

Los medios de determinación de la precipitación radiactiva y atmosférica

N. NUSSIS

(Comisión Nacional de Energía Atómica Dpto. de Química — Div. Radioquímica)

LA SERIE de explosiones nucleares que empezó con la prueba de Alamogordo en julio de 1945 y culminó con las pruebas recientes de bombas 500 veces más potentes que la primera, ha planteado un problema extremadamente urgente, el de la determinación del grado de contaminación de nuestro medio por los radioisótopos generados durante las explosiones nucleares.

La opinión pública se ha conmovido por las discusiones sobre este tema y todavía existen divergencias sobre la magnitud del peligro proveniente de esta contaminación. Tal situación ha tenido como consecuencia un esfuerzo multilateral para obtener datos de valor científico que permitan discutir de una manera segura el alcance de dicho peligro. La creación del Comité Científico para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas en noviembre de 1955, por resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas, ha venido a cubrir la necesidad de una colaboración internacional para aclarar este problema.

En el presente artículo no se tratará el problema en todos sus aspectos, ya que muchos de ellos han sido ampliamente discutidos por su interés general, sino en el que indica el título que, por ser de carácter puramente técnico, ha sido menos difundido.

Las armas nucleares, como todas las demás, han seguido un proceso de perfeccionamiento y en consecuencia, desde

el punto de vista militar, de aumento de su poder destructivo, de manera que actualmente existen tres tipos fundamentales:

(a) *La bomba atómica (nominal o de fisión)*, que consiste de material fisionable, ^{235}U o ^{239}Pu , separado en porciones que al reunirse superan la masa crítica y por reacción de fisión en cadena producen la explosión. La masa crítica para el uranio es de aproximadamente 15 kgs y para el plutonio algo menor. El poder explosivo de una bomba atómica llamada nominal es equivalente al de 20.000 toneladas de T. N. T. y se cree que si bien es posible aumentar el rendimiento del material fisionable, nunca podrá ser más que diez veces mayor que el mencionado.

(b) *La bomba de hidrógeno (H o de fusión o termonuclear)*: El poder explosivo de este tipo de bomba se debe al desprendimiento de gran cantidad de energía en la reacción de fusión de tritio y deuterio a helio. Dicha reacción se produce a temperaturas del orden de millones de grados, que se logran durante la explosión de una bomba atómica nominal: es decir, el ^{235}U o ^{239}Pu actúan como detonantes. Como el tritio es inestable y no se podría almacenar durante muchos años parece que se usa como explosivo el deuteruro de litio. Los neutrones emitidos durante la explosión de la bomba atómica producen a partir del litio el tritio necesario para que a esas temperaturas —por una serie complicada de

reacciones entre litio, deuterio y tritio— se genere la energía de explosión.

(c) *La bomba de fisión-fusión-fisión:* Este tercer tipo consiste de una bomba —H, como la anteriormente descrita, envuelta en algunos centímetros de uranio natural. En estas condiciones resulta posible la fisión del ^{238}U , de manera que aumente la energía de explosión, limitando el uso de ^{235}U o ^{239}Pu , que son mucho más difíciles de obtener. Han sido probadas bombas de este último tipo equivalentes en potencia a 10.000.000 de toneladas de T. N. T.

La explosión de cualquiera de estos tipos de bomba, produce una serie de efectos sobre los materiales, animales o seres humanos que se encuentran dentro de su radio de acción; estos efectos pueden ordenarse de la siguiente manera: para los dos casos principales, el de 20 kilotoneladas de T. N. T. (bomba usada en Hiroshima), y el de 10 Megatoneladas (bomba probada en Bikini en marzo de 1954):

1. — Onda de presión y depresión
2. — Radiación térmica
3. — Radiaciones nucleares inmediatas
4. — Radiaciones nucleares persistentes.

