

Artículo N^o 4 de la serie:
Los radioisótopos al servicio del hombre

Protección de la calidad de los alimentos y del medio ambiente

por F.P.W. Winteringham*

Los radioisótopos no pueden, por supuesto,
hacer nada en servicio del hombre.
En cambio, a la pregunta
¿qué puede hacer el hombre con los radioisótopos?
Pueden darse dos respuestas:
Destruirse, o bien, ayudarse a sí mismo.
El impetuoso adelanto de las ciencias aplicadas, desde Hiroshima,
la naturaleza evidente del hombre
y de la sociedad contemporánea
(véanse las obras de Robert Arrey, Jacob Bronowski
y del Club de Roma),
y una modesta extrapolación al futuro,
no parecen indicar, por desgracia,
una probabilidad despreciable de la primera posibilidad.
En su declaración ante una sesión plenaria
de la Conferencia trienal del Consejo Internacional de Mujeres
(Conseil international des femmes, París, PLE/73/24)
celebrada en 1973, mi difunta esposa dijo:
"Acojo con satisfacción
esta oportunidad de referirme brevemente
al Organismo Internacional de Energía Atómica,
perteneciente al sistema de las Naciones Unidas ...
creado para fomentar la utilización de la energía atómica con fines pacíficos.
No olvidemos la sobre-cogedora disyuntiva ...
De ninguna manera debemos nosotras,
las mujeres, desentendernos de estos temas
a causa de su manifiesta complejidad técnica.
Hoy en día, la ciencia y la tecnología, egoístamente aplicadas,
podrían causar en el medio ambiente
y sus recursos estragos que durarían varias generaciones".
Estamos en el Año Internacional de la Mujer
y dedico este trabajo a la memoria de mi esposa.
Se refiere a la utilización pacífica de los isótopos
para proteger la calidad de los alimentos y del medio ambiente
y complementa el segundo artículo de la serie,
escrito por el Dr. Ralph M. Kniseley
y referente a las aplicaciones médicas y biológicas.

* Jefe de la Sección de Residuos Químicos y Contaminación de la División Mixta FAO/OIEA
de la Energía Atómica en la Agricultura y la Alimentación.

ANTECEDENTES

Los vestigios de contaminantes químicos de origen artificial representan una siniestra amenaza para la calidad del medio ambiente (y, por tanto, de los organismos que en él viven y de sus alimentos). Siniestra en el sentido de que, generalmente, sólo puede detectarse e identificarse por medio de técnicas complejas de la ciencia moderna y porque sus efectos pueden tardar mucho en aparecer, aunque no por ello las consecuencias biológicas dejan de ser menos graves. La tragedia de Minamata y los problemas de eutroficación que surgen en todo el mundo así lo atestiguan. Además, los mecanismos en cuestión "son muy complejos y no fácilmente comprensibles por el profano. Por tanto, el científico tiene el deber especial de estudiar su naturaleza, magnitud e importancia biológica y de presentar sus conclusiones imparcialmente". (Grupo de expertos FAO/OIEA, Viena 1970).

El empleo de isótopos radiactivos o estables para marcar átomos o moléculas en los alimentos, en el medio ambiente o en los organismos vivos, representa probablemente la mayor innovación en la técnica de la investigación biológica desde el empleo del microscopio por Leeuwenhoek en el siglo XVII.

El empleo de trazadores radiactivos no es nuevo. Ya en 1923 Hevesy estudió la absorción del plomo por las plantas con ayuda de un isótopo del plomo existente en la naturaleza: el torio B. Sin embargo, sólo cuando se construyeron los reactores nucleares, el primero de ellos en Chicago en 1942, se dispuso de cantidades suficientes de isótopos radiactivos artificiales para su uso en gran escala como trazadores.

Las técnicas basadas en los radiotrazadores han demostrado ya su gran valor como instrumento de investigación. En combinación con la cromatografía y demás técnicas de fraccionamiento, se emplean ampliamente para estudios fundamentales del comportamiento, destino final y significado de los residuos de plaguicidas (por ejemplo, insecticidas, fungicidas, herbicidas), drogas, detergentes, productos químicos y desechos industriales, etc., que, en forma de vestigios, pasan a contaminar los alimentos, el medio ambiente y los organismos vivos. "Tras la aparición de los métodos basados en los radiotrazadores hubo que escribir de nuevo casi todo lo referente a procesos metabólicos intermedios y mecanismos de desintoxicación ... Los estudios con radiotrazadores sobre el metabolismo y el destino final de los plaguicidas han dejado de ser sólo un medio de satisfacer la curiosidad académica sobre los compuestos que ya están en uso; por el contrario, actualmente constituyen, en general, una etapa necesaria y crucial en el conocimiento de la persistencia y acción de un plaguicida antes de que empiece realmente a utilizarse" (Casida, 1969).

El empleo de los isótopos estables como trazadores, cuestión diferente del conocimiento de su existencia, fue efectivamente posible gracias a H.C. Urey, quien logró en 1931 la concentración del deuterio (^2H), utilizado como trazador, también por Hevesy, algo después.

