

Tendencias futuras de las aplicaciones de los isótopos y de las radiaciones

Por Hellmut Glubrecht

Desde hace unos tres decenios se observa en nuestro mundo científico-técnico un aumento continuo de las aplicaciones de los isótopos. La mayoría de la gente desconoce probablemente el alcance y la diversidad de tales aplicaciones. Pero, en realidad, existen pocos sectores de la investigación científica, la agricultura, la medicina y la producción industrial que no hayan utilizado provechosamente, de una u otra forma, estas herramientas modernas y polifacéticas al servicio de la ciencia y la tecnología. En comparación, sólo la electrónica y la informática modernas pueden haber ejercido una influencia tan amplia sobre la tecnología.

El empleo de radiaciones ionizantes está íntimamente ligado a los isótopos radiactivos, que constituyen las fuentes más seguras, baratas y economizadoras de energía de ese tipo de radiaciones. Las radiaciones ionizantes en forma de rayos X procedentes de fuentes electrónicas se habían aplicado unos 20 a 30 años antes. Pero no ha sido posible disponer de fuentes radiactivas potentes, con intensidades del orden del kilocurio, hasta que se consiguió producirlas en reactores nucleares de investigación, es decir, hacia el final de los años 50.

Entre tanto se han convertido en aplicaciones de uso corriente muchas aplicaciones de los isótopos y las radiaciones. Sin embargo, con ello no se han agostado las posibilidades de esta rama de la tecnología nuclear. En nuestro artículo se describen algunas de las tendencias previstas en su desarrollo y aplicaciones futuras ya que tanto en la metodología como en los campos de aplicación pueden preverse nuevos progresos.

TENDENCIAS GENERALES EN LA METODOLOGIA DE ISOTOPOS Y RADIACIONES

Característica exclusiva de las aplicaciones de los isótopos es la posibilidad de distinguir entre átomos del mismo elemento pero de origen y trayectorias diferentes dentro de un sistema complejo. Otra característica sobresaliente es la extremada hipersensibilidad de los métodos de detección. Ambas características se complementan idealmente cuando los isótopos radiactivos se emplean como trazadores. Es indudable que en el porvenir los isótopos radiactivos se utilizarán en cantidades crecientes como trazadores, especialmente a medida que vaya siendo mayor el número de radioisótopos producidos por bombardeo protónico en ciclotrones.

Por otra parte, se advierte una tendencia creciente en el empleo como trazadores de isótopos poco frecuentes, tales como el ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{34}S , ^{48}Ca , ^{58}Fe , etc. Los isótopos estables poseen la ventaja de no perturbar con radiaciones las muestras marcadas (especialmente las muestras biológicas) o el medio ambiente. Además, su empleo efectivo no está sometido a límites de tiempo a causa de la desintegración radiactiva. Sin embargo, han resultado bastante caros; además, los métodos de detección, como el espectrómetro de masas o los dispositivos ópticos, eran hasta ahora costosos o no muy exactos. Actualmente se están

El Profesor Glubrecht pertenece al Instituto de Biofísica de la Universidad Técnica de Hannover (República Federal de Alemania). De 1973 a 1977, fue Director General Adjunto del OIEA encargado de Departamento de Investigaciones e Isótopos.

superando estos inconvenientes y el umbral de detección ha alcanzado ya un nivel muy por debajo de la millonésima.

Otro método para medir isótopos estables poco frecuentes se basa en el análisis por activación nuclear, que a menudo posee la ventaja de no ser destructivo. En diversas aplicaciones el trazador se emplea exclusivamente para localizar objetos tales como partículas de polvo, microorganismos, polen, insectos o incluso peces. Si la muestra marcada no ha de someterse a tratamiento químico, puede utilizarse cualquier "trazador activable"; es decir, que cualquier elemento químico poco frecuente, como el disprosio, el europio, el indio o el lantano, entre otros, podrá servir de trazador y ser detectado mediante análisis por activación nuclear. Este método de activación de trazadores puede ofrecer grandes posibilidades en el futuro. Es probable que se utilice de modo muy amplio en las investigaciones sobre el medio ambiente. Actualmente se dispone en todo el mundo, en forma de reactores de investigación, de potentes fuentes de neutrones para la activación.

Otro progreso importante se ha producido en la medición de razones isotópicas naturales o ambientales, progreso que tuvo su origen en el campo de la hidrología isotópica. La información que puede obtenerse observando los cambios relativos, a veces muy pequeños, de las concentraciones o proporciones en la composición isotópica de un elemento es importante no solamente en hidrología sino también en otros campos, tales como la prospección de minerales o la ecología. Al parecer, nos hallamos precisamente en los comienzos del desarrollo de una nueva disciplina, en la que se hace uso de un trazador sumamente sensible para estudiar los procesos físico-químicos que nos ofrece la naturaleza.

