

CONTAMINACION RADIOACTIVA DE LOS ALIMENTOS. SU IMPORTANCIA SANITARIA

Dr. SANTIAGO RIPOL GIRONA
(Barcelona)

1.ª Parte:

LA RADIOACTIVIDAD COMO AGENTE DE CONTAMINACION

Consideraciones generales

El estudio de la contaminación radioactiva del medio tiene su importancia muy definida, fundamentalmente por razones independientes de su peligrosidad en sí.

La contaminación radioactiva es esencialmente distinta de la que producen otros agentes químicos, puesto que su toxicidad está intrínsecamente ligada al átomo, partícula básica constituyente de un elemento de materia definida, y por tanto la toxicidad radioactiva obedece a leyes que por ahora están fuera del alcance del hombre.

El peligro radioactivo subsiste en tanto existe el isótopo activado, hasta que no haya decaído en un elemento inerte no radioactivo.

El factor de radiotoxicidad está íntimamente ligado con el período de

permanencia del elemento radioactivo en las estructuras orgánicas, el cual se denomina período biológico efectivo. Otra característica diferencial de la contaminación radioactiva es su carácter insidioso. El hombre no posee medios de referencia o sentidos que le adviertan de la presencia de la radioactividad y para detectarla se ve invariablemente obligado a recurrir a los aparatos de medida.

Esta sutilidad de la radioactividad se hace extensiva a su penetración en el organismo, ya que su incorporación a los alimentos, bebidas y objetos de consumo pasa totalmente inadvertida, y análogamente en lo que se refiere a su persistencia en el ser vivo.

Otro aspecto de la contaminación radioactiva que debe valorarse, aunque éste no difiere en mucho de otros factores contaminantes, es su persistencia en el medio ambiente.

La presencia continuada de un radioisótopo condiciona la posibilidad de un aporte reiterado y constante en sus valores de actividad. Por lo tanto, un factor decisivo para su acción biológica es su período biológico efectivo,

tanto o más que el período de semi-desintegración del isótopo.

Aparte de la contaminación natural inevitable representada por el continuo bombardeo de la atmósfera por radiaciones cósmicas y las radiaciones emitidas por los elementos radioactivos naturales, existen en la actualidad toda una serie de factores de contaminación radioactiva debidos a la actuación del hombre.

Son múltiples los campos en los que podemos estudiar el modo en que la radiación puede afectar al hombre de forma más o menos directa o indirecta. Entre éstos podemos recordar:

Biología y medicina de las radiaciones

Evaluación de los efectos somáticos y genéticos de la radioactividad en el hombre.

Producción de radionúclidos

Reactores y aceleradores industriales, reprocesado de subproductos, detonación de ingenios bélicos.

Aplicaciones pacíficas de la energía atómica

Producción de energía, aplicaciones industriales, biomédicas y agrícolas.

Meteorología

Transporte por el medio ambiente de radionúclidos naturales y artificiales.

Oceanografía

Transporte de radionúclidos por las aguas marinas.

Biología marina

Incorporación de radionúclidos en las fuentes de alimentación procedentes del mar.

Geología

Movimiento geofísico de los radionúclidos, depósito de residuos, radioactividad natural.

Radioecología

Dinámica de los radionúclidos a través de los ciclos alimenticios de los seres vivos.

Agronomía

Aplicaciones de la radioactividad en orden al mejoramiento o creación de nuevas especies vegetales o mejoramiento de cosechas, hibridación de especies, etc.

Producción animal

Contaminación radioactiva a través de los ciclos de alimentación.

Tecnología alimentaria

Dispersión o concentración de contaminantes a través de los procesos de manipulación.

Nutrición

Efectos de los hábitos dietéticos en relación con las posibilidades de contaminación.

La contaminación radioactiva susceptible de afectar al hombre proviene primariamente de tres fuentes principales:

1. Radioactividad natural.
2. Residuos radioactivos proyectados por los experimentos con fines bélicos.
3. Usos industriales y demás aplicaciones pacíficas de la energía atómica.

Vamos a centrar nuestro estudio en lo que concierne a la radioactividad creada por la actuación del hombre.

Aplicaciones bélicas

Cronológicamente la más antigua de todas es la debida a fines bélicos, y quizá de este principio poco edificante se deriva en buena parte también la repulsa que en el mundo despierta el uso de la energía atómica, y el recelo con que se observa todo lo que a ésta se refiere.

Los primeros artefactos bélicos nucleares están basados en la enorme cantidad de energía producida en la fisión de los núcleos de ^{235}U o ^{239}Pu al ser bombardeados con neutrones, produciéndose la conocida reacción en cadena.

Esta energía liberada produce una serie de efectos de tres tipos: mecá-

nicos, térmicos y radioactivos. No vamos a detenernos en los dos primeros, ni tampoco en la forma en que producen su energía los diversos modelos de bombas que sucesivamente se han ido ensayando.

En lo que respecta al problema que nos ocupa, la contaminación radioactiva, cabe considerar que sus efectos pueden subdividirse en dos categorías:

1. *Efectos de la radiación inicial*

Los primeros microsegundos de la fase inicial representan el tiempo necesario para que tenga lugar la reacción nuclear; casi el 70 % de la energía liberada aparece en ese período en forma de rayos X blandos, cerca del 3,5 % de la energía total de fisión aparecerá en forma de rayos gamma y otro 2 % lo vehiculan los neutrones de la fisión.

Las radiaciones que aparecen durante los segundos siguientes de la fase inicial proceden de los productos de fisión, que emiten partículas beta, rayos gamma y neutrones retrasados.

La absorción de los neutrones por los elementos del suelo puede producir una radioactividad inducida durante los primeros microsegundos.