Dado un instrumento de investigación nuevo y poderoso, surge la tentación de elaborar un programa orientado a los problemas que se adapten bien al instrumento. El acierto de esta actitud es discutible. Sin embargo, es indudable que las técnicas isotópicas, *combinadas con los factores que casi invariablemente van unidos a ellas* (laboratorios de excelente concepción y seguridad, mantenimiento minucioso de los instrumentos, alta capacitación, etc.) han contribuido en gran medida a nuestro conocimiento del comportamiento y significación de los contaminantes químicos y radiactivos y, por supuesto, de la capacidad de los propios ecosistemas ambientales para recibir tales contaminantes sin efectos inadmisibles. Es más, bien pudiera argüirse que ese conocimiento merece mayor prioridad que en el presente si se quiere conocer las situaciones o vías verdaderamente críticas y realizar programas de "vigilancia" más racionales. Por ejemplo, si se consiguen datos suficientes, por medio de investigaciones, sobre el comportamiento y significación biológica de un plaguicida y de sus residuos, en las diferentes condiciones necesarias para el control

efectivo de la plaga, se conocerán claramente los límites de su utilización sin riesgos. Si, gracias a una educación adecuada y a controles ejercidos en el momento de la aplicación, se respetasen estos límites, ¿no resultarían entonces innecesarios algunos órganos burocráticos y programas de vigilancia? En efecto, este criterio se sigue eficazmente en farmacología y medicina. Una vez que se han establecido los límites para la utilización eficaz y sin riesgos de una nueva droga, ésta se utiliza ampliamente sin necesidad de recurrir a la toma de muestras de los tejidos o excreciones de los pacientes como parte de algún programa de vigilancia de los residuos de la droga.

TECNICAS ISOTOPICAS PARA "ESTUDIOS CON TRAZADORES" O PARA ACTIVIDADES DE "VIGILANCIA"

Conviene considerar dos clases de aplicaciones: 1) Para estudios con "trazadores", en los que un contaminante marcado con isótopos estables o radiactivos se incorpora al sistema a fin de estudiar su comportamiento, destino final químico y físico en condiciones experimentales o de realidad simulada. 2) Como instrumento de "vigilancia" para estudiar una situación existente de contaminación o exposición.

La primera clase de aplicación comprende el empleo clásico de los isótopos como trazadores y es, generalmente, una aplicación de investigación en el sentido de que el sistema estudiado, sea un alimento, un elemento ambiental como el suelo o el agua, o un organismo animal o vegetal vivo, es artificialmente expuesto al contaminante con fines de investigación.

La segunda clase de aplicación abarca las técnicas bien arraigadas de análisis por radioactivación y por dilución isotópica. También comprende las técnicas menos conocidas de utilización de sustratos o reactivos marcados para vigilar o investigar sistemas ya contaminados o expuestos. Estas últimas son los equivalentes, en el aspecto ambiental, de las aplicaciones de los radioisótopos para el diagnóstico y el radioinmunoanálisis en la medicina moderna (véase en el BOLETIN DEL OIEA, Vol. 16, Nº 5, el segundo artículo de esta serie). En el contexto de la protección de la calidad del medio ambiente, las posibilidades que brindan parecen haberse explotado relativamente poco. Ambas clases de aplicaciones para la investigación y protección de la calidad de los alimentos y del medio ambiente son el tema de una serie de publicaciones del OIEA (reseñadas en la bibliografía aneja).

ESTUDIOS CON TRAZADORES RADIATIVOS

Actualmente se dispone en el comercio de una amplia gama de contaminantes potenciales marcados con isótopos radiactivos del hidrógeno, tritio (^3H), carbono (^{14}C), azufre (^{35}S), fósforo (^{32}P), yodo (^{131}I), o con otros radioisótopos, con radiactividades específicas de 10 o más milicurios por gramo. Entre ellos figuran drogas, plaguicidas, solventes industriales, fertilizantes, aditivos de alimentos, productos intermedios orgánicos, etc. Además, en la literatura científica se describen los métodos para preparar casi cualquiera de los muy variados productos químicos orgánicos sintéticos empleados en agricultura, medicina e industria, a partir de simples productos intermedios marcados de venta en el comercio. Muchos de los principales fabricantes de nuevos productos agroquímicos y farmacéuticos preparan corrientemente sus productos en forma marcada para determinar los límites de seguridad de su comercialización y utilización (véase la **figura 2**). Análogamente pueden adquirirse en el comercio los isótopos radiactivos de muchos elementos "tóxicos", tales como el arsénico (^{76}As), cadmio ($^{115\text{m}}\text{Cd}$), cromo (^{51}Cr), plomo (en forma de radio D), mercurio (^{203}Hg), selenio (^{75}Se), cinc (^{65}Zn), etc.