Otra importante tendencia metodológica puede apreciarse en el empleo de radiaciones ionizantes, tanto en análisis como en procesos. Los análisis por radiaciones se emplearon primeramente para el diagnóstico médico. Luego se utilizaron también en los ensayos no destructivos de materiales, en las mediciones de la densidad y humedad de suelos y en ciertos problemas biológicos. Incluso en las aplicaciones médicas se ha registrado recientemente un nuevo progreso, gracias a la introducción de la tomografía computadorizada. Los instrumentos de medición de tan importante uso en los procesos industriales se simplificarán y se perfeccionarán. Aumentarán las aplicaciones prácticas de las interacciones de los neutrones con la materia, especialmente si se continúa disponiendo de fuentes de ^{252}Cf . En agricultura, acaba de iniciarse el empleo de métodos de exploración isotópica para el estudio de la biomasa y la estructura vegetal.

El análisis químico por radiación puede efectuarse mediante el análisis por activación nuclear y las técnicas de fluorescencia de rayos X con dispersión de energía. El análisis por activación nuclear se ha limitado principalmente a la irradiación con neutrones térmicos. Pero existen notables posibilidades aún inexploradas en el empleo de neutrones rápidos, partículas cargadas y rayos gamma de altas energías (producidos con aceleradores), así como en la aplicación de la radiación instantánea para la detección. En los últimos años, la técnica de la fluorescencia de rayos X con dispersión de energía ha demostrado su eficacia utilizando la excitación de protones en vez de rayos X o electrones. Indudablemente, esa técnica llegará a convertirse en método complementario del análisis por activación nuclear y en fuerte competidor de los métodos de análisis químico.

Actualmente el tratamiento por radiaciones está adquiriendo importancia entre las aplicaciones industriales en gran escala. Sus características distintivas son el ahorro de energía y la gran homogeneidad de efectos que, en la mayoría de los casos, lo hacen superior al tratamiento térmico. La esterilización de productos médicos por irradiación es ya un proceso bien arraigado. La conservación de alimentos por irradiación también se está situando hoy en primer plano. La investigación a fondo de la interacción de las radiaciones con las macromoléculas descubrirá muy probablemente nuevos horizontes para perfeccionar diversas

calidades de los materiales industriales. Otra perspectiva es el tratamiento de aguas residuales por irradiación.

En lo futuro es posible que se descubran efectos nuevos e inesperadamente útiles de las radiaciones ionizantes. Un ejemplo es el reciente descubrimiento de la influencia favorable de dosis de radiaciones de intensidad bastante baja sobre la diferenciación de plantas obtenidas mediante cultivos de tejidos. Si se demuestra que los resultados obtenidos hasta la fecha son fiables, este método puede inaugurar una nueva era en la fitogenética.

APLICACIONES EN LA AGRICULTURA

Aunque las técnicas isotópicas y de radiaciones se emplean ya ampliamente en la agricultura, es posible que sus aplicaciones en esta esfera encuentren mayor expansión en lo futuro. Esto se debe, por una parte, a que la producción agrícola depende todavía estrechamente de los métodos tradicionales; por otra parte, la agricultura se basa en sistemas sumamente complejos y con numerosos componentes aún por explorar.

El creciente empleo de isótopos estables, que ha facilitado ya de modo esencial nuestros conocimientos actuales del metabolismo del ácido nucleico y de las proteínas, reviste especial importancia en las investigaciones sobre la función que desempeñan elementos tales como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, y el azufre. El ^{15}N seguirá teniendo la máxima importancia para resolver nuevos problemas; en casos especiales, podría complementarse con el isótopo radiactivo ^{13}N , de vida corta. En agricultura, la inducción de absorción de nitrógeno molecular del aire por las plantas no leguminosas constituye una de las tareas más estimulantes. El método tradicional de reducción del acetileno no puede proporcionar la medida integrada del nitrógeno molecular total fijado durante el ciclo de cultivo de una planta. Tales mediciones solo pueden efectuarse utilizando isótopos de nitrógeno.