Dado que la mayor parte de pruebas nucleares se han realizado en lugares desérticos o muy alejados, o bien en zonas subterráneas o submarinas, estos efectos de la radiación inicial revisten escasa importancia desde el punto de vista de la contaminación del medio.

2. *Efectos de la radiación residual o de desprendimiento*

Son éstos los que presentan el problema más serio desde nuestro enjuiciamiento.

La mayor parte de la radiación residual procede de los productos de fisión, del material fisionable no utilizado y de los materiales de activación.

En un principio se halla en estado gaseoso, y tras el progresivo enfriamiento que sigue a la expansión, los fragmentos de fisión y demás materiales radioactivos se transforman en partículas que son transportadas hacia las capas atmosféricas superiores y vuelven a caer muy lentamente sobre la tierra.

El desprendimiento está formado por las sustancias radioactivas precipitadas que aparecen como productos secundarios de la bomba, que se extienden por grandes superficies y descienden lentamente en forma diluida o menos activa.

El fenómeno del desprendimiento aparece mucho tiempo después de la explosión, dependiendo de las características de aquélla y de las condiciones atmosféricas.

El depósito lejano está constituido por las partículas radioactivas transportadas a través de la atmósfera, cubriendo extensiones de miles de kilómetros cuadrados.

Según el punto de origen la extensión de este depósito se hace no sólo en superficie sino en altura. Poco a poco el depósito tiende a reintegrarse también a la tierra y, con preferencia

en los cambios estacionales, llega a la troposfera donde las turbulencias climáticas lo proyectan en todas direcciones, permitiendo su depósito en el suelo.

Es en estas condiciones que los isótopos de vida más larga pueden llegar a ser contaminantes, manteniendo un grado permanente en el caso de que las experiencias nucleares continuasen indefinidamente. La actividad de estos radionúclidos va aminorándose con el paso del tiempo, de acuerdo con su decaimiento físico.

De todos los radionúclidos que se producen en la explosión los que realmente merecen nuestro interés son los que por sus propiedades químicas poseen semejanza con los elementos que normalmente entran en el ciclo de mantenimiento de los seres vivos, pues su presencia en el medio ambiente permite que el hombre los incorpore fácilmente a su economía, bien por inhalación o ingesta, así como le expone a los efectos de la irradiación externa.

La peligrasidad de estos radionúclidos está también en función del tipo de radiación emitido; así, los emisores alfa de poca energía no tienen gran importancia si no penetran en los tejidos vivos, fundamentalmente los huesos; los emisores beta si son de energía elevada presentan peligro por irradiación externa, y finalmente los emisores gamma son los responsables de las zonas de niveles de irradiación externa que pueden alcanzar a largas distancias.

De todos los radioisótopos de esta procedencia, merecen atención primor-

dial como factores efectivos de contaminación el ^{131}I , el ^{90}Sr y el ^{137}Cs .

De estos tres, el ^{131}I es el menos importante ya que su período de semidesintegración es de 8 días. En cambio los otros dos isótopos plantean problemas más serios, puesto que su período de semidesintegración se halla próximo a los 30 años, y ambos son susceptibles de incorporarse al ciclo vital del hombre a través de las materias alimenticias. Sobre este tema volveremos más adelante al referirnos a los problemas concretos de la contaminación de los alimentos.

En resumen, podemos considerar que la fuente principal de radioactividad presente en la biosfera procede de los ensayos nucleares con fines militares, siendo las épocas más significativas en cuanto a índices de presencia de radioisótopos, las comprendidas entre los años 1953 a 1958 y de 1961 a 1963.

Aplicaciones pacíficas

Otro grupo no desdeñable de posibles agentes contaminantes está constituido por el conjunto de actividades industriales encaminadas al desarrollo y mantenimiento de la obtención de potencia (calor y electricidad) a partir de la energía liberada por el átomo.

En principio, a partir de los estudios de protección y detección de las radiaciones en los usos industriales, cabe suponer que los índices de contaminación debidos a éstos sean mucho menores que los debidos al apartado anterior, mucho más incontrolables,

sin embargo, la proliferación de usos pacíficos de la energía atómica a escala mundial y en múltiples niveles, hace que deba prestarse la debida atención a esta posibilidad en las últimas décadas.

Desde la mina en que se extrae el mineral de uranio hasta el depósito final de los residuos radioactivos se recorre un largo camino, en continuo grado de complicación y perfeccionamiento, que sólo podemos esbozar aquí muy esquemáticamente.

El uranio en estado natural se halla constituido por la mezcla de sus tres isótopos ^{238}U , ^{234}U y ^{235}U , y previamente es necesario concentrarlo desde los diversos minerales de procedencia y elaborarlo para convertirlo en uranio metálico.

A fin de incrementar su rendimiento es preciso enriquecerlo, es decir, incrementar su contenido en ^{235}U (que normalmente sólo es de un 0,7 %) ya que es éste el isótopo interesante desde el punto de vista energético.

Una vez enriquecido se prepara en la fábrica de elementos combustibles de forma que pueda ser utilizado en los reactores. Esencialmente un reactor es un sistema destinado a producir neutrones y como subproductos del proceso, isótopos radioactivos y calor. El uso industrial de los reactores nucleares se deriva del aprovechamiento del calor.

El contenido de isótopos radioactivos resultantes del proceso es variable y depende de variados parámetros, tales como el tiempo, el enriquecimiento del uranio, el grado de aprovecha-

miento de la reacción, etc., de acuerdo con los cuales se puede calcular con una cierta aproximación.

Transcurrido un tiempo, los elementos combustibles se extraen para recuperar el uranio todavía no fisionado y los isótopos de vital importancia en el ciclo energético.