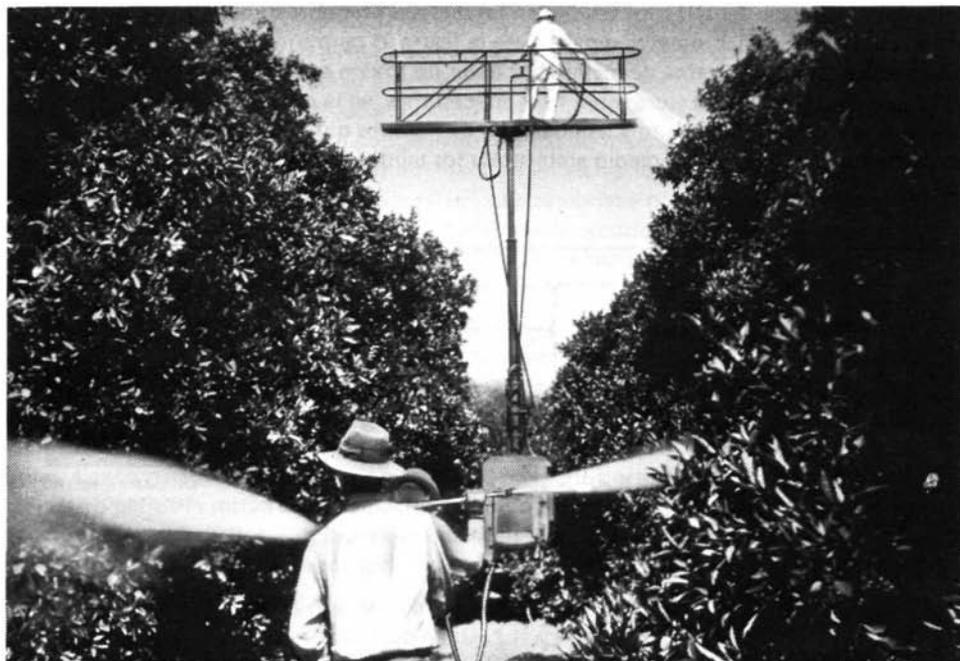


Figura 2: ¿Cuál es el destino final de un insecticida aplicado para combatir las plagas de la fruta? Las técnicas isotópicas son un elemento esencial para responder a tales preguntas y determinar las condiciones de empleo sin riesgos de los plaguicidas.

Esto significa que el comportamiento, persistencia y destino final de tales contaminantes en el suelo, agua, alimentos, tejidos vegetales o animales, puede estudiarse experimentalmente en concentraciones de menos de una parte por mil millones. Tales concentraciones de los residuos de plaguicidas en los alimentos, por ejemplo, son muy inferiores a las consideradas por la OMS como significativas desde el punto de vista toxicológico para el hombre expuesto a ellas durante toda su vida. Además, por técnicas de radiocromatografía u otras técnicas de fraccionamiento con sustancias conocidas, puede determinarse a menudo, sin ambigüedad, la identidad de los productos de degradación o de reacción del contaminante, para concentraciones de éste muy inferiores a las necesarias para la detección por análisis químico clásico.

El rasgo común de los estudios de persistencia y destino final es que primero se prepara el plaguicida, la droga o el contaminante potencial en forma adecuadamente marcada. Se aplica entonces en condiciones experimentales o simuladas, según la exposición o contaminación que se desee investigar. Tras diferentes períodos de espera se recogen muestras (por ejemplo, de excreciones de animales, sangre, tejidos de plantas o alimentos tratados, suelo, agua, etc), se comprueba su radiactividad total, se extraen sus componentes y se fraccionan, y se comprueba también la radiactividad de las fracciones. La proporción de radiactividad determinada en cada fracción permite cuantificar, caracterizar y a veces identificar dicha fracción químicamente, incluso aunque sea un producto de degradación totalmente distinto de la sustancia original. De este modo, ha sido posible estudiar, por ejemplo, el destino final de un residuo de DDT en el trigo, desde el momento de su empleo como insecticida hasta el consumo del pan por animales de experimentación (¡inclusive al autor!), pasando por las operaciones de molienda y cochura. El fraccionamiento de los

derivados radiactivos del DDT, obtenidos en las diversas etapas, y su determinación por exploración de los radiocromatogramas (véase la figura 1) permitió seguir su evolución hasta su excreción "final" en forma de metabolito polar no tóxico en la orina del hombre. Hoy día es abundantísima la literatura sobre tales aplicaciones, en la que se describen la persistencia y destino final de una amplia gama de residuos químicos "extraños" que se incorporan a los alimentos, el medio ambiente y los tejidos vivos (véase la figura 2).