Al último punto corresponde la contaminación persistente de la atmósfera por los núcleos radiactivos producidos en la fisión del uranio. Esta se debe a la dispersión de los productos de fisión en la atmósfera — con parte del uranio o plutonio no fisionado y material del suelo en el que se realizó la explosión. Este es el material que generalmente se denomina “ceniza radiactiva”.

Cuando explota una bomba atómica nominal, se produce aproximadamente 1 kg de material radiactivo, del cual la actividad gamma en el primer minuto después de la explosión es de aproximadamente $8 \times 10^{11}\text{C}$; después de un año, ha decaído a 10^5C , y a los 10 años, es de $8 \times 10^3\text{C}$. La actividad beta es dos veces mayor que la gamma.

La radiactividad de la mezcla de los productos, beta y gamma, sigue una ley de decaimiento que se expresa por la relación $A_t = A_1 t^{-1,2}$, donde A_1 es la actividad de una muestra de esta mezcla de núcleos un segundo después de la ex-

plosión, t es el tiempo que ha pasado después de la explosión, en segundos, y A_t la actividad correspondiente de la muestra al cabo del tiempo t . Si A_1 es la actividad después de un minuto —o cualquier otra unidad de tiempo— t se expresa en la misma unidad.

Aplicando esta última ley a una muestra en la cual la actividad beta o gamma ha sido medida por lo menos dos veces, se puede calcular la fecha de la explosión que la produjo. Pues si A' corresponde al tiempo t' y A'' al t'' , será:

$$A' = A_1 t'^{-1,2}$$

y

$$A'' = A_1 t''^{-1,2}$$

$$\text{de donde } \frac{A'}{A''} = \left(\frac{t''}{t'} \right)^{1,2}$$

$$\text{y si } t'' = t' + T \quad t' = \frac{T}{\sqrt[1,2]{\frac{A'}{A''}} - 1}$$

El mismo resultado se puede obtener gráficamente de la siguiente manera:

$$\text{Si } A_t = A_1 t^{-1,2}$$

pues

$$\frac{1}{\sqrt[1,2]{A_t}} = \frac{1}{\sqrt[1,2]{A_1}} \cdot t$$

lo que significa que $\frac{1}{\sqrt[1,2]{A_t}}$ es función

$$\frac{1}{\sqrt[1,2]{A_t}}$$

lineal de t , ya que $\frac{1}{\sqrt[1,2]{A_1}}$ es constante,

$$\sqrt[1,2]{A_1}$$

siendo A_1 la actividad de la muestra en la primera unidad de tiempo después de la explosión.

$$\text{Entonces para } t \rightarrow 0 \text{ también, } \frac{1}{\sqrt[1,2]{A_t}}$$

$\rightarrow 0$, lo que explica la solución de acuerdo al gráfico 1.

Las partículas radiactivas, proyectadas durante la explosión o después, precipitan a lo largo del tiempo de tres maneras distintas. Las más pesadas, provenientes del suelo o del material de las torres de explosión, precipitan durante las primeras horas, arrastrando parte de los productos de fisión. Esta manera se define como "precipitación radiactiva local".

Alí permanece durante largo tiempo, debido a la falta de agentes de precipitación, como lluvia, nieve o corrientes de aire descendentes. Se ha observado que la cantidad de radioisótopos almacenados en la estratósfera, se reduce en aproximadamente 10 años a la mitad. Durante su permanencia en la estratósfera, se difunden sobre todas las latitudes en forma