Otros isótopos se recuperan para su utilización en la industria o en medicina.

Finalmente el elemento combustible irradiado es sometido a un proceso químico de reelaboración, debiendo mantenerse en lugares bien protegidos durante algún tiempo por los altos niveles de radiación que crea. Los isótopos de vida corta decaen muchas veces antes de llegar al reprocesado, pero los de vida larga, si no se aprovechan, presentan el problema fundamental de los residuos radioactivos.

A lo largo de todo este complicado proceso que hemos intentado resumir en muy pocas palabras, existen diversas ocasiones en que la contaminación radioactiva es un hecho o, por lo menos, es posible.

Gracias a que todo el proceso nuclear puede ser calculado minuciosamente, todo el complejo de instalaciones de investigación básica que prepararon el terreno al desarrollo industrial de la energía atómica, así como en la actualidad las propias industrias, se han ocupado de valorar exactamente todos los riesgos previsibles y las posibilidades de seguridad y protección contra los mismos.

En esos estudios preliminares figura el del llamado «accidente máximo pre-

visible», es decir, el cálculo de las dosis medidas a distintas distancias en el caso de confluir al mismo tiempo todas las circunstancias desfavorables que puedan preverse.

Las posibilidades de contaminación radioactiva en todo el ciclo industrial dependen del paso de radioisótopos al medio ambiente en cualquiera de los tres estados:

- Sólido en forma de polvos o partículas que se producen en las minas, fábricas de material radioactivo y de elaboración de elementos combustibles.
- Líquido en los residuos de los reactores y fábricas de reprocesamiento.
- Gaseoso en casi todos los casos y muy especialmente en los reactores y fábricas de reelaboración de combustibles.

Para la localización de los primitivos reactores se escogían lugares desérticos, pero en la actualidad la proximidad a los núcleos de población es cada vez más frecuente, siendo éste el aspecto que requerirá una planificación más cuidadosa en el futuro.

Todas estas emisiones son perfectamente conocidas, valoradas y controladas. El problema se centra en determinar si la proliferación de estas industrias traerá consigo un aumento en la exposición del público no profesional.

Aparte de ello siempre cabe la posibilidad, aunque sea remota, de un

accidente imprevisible. Por el momento se han producido con relativa frecuencia escapes líquidos o gaseosos, pero sus consecuencias han sido bien controladas por los sistemas de seguridad.

Los tres isótopos que fundamentalmente pueden contaminar el medio ambiente son el tritio, los gases nobles (sobre todo el kriptón) y el ^{129}I . El tritio y el yodo entran en el ciclo vital del hombre incorporándose a los alimentos o al agua, en tanto que el kriptón sólo preocupa por las posibilidades de inhalación.

Las perspectivas de futuro de los reactores de fusión, en la actualidad todavía en fase experimental, son mucho mejores en cuanto al problema de la contaminación radioactiva del ambiente, sin embargo sus voluminosos residuos crearán otro no menos grave por la activación neutrónica de los componentes de los sistemas de contención.

Uno de los problemas más serios de la industria nuclear es la eliminación de los residuos considerados ya irrecuperables, es decir, no aprovechables para nuevas operaciones.

Aquí el riesgo es patente, pues los residuos líquidos se vierten a los ríos y al mar, y los sólidos almacenados son potenciales focos de contaminación.

Todo ello, unido al volumen cada vez creciente de residuos a almacenar, plantea un problema para el que se aportan muchas posibles soluciones sin que ninguna pueda calificarse de satisfactoria, por lo que se requiere todavía un estudio arduo y costoso.

En lo que concierne a los residuos vertidos al mar o los que accidentalmente pudieran alcanzarlo, no puede asegurarse que la contaminación de los fondos marinos no aflore a la superficie por los movimientos de masas de agua y difusión de sustancias en suspensión. Por otra parte, la captación de los radionúclidos por diversos organismos marinos vegetales o animales (plancton, algas, moluscos, etc.) aún no está perfectamente estudiada, pero indudablemente influiría en la contaminación de los animales y del hombre.

Recientemente se ha propuesto una solución audaz para la eliminación de los residuos radioactivos, consistente en su almacenaje aprovechando las fallas geológicas del terreno. Esta posibilidad se halla todavía en estudio, pudiendo aducirse numerosos argumentos a favor y en contra.

Otros usos de los isótopos radioactivos

Las variadas aplicaciones de los radioisótopos (investigación, biología, industria, aeronáutica, medicina, traza-dores, esterilización de productos, etc.) ofrecen múltiples posibilidades de contaminación de muy diverso valor.

En general son las fuentes abiertas las más problemáticas, aunque también puede producirse la rotura accidental de la protección de una fuente encapsulada.

Aunque generalmente se emplean los isótopos menos peligrosos, en caso de accidentes, roturas u otras causas,

siempre pueden desprenderse partículas contaminadas.

En lo que concierne a algunas pinturas luminosas y las agujas de uso terapéutico que emplean ^{226}Ra , es posible la difusión de emanaciones no despreciables de radon.

La mejor protección contra la contaminación debida a las aplicaciones de radioisótopos estriba en que éstas se hallen siempre en manos de personas debidamente capacitadas y responsables.

Materiales exentos

Finalmente queda un grupo que podemos denominar de materiales exentos, ya que no están codificados en las reglamentaciones vigentes por considerarse ínfima su aportación de radioisótopos.

Tales son, por ejemplo, esferas luminosas de relojes, botones de timbre, detectores de humos y de incendios, paneles de señalización, indicadores luminosos diversos, objetos de cerámica y de cristal, cheques bancarios, tubos electrónicos, cuadrantes de teléfono público, pinceles antiestáticos, lentillas ópticas y muchos otros.