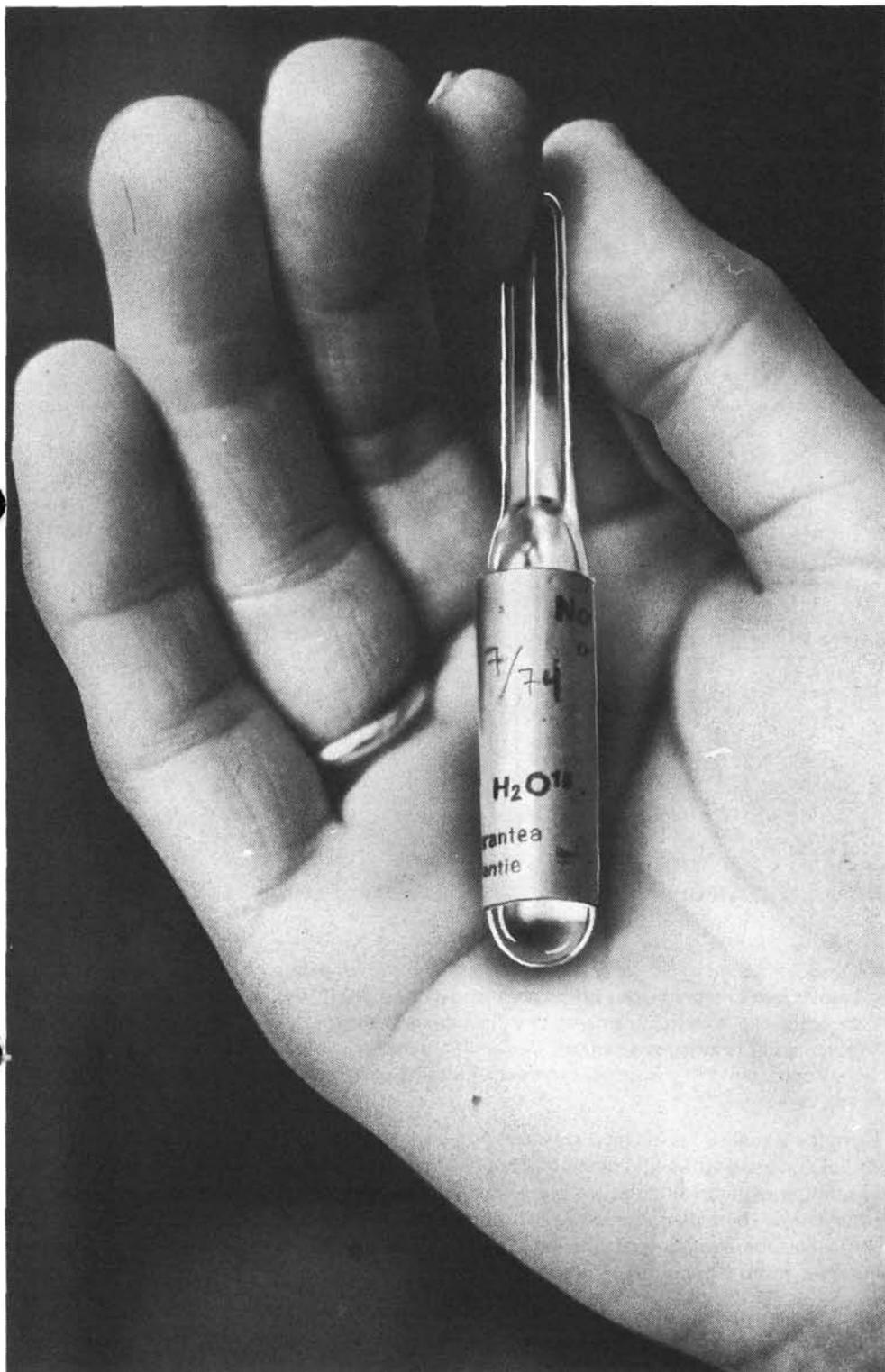
Los compuestos marcados con isótopos estables pueden emplearse también en estudios sobre el terreno relativos al destino y a los procesos metabólicos de los residuos de plaguicidas, así como en experimentos de larga duración sobre nutrición animal.

