

# La química de las radiaciones, una rama poco conocida de la ciencia

*Efectos trascendentes de una rama de la química que ha quedado olvidada durante mucho tiempo*

por Vitomir Markovic

La química de las radiaciones es una rama de la química (de la química física, según algunos) que estudia las transformaciones químicas que experimentan los materiales expuestos a radiaciones de alta energía y utiliza la radiación como iniciadora de las reacciones químicas, como fuente de energía para romper el delicado equilibrio energético de los sistemas estables. En este sentido es hermana menor de la fotoquímica, que hace lo mismo, aunque utiliza otro tipo de energía electromagnética —la luz— como iniciadora. La química de las radiaciones no tiene que ver con los elementos radiactivos (como ocurre con la radioquímica) salvo para utilizarlos como fuente de radiación, siempre separada físicamente del sistema irradiado.

Las aplicaciones prácticas de la química de las radiaciones en la actualidad se extienden a muchos campos, incluidas la atención de la salud, la alimentación y la agricultura, la industria y las telecomunicaciones. Son relativamente pocas las personas que conocen los diversos beneficios que aporta esta rama tan desconocida de la ciencia.

## Origen y evolución

El origen de la química de las radiaciones como nueva ciencia se remonta a las postrimerías del siglo XIX, pocos años después del descubrimiento de los rayos X. No es extraño que se observaran tan pronto los efectos químicos de los rayos X, si recordamos que incluso los rayos X blandos (de baja energía, de 100 a 200 kiloelectronvoltios) están constituidos por cuantos capaces de excitar o ionizar átomos y moléculas y de romper decenas de miles de enlaces moleculares. Los primeros intentos por conocer la naturaleza de las reacciones químicas radioinducidas chocaron con la falta de fuentes de radiaciones lo suficientemente intensas como para producir cambios que pudieran medirse con lo que, en aquel entonces, eran técnicas analíticas muy burdas e insensibles.

En esos primeros años se desplegó una considerable labor precursora. Aun así, la existencia de esta nueva ciencia no fue reconocida hasta principios de los años cuarenta cuando los conocimientos acerca de las radiaciones y las ciencias nucleares experimentaron una rápida evolución y se lograron numerosos descubrimientos importantes. Se crearon máquinas productoras de radiaciones y fuentes de isótopos radiactivos con potencias que ni remotamente se habían soñado antes. Al principio se invitó a los químicos a que apoyaran otros programas, tales como el estudio de los efectos de las radiaciones en las células vivas.

Algunos químicos pronto descubrieron que, además de resolver problemas prácticos, la química de las radiaciones podía abrir nuevas avenidas a conocimientos de importancia fundamental para la química. Un gran logro fue el descubrimiento de los más poderosos agentes reductores químicos, conocidos como electrones solvatados (o hidratados). El estreno de una técnica conocida como radiólisis por impulsos en el decenio de 1960 amplió aún más las fronteras de la cinética química. Se observaron directamente las más rápidas reacciones de difusión controlada. En una compilación reciente (de 1988), por ejemplo, se enumeran alrededor de 3500 constantes de velocidad para reacciones de radicales libres principales producidas en sistemas irradiados. Esta información sobre la velocidad es sumamente importante para los investigadores que aplican las radiaciones en estudios de problemas biológicos y del medio ambiente en terapia médica (radioterapia) y en la elaboración de modelos para problemas de transformación industrial y tecnología de reactores.

No cabe duda de que la química de las radiaciones ha llegado en su evolución a convertirse en una amplia disciplina de la química. Los métodos empleados y los conocimientos adquiridos tienen diversas aplicaciones en otras disciplinas científicas y en otras industrias. Pero, ¿recibe acaso la química de las radiaciones el reconocimiento que merece incluso de los profesionales que trabajan en los campos correspondientes? La mayoría considera que muy pocos científicos comprenden que la química de las radiaciones ha producido muchos beneficios en campos importantes de la química básica y aplicada, la física química y la biología.

El Sr. Markovic es especialista en química de las radiaciones de la Sección de Química y Aplicaciones Industriales del Departamento de Investigaciones e Isótopos del OIEA. El presente artículo se basa principalmente en los análisis y las conclusiones de dos reuniones recientes de grupo asesor convocadas por el OIEA y realizadas en Maryland (Estados Unidos de América) en 1987 y en Bolonia (Italia) en 1988.