El riesgo debido a la actividad específica del contenido radioactivo de estos elementos es casi despreciable en sí mismo, pero el hecho de formar parte de objetos de uso muy común, que incluso ocupan lugares preferentes en el propio hogar, crean un peligro cierto de contaminación, aunque desde luego no sea exagerado.

2.ª Parte:

LA CONTAMINACION DE LOS ALIMENTOS Y DE LAS AGUAS

Introducción

La gran diseminación de radionúclidos de procedencias diversas en el momento actual ha llamado necesariamente la atención sobre las posibles consecuencias de ésta sobre los alimentos y el agua que son consumidos por la población.

Puesto que los alimentos son un camino directo por el que la contaminación radioactiva puede afectar al hombre es importante considerar algunos de los aspectos determinantes de la aparición de radioelementos en los ciclos alimenticios de los seres vivos.

En la investigación de la importancia potencial de los radionúclidos como agentes agresores por vía de los hábitos dietéticos, deben considerarse primordialmente algunas áreas específicas:

Consideración de sectores especiales, tales como fetos, niños, enfermos y ancianos.

Estudio de las causas de las valoraciones en la exposición radioactiva a través de los alimentos y bebidas y el movimiento de radionúclidos en los ecosistemas. Este estudio debe abarcar la meteorología, tecnología alimentaria y características socioeconómicas de la población.

Puesta a punto de medidas prácticas y económicas con particular atención hacia los procesos de manipula-

ción y tratamiento de los productos alimenticios.

Creación y desarrollo de controles radiológicos adecuados.

Desarrollo de técnicas en orden a reducir o eliminar los riesgos contaminantes derivados de los usos pacíficos de la energía atómica.

Es muy importante hoy día estudiar más detenidamente la valoración de los índices de permisividad radioactiva en lo que concierne a los alimentos, ya que de ésta se deriva la incorporación de radionúclidos al metabolismo humano, y conviene conocer con la máxima exactitud sus repercusiones en el ciclo vital.

Según expusimos en la primera parte, la fuente principal de radioactividad en la biosfera puede considerarse procedente de los ensayos nucleares con fines bélicos. Otras fuentes de contaminación de la biosfera son los subproductos gaseosos, líquidos o sólidos elaborados en los reactores y plantas de reprocesado, y en los usos industriales, médicos y científicos de los materiales radioactivos.

Esta última fuente de contaminación es usualmente pequeña y bien controlada, sin embargo no debe descartarse a priori que no pueda crear algún riesgo para la población en general a través de determinadas vías específicas de alimentación.

Desde este punto de vista revisten interés aquellos radionúclidos con una vida media relativamente prolongada y que sean susceptibles de incorporarse de algún modo al metabolismo alimentario.

En esta categoría podemos considerar fundamentalmente los siguientes radionúclidos: ^3H , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{137}Cs , y algunos productos activados por bombardeo neutrónico a partir del cinc, hierro, manganeso y cobalto.

Estos radionúclidos de activación, bajo circunstancias especiales, pueden revestir un interés particular en los ciclos alimenticios de la biología marina.

Yodo

El radioyodo es un importante subproducto de fisión obtenido en los reactores de potencia y en las plantas de reprocesamiento químico. Es volátil.

Los isótopos radioactivos del yodo pueden incorporarse al metabolismo biológico juntamente con el isótopo estable, y al igual que éste, se concentran en el tiroides.

El yodo puede ser absorbido a través de la piel y de la superficie de las mucosas, y esencialmente se absorbe todo el que es ingerido.

La tasa de radioyodo en el tiroides es íntimamente dependiente de la total de yodo estable. Alrededor de un 10 a 40 % de la dosis de ^{131}I que es absorbida se concentra en el tiroides de un individuo normal que incorpore metabólicamente de 100 a 200 microg. de yodo al día.

Lógicamente, según acabamos de indicar, el órgano crítico considerado en relación a la exposición al radioyodo es el tiroides.

La mayor parte del radioyodo en el

hombre es excretado a través de la orina, siendo su vida media biológica de dos a cuatro meses. La vida media efectiva del ^{131}I en el tiroides es de 6 a 7,6 días.

Se conocen 24 isótopos del yodo, de los cuales son productos de fisión los de masas atómicas 129 y 131 hasta 140. De éstos, solamente los de masas 129 y 131 hasta 135 tienen interés desde nuestro punto de vista ya que las vidas medias ínfimas de los demás no ofrecen ninguna posibilidad de llegar a los ciclos alimenticios de los seres vivos.

Además, el ^{129}I por su baja energía y su baja actividad específica puede considerarse de influencia despreciable en cuanto a la exposición total del hombre.

En cuanto a los demás isótopos, su contribución a la exposición humana depende de una serie compleja de condicionamientos tales como sus precursores, vidas medias, tiempo y modo de exposición.

Los isótopos con vidas medias de menos de un día tampoco pueden tener una influencia notoria en la contaminación de los alimentos.

Queda únicamente el ^{131}I , con una vida media de algo más de ocho días, y es importante para nosotros por fijarse en la vegetación con lo que puede incorporarse al metabolismo humano a través de los animales herbívoros.

El radioyodo aparece primariamente en forma de aerosol, con un porcentaje variable de gotículas y gas. Reacciona con varias sustancias, incluso ya en la atmósfera, y es susceptible de oxidarse

o reducirse. Una pequeña parte del radioyodo gaseoso puede aparecer en forma elemental o como HI. Del que aparece en finas partículas, menos de dos tercios se halla en forma reducida, un tercio en forma de yodato y menos del 5 % como peryodato. Los derivados alquílicos y formas inorgánicas se hallan en proporciones ínfimas.