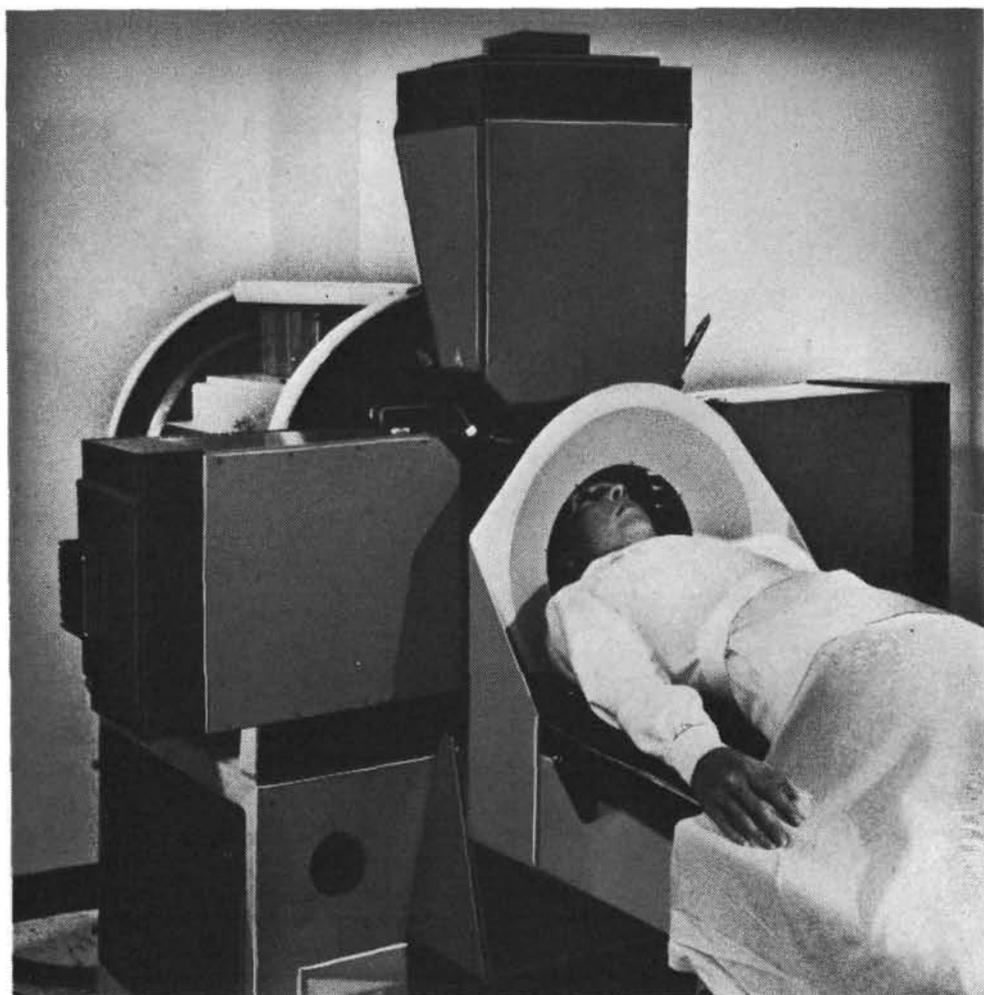
Los isótopos radiactivos seguirán desempeñando un papel predominante en las investigaciones con trazadores, especialmente en los estudios sobre la interacción y sinergismo de diversos trazadores en suelos, plantas y animales. El empleo de sustratos y reagentes marcados radiactivamente se hará también indispensable en las investigaciones sobre enzimas. Así sucede ya en fisiología animal, ciencia en que se están empleando las técnicas de radioinmunoanálisis; pero podría emplearse también muy ventajosamente en la vigilancia de la contaminación de alimentos y suelos.

En la investigación agrícola se están hoy introduciendo las mediciones de razones isotópicas como, por ejemplo, la $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ para el estudio de la respiración. Según una investigación sobre la composición isotópica de contaminantes de plomo en la agricultura, la contaminación se debe más a los gases de escape de los automóviles que al plomo que se encuentra en estado natural en el medio ambiente del lugar estudiado. El futuro aportará indudablemente muchas más aplicaciones de este eficazísimo método.

Entre las otras muchas aplicaciones de los isótopos en la agricultura que pudieran experimentar adicional desarrollo debe mencionarse una de ellas: la importancia del marcado no radiactivo en ecología. La lucha contra los insectos debe basarse en un conocimiento

Una de las primeras aplicaciones prácticas de los isótopos radiactivos fue su empleo como trazadores en procesos químicos y biológicos. Hoy día se advierte una tendencia creciente del empleo de isótopos estables poco frecuentes (no radiactivos) como trazadores. En la fotografía aparece una muestra de agua que contiene el isótopo oxígeno-18 en vez del oxígeno-16, más corriente. Fotografía: Norsk Hydro.