### Repercusión en otras ciencias

La ventaja importante de la química de las radiaciones radica en que puede ser utilizada para producir y estudiar casi cualquier especie atómica reactiva que desempeñe una función en las reacciones químicas, las síntesis, los procesos industriales o en los sistemas biológicos. Las técnicas se aplican a sistemas gaseosos, líquidos, sólidos y heterogéneos. Combinando las distintas técnicas de la química de las radiaciones con la química analítica, se estudian el mecanismo y la cinética de las reacciones químicas.

Entre los ejemplos de aplicaciones en otras ciencias figuran:

**Química de los radicales libres.** Los radicales libres son especies atómicas reactivas de poca duración y productos intermedios comunes de las reacciones químicas. Desempeñan un importante papel en nuestro medio ambiente, incluida la atmósfera (agotamiento del ozono, lluvia ácida, *smog*) y en los procesos industriales. Las reacciones de radicales libres tienen lugar en las células vivas (vegetales, animales y humanas) y pueden tener efectos tanto dañinos como beneficiosos. De especial importancia son los radicales de óxido y peróxido formados en sistemas acuosos y orgánicos en presencia de oxígeno. Los radicales libres producidos por radiación matan las células tumorales y nuestros cuerpos utilizan los radicales libres para aniquilar los organismos invasores. Es comprensible que el conocimiento de las reacciones de radicales libres sea esencial en esferas tan diversas como la biología, la bioquímica, la medicina, las ciencias de la nutrición, la conservación de alimentos y la industria. Aunque también hay otros medios de producir radicales libres, la química de las radiaciones sigue siendo una importante fuente de información.

**Química general (orgánica e inorgánica).** La química de las radiaciones facilitó por primera vez la determinación en detalle y el estudio de muchos productos intermedios de corta duración en las reacciones químicas, y arrojó un gran volumen de datos que permitieron llegar a conocer algunas trayectorias de reacciones complejas y posibilitaron la elaboración de modelos de distintos sistemas. Se han estudiado exhaustivamente algunos procesos químicos y físicos básicos, conocidos como transferencia de carga, transferencia excitónica y reacciones radical-radical y radical-molécula.

**Cinética química.** La radiólisis por impulsos permitió la identificación espectral de radicales libres sumamente reactivos y de corta duración, iones de radicales y especies atómicas excitadas. Mediante la radiólisis por impulsos se observan procesos ultrarrápidos, que suelen ocurrir en nanosegundos ( $10^{-9}$  s) y microsegundos ( $10^{-6}$  s), e incluso en períodos tan breves como varios picosegundos ( $10^{-12}$  s). Se utilizan impulsos cortos de haces electrónicos intensos conjuntamente con las técnicas de detección sensibles; éstas incluyen las técnicas conocidas como absorción, emisión y dispersión de la luz, conductividad (para las especies cargadas), espectros de resonancia del espín electrónico (ESR) (para los radicales libres) y espectros Raman.

**Química nuclear y aplicaciones nucleares.** La química de las radiaciones es fundamental para el conocimiento y el control de los procesos que tienen lugar

### Química de las radiaciones

Los químicos especializados en radiaciones se interesan en tres tipos diferentes de radiaciones:

- electromagnéticas (rayos X, rayos gamma)
- partículas cargadas (incluidos los electrones, positrones, protones e iones pesados)
- partículas neutras (neutrones).

La energía de estas radiaciones suele ser del orden de los kiloelectronvoltios ( $\text{KeV} = 10^3 \text{ eV}$ ) o de millones de electronvoltios ( $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ). Estas son magnitudes de un orden muy superior al de las energías de ionización y excitación de los electrones en los átomos y moléculas (decenas de eV) o al de la energía de los enlaces atómicos en las moléculas (de varios eV). Una partícula, o cuanto, de radiación electromagnética puede ionizar o excitar a un sinnúmero de moléculas: de ahí la elevada eficacia de la conversión de energía de las radiaciones en efectos químicos.

La mayoría de los experimentos químicos con radiaciones se realizan con rayos gamma (a partir del isótopo de cobalto 60) o con electrones de alta energía (de aceleradores de haces de electrones con energías de varios MeV). Los mismos tipos de radiaciones se usan en aplicaciones industriales. En interacción con la materia, estos tipos de radiaciones dislocan los electrones orbitales solamente y producen especies atómicas excitadas, radicales libres e iones. Estas energías de radiación no inducen radiactividad en la materia expuesta.