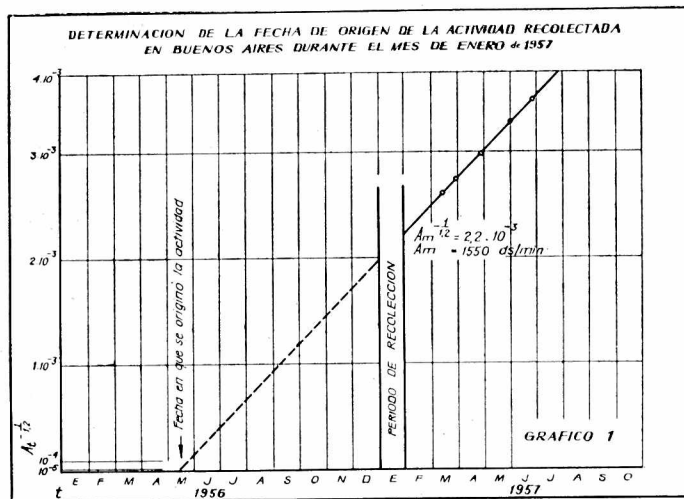


GRÁFICO I

Parte de las partículas producidas que son proyectadas a grandes alturas, dentro de la tropósfera, no logran precipitar por su propio peso en las primeras horas, y quedan expuestas a los distintos fenómenos meteorológicos que tienen lugar en esta zona de la atmósfera. Dichas partículas, arrastradas por los vientos, precipitan lentamente a grandes distancias del lugar de la explosión. En general esta forma de precipitación, que se define como "troposférica", sucede hasta aproximadamente algunos meses después de la explosión y se produce en zonas de latitud vecina a la del lugar de la prueba alrededor de toda la tierra, por razones meteorológicas.

En el caso de explosiones de gran potencia, equivalentes a más de 1 Megatone-lada de T. N. T., gran parte del material radiactivo es proyectado hasta la estratós-

prácticamente homogénea. Esto significa que en cualquier lugar del mundo la precipitación radiactiva atmosférica tiene dos componentes de distinto origen: el estratosférico obligatoriamente, y el troposférico circunstancialmente.

La relación entre las fracciones que tienen los destinos descritos anteriormente, depende principalmente de las condiciones en las cuales se ha realizado la explosión y de su potencia.

Cuando la prueba se realiza sobre la superficie de la tierra o sobre torres, de manera que la esfera candente haya tenido contacto con el suelo, el 80 % de la actividad producida precipita localmente. En el caso de una explosión sobre el mar, la relación es de 20 - 50 %.

Si una explosión de potencia equivalente a 500 kilotoneladas se produce de manera que la esfera candente no tenga

contacto con el suelo, la mayor parte de la actividad producida precipita por vía troposférica. En general puede decirse que las pruebas de potencia menor que una megatonelada de T. N. T. tienden a producir principalmente precipitación troposférica, mientras las de potencia mayor provocan preferentemente precipitación estratosférica a largo plazo.

La radiactividad producida en la fisión del uranio o plutonio, debida a una mezcla de diferentes núclidos, cambia continuamente de características, es decir, de intensidad y de energía media beta y gamma. Asimismo, núclidos de períodos de semidesintegración relativamente cortos, en comparación con la edad de la mezcla, desaparecen continuamente. De esta manera, algunas semanas o meses después de la explosión, parece ser dominante el peligro de ingestión de los núclidos de período de semidesintegración largo.

Entonces entre los distintos productos de fisión, los más importantes desde el punto de vista de la radiactividad dispersada sobre extensas regiones de la superficie terrestre, son los núclidos de período largo, ya que los más cortos desintegran antes de precipitar.

Especialmente el ^{90}Sr (28 años), y el ^{137}Cs (33 años) son objeto de un estudio particular. El primero de ellos, al emitir una partícula beta de 0,54 Mev decae a su hija radiactiva ^{90}Y , que a su vez desintegra con un período de 64 horas emitiendo solamente radiaciones beta de 2,27 Mev. El segundo desintegra emitiendo radiaciones beta de 0,52 y 1,18 Mev y radiaciones gamma de 0,62 Mev.

El ^{90}Sr se considera peligroso por su período extremadamente largo, por las radiaciones tan energéticas que emite su hija radiactiva y principalmente por su comportamiento químico tan similar al del calcio. Esta última propiedad le permite contaminar las fuentes de calcio y por ese conducto, siguiendo el ciclo biológico de este elemento, fijarse en los huesos. Desde ese punto estratégico en el organismo puede convertirse en la causa de leucemias, anemias y cáncer. El ^{90}Sr se

produce con gran rendimiento durante la fisión de uranio o plutonio.