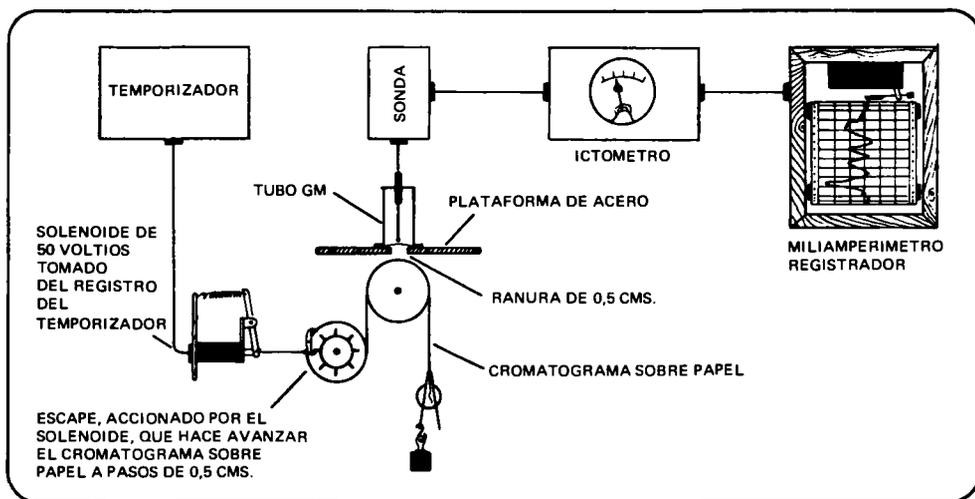


Figura 1: Dispositivo de exploración de radiocromatogramas sobre papel ideado por el autor hace más de 25 años para estudiar el destino final de los vestigios de contaminantes en los alimentos y tejidos vivos. Estas técnicas combinadas de trazadoras radiactivas y cromatografía se utilizan ahora ampliamente en los laboratorios para estudiar la evolución y persistencia de drogas, plaguicidas, detergentes y demás contaminantes potenciales.

Los programas coordinados de investigación de la División Mixta FAO/OIEA, ejecutados para ayudar a los científicos del "tercer mundo" a identificar y estudiar sus propios problemas en sus propias condiciones, han puesto de manifiesto aspectos importantes de la cuestión. En primer lugar, los problemas de contaminación son frecuentemente tan graves en los países "en desarrollo", aunque más descuidados que en los países adelantados. Por ejemplo, cuando un proceso rápido de industrialización ha afectado las pesquerías tradicionales situadas en torno a los estuarios formados por los ríos, pero no existen las investigaciones complejas y la legislación que se dan por descontadas en los países adelantados. El segundo aspecto es que la naturaleza de los problemas puede ser por completo diferente en las circunstancias de un país "en desarrollo", de modo que los datos publicados existentes no siempre son aplicables o no siempre están disponibles. Por ejemplo, en relación con el empleo de insecticidas y fungicidas para la protección del cacao en Africa Occidental.

Una propiedad única de la técnica de los trazadores isotópicos, además de su extremada sensibilidad y especificidad para la sustancia marcada, es que el material marcado tiene, para todos los efectos prácticos, propiedades idénticas a las del elemento o compuesto químico normal o no marcado, pero además, puede detectarse y determinarse por las radiaciones emitidas. Así pues, el comportamiento del DDT marcado puede estudiarse incluso cuando ya existe una contaminación detectable, que, en el caso del DDT, afecta a toda la biosfera.

Otra ventaja es que, en muchos casos, la presencia del compuesto marcado puede estimarse y su distribución determinarse por técnicas no destructivas. Por ejemplo, utilizando técnicas de exploración o de recuento a distancia de la actividad del cuerpo entero, puede observarse la "bioacumulación" en los peces *in vivo* y la concentración en un órgano determinado de un contaminante acuático marcado. La distribución de un fungicida sistémico marcado en plantas enteras, o en secciones histológicas, puede fotografiarse en forma de "autorradiografía", que se obtiene poniendo simplemente una placa o emulsión fotográfica en contacto con la muestra en la oscuridad durante el tiempo necesario. En realidad, Henri Becquerel descubrió, en 1896, la radiactividad, por los efectos de las radiaciones (de una sal de uranio) sobre una emulsión fotográfica en la oscuridad.

Las técnicas isotópicas, como todas las demás, tienen sus inconvenientes y limitaciones. Los inconvenientes se deben generalmente a la ignorancia de las propiedades nucleares o de la bioquímica del sistema estudiado. Las limitaciones se deben principalmente a los costes relativamente altos de preparación de muchos compuestos marcados, a los riesgos reales o imaginarios de irradiación, y al hecho de que muchos isótopos radiactivos, por lo demás útiles, tienen períodos de semidesintegración demasiado cortos. Por ejemplo, el bromo-82 radiactivo pierde la mitad de su radiactividad cada 35 horas. La duración de los experimentos con dichos isótopos tiene que limitarse, por lo general, a 10 o 15 períodos de semidesintegración. Estos plazos son demasiado breves para el estudio de muchos problemas ambientales.

Precisamente por tales razones son importantes los cursos de capacitación en el empleo de técnicas isotópicas para estudiar los problemas de la contaminación de los alimentos y del medio ambiente. Dichas técnicas son instrumentos únicos y poderosos pero, para aplicarlas en condiciones de seguridad y eficacia, no basta con tomarlas y usar de ellas como si fueran un microscopio.