En los últimos años ha aumentado el interés por el uso de los haces de neutrones, los haces de iones pesados y los electrones de muy baja energía (muy inferior a 0,1 MeV).

en los reactores nucleares, donde el agua se usa como moderador y líquido refrigerante y, como es lógico, está sujeta a la radiólisis. Otros problemas como la corrosión, el control de la acidez y la degradación de las materias orgánicas también tienen relación con los efectos químicos de las radiaciones.

### Aplicaciones prácticas

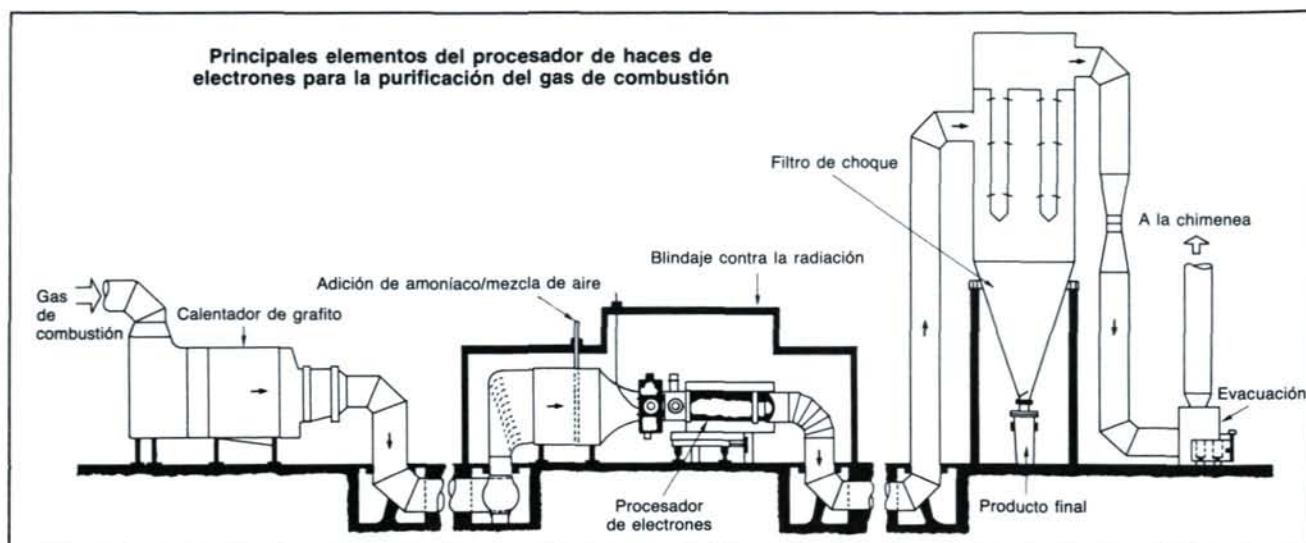
Las aplicaciones prácticas de la química de las radiaciones tienen gran alcance, especialmente en la industria.\* Una de las esferas de interés concreto ha sido la modificación de polímeros mediante radiaciones para distintos usos.

**La radiorreticulación** de polímeros se usa comercialmente en la industria de alambres y cables para mejorar las propiedades de los materiales aislantes a altas temperaturas, así como en la industria de los neumáticos de caucho. Estos materiales se emplean en muchas industrias, incluidas la de las naves espaciales y la aviación, la automovilística, la electrónica, la de las telecomunicaciones y la ingeniería civil. Con las radiaciones se facilita mucho la fabricación de materiales contraíbles por calor (películas, cintas magnéticas, tuberías, empalmes).

**La radioesterilización** de productos médicos desechables se está convirtiendo en el método favorito de la industria médica. La descontaminación de productos cosméticos, de algunos medios farmacéuticos, así como

\* Véase, por ejemplo, el *Boletín del OIEA*, Vol. 27, N° 1 (1985), pág. 33.





Una de las nuevas aplicaciones de la química de las radiaciones tiene como objetivo eliminar los gases tóxicos de las emisiones de las centrales eléctricas alimentadas con combustibles fósiles. Los gases de combustión son irradiados en presencia de amoníaco; el proceso de haces electrónicos elimina el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno y, además, crea un subproducto que puede convertirse en fertilizante para la agricultura.

de materias primas de la industria farmacéutica, también está ganando amplia aceptación. Estas aplicaciones dependen en gran medida del conocimiento de los efectos de las radiaciones sobre los materiales.