El ^{137}Cs no es tan peligroso desde el punto de vista de la ingestión, por su período biológico corto, pero es el principal responsable, después de un año de producida la fisión, de la radiación gamma residual, y en consecuencia de los daños genéticos tan comentados.

Una precipitación radiactiva de avanzada edad puede ser considerada como una mezcla de partes aproximadamente iguales de ^{90}Sr y ^{137}Cs .

El resto de los radioisótopos presentes, o no constituyen un peligro desde el punto de vista de la ingestión, o emiten muy baja intensidad de radiaciones gamma, de manera que el peligro debido a la precipitación radiactiva atmosférica sobre toda la superficie de la tierra se reduce fundamentalmente al peligro de ingestión de ^{90}Sr y de irradiación externa por el ^{137}Cs .

Se ha visto cuál es el mecanismo de contaminación del medio ambiente. A continuación se verá cómo se la determina. Los métodos usados son diversos, pero todos tienden a obtener, con mayor o menor precisión, los datos necesarios para estimarla.

Los procedimientos para obtener muestras y la selección de los tipos de éstas, son la parte fundamental de cualquier programa tendiente a estudiar la contaminación radiactiva atmosférica, sobre todo cuando abarca amplias regiones.

Es preciso estudiar dos problemas distintos: 1) La determinación de los riesgos presentes y futuros debidos al ^{90}Sr y ^{137}Cs , y 2) la distribución geográfica de este peligro. La relación entre ambos problemas sólo puede determinarse si se dispone de datos suficientes del régimen demográfico y alimenticio habitual de una región, y de la cinética del ^{90}Sr en el ciclo biológico.

Se necesita entonces saber en detalle:

a) Cuál es la cantidad de radioisótopos contenida en cada litro de aire a distintas alturas y en distintas regiones, y su composición radioquímica, para poder estudiar el proceso de precipitación, su dependen-

cia de los fenómenos meteorológicos, y para poder predecir cual será la precipitación en el futuro.

b) Cuál es la velocidad de deposición de la radiactividad sobre la superficie de la tierra, cuál es la cantidad acumulada y qué origen tiene, para poder estimar las dosis a las cuales estará sometido el hombre y durante cuántas generaciones serán éstas apreciables.

c) Cómo se absorbe el ^{90}Sr en las primeras capas del suelo, o se retiene sobre el follaje de las plantas o cómo pasa acompañando al calcio en las distintas etapas del ciclo biológico de este último.

La aclaración del primer punto ha dado origen a una serie de investigaciones, en algún caso muy costosas por los medios que se necesitan para realizarlas. En general eso se hace filtrando grandes volúmenes de aire a distintas alturas, utilizando aviones con filtros en el fuselaje o globos. En el caso del control del aire que circula sobre la superficie de la tierra se han utilizado sistemas aspiradores de alto caudal, según el descrito a continuación. El equipo está compuesto por una aspiradora que filtra un caudal de 8 - 10 m³/h por un papel de filtro de alto contenido de fibras de amianto, de un diámetro de aproximadamente 20 cm. Una vez finalizada la filtración, se calcina el filtro y en el residuo se mide la actividad beta y gamma y, si es necesario, se determina radioquímicamente el ^{90}Sr y ^{137}Cs para calcular su contribución a la actividad beta y gamma de la muestra. Este método tiene el inconveniente de la gran masa de material inerte que acompaña a la muestra después de la calcinación. Esto dificulta las operaciones posteriores de medición y procesamiento radioquímico, si bien el amianto aumenta notablemente el poder de retención de estos filtros, en comparación con los comunes.

