interior del reactor nuclear de fusión europeo. En su interior se mantiene un plasma que contiene los núcleos a fundirse, el cual no debe tocar las paredes del reactor; ello se logra mediante un conjunto de campos eléctricos y magnéticos.



Ilustración 38. Molina y Rowland al momento de publicar su propuesta.

Química y ambiente

Finalmente, vale la pena hacer notar que la química ha sido empleada ampliamente en los últimos años para evitar graves problemas ecológicos. El del hoyo de ozono es el ejemplo más claro. En 1974, Molina y Rowland (ilustración 38) proponen que el cloro de los freones puede generar reacciones catalíticas en las que acabe con miles de moléculas de ozono (ilustración 39). Algunos años más tarde se confirma el adelgazamiento del ozono estratosférico en el polo sur (ilustración 40) y se da la razón del hecho a la esgrimida por Molina y Rowland. ▣

Bibliografía

Ball, P., *Designing the Molecular World. Chemistry at the Frontier*, Princeton, Princeton University Press, 1994.
 Borman, S., Dagani, R., Rawls, R.L. and Zurer, P.S., 75 Years of Chemical Research. Chemistry Crystallizes into Modern Science, *Chemical &*

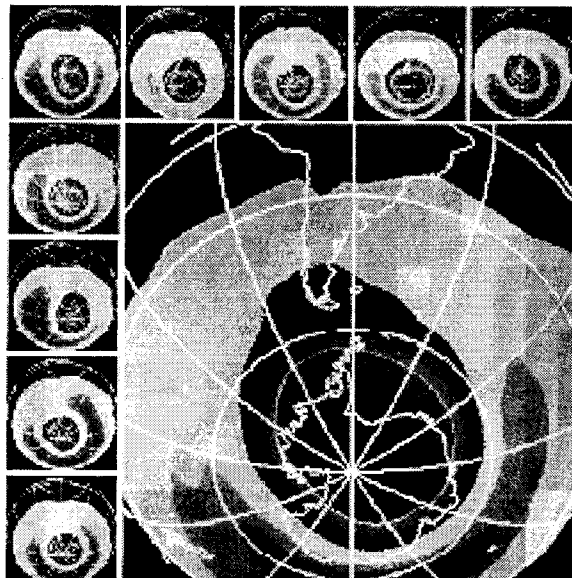


Ilustración 40. Perfiles del ozono en el polo sur cada año de la década 1980-1990.

Engineering News, 76(2), 39-75 (1998).

Bosch, P. y Schifter, I., La zeolita, una piedra que hierve, Colección "La Ciencia desde México", SEP, Fondo de Cultura Económica, CONACYT, núm. 55, México D.F., 1988.

Breslow, R., *Chemistry: Today and Tomorrow. The Central, Useful, and Creative Science*, American Chemical Society, Washington, 1997.

Chimal, C., Juaristi, E. y Quintero, L., Derek Barton y la invención química, *Avance y perspectiva*, 16(6) 389-394 (1997).

Hoffmann, R. *The same and not the same*, Columbia University Press, New York, 1995.

Horgan, J., *The End of Science*, Addison-Wesley, Reading, 1996.

JAMES, L.K., *Nobel Laureates In Chemistry 1901-1992*, American Chemical Society, Washington, 1993.

Jensen, W.B., Logic, History and the Chemistry Textbook. III. One Chemical Revolution or Three? *J. Chem. Educ.* 75(8), 961-969, 1998.

Pauling, L.C., *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules*, Cornell University Press, New York, 1939.

Stent, G.S., *The Coming of the Golden Age: A View of the End of Progress*, Natural History Press, New York, 1969.

Syntex, *Una corporación y una molécula. Historia de la investigación en Syntex*, México, 1967.

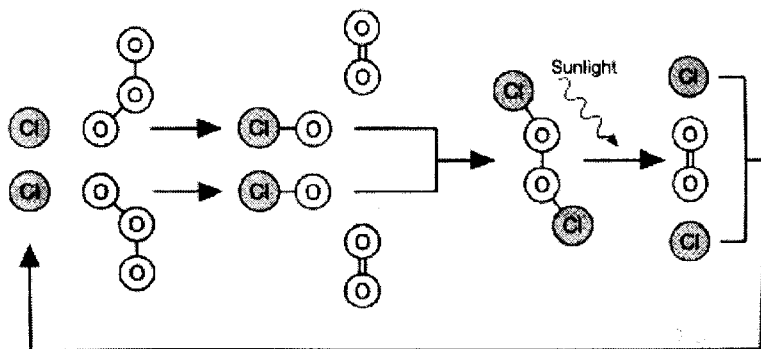


Ilustración 39. Reacción propuesta por Molina y Rowland, entre el cloro de los freones y el ozono estratosférico.