TRAZADORES ISOTOPICOS ESTABLES

Las limitaciones de los trazadores radiactivos debidas a la desintegración radiactiva (brevedad de los períodos de semidesintegración de algunos isótopos, y posibles riesgos de irradiación) excluyen, por lo general, los experimentos en gran escala sobre el terreno. Además, no existen isótopos radiactivos adecuados de dos elementos importantes, por lo menos, en este aspecto: el nitrógeno y el oxígeno.

El Simposio FAO/OIEA celebrado en Viena en noviembre de 1974 (Isotope Ratios as Pollutant Source and Behaviour Indicators, IAEA Symposium Proceedings, Viena 1975, STI/PUB/382) puso de relieve que se habían conseguido grandes adelantos en la disponibilidad y utilización de los isótopos estables como trazadores. Ello se debe a una más eficaz y económica separación de los isótopos estables, especialmente el ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O y ^{34}S , a un aumento de la sensibilidad y disponibilidad de los instrumentos para su medición, y al mayor número de compuestos químicos disponibles marcados con isótopos estables. Actualmente se dispone, en cantidades del orden de kilogramos, de elementos y sus compuestos, marcados por alteración de la razón isotópica natural (por ejemplo, mediante el empobrecimiento en ^{14}N o el enriquecimiento en ^{15}N del nitrógeno natural). Estas sustancias pueden utilizarse sobre el terreno sin ningún riesgo de irradiación y sin ningún límite de tiempo impuesto por la desintegración radiactiva. Además, los adelantos en la instrumentación y la metodología han puesto la utilización de tales isótopos al alcance del presupuesto de instituciones modestas; actualmente puede obtenerse equipo adecuado de determinación de isótopos estables por menos de 50 000 dólares de los Estados Unidos.

Gracias a los modernos espectrómetros de masas y a la resonancia magnética nuclear (RMN), la espectroscopia permite no solamente medir la razón isotópica sino que también indica

la localización del isótopo y la estructura molecular. El empleo de técnicas de "mercado múltiple" permite detectar moléculas marcadas en condiciones de dilución ambiental, capaces de competir con las de una sola marca radioisotópica. Por ejemplo, en las condiciones normales de síntesis, la probabilidad de formación del herbicida 2, 4, 5-T marcado uniformemente con ^{13}C es menor de una parte por mil billones. La utilización del herbicida marcado artificialmente de esta forma permitiría, por tanto, detectarlo con seguridad tras enorme dilución.

Obviamente, existen grandes posibilidades para la utilización de los trazadores isotópicos estables en las investigaciones relativas al medio ambiente. A este respecto, cabe citar el programa conjunto FAO/OIEA/GSF de investigaciones coordinadas sobre residuos de productos nitrogenados en agricultura. Recientemente se amplió en gran medida gracias a la generosidad de la República Federal de Alemania y está basado en investigaciones coordinadas internacionales con fertilizantes marcados con ^{15}N para estudiar el comportamiento de los residuos de fertilizantes nitrogenados, es decir, la parte (a veces más de la mitad) no aprovechada por las plantas. Parte, dicho sea de paso, de un elemento básico indispensable en agricultura y cada vez más costoso, especialmente para los países en desarrollo. ¿Qué cantidad del residuo retorna a la atmósfera por los procesos de "desnitrificación" del suelo y qué cantidad es arrastrada hacia las aguas locales subterráneas, superficiales o incluso potables? Se ha comprobado ya que la proporción de nitrato inorgánico ha aumentado considerablemente en ciertas aguas subterráneas y superficiales, y que en algunos casos incluso sobrepasa los límites recomendados por la OMS para las aguas potables. El nuevo programa se interesa especialmente por estas cuestiones. Las respuestas tienen una obvia importancia ambiental y económica.

Otros problemas ambientales en los que el empleo de trazadores isotópicos estables ya representa una aportación útil son el destino final y el comportamiento de las emisiones industriales de nitrógeno y azufre a la atmósfera. Actualmente se sabe que estas emisiones pueden afectar, y de hecho afectan en grado apreciable, al pH o acidez de la lluvia en grandes zonas, con los efectos consiguientes sobre la salud de las plantas y las propiedades del suelo.

Existen problemas similares muy difundidos en relación con el comportamiento del nitrógeno en la contaminación y eutroficación de las aguas interiores. Se sabe, por ejemplo, que en algunos sistemas acuáticos la eliminación de concentraciones perjudiciales de nitratos puede conseguirse por procesos biológicos naturales de desnitrificación y que acaso sea posible estimular artificialmente tales procesos. Las cuestiones como ésta sólo pueden tener contestación tras experimentos en gran escala en condiciones ambientales y actualmente es posible el estudio de las mismas con los isótopos estables del nitrógeno.