Un método similar a este, pero que permite el control continuo de la actividad presente en el aire, es el siguiente: un papel de filtro adecuado se desliza sobre una ranura, por la cual se succiona el aire con una aspiradora, de manera que nunca se obstruya el filtro por el polvo acumulado. A una distancia determinada,

dependiente de la velocidad de avance del filtro, se encuentran dos equipos detectores de rayos beta y gamma, de manera que al llegar allí el filtro, hayan desintegrado los radioisótopos correspondientes a las familias radiactivas naturales, RaB, RaC, ThB y ThC, lo que sucede al cabo de aproximadamente 60 horas. Los detectores, conectados con equipos contadores y registradores automáticos, dan un registro continuo de la radiactividad artificial presente. En el caso de que cierta porción del papel —de acuerdo a los registros obtenidos— presente algún interés especial, se puede cortar directamente y tratar como anteriormente. Naturalmente, la eficiencia de los detectores ha sido controlada previamente.

Se han usado también precipitadores electrostáticos para obtener muestras del material radiactivo suspendido en el aire, ya que este se encuentra electrostáticamente retenido sobre las partículas del polvo atmosférico.

El gran inconveniente de todos estos métodos está en la falta de un conocimiento completo del espectro de tamaño de los polvos radiactivos, y en consecuencia, en la ambigüedad que existe en la determinación de la eficiencia de retención de los distintos filtros, o de precipitación en los precipitadores electrostáticos. Otro inconveniente de los métodos anteriormente descritos, es la imposibilidad de utilizarlos cuando llueve o cuando la humedad ambiente es muy elevada.

En general, se considera eficiente cualquier método que tenga un rendimiento mayor del 95 % para partículas mayores que 0,2 micrones.

La aclaración del segundo punto ha sido la causa de la elaboración de distintos métodos, de los cuales se describirán los principales. Para este fin, se usaron los métodos llamados del papel engomado, del recipiente con paredes altas (Fig. 1) y de la columna de intercambio.

1) *Método del papel engomado.* Este consiste en la exposición de un papel tipo Durex, con soporte de acetato de celulosa, cubierto con una goma difícil de secar. El tamaño de esta hoja es de 30 x 30 cm²,



FIG. 1

y la parte engomada viene protegida con papel manteca, de manera que no se altere durante su manipuleo. Una vez retirada la cubierta de la superficie engomada, dicho papel se pega por los bordes sobre un marco de cadmio o de acero inoxidable, y el conjunto se apoya sobre un soporte a 90 cm del suelo. De esta manera, la superficie engomada queda expuesta hacia arriba. El dispositivo entero se instala en un lugar abierto, lejos de edificios altos, de manera de reproducir las condiciones de campo abierto, por lo cual es preferible instalarlo en el área de instrumental de una estación meteorológica. La superficie engomada retiene así el polvo que precipita sobre ella, y parte del arrastrado por las lluvias; en este caso, se fija por el impacto de las gotas. El método no es eficiente para los productos radiactivos disueltos en la lluvia, o en el caso de heladas o nieve, ya que la superficie resulta inoperante al

cubrirse con la primera capa de hielo o nieve. El papel puede dejarse expuesto hasta una semana; después empieza a alterarse. Generalmente se reemplaza cada 24 horas, es decir, se usa para determinaciones diarias.

Al finalizar el período de exposición, se despegan los bordes y se pliega en dos, de forma tal que las dos mitades de la superficie engomada queden adheridas entre sí; luego se encierra en un sobre con una ficha donde se consignan todos los datos meteorológicos correspondientes al período de exposición, y se envía al laboratorio especializado, donde será tratado.

Allí se archiva la ficha y el papel es calcinado en un crisol de porcelana, o mejor de hierro, a unos 550°C; la ceniza se monta sobre una chapita de plástico o de aluminio, en condiciones normalizadas, y se mide la actividad beta con un tubo Geiger-Müller, de ventana fina.

De acuerdo a las ecuaciones planteadas al principio, a partir de la actividad medida, puede determinarse la actividad de la muestra correspondiente a la fecha de su recolección. Además, a partir de estos datos, puede calcularse la edad de la radiactividad artificial presente y, de allí, conocer la actividad gamma de la muestra sin efectuar otra medición.