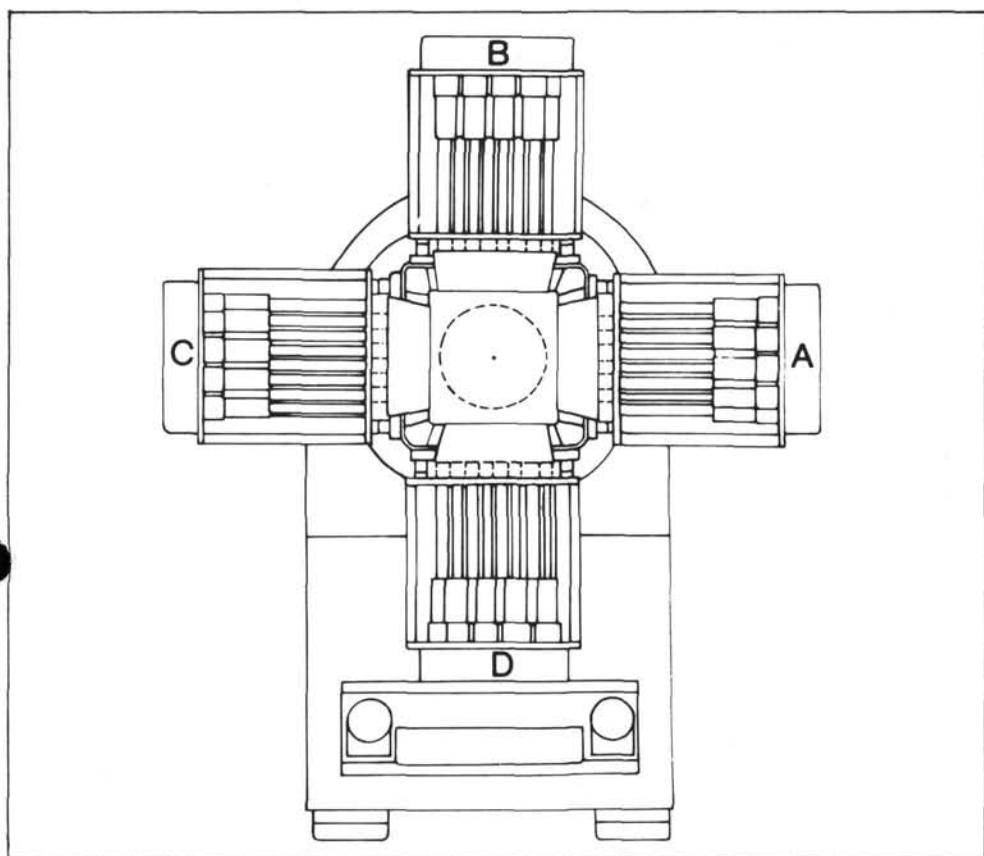




profundo de las migraciones y del comportamiento de los animales. Los trazadores activables antes mencionados brindan un instrumento ideal para realizar estudios de este tipo sobre el terreno, e indudablemente se utilizarán cada día más. Es también de esperar que los fascinantes resultados alcanzados en ecología piscícola mediante el marcado de salmones con europio, samario y disprosio estimulará a los expertos piscícolas a continuar trabajando en esta dirección.

Ejemplo de análisis radiológico avanzado es el método de exploración que permite la medición de la distribución de biomazas en las distintas partes de los cereales durante todas las fases de su desarrollo. Es posible que se realicen nuevos experimentos para comprobar la influencia de diversos tratamientos con fertilizantes y de las variaciones climáticas. En silvicultura se están desarrollando métodos de exploración similares para detectar zonas enfermas en los troncos de los árboles.

El análisis por radiación es también sumamente apropiado para vigilar las variaciones diurnas de la acumulación de agua en las plantas, así como en los suelos, lo que revestirá la mayor importancia para el desarrollo de la agricultura de secano.