La retención de radioyodo por las plantas puede variar desde un 6 hasta un 100 % del total de radionúclido depositado en campo abierto, medido por metro cuadrado de superficie ocupada por la vegetación.

Los índices más altos corresponden a la vegetación densa cubierta con radioyodo en forma de vapor inorgánico o pequeñísimas partículas.

Del yodo depositado sobre las hojas de las plantas, es absorbido por éstas del 10 al 40 %, dependiendo de la forma de presentarse el isótopo. La contaminación externa está sujeta a los agentes atmosféricos (viento, lluvia, luz, etc.).

A través de la dieta de los animales herbívoros, y concretamente la vaca, resulta ser la leche la principal fuente de contaminación con radioyodo, especialmente la alimentación infantil.

En las zonas en que el consumo de leche es bajo, la mayor fuente de radioyodo se halla en el consumo de frutas y legumbres, muy particularmente en las hortalizas con hojas.

En diversos países se han realizado estudios estadísticos de los índices de ^{131}I , dando una serie de relaciones variables entre éstos, referidos a las etapas fundamentales de la asimilación

metabólica del radioyodo, o sea, el pasto fresco, las hortalizas, el tiroides del ganado vacuno, la leche y finalmente el tiroides humano.

De todo ello se han deducido una serie de cálculos sobre la asimilación del radioelemento.

La concentración en ^{131}I en la leche es usualmente de alrededor de la décima parte de la del pasto que la vaca consume.

Una dosis única de radioyodo de 1.000 pCi/g del tejido tiroideo dará una dosis integral total de 120 mrads.

Una ingestión de 80 pCi por día durante un año dará una dosis de 500 mrads en la glándula tiroidea de un niño (2 g).

Para causar daños en la estructura del tiroides normal se calcula que es necesaria una dosis de varios millones de mrads.

Se ha descrito un incremento de los adenomas de tiroides en relación con la irradiación de ^{131}I en el orden de varios cientos de miles de mrads.

Se han estudiado varios métodos de cálculo para prever la ingestión total de radioelemento a partir de la leche de vacas que han consumido pastos irradiados, y se considera a este efecto el factor dado por la relación entre el total de radioyodo ingerido y la concentración de éste en la leche.

Estroncio

El ^{90}Sr en los sistemas biológicos sigue los mismos caminos que el es-

troncio estable presente normalmente en aquéllos.

El comportamiento de los isótopos del estroncio está determinado por el calcio presente y por los factores que afectan la interrelación entre el metabolismo del calcio y el estroncio.

Por esta razón frecuentemente se refiere la concentración de estroncio a la del calcio, basándose en el hecho que los índices de calcio en varios tejidos importantes y secreciones es razonablemente constante de acuerdo con la ingesta diaria.

La concentración de ^{90}Sr en los vegetales comestibles es difícil de evaluar debido a las variaciones en las tasas de contaminación, influencia de la fertilidad del terreno, precipitación, y las alteraciones introducidas por la preparación y elaboración de estos alimentos antes de ser consumidos.

Por ejemplo, el contenido en radioestroncio puede ser reducido entre un 19 y un 55 % por efecto de la simple conservación y preparación de los alimentos en el hogar.

Se ha comprobado que el contenido de ^{90}Sr en el trigo y sus derivados depende del grado de refinamiento y tipo de elaboración del producto que se consume.

En estudios realizados en los Estados Unidos en 1968 se calcularon índices de 12 pCi/Kg para las hortalizas frescas, 10 pCi/Kg para las patatas, 4 pCi/Kg para las judías secas, 5 pCi/Kg para las zanahorias, nabos y similares.

Por esas mismas fechas y lugares las concentraciones en la carne, huevos y

pescado eran, respectivamente, de 6,3, 6,0 y 0,5 pCi/g de calcio (ya hemos indicado anteriormente que con frecuencia se recurre a su relación con el calcio para el cálculo de índices significativos).

Para el trigo el contenido en radioestroncio se evaluó en 35 pCi/g de calcio o de alrededor de 7 pCi/Kg.

La leche y los productos lácteos en general proveen la mayor proporción de ^{90}Sr en la dieta. Las frutas y legumbres contribuyen en menor medida, seguidas por el trigo y sus derivados. La carne y el pescado contribuyen sólo en una ínfima parte al aumento de la concentración del radioestroncio.

Hay que notar, sin embargo, que pese a la relación entre las concentraciones relativas de estroncio y calcio, si bien los productos lácteos representan el 58 % de la aportación de calcio a la dieta humana, su contenido en radioestroncio representa una aportación mucho menos significativa.

En una experiencia tendente a reducir la concentración metabólica de ^{90}Sr se suprimió la leche de la dieta, sustituyendo su aporte en calcio por otras hortalizas y legumbres; sin embargo los índices de radioestroncio no disminuyeron, sino incluso aumentaron ligeramente.

El agua potable contiene una concentración de radioestroncio superior a la mayor parte de los alimentos sólidos, mostrando además una tendencia a mostrarse constante con el paso del tiempo.

En el hombre se calcula una dosis

de 1 microrad/día absorbido en el bazo en relación con una ingesta de 1 pCi de ^{90}Sr . No pueden darse cifras absolutamente exactas porque la absorción de radioestroncio en las células críticas está influenciada por muy diversos factores.

Según evaluaciones efectuadas en la ciudad de New York en 1968, un niño consumiendo un litro de leche diario, aproximadamente 1 g de Ca (10 pCi/día de ^{90}Sr) podía recibir unos 10 microrads/día de exposición en las células del bazo.