Cabe destacar en este punto, que últimamente toda esta serie de cálculos se ha hecho muy difícil, ya que la radiactividad recolectada en una mezcla compleja de actividades de distinto origen, troposférico y estratosférico, y en consecuencia de muy distintas edades.

La radiactividad determinada por este método es el 60 % de la que realmente ha precipitado, representando este último dato un promedio de una serie muy grande de mediciones realizadas en comparación con otros métodos considerados cuantitativos. La gran ventaja del método, que ha sido usado ampliamente hasta hace poco tiempo, en E.E. UU., se debe a la facilidad con la que pueden ser enviadas muestras desde lugares muy remotos a un laboratorio central. Esto permite la instalación de una vasta red de estaciones, sin disponer de personal especializado, ya que su intervención en la recolección de las muestras se reduce a reemplazar el papel y llenar la ficha de datos meteorológicos, lo que resulta muy fácil para los observadores de una estación meteorológica.

A pesar de todo esto, el método tiende a ser abandonado, y se mantiene solamente como método de control diario, sin exigirle los datos imprescindibles para calcular la velocidad de deposición y la cantidad acumulada de radioisótopos artificiales, objeto principal de todo el trabajo.

2) *Método del recipiente con paredes altas.* El método anterior ha sido reemplazado por el que usa un recipiente de acero inoxidable o de material plástico, de aproximadamente 30 cm de diámetro y de la misma altura. Dicho recipiente se deja expuesto con la boca a la misma altura que el papel engomado, y en las mismas condiciones de ambiente. La muestra se toma durante una semana o mejor

un mes, con las precauciones necesarias para que se mantengan en el fondo del recipiente 2 o 3 cm de agua destilada o de lluvia por lo menos. Así se evita que el contenido del recipiente se seque, y cualquier corriente de aire, al llegar hasta el fondo levante el polvo depositado, seco. De esta manera, el recipiente recoge cualquier clase de precipitación atmosférica, polvo, lluvia, nieve, hielo y puede ser considerado como un dispositivo de aproximadamente 100 % de eficiencia.

Al finalizar el período de exposición, el contenido se transvasa cuantitativamente y se transporta al laboratorio, donde se concentra todo hasta seco, se calina a unos 800°C, se monta y se mide la radiactividad como anteriormente.

En este caso, la muestra es mucho más compleja, desde el punto de vista de origen y edad de sus componentes, ya que durante la recolección, más larga ahora, han variado notablemente las características meteorológicas del medio ambiente. Por esta razón, la clase de cálculo usada en el método anterior no tiene mucho sentido y es necesario proceder a la determinación radioquímica de los radioisótopos que más interesan, ^{90}Sr y ^{137}Cs , además de la determinación de la radiactividad beta total.

3) *Método de la columna de intercambio iónico.* Otro método, más perfecto desde el punto de vista técnico, consiste en el empleo de un aparato compuesto de dos unidades: la recolectora y la filtradora. La primera consiste en un embudo metálico de 30 cm de diámetro, recubierto en su superficie interior con un plástico termorresistente; la parte exterior está cubierta por un dispositivo calentador de aproximadamente 50 Watt, para el caso de tener que derretir la nieve o el hielo que se va acumulando en el embudo. La unidad filtradora consiste en un tubo de politene, de 20 cm de largo, y 2 cm de diámetro, dentro del cual se ha colocado resina de intercambio aniónica, luego catiónica y encima, una capa de pulpa de papel. El dispositivo se usa para tomar muestras semanales, mensuales o aún más largas: el embudo tiene la

misma finalidad que el recipiente mencionado anteriormente con la diferencia que aquí el líquido no se acumula, sino filtra continuamente a través de la columna. Los radioisótopos adheridos al polvo se retienen en la pulpa de papel. Los disueltos como aniones se retienen en la resina aniónica, mientras que los que se encuentran como cationes son retenidos por la resina catiónica. La eficiencia de este dispositivo es del 95 %.