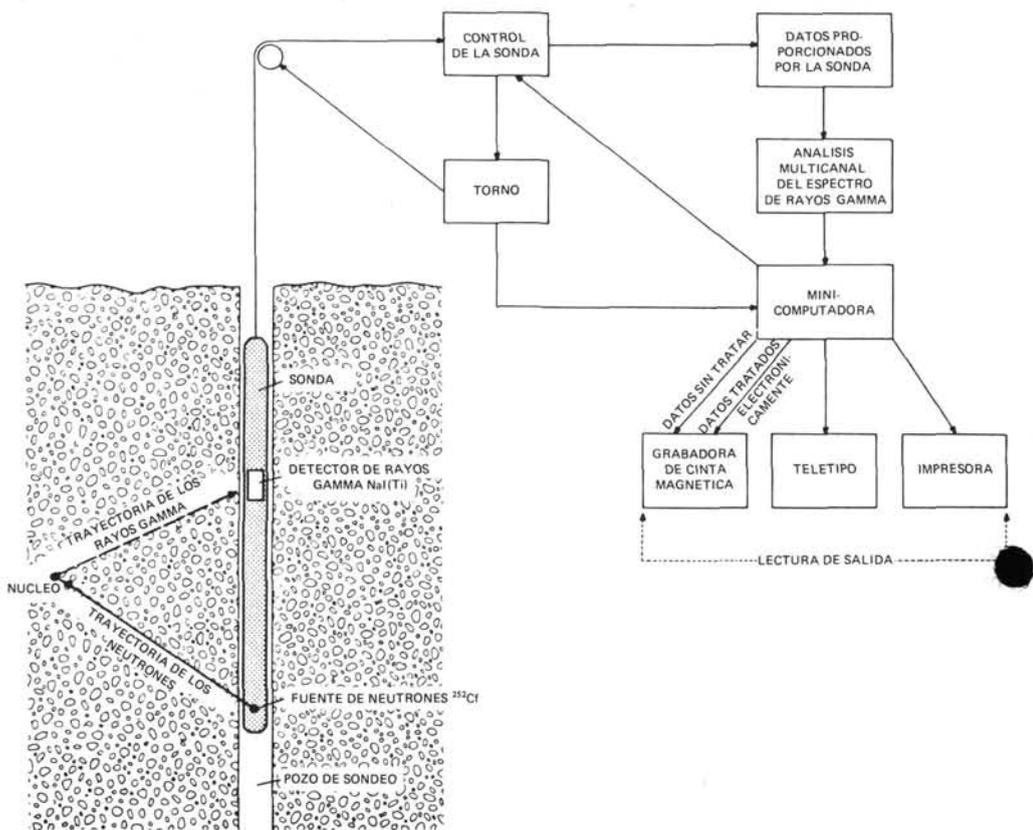


Sistema de tomografía computarizada de radionucleidos de The Center for Health Sciences de la Universidad de California, en Los Angeles, que se emplea para estudiar el riego sanguíneo del cerebro y el metabolismo cerebral de la glucosa. La imagen reconstruida — o tomograma — representa una sección horizontal del cerebro, de modo que una serie de tomogramas en diferentes planos puede proporcionar una imagen tridimensional del órgano. El sistema consta de cuatro conjuntos de detectores. Entre los radionucleidos utilizados en el sistema figuran el ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{111}In y el ^{18}F .

La más importante de las aplicaciones de las radiaciones en la agricultura es la conservación de alimentos por irradiación. Este método se halla actualmente en su última fase de estudio por parte del de la Comisión del Codex Alimentarius de la FAO y de la OMS con respecto a diversos alimentos. Los trabajos futuros consistirán, sobre todo, en obtener pruebas de la comestibilidad de otros alimentos. Pero estos estudios tendrán un carácter más fundamental y se ocuparán de los efectos de las radiaciones sobre los componentes de los alimentos en general para demostrar que la irradiación de alimentos como proceso generalizado es aceptable hasta una cierta dosis. Se dedicará un mayor esfuerzo a los estudios prácticos en gran escala de viabilidad tecnológica y económica. Se investigará asimismo sobre un sistema de conservación integrado que combine el tratamiento térmico y la irradiación.

Otro método prometedor es la irradiación de basuras para que las materias de desecho puedan utilizarse como piensos. El tratamiento de aguas residuales mediante radiaciones puede facilitar una mayor producción de fertilizantes ricos en materias orgánicas.

Mediante el empleo de la irradiación de neutrones en vez de rayos gamma es posible prever algunos progresos en dos campos de las aplicaciones de las radiaciones en la agricultura:



Método de sondeo del contenido metálico de los yacimientos de níquel o de cobre por detección de las emisiones gamma instantáneas inducidas por captura neutrónica. Una fuente de neutrones se introduce en un pozo de sondeo y se miden con un centelleador las emisiones gamma. Estas técnicas nucleares permiten la caracterización de muestras más grandes y más representativas que las obtenidas generalmente mediante las técnicas tradicionales de extracción.

la fitogenética y la técnica de los insectos estériles (TIE). Las ventajas de esterilizar los insectos machos con neutrones, en vez de hacerlo con rayos gamma, se han observado en el macho de la mosca tsé-tsé, que sufre menos daño fisiológico al ser expuesto a dosis moderadas de neutrones y que, a pesar de quedar estéril, sigue compitiendo plenamente con los machos de la mosca tsé-tsé no tratados.

APLICACIONES MEDICAS

Hoy día, la medicina nuclear se encuentra desarrollada en alto grado en la mayor parte de los países industrializados. El instrumental utilizado es bastante complejo y costoso. Las ventajas del diagnóstico nuclear son enormes en comparación con los métodos de diagnóstico tradicionales en lo que respecta al contenido de la información. Otra ventaja estriba en que limita las incomodidades causadas al paciente. En vista de estas consideraciones sería muy conveniente simplificar el equipo médico nuclear y adaptarlo a las condiciones de trabajo de los países en desarrollo tropicales o subtropicales. Actualmente esta labor forma parte importante del programa del OIEA.

Pero pueden preverse también otros progresos importantes en el campo de la medicina. La formación de imágenes *in vivo* con radionucleidos, efectuada mediante exploración, solo puede proporcionar datos sobre la distribución en una cierta zona un fármaco marcado radiactivamente. Los estudios dinámicos de la función y de los procesos fisiológicos deben realizarse empleando cámaras de rayos gamma, que combinan la localización espacial con la variación de tiempos. Las cámaras de rayos gamma han alcanzado ya gran poder de resolución, pero pueden perfeccionarse aún más.

Cada día que pasa se dispone de mayor número de radioisótopos de vida corta, incluso de emisores de positrones producidos en ciclotrones, aumentándose, al mismo tiempo, la lista de radiofármacos obtenidos industrialmente. Constituye progreso importantísimo la formación tomográfica de imágenes con emisores de positrones mediante el uso de radiaciones gamma de aniquilación.

Uno de los métodos de mayor éxito en medicina clínica e investigación biomédica es el radioinmunoanálisis. Es sumamente específico, al menos si se utilizan técnicas de doble anticuerpo. Ha alcanzado una sensibilidad del nivel del picogramo. Su precisión varía entre $\pm 10\%$ y $\pm 2\%$, pero indudablemente podrá perfeccionarse en lo futuro, preferiblemente mediante la preparación automática de muestras. Hoy día se han desarrollado más de 80 tipos de radioinmunoanálisis, cifra que, sin duda, aumentará. En 1975, se han efectuado en todo el mundo unos 100 millones de ensayos de radioinmunoanálisis y se estima que, hacia 1980, el número de ensayos se elevará a 250 millones.