El ^{89}Sr es también un importante producto de la fisión nuclear que se produce en mayor escala que el ^{90}Sr , sin embargo su vida media de 51 días (en comparación con la de 28 años del otro isótopo) hace que revista menor importancia como factor de contaminación alimenticia.

Con todo, en el período de ensayos bélicos nucleares de 1961 a 1963 se midieron concentraciones significativas de ^{89}Sr en la leche del orden de 100 pCi/l, que decrecieron rápidamente en 1964 hasta hacerse insignificantes. En contraste, se midieron concentraciones menores de ^{90}Sr que con posterioridad no mostraron la misma tendencia a decrecer.

Cesio

Las medidas del ^{137}Cs se obtienen a partir de los análisis realizados para el ^{90}Sr , ya que es relativamente fácil detectar la emisión gamma del cesio.

Desde 1961 la leche viene a ser la

fuelle del 25 al 40 % de la ingestión alimenticia de radiocesio; las carnes proveen del 12 al 26 %; los cereales del 17 al 30 % y las frutas y legumbres aproximadamente un 15 % cada uno.

Los más altos índices en los granos pueden ser debidos al tiempo de almacenamiento antes de su utilización alimenticia.

Parte de las variaciones en la concentración de radiocesio en la leche es debida a las diferencias regionales en las deposiciones radioactivas acumuladas, extremo que afecta también en general a las tasas de concentración en cualquier otro alimento.

En las mediciones efectuadas en la región de Chicago en 1971 se halló una baja muy sensible de los índices calculados en 1968 para aquella misma región, incluso en el pescado de río que había llegado a registrar índices de 1.000 pCi/Kg.

En Alaska, en cambio, los índices de radiocesio ingeridos por la población son sensiblemente altos y constantes, debido al régimen de carne de caribú, animal que se alimenta de líquenes de la tundra, muy ricos generalmente en contenido radioactivo.

Hierro

El isótopo ^{55}Fe es producido en las detonaciones nucleares por bombardeo del ^{54}Fe con neutrones de baja energía, así como también a partir del isótopo estable ^{56}Fe .

El ^{55}Fe es considerado relativamente

de menor importancia en lo que concierne a la contaminación por los reactores industriales ya que en éstos se produce en cantidades poco significativas.

Es asimilado metabólicamente por los seres vivos siguiendo el ciclo del hierro estable.

Se han identificado dos caminos para la asimilación del hierro radioactivo.

Uno de ellos es el que ya hemos mencionado refiriéndonos a otros radioelementos por medio de la carne de reno, a partir de los líquenes que constituyen el principal alimento de estos animales. Este factor de contaminación afecta por lo tanto casi únicamente a las poblaciones de Alaska y las áreas más septentrionales del Canadá, Finlandia y la Unión Soviética.

La segunda vía de asimilación de hierro radioactivo es a través de los peces marinos. Los ciclos alimenticios de la fauna marina concentran el radiohierro en un grado notablemente superior al de los animales terrestres; por ejemplo, el salmón y el atún muestran índices 20 ó 30 veces mayores que la carne de reno antes mencionada.

Las relativamente altas tasas de radiohierro en las especies marinas reflejan por contraste las bajas concentraciones de hierro estable en el agua del mar. Además, los peces tienden a ser deficientes en hierro en relación a los animales terrestres. En cambio, en la superficie terrestre las concentraciones de radioisótopo tienden a diluirse en el mayor contenido en hierro estable.

En opinión de los investigadores, el

eritrocito es el órgano crítico para la fijación de ^{55}Fe en el metabolismo humano.

Una dosis absorbida de 61 nCi corresponde a una dosis anual de 1,4 mrad en los eritrocitos.

A causa de la alta concentración de hierro en las proteínas estructurales del tipo de la ferritina y la hemosiderina, se ha hecho notar que son susceptibles de captar dosis relativamente elevadas de radioisótopo.

Con todo, en los estudios realizados en los Estados Unidos con valoración de los diversos índices significativos, se pone de manifiesto las notables diferencias observables en la relación entre los pueblos nórdicos y las otras áreas de población.

Rutenio

El isótopo ^{106}Ru fue observado en el mar de Irlanda como un residuo líquido procedente de las plantas de reprocesado de Windscale, en Gales.

La asimilación de este isótopo está en relación con una dieta alimenticia local. El ^{106}Ru se fija en un organismo marino del género *Porphyra*, material que es recogido para la manufactura de un alimento denominado «laverbread».

En este caso es interesante notar que en tanto la concentración de radioisótopo en la *Porphyra* es de 87 pCi/g, en los peces de la zona es sólo de 2 pCi/g, lo que da idea de la selectividad de aquel organismo.

El órgano crítico para este radioele-

mento se sitúa en el intestino grueso.

Se han efectuado determinaciones en la población, tanto adultos como niños, relacionando los índices observados de diversos subproductos radioactivos procedentes de las plantas de reprocesado y la distribución de los organismos del tipo *Porphyra* y las manufacturas de «laverbread».

La población del sur de Gales, por su situación geográfica, edad y hábitos alimenticios, está más expuesta a altas dosis de rutenio radioactivo procedente de las plantas de Windscale que los demás sectores de la población.

Radionúclidos en los ciclos de alimentación marinos

La dosis de radiación librada a la población a través de los alimentos de origen marino viene determinada en gran medida por la concentración y tipos de radioactividad en esos alimentos, la cual depende a su vez de las concentraciones de radionúclidos en el agua y la productividad del sistema, los hábitos dietéticos de la población y las vías de asimilación metabólica de cada radioelemento en cuestión.