La toma de muestra por este método es muy sencilla. Al finalizar el período de recolección, se lava el embudo con un poco de agua destilada, que se deja escurrir por la unidad filtradora antes de reemplazarla. Las unidades filtradoras se envían a la estación desde el laboratorio, llenas de agua destilada, y tapadas herméticamente con tapones de goma. Finalizado el período, se envían de vuelta al laboratorio cerradas de la misma manera, y acompañadas por un informe sobre las condiciones meteorológicas observadas durante el período de recolección.

Durante este período, hay que tomar dos precauciones: la columna no debe secarse nunca, por lo cual se debe controlar especialmente el nivel del agua cuando hay tiempo seco, y, en segundo lugar hay que evitar, en presencia de mucho polvo en el aire, que se obstruya el paso de líquido por la pulpa de papel. Si esto sucede se puede remediar haciendo una leve succión o reemplazando la columna.

En el laboratorio central, se calcina el contenido de la columna a unos 600°C y se mide la actividad beta y gamma del residuo, después de lo cual se realiza un análisis radioquímico para determinar el contenido en ^{90}Sr y ^{137}Cs .

Por este método, como se ha visto, se evita el problema del transporte de gran volumen de líquido, o el trabajo de concentración de ese líquido en las estaciones recolectoras. Además, si se considera necesario, puede realizarse un estudio de ciertos aspectos químicos de la precipitación radiactiva.

La radiactividad determinada por cualquiera de estos métodos se expresa en mC/km^2 * o, para el caso de nucleídos

individuales en $\mu\text{C}/\text{km}^2$ **. Además se hace el cálculo de la radiactividad acumulada y se registra la velocidad de deposición.

Para aclarar el tercer punto, es necesario en primer término conocer el contenido en ^{90}Sr en el suelo, en las plantas, en la leche y en los huesos. Esto nos proporcionará datos sobre los niveles de contaminación con este radioisótopo en función del tiempo y las experiencias nucleares que se realicen.

1) *Determinación de ^{90}Sr en el suelo.*
Las muestras de tierra se obtienen utilizando vasijas con bordes cortantes. Deben obtenerse preferentemente de una región que reúna las siguientes características: no debe ser arenosa, y debe estar en una zona llana donde no haya inundaciones ni erosión; debe tener vegetación baja (impide que vuele el polvo), pero no debe estar cultivada. Según mediciones realizadas hasta la fecha, casi toda la actividad debida a ^{90}Sr queda retenida en los primeros 15 cm de suelo. La cantidad necesaria para realizar un análisis por duplicado es de 5 kg. La muestra seca se puede enviar en bolsas de papel dentro de otra de arpillera, mientras que, si está húmeda, se debe colocar en recipientes de metal plástico.

La extracción del ^{90}Sr de la tierra se puede realizar por los siguientes métodos:

a) Tratando la muestra con $\text{HCl } 6\text{N}$ en presencia de portador isotópico; el Ca y Sr extraídos se precipitan como oxalatos, los cuales a continuación se tratan con HNO_3 fumante y luego se sigue como se describe para el caso de los huesos.

b) Se solubiliza el Sr con una fusión alcalina con Na_2CO_3 e NaOH , se insolubiliza la sílice con HClO_4 y se continúa como anteriormente.

c) Tratando la muestra con solución de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N; el Sr intercambiable se extrae en ausencia de portador isotópico y se lo precipita como oxalato o carbonato. A partir de este punto puede seguirse como en el caso de los huesos.

* 10^{-3} Curie por km^2 .
** 10^{-6} Curie por km^2 .

2) *Determinación de ^{90}Sr en leche.* La leche se evapora a baja temperatura durante muchas horas hasta residuo seco; éste es calcinado a 900°C . Para evitar la larga evaporación, es conveniente usar leche en polvo, conociendo naturalmente, su procedencia. Para hacer un buen análisis se necesitan 4 litros de leche o 300 g de leche seca, lo que en ambos casos representa unos 25 g de cenizas. Para evitar un rendimiento bajo en la separación de Sr, es aconsejable concentrar el Ca y el Sr inicialmente, precipitándolos como fosfatos, y de allí aplicar la separación descrita en el caso 3.