Hasta ahora, la vigilancia de la concentración de ciertos elementos en muestras del cuerpo humano se ha efectuado principalmente para estudiar las deficiencias de tipo nutricional. Resulta cada día más evidente que la medición de la composición por elementos de dichas muestras posee también un elevado valor de diagnóstico para la detección en gran escala de enfermedades infecciosas y no infecciosas. Esto ha de conducir en medicina a estudios de modelos con isótopos radiactivos y, lo que es aún más útil, con isótopos estables, así como a la amplia utilización de los análisis por activación nuclear y las técnicas de fluorescencia de rayos X con dispersión de energía.

APLICACIONES INDUSTRIALES

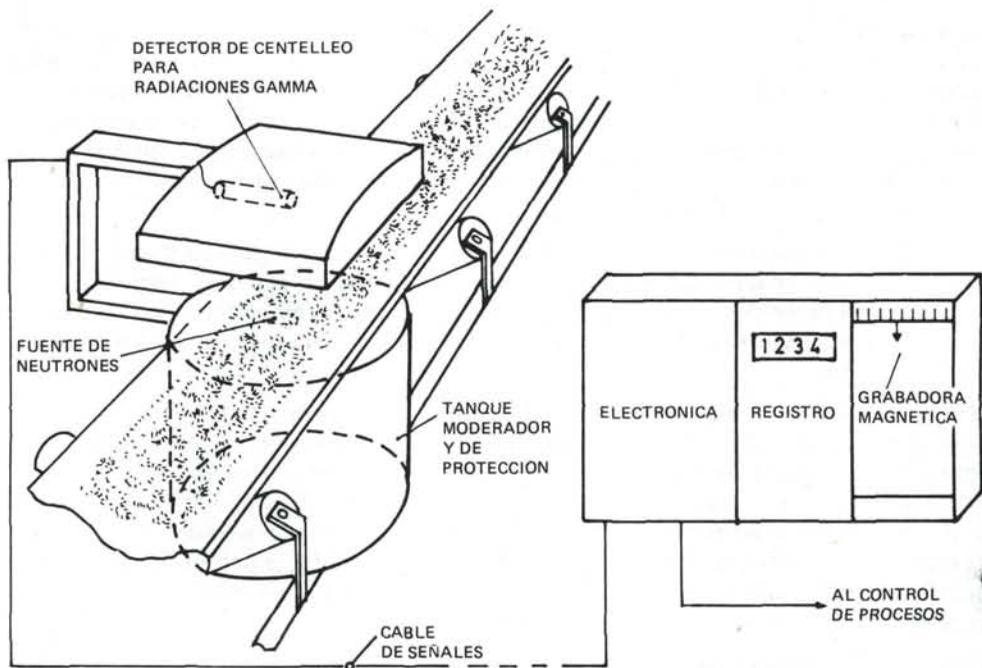
A menudo se han empleado los trazadores en los estudios y en el control de los procesos industriales, tales como el transporte de petróleo, la medición del desgaste, etc., pero no en el mismo grado que en los sistemas biológicos. El carácter menos complejo de los procesos industriales permite, con mayor frecuencia, el empleo de métodos tradicionales.

Cabe prever un fuerte aumento en el empleo de sondas y otros métodos radioanalíticos.

En la industria petrolífera, constituye una técnica prometedora la determinación cuantitativa de la saturación en hidrocarburos empleando diagramas de captura de neutrones pulsados y diagramas basados en mediciones de rayos gamma procedentes de la dispersión inelástica de neutrones. Si esta técnica se combina con una sonda de densidad, pueden detectarse los hidrocarburos existentes a una distancia de decenas de metros del pozo de sondeo.

La exploración de minerales y la minería misma pueden favorecerse grandemente el desarrollo de instrumentos portátiles de fluorescencia de rayos X con dispersión de energía empleando fuentes isotópicas y detectores de Si(Li) de alta resolución. Estos instrumentos permitirán realizar sobre el terreno análisis simultáneos de elementos múltiples con muestras de suelos y sedimentos de corrientes durante los estudios geoquímicos.

Tendencia notable en el empleo de sondas nucleares en la industria del tratamiento de minerales será el desarrollo de dispositivos para la medición continua, a la llegada y en el



La medición de las radiaciones gamma inducidas por captura neutrónica suministra un medio de determinación del contenido de hierro de los concentrados de mineral durante su transporte.

curso del tratamiento de la densidad, flujo de masas, contenido de humedad y concentración de elementos. El equipo desarrollado para las mediciones estáticas se ha adaptado ya en cierto modo para las mediciones en la corriente, pero podría perfeccionarse considerablemente. Lo mismo es válido para las técnicas nucleares empleadas para determinar en continuo la distribución por tamaños de las partículas en un proceso industrial.