LOS TRAZADORES ISOTOPICOS COMO INSTRUMENTOS DE "VIGILANCIA"

La "industria de la energía atómica", los ensayos de explosivos nucleares, la generación de energía nucleoelectrónica y el tratamiento de combustibles nucleares, han ocasionado la aparición de sustancias radiactivas que, en forma de vestigios, contaminan los alimentos, el medio ambiente y los organismos vivos a escala global, pero que, debe subrayarse, suponen actualmente niveles de irradiación muy inferiores a los originados por la radiactividad natural de fondo a la que el hombre siempre ha estado y estará expuesto.

Los estudios con radiotrazadores sobre el metabolismo y el destino final de los plaguicidas ... constituyen ►
... un paso necesario y capital para conocer la persistencia y acción de un plaguicida antes de que comience su verdadera utilización". La fotografía muestra un invernadero caliente del Instituto de Botánica y Microbiología del Centro de Investigaciones de Jülich, RFA. Foto: KFA, Jülich



Radioecología

La instrumentación y metodología empleada en las investigaciones con trazadores radiactivos pueden, por supuesto, utilizarse como medios de vigilancia de la radiactividad ambiental. Los datos así obtenidos brindan muy valiosa información sobre el comportamiento y persistencia en los medios atmosférico, terrestre y acuático. Muestran, por ejemplo, que la dilución efectiva de ciertos vestigios contaminantes, una vez que éstos pasan a los océanos, no es, en modo alguno, tan amplia como el volumen total de los océanos pudiera sugerir, pues solamente las capas superficiales relativamente someras (30 m) actúan efectivamente como medio de dispersión.

Al contrario de muchos de los problemas de la contaminación química, los de la contaminación radiactiva pudieron preverse desde los comienzos de la "era de la energía atómica". Los estudios correspondientes dieron por resultado la elaboración de normas estrictas, límites deducidos de trabajo, etc. para la protección del hombre y de su medio ambiente. Dada la gran sensibilidad y especificidad con que pueden estudiarse los contaminantes radiactivos (en concentraciones mucho menores que las que permite determinar el análisis químico clásico), se ha obtenido un gran cúmulo de datos, no solamente sobre el comportamiento de los contaminantes radiactivos sino sobre el comportamiento de los vestigios contaminantes no radiactivos. En esta perspectiva, puede decirse que este campo de la "radioecología", con sus normas anejas de protección radiológica, constituye en sí mismo una importante contribución a la solución de los problemas de protección de la salud humana y de la calidad del medio ambiente, tanto frente a los contaminantes no radiactivos como radiactivos.

Análisis por radioactivación

Uno de los resultados del desarrollo de la industria de la energía atómica es la proliferación de las fuentes de neutrones, partículas aceleradas y radiaciones, y su accesibilidad para los científicos de muchos países. Muchos elementos pueden determinarse fácilmente con gran sensibilidad irradiándolos con dichas fuentes. Esto provoca su excitación (por ejemplo, en el caso del análisis por fluorescencia de rayos X y gamma) o la formación de un isótopo radiactivo que puede detectarse y con frecuencia determinarse cuantitativamente. De estas técnicas, el análisis por activación neutrónica es la más importante y de más difundido uso. Tales técnicas analíticas de activación por partículas y fotones ocupan ahora un lugar bien ganado en la metodología del análisis de gran número de elementos. En efecto, es posible detectar elementos potencialmente tóxicos, tales como el manganeso, vanadio, bismuto, cobre, cadmio, arsénico, mercurio o cinc, en concentraciones de tan sólo una parte por diez mil millones. Algunos laboratorios adelantados, con acceso a reactores nucleares con intensos flujos neutrónicos, han perfeccionado el análisis por activación neutrónica dándole un grado elevado de automatización y lo aplican corrientemente a los alimentos y a los medios ambientales.

Substratos y reactivos radiomarcados

En este campo, y en el contexto del medio ambiente, las posibilidades parecen ser especialmente interesantes. También en este terreno las aplicaciones parecen haberse retrasado con respecto a las de la medicina nuclear. He aquí algunos breves ejemplos:

Un efecto perjudicial secundario de ciertos contaminantes del medio ambiente en forma de vestigios es su acción sobre el material genético de las células vivas, habiendo pruebas convenientes de que esta acción explica las propiedades carcinógenas de algunos productos químicos. Durante su evolución, las células han creado mecanismos de defensa para eliminar las partes dañadas de su material genético. Estos mecanismos se conocen como



Figura 3: Tranquilidad en la superficie pero debajo agonizan los peces. Las técnicas de sustratos marcados pueden indicar modificaciones críticas en los niveles microbiológicos fundamentales de las cadenas alimentarias acuáticas.

mecanismos de reparación ADN (ácido desoxirribonucleico, el componente químico del núcleo celular, que controla el crecimiento y la reproducción). Los productos químicos que inhiben los mecanismos de reparación ADN se califican como cocarcinógenos. Ahora es posible detectar los inhibidores potenciales de los mecanismos de reparación ADN estudiando sus efectos sobre la incorporación de timidina radiactiva (un precursor del ADN) de preparados de ADN celular en laboratorio. Estas técnicas representan un gran adelanto en la vital búsqueda de las propiedades mutagénicas de los carcinógenos y cocarcinógenos potenciales.