Para comprender el primero y más variable de estos factores se precisan datos sobre la descarga de los diversos radionúclidos en las aguas, la extensión y mecanismos de su concentración en los organismos acuáticos y el transporte de radioisótopos a través de las variadas tasas tróficas y ciclos alimenticios marinos.

Para algunos radionúclidos en particular es preciso además conocer las vías de asimilación del elemento en su forma estable en el metabolismo humano.

Los avances de la tecnología deben hacer posible la retención de gran parte de la radioactividad que es vertida en los alrededores acuáticos de los reactores nucleares.

Los más modernos constituyen ciclos cerrados en lo que concierne a la circulación de agua, pero los primeros reactores se nutrían de agua corriente. En ese caso varios de los radionúclidos producidos eran incorporados fácilmente al ecosistema marino, bien directamente, bien a través de los ríos.

Una vez incorporados al sistema, estos radioelementos circulan por el mismo a través del agua, sedimentos, plantas marinas y animales. La concentración radioactiva en las aguas puede variar por el decaimiento propio de cada isótopo, por dilución, por fijación estable a materiales sedimentados, etc.

Nuestra continua dependencia del medio acuático para la alimentación, bien sea directamente a través de los peces, moluscos, crustáceos, algas, o indirectamente por el uso de materiales marinos como fertilizantes o pienso para animales domésticos, provee de vías de incorporación de los radionúclidos presentes en las aguas en el metabolismo humano.

Estas cadenas alimenticias acuáticas merecen especial consideración, además, porque representan una importante reserva de proteínas en el fu-

turo para la alimentación de hombres y animales, y porque algunos organismos marinos son capaces de fijar determinados radionúclidos en concentraciones relativamente elevadas.

Los elementos radioactivos pueden incorporarse también a los productos agrícolas a través del regadío con aguas procedentes de ríos contaminados.

La concentración de un radionúclido dado en particulares especies es ampliamente variable porque depende de factores biológicos y ambientales muy diversos.

Entre éstos se cuentan la concentración del correspondiente elemento estable, concentración de iones, estado físico y químico del radioelemento en la disolución, naturaleza de la asimilación metabólica del elemento en el organismo, temperatura, acidez, salinidad y grado de iluminación del medio acuoso, presencia de agentes enlazantes en el sistema, dilución del radioisótopo, decay, y probablemente muchos factores más.

La capacidad de los organismos acuáticos para fijar radioelementos se suele medir en factores de concentración, y se han hecho diversos estudios tendentes a evaluar estos factores para un número de radionúclidos en ecosistemas particulares.

Además, para el cálculo de las dosis de radiación en el hombre es preciso considerar la relativa importancia de los diferentes organismos marinos susceptibles de contaminación en la dieta alimenticia humana.

En 1966 los investigadores CHIPMAN y POLIKARPOV efectuaron un de-

tenido estudio sobre los factores de concentración en las aguas marinas y terrestres y de los organismos animales y vegetales que en ellas se encuentran, referidos a los principales radioelementos contaminantes procedentes de la industria nuclear, tales como ^{137}Cs , ^{64}Cu , ^{90}Sr , ^{65}Zn , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{99}Mo , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{54}Mn , ^{131}I , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{103}Ru y ^{106}Ru .

Para determinados radioelementos dispersos en un ecosistema acuático existen algunos organismos que actúan como verdaderos concentradores biológicos.

La identificación y cuantificación de las vías de incorporación metabólica de los distintos radionúclidos puede darnos una orientación efectiva en cuanto a las medidas protectoras ante su posible asimilación por el organismo humano.

En la vecindad de los reactores nucleares se requiere una estricta vigilancia ambiental y un control de los distintos factores de concentración de radioelementos en las aguas residuales.

No debemos olvidar también que tanto como los factores de concentración radioactiva influyen los hábitos de vida de la población y las dietas habituales en las áreas presuntamente contaminables.

Radioisótopos especiales

Entre los radioisótopos especiales que se encuentran tanto en la natura-

leza como de resultados de las actividades del hombre encontramos el ^{14}C y el ^3H , conocido por tritio.

Se producen asimismo otros radionúclidos en la atmósfera, pero su contribución en cuanto a la dosis recibida por la población puede considerarse despreciable, por lo que no vamos a entrar en detalles sobre ellos.

El porcentaje de ^{14}C presente en la atmósfera se incrementó rápidamente a partir de las pruebas nucleares atmosféricas en los años 60.

Es utilizado en forma de CO_2 por las plantas en su fotosíntesis y a partir de éstas puede eventualmente incorporarse a los ciclos metabólicos de la especie humana.

El ^{14}C aparece incorporado al metabolismo de los seres vivos junto con los compuestos orgánicos en los que predomina el isótopo estable ^{12}C .

Este mecanismo ha servido de base para el sistema llamado de la datación carbónica, que permite calcular la edad de muy diversos antecedentes en los que se hallaban compuestos orgánicos o minerales en forma de carbonatos.

El tritio aparece en la biosfera de forma predominante como componente del agua (THO). El componente acuoso de los tejidos humanos tiende a conservar las proporciones de tritio similares a la de los alimentos y el agua que consume.

La abundancia natural de tritio puede cifrarse, relativamente, en 5 átomos de ^3H por 10^{18} átomos de ^1H .

La fuente primordial de producción de tritio se halla en los reactores de

potencia y en las plantas reprocessadoras.

Asimismo otra fuente potencial de producción de tritio se halla en las reacciones de fusión.

La relación entre tritio e hidrógeno estable en el cuerpo humano es esencialmente similar a la de la biosfera.

El tritio puede ser incorporado al metabolismo humano por varios conductos, fundamentalmente inhalado desde la atmósfera o ingerido como agua. Pequeñísimas cantidades son incorporadas en forma de compuestos orgánicos.