La **curación** mediante radiaciones se basa en la polimerización radioinducida. Con ella se obtienen productos de calidad superior en comparación con las curaciones térmicas y por luz ultravioleta, a la vez que se reduce o elimina la contaminación ambiental y disminuyen los costos totales. Se emplea, por ejemplo, en el revestimiento de superficies, la curación de sustancias adhesivas, los laminados y la impresión tipográfica.

La **irradiación de alimentos** es un proceso cuya aceptación se basa en ensayos biológicos y organolépticos, así como en el conocimiento de los efectos químicos de las radiaciones en los productos alimenticios y sus componentes. Se puede afirmar que se conoce mejor la química de los alimentos irradiados que la de los cocinados o tratados de otra manera.

Las **nuevas aplicaciones incipientes** incluyen el tratamiento mediante radiaciones de los gases de combustión de las centrales termoeléctricas de carbón y petróleo para eliminar los componentes tóxicos, el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno con fines de protección ambiental. Los productos tratados pueden convertirse en fertilizantes agrícolas.\* En otras esferas de investigación, se están desarrollando algunas aplicaciones biomédicas sobre la base del uso de la modificación de superficies polímeras mediante radiaciones o la inmovilización de distintos materiales biológicamente activos.\*\*

\* Véase el *Boletín del OIEA*, Vol. 29, N° 2 (1987) pág. 25, y el documento IAEA-TECDOC-428 (1987).

\*\* Véase el documento IAEA-TECDOC-486 (1988).

## Tendencias y evolución

En noviembre de 1988, en Bolonia (Italia), se reunió un grupo asesor de expertos en química de las radiaciones convocado por el OIEA para que evaluara las tendencias y la evolución en 17 países. Asistieron expertos de Alemania (República Federal de), Austria, Canadá, China, Dinamarca, Francia, Estados Unidos, Hungría, India, Israel, Italia, Japón, Países Bajos, Polonia, Reino Unido, República Democrática Alemana y Unión Soviética.

En los informes presentados en la reunión se examinaron algunas aplicaciones de la química de las radiaciones que se están ensayando, y que, entre otras, comprenden los sistemas polímeros para el almacenamiento fotoquímico de energía, los polímeros resistentes o sensibles a las radiaciones, las aplicaciones para la protección del medio ambiente (por ejemplo, el tratamiento de sustancias contaminantes del agua), el efecto de la irradiación sobre la corrosión y la inmovilización de fármacos y materiales biológicamente activos.

**Consideraciones para el futuro.** Dado el alcance de la contribución de la química de las radiaciones al conocimiento científico y a los procesos industriales, ¿qué traerá el porvenir? ¿Se reconocen y explotan plenamente sus posibilidades? ¿Cuál es la situación actual de la química de las radiaciones como disciplina científica? ¿Y cuál será su futuro?

Hay algunos indicios inquietantes.

A pesar de la función reconocida de la química de las radiaciones, la comunidad de investigadores dedicados a ese campo es relativamente pequeña. En todo el mundo, hay sólo unos pocos centenares de científicos dedicados a las investigaciones teóricas y, quizás, un número igual en la industria del tratamiento mediante radiaciones.

Salvo algunas excepciones, disminuyen constantemente los recursos asignados a la química de las



radiaciones en la mayoría de los países. Lo que es más importante, la química de las radiaciones no figura en los programas de enseñanza de la mayoría de las universidades, o casi ha desaparecido de ellos.

Esta lamentable situación obedece a que la investigación activa requiere la existencia de costosas fuentes de radiación, tales como aceleradores de electrones; o de fuentes de radiaciones gamma de cobalto 60, menos costosas, pero también menos flexibles y de uso limitado. Tal vez requiera, además, equipos analíticos ultramodernos y de elevado costo. Por esa razón, la mayoría de los especialistas dedicados a la química de las radiaciones radica en instituciones orientadas hacia las ciencias nucleares o tiene que utilizar los servicios de dichas instituciones en su trabajo. En cierto sentido esto puede interpretarse como una ventaja, ya que ha propiciado un excelente respaldo instrumental y acceso a las fuentes de radiaciones. Al mismo tiempo ha resultado ser una debilidad, ya que ha separado a los químicos de la corriente principal de la química. De hecho, en los últimos años se ha producido una disminución y no un aumento del interés en las universidades. Por eso, la mayoría de los profesores y estudiantes de química desconocen, o conocen muy poco, la contribución que la química de las radiaciones puede aportar a sus empeños. En cierta medida, esto se comprende, ya que la química de las radiaciones tiene poca repercusión y muchas veces una información obtenida gracias a la metodología de la química de las radiaciones no se reconoce como tal.