Muchos contaminantes ambientales y sustancias tóxicas nocivos dañan el organismo animal o vegetal viviente por inhibición de enzimas vitales (catalizadores biológicos). La inhibición de una enzima se manifiesta invariablemente como una reducción de su capacidad para transformar su "sustrato" químico normal. Afortunadamente, la inhibición de algunas enzimas puede apreciarse claramente para concentraciones de contaminantes muy inferiores a las que causan los síntomas de intoxicación. La sensibilidad de estas mediciones puede acrecentarse en muchos casos utilizando un sustrato radiactivo para medir la actividad de la enzima. Así es posible detectar la exposición humana a ciertos venenos insecticidas bastante antes de que se manifiesten eventuales efectos significativos para la salud. Se han elaborado y utilizado técnicas de empleo de acetilcolina marcada con carbono-14 como sustrato indicador de la actividad de la colinesterasa de muestras de sangre humana obtenidas mediante punción en el dedo, a fin de detectar la exposición de animales domésticos y salvajes a los insecticidas que contienen carbamato y fósforo orgánico, que se están ensayando para la lucha contra la langosta. Se está elaborando también un método para detectar la exposición excesiva del ganado a los acaricidas que contienen carbonato o fósforo orgánico empleados en la lucha contra las garrapatas del ganado. Esta técnica radiométrica es probablemente la más sensible posible para detectar los efectos subclínicos de muchos residuos de insecticidas presentes en el medio ambiente.

Una aplicación importante de la técnica de los sustratos marcados es la de utilizar sustratos simples tales como un bicarbonato marcado con carbono-14 o un fosfato marcado con fósforo-32 como indicadores de la actividad de algas o de otros microorganismos en muestras de agua. La eutroficación de un lago, por ejemplo, depende, en este "nivel trófico primario", de la capacidad del fitoplancton para utilizar los componentes minerales en su producción y crecimiento fotosintéticos. Esta utilización es estimulada por el aumento de la concentración del nitrógeno y el fósforo, resultante de la contaminación y puede iniciar efectivamente el ciclo de sucesos biológicos que desemboca en la eutroficación y la reducción de poblaciones útiles de peces. (Véase la figura 3). Estas técnicas se han estudiado ampliamente y un Grupo Asesor Mixto FAO/OIEA ha recomendado su explotación coordinada como un indicador de alteraciones perjudiciales de lagos, embalses, etc.

En la técnica de la "masa biológica marcada" los productos metabólicos intermedios de los tejidos de una planta o animal vivientes pueden marcarse incorporando al organismo un precursor radiactivo adecuado. Los productos intermedios de la "masa biológica marcada" resultante pueden disociarse fácilmente (por ejemplo, por cromatografía) y determinarse en muestras muy reducidas de tejido, lo que permite estudiar los efectos de la contaminación o de los venenos ambientales sobre los cauces metabólicos. Esta aplicación se está utilizando para estudiar los efectos del bióxido de azufre atmosférico sobre plantas sensibles. El autor elaboró originalmente esta técnica para estudiar los efectos de los venenos en los insectos vivos y pudo detectar efectos en fracciones de tejido equivalentes a una centésima parte del cerebro de una mosca común.

Radioinmunoanálisis de residuos químicos

La presencia de una proteína extraña (antígeno) en los tejidos de un animal vivo puede estimular la producción defensiva de una proteína específica, llamada anticuerpo. El suero sanguíneo que contiene dicho anticuerpo mucho tiempo después del estímulo original tiene la propiedad de poder combinarse sea *in vivo* o *in vitro* con el antígeno. En realidad, esta es la base bioquímica de la inmunización por vacunación.

Si el antígeno se combina químicamente con un vestigio contaminante (por ejemplo, del insecticida parathion) se puede producir un anticuerpo que es efectivamente específico para el insecticida. Así pues, si el "antisuero" obtenido de un animal especialmente tratado es incubado con una concentración conocida del contaminante radiactivo, pero con una concentración desconocida del mismo contaminante, el complejo anticuerpo-insecticida producido puede aislarse y medirse la proporción de insecticida marcado obtenida de esta forma. Esta proporción dependerá de la concentración desconocida del residuo químico competidor no marcado, brindando así un método muy específico de análisis. Esta técnica de "radioinmunoanálisis" para los residuos químicos es verosímil que proporcione también información sobre los efectos secundarios de los vestigios contaminantes, referentes en particular a las reacciones de inmunorrespuesta tales como las alergias. Existe también la posibilidad de que dichas reacciones desempeñen en papel en el grave problema de la resistencia de las plagas a ciertos plaguicidas, cuyos mecanismos permanecen desconocidos en muchos casos.