No hay evidencias de que el tritio aparezca en concentraciones significativas en los seres vivos, tanto animales como plantas. Otra cuestión importante es la posible incorporación del tritio en el material genético humano a través del DNA.

Los estudios realizados por MEWISSEN en 1971 y 1972 parecen concluir en que la actividad específica del tritio como componente de las moléculas de los ácidos nucleicos es inferior a la del isótopo en los materiales orgánicos y el agua que componen el organismo.

3.ª Parte:

IMPORTANCIA SANITARIA DEL PROBLEMA

La salud y la enfermedad dependen de un medio interno (constitución genética) que puede modificarse, y de un medio externo, entorno o medio

ambiente, en el que podemos individualizar esquemáticamente cuatro factores:

1. Polución del suelo y de las aguas.
2. Polución atmosférica.
3. Transformación de la flora y de la fauna.
4. Transformación de la geomorfología a través de la industrialización, urbanización y crecimiento demográfico.

Estos cuatro factores vienen a representar el tributo casi obligado que el hombre debe pagar por la civilización, y se hallan profundamente interrelacionados en la progresiva degradación del medio.

Somos conscientes de que la aplicación pacífica de la energía atómica ha propiciado notables adelantos científicos en todos los órdenes y ha puesto a nuestro alcance unas posibilidades energéticas hasta ahora insospechadas.

Somos conscientes asimismo del enorme poder destructivo que encierra una posible confrontación atómica, por lo que parece estar muy claro para todos que debe evitarse a toda costa su aplicación práctica en la guerra.

Pero en cambio quizá no somos tan conscientes de que el tecnicismo y el progreso en este campo de acción tan amplio de la energía atómica puede ser causa de daños irremediables, que ya empezamos a tocar en el presente, pero que sin duda se harán patentes con toda su crudeza en un futuro próximo.

En efecto, la energía atómica es el arma de degradación del medio más poderoso con que debemos enfrentarnos, puesto que afecta simultáneamente a aquellos cuatro factores que definíamos como representación esquemática de nuestro entorno.

Por tanto no serán nunca excesivas las precauciones que se aconsejen en el manejo de esta colosal fuente de energía, ni serán baldíos todos los esfuerzos que se inviertan, por costosos que sean, en medios de seguridad y protección.

Es por tanto de desear que los gobiernos, como gerentes máximos de la seguridad de las respectivas sociedades humanas que representan, supervisen activa y meticulosamente todas las ac-

tividades relacionadas con el uso de la energía atómica, evitando que su desarrollo sea regido por la especulación, pendiente solamente del rendimiento y el beneficio, y que las normas de seguridad nacionales e internacionales que se van dictando sean aplicadas con el máximo rigor y seriedad.

Como garantía de que no existe exageración en cuanto exponemos, recordemos, para terminar, que a finales del mes de julio se celebró en París en la sede de la Unesco una mesa redonda sobre salud y factores geológicos. Entre las conclusiones a que llegaron los expertos allí reunidos podemos leer: «La locura nuclear y la amenaza ecológica son males perniciosos que pueden decapitar a la Humanidad.»

BIBLIOGRAFIA

- ABERG, B. y cols.: "Radioecological concentration processes". Pergamon Press. New York, 1967.
- Atomic Energy of Canada Ltd.: "Progress reports of the biology and health physics division". Chalk River (Ontario), 1953 a 1968.
- BEASLEY, T. M. y cols.: "Natural and artificial radionuclides in seafoods and marine protein concentrates". *Nature*, 221: 1207, 1969.
- British Medical Research Council: "The hazards to man of nuclear and allied radiations". London, 1960.
- CALDECOTT, R. S. y cols.: "Symposium on radioisotopes in the biosphere". University of Minnesota. Minneapolis, 1960.
- CHAMBERLAIN, A. C. y cols.: "Environmental monitoring after accidental deposition of radioactivity". *React. Sci. Technol.* 14: 155, 1961.
- COHEN, B. L.: "La eliminación de los residuos radioactivos". *Inv. y Ciencia*, 11: 6, 1977.
- GARNER, R. J.: "An assessment of the quantities of fission products likely to be found in milk in the event of aerial contamination of agricultural land". *Nature*, 186: 1063, 1960.
- GARNER, R. J.: "A mathematical analysis of the transfer of fission products to cows' milk". *Health Phys.*, 13: 205, 1967.
- HARLEY, J. H.: "Radionuclides in food". USAEC Conferencia 690. 303. Oak Ridge (Ten.), 1969.
- HEALY, J. W.: "Radiation exposure to people in the environs of a major production atomic energy plant". 2.ª U. N. Int. Conf. Peace. Uses Atomic Energy. Genève, 1958.
- KAHN, B. y cols.: "Environmental aspects of nuclear power stations". International Atomic Energy Agency. Wien, 1971.

- KRUMHOLZ, L. A. y cols.: "The effects of atomic radiation on oceanography and fisheries". National Academy of Sciences. Washington, 1957.
- POLIKARPOV, G. G.: "Radioecology of aquatic organisms". North Holland Publishing Co. Amsterdam, 1966.
- RAMOS, E.: "Radiaciones ionizantes y contaminación ambiental". *Medicamenta*, 508: 143, 1973.
- RUSSELL, R. S.: "Radioactivity and human diet". Pergamon Press. New York, 1966.
- RUST, J. H. y cols. (Committee on food protection): "Radionuclides in foods". National Academy of Sciences. Washington, 1973.
- THOMPSON, J. C. y cols.: "Dietary intake of radionuclides". USAEC Conference 765. 877. Germantown (Md.), 1965.