En los estudios fundamentales de la dinámica de los procesos, las técnicas basadas en el uso de trazadores pueden desempeñar un papel cada vez más importante, especialmente en la optimización de la explotación de minerales de baja ley.

Las radiaciones ionizantes pueden producir reticulaciones e injertos entre el plástico y el caucho. Es de prever que, en lo futuro, se prestará mayor atención a estos procesos economizadores de energía. En la industria de la celulosa, se han realizado progresos en los procedimientos para preparar texturas ignífugas y nuevas sustancias protectoras no lixiviables de la madera empleando radiaciones gamma o radiaciones de electrones.

Ya se ha mencionado la radioesterilización de aguas residuales municipales para su evacuación en condiciones de seguridad y posible aprovechamiento en la agricultura. Otra aplicación de reciente desarrollo es la conservación de objetos y documentos antiguos mediante la obtención por irradiación de un combinado madera-plástico.

HIDROLOGIA Y CONTROL DEL MEDIO AMBIENTE

Las mediciones con isótopos "naturales" (^{14}C , ^3H) y de razones isotópicas ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) han alcanzado probablemente el máximo grado de refinamiento en relación con los

problemas que plantea la evaluación de recursos hídricos. Podemos prever una utilización creciente de estos métodos a medida que aumenta en los países en desarrollo el número de equipos capaces de efectuar los análisis necesarios y aplicar las técnicas adecuadas.

Además, se prevé que han de aumentar las aplicaciones combinadas de mediciones isotópicas ambientales y de obtención de datos químicos, especialmente en estudios sobre los procesos de salinización de aguas y en los problemas de contaminación. No hay duda de que en estos últimos aumentará el empleo de mediciones de ^{34}S y ^{15}N .

La crisis energética mundial ha estimulado una nueva evaluación de las reservas de las fuentes geotérmicas de energía. Los isótopos ambientales se utilizan hoy en el estudio hidrológico de sistemas geotérmicos, por ejemplo, en la evaluación de zonas de recarga, los fenómenos de mezclas entre diferentes fluidos y los tiempos de mezcla. Las estimaciones de la temperatura del depósito constituyen parámetros esenciales y, a este respecto, se prevé que los geotermómetros isotópicos han de desempeñar en el futuro un papel cada vez más importante.

El empleo de isótopos "artificiales" en las mediciones relativas a las aguas de superficie, así como en las técnicas de perforaciones de sondeo (para determinar la velocidad de las aguas subterráneas) puede aumentar gracias al uso de trazadores activables. Estos trazadores son inocuos para el medio ambiente y pueden utilizarse en experimentos en gran escala sobre el terreno. Una nueva técnica que pudiera ser especialmente provechosa en los estudios sobre sedimentaciones es la combinación de pequeñas cantidades de trazadores radiactivos, para una primera evaluación cualitativa, con cantidades superiores de un trazador activable para la evaluación cuantitativa a largo plazo.

Es difícil imaginar que pueda efectuarse un control y una vigilancia del medio ambiente sin hacer uso de métodos nucleares. El análisis por activación nuclear y la técnica de la fluorescencia de rayos X con dispersión de energía permiten un rápido efecto de detección de más de 30 elementos de importancia para el control de la contaminación ambiental. Gracias a la capacidad no utilizada de los reactores de investigación y al uso de aceleradores con que ahora se cuenta es factible y conveniente establecer un programa de dichas mediciones a escala mundial.

La propagación de contaminantes gaseosos o aerosoles contaminantes puede vigilarse fácilmente mediante combinaciones de isótopos estables especiales o mediante trazadores activables. En un experimento en gran escala realizado en los Estados Unidos se utilizó metano de la composición $^{13}\text{C}_2\text{H}_4$, que se propaga fácilmente con el aire y puede detectarse por espectrometría especial de masas. La detección se logró a distancias de más de 1 500 kilómetros.

Los aerosoles marcados con disprosio pueden producirse mediante reacciones pirotécnicas y distribuirse fácilmente como fuentes localizadas en la atmósfera para estudiar el comportamiento de la contaminación en diferentes condiciones climáticas. Mediante el marcado con trazadores activables también es posible vigilar la contaminación causada por los gases de combustión y por el polvo producido en las plantas industriales.

CONCLUSION

Es posible concebir las tendencias futuras por extrapolación a partir de la situación actual. Aunque las tendencias examinadas en este artículo pueden cambiar ligeramente y la lista de temas tratados es incompleta, debe quedar bien claro que los isótopos y las radiaciones tienen un campo cada vez más amplio de aplicaciones en nuestro mundo técnico y que cabe prever grandes progresos futuros.