Razones isotópicas ambientales

La determinación exacta de las razones entre los isótopos estables y/o radiactivos de los contaminantes ambientales puede facilitar algunas veces información sobre los niveles de contaminación y sobre la localización y naturaleza de la fuente. Por ejemplo, la determinación de las razones de criptón-85 y tritio en el medio ambiente constituye un indicador cuantitativo de fisión nuclear y ensayos nucleares atmosféricos a escala mundial,

así como de su magnitud relativa. La determinación de las razones naturales de $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ en el nitrógeno del suelo promete ser un indicador de la cantidad de nitrógeno del suelo que puede haberse perdido por desnitrificación y no por filtración.

CONCLUSION

Sólo ha sido posible describir muy brevemente la situación actual y posibilidades que ofrecen las técnicas isotópicas como medio para la protección de la calidad de los alimentos y del medio ambiente, así como para la investigación en esta esfera. No obstante, estas aplicaciones, junto con las de la medicina nuclear, pueden, en último término, contribuir en mayor grado a la salud y bienestar del hombre que el desarrollo de la energía nucleoelectrónica.

NOTA

Las opiniones expresadas en este artículo son las del autor y no necesariamente las de los organismos mencionados de las Naciones Unidas.

Bibliografía

Publicaciones del OIEA y afines referentes al empleo de las técnicas isotópicas para la protección de la calidad de los alimentos y del medio ambiente, y las investigaciones conexas:

OIEA	Reference Methods for Marine Radioactivity Studies	Colección de Informes Técnicos Nº 118	OIEA, Viena, 1970 STI/DOC/10/118
OIEA	Nuclear Techniques in Environmental Pollution	Actas de un simposio, Salzburgo, 26 a 30 de octubre de 1970	OIEA, Viena, 1971 STI/PUB/268
OIEA	Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences	Actas de un simposio, Bled, 10 a 14 de abril de 1974	OIEA, Viena, 1972 STI/PUB/310
OIEA	Radioactive Contamination of the Marine Environment	Actas de un simposio, Seattle, 10 a 14 de julio de 1972	OIEA, Viena 1973 STI/PUB/313
OIEA	Laboratory Manual on the Use of Radiotracer Techniques in Industry and Environmental Pollution	Colección de Informes Técnicos Nº 161	OIEA, Viena, 1975 STI/DOC/10/161 ISBN 92-0-165075-2
FAO/OIEA	Nuclear Techniques for Studying Pesticide Residue Problems	Actas de un grupo de expertos, Viena, 16 a 20 de diciembre de 1968	OIEA, Viena, 1970 STI/PUB/252
FAO/OIEA	Nitrogen-15 in Soil-Plant Studies	Actas de una reunión para la coordinación de investigaciones, Sofía, 1 a 5 de diciembre de 1969	OIEA, Viena, 1971 STI/PUB/278
FAO/OIEA	Pesticides Residues and Radioactive Substances in Food: A Comparative Study of the Problems	Informe de un grupo de expertos, Viena, 12 a 16 de octubre de 1970	OIEA, Viena, 1972 IAEA-144
FAO/OIEA	Radiotracer Studies of Chemical Residues in Food and Agriculture	Actas de una reunión combinada de expertos y para la coordinación de investigaciones, Viena, 25 a 29 de octubre de 1971	OIEA, Viena, 1972 STI/PUB/332

FAO/OIEA	Isotope Tracer Studies of Chemical Residues in Food and the Agricultural Environment	Actas e informe de reuniones para la coordinación de investigaciones, Ispra, 30 de octubre a 10 de noviembre de 1972	OIEA, Viena, 1974 STI/PUB/363
FAO/OIEA	Effects of Agricultural Production on Nitrates in Food and Water with Particular Reference to Isotope Studies	Actas e informe de un grupo de expertos, Viena, 4 a 8 de junio de 1973	OIEA, Viena, 1974 STI/PUB/361
FAO/OIEA	Radiolabelled Substrates for Studying Biological Effects of Trace Contaminants	Informe de una reunión para la coordinación de investigaciones, Viena, 8 a 11 de octubre de 1974	OIEA, Viena, 1975 IAEA-170
FAO/OIEA	Isotope Ratios as Pollutant Source and Behaviour Indicators	Actas de un simposio, Viena, 18 a 22 de noviembre de 1974	OIEA, Viena, 1975 STI/PUB/382 ISBN 92-0-010375-8
FAO/OIEA/ OMS	Métodos de análisis radioquímico	Serie de Informes Técnicos de la OMS, 1959, 173	OIEA, Ginebra, 1966
FAO/OIEA/ OMS	Comparative Studies of Food and Environmental Contamination	Actas de un simposio, Otaniemi, 27 al 31 de agosto de 1973	OIEA, Viena, 1974 STI/PUB/348
FAO/OIEA/ OIT/OMS	Mercury Contamination in Man and his Environment	Colección de Informes Técnicos N° 137	OIEA, Viena, 1972 STI/DOC/10/137