En muchos casos, los beneficios de las aplicaciones industriales más eficaces de la tecnología de las radiaciones se han derivado directamente de mayores inversiones en la investigación de la química de las radiaciones. Ahora bien, en los países en desarrollo, la transferencia de tecnología de las radiaciones no siempre se complementa adecuadamente con una base probada de investigaciones fundamentales. Y en los países industrializados, una vez que la industria adopta una tecnología, existe la tendencia a reducir las investigaciones fundamentales conexas. No se podrán lograr de manera continua los beneficios que ofrece la tecnología de las radiaciones, a menos que estas tendencias se modifiquen y corrijan.

### Algunos hechos positivos

Se vislumbra una evolución positiva. Malasia, por ejemplo, está concediendo una alta prioridad a las nuevas tecnologías, entre ellas a la tecnología de las radiaciones. En la industria médica, durante muchos años se practicó la esterilización de guantes quirúrgicos con radiaciones gamma. Hace poco se instaló un segundo irradiador de rayos gamma para el servicio industrial en el Centro Nuclear cercano a Kuala Lumpur. También se están haciendo gestiones para introducir en la industria local la curación por luz ultravioleta y por haz de electrones, y se está estudiando la vulcanización de látex de

caucho. Consciente de la necesidad de fortalecer la base fundamental, en 1988 el Centro Nuclear organizó, con ayuda del OIEA, un curso de capacitación nacional sobre fundamentos de la química de las radiaciones y sus aplicaciones. Cuatro catedráticos extranjeros y funcionarios nacionales impartieron el curso de 80 horas lectivas a 18 participantes y algunos observadores.

En el Japón, el Establecimiento de Investigación en Radioquímica de Takasaki del Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica está vinculando eficazmente la química aplicada de las radiaciones con la industria. Como resultado de esta cooperación, aún siguen apareciendo nuevas aplicaciones de la química de las radiaciones para materiales polímeros. Se ha estudiado exhaustivamente la aplicación del tratamiento por irradiación a la protección del medio ambiente. Un nuevo proyecto que se realiza en el Establecimiento es la aplicación de los haces de iones en la ciencia de los materiales y en biología. Se ha proyectado un conjunto de instalaciones de haces de iones que servirán para promover la cooperación internacional en esta esfera.

Mediante el intercambio de información, se está ampliando también en otros países la base de conocimientos técnicos sobre técnicas y aplicaciones de la química de las radiaciones. Un importante simposio celebrado en Marly-le-Roi (Francia) en 1988 atrajo a un centenar de científicos de habla francesa dedicados a la investigación básica o a la aplicada, que trabajan en la química de las radiaciones. La reunión propició un análisis de las investigaciones y el examen del futuro de la química de las radiaciones en Francia. Este país tiene un historial particularmente largo y productivo en este terreno.

En la URSS, Nauka publicó recientemente en Moscú (en ruso solamente) una magnífica y amplia monografía, editada por A.K. Pikaev, sobre la química moderna de las radiaciones. Los tres tomos se centran en los principios fundamentales y las técnicas y métodos experimentales, la radiólisis de los gases y los líquidos, y el estado sólido y los polímeros, incluidas las aplicaciones.

### Medidas futuras

Para garantizar la transferencia eficaz de la tecnología de las radiaciones a los países interesados, parece necesario prestar un apoyo más intenso a la investigación básica sobre radiaciones.

En lo inmediato, una de esas medidas puede ser acelerar los esfuerzos para integrar la información obtenida de las investigaciones sobre química de las radiaciones a las ramas tradicionales de la química. De este modo, la química de las radiaciones podría incluirse junto a la radioquímica y la fotoquímica en los programas de estudios de las cátedras de química. Se espera que el Organismo, en cooperación con sus Estados Miembros, desempeñe un papel apreciable en estos esfuerzos, como parte de su labor en este importante campo.