3. *Determinación de ^{90}Sr en huesos.* Las muestras para estas determinaciones provienen de intervenciones quirúrgicas o autopsias, tratándose en este caso de personas que no hayan muerto de una enfermedad que afecte la composición o la estructura de los huesos. Las mediciones realizadas hasta ahora, demuestran que la concentración de ^{90}Sr por gramo de Ca, varía mucho de acuerdo con la edad del individuo; en promedio es:

hasta 1 año	0,73 $\mu\mu\text{C } ^{90}\text{Sr}/\text{g Ca}$
de 1 a 15 años	0,48 " "
" 15 a 40 años	0,047 " "
a más de 40 años,	despreciable

Por tal razón, es necesario conocer bien la edad del individuo, que debe ser menor de 20 años. Además, como el ^{90}Sr no se distribuye de manera uniforme en el esqueleto, es necesario saber de qué hueso se trata, en caso de que la muestra se envíe desde el hospital en forma de ceniza. En general se prefieren huesos grandes porque en éstos la concentración está mejor relacionada con la concentración media en el esqueleto.

Como muestra, se toman unos 20 g de hueso o unos 10 g de ceniza, lo que corresponde aproximadamente a 4 g de Ca o a 3 $\mu\mu\text{C } ^{90}\text{Sr}$, actividad cuatro veces mayor que la mínima medible con los medios actuales. Los huesos a enviar se pueden fijar convenientemente en formol al 15 %, o se pueden calcinar directa-

mente a 900°C durante varias horas y remitir las cenizas.

En el laboratorio se extrae con HCl concentrado el Ca y el Sr de las cenizas; sobre parte alícuota (5 %) se determina el Ca y en el resto se separa radioquímicamente puro el ^{90}Sr , en presencia de portador isotópico. La separación radioquímica consiste en la precipitación de Ba y Sr como nitratos, con HNO_3 fumante y posterior separación del Ba como BaCrO_4 . En la fracción de ^{90}Sr se deja crecer su hija radiactiva, el ^{90}Y durante unos 15 días, hasta el equilibrio radiactivo. Al cabo de este término, se separa, en presencia de portador isotópico, este último radioisótopo como oxalato. El preparado así obtenido se mide, y a partir de la actividad de ^{90}Y se calcula la correspondiente a ^{90}Sr , la que se expresa en $\mu\mu\text{C } ^{90}\text{Sr}/\text{g Ca}$.

4) *Determinación de ^{90}Sr en otros materiales.* La determinación de ^{90}Sr en los materiales mencionados puede considerarse fundamental. Es aconsejable también, determinarlo en plantas —especialmente forrajes— en huesos de animales o en aguas, para completar los conocimientos que se tienen sobre el ciclo biológico del Sr. Existen métodos elaborados para este fin, que son fundamentalmente similares a los descritos anteriormente.

El procesamiento químico de todos estos tipos de muestras se puede simplificar utilizando resinas de intercambio.

De acuerdo con lo expuesto, en general se mide la radiactividad del ^{90}Y , separado en equilibrio con su madre radiactiva, a partir de una fracción pura de Sr. Determinando la cantidad de ^{89}Sr presente en la fracción de Sr, se puede calcular el nivel correspondiente a la componente troposférica y, por diferencia, el de la estratosférica.

Estas mediciones plantean un serio problema, por ser muy baja la radiactividad de los preparados, excepto la de los provenientes de muestras mensuales. El ejemplo del nivel de contaminación de los huesos da una idea de las dificultades con las que se tropieza. Si la concentración

de ^{90}Sr en huesos de niños hasta 1 año es de $0,73 \mu\mu\text{C } ^{90}\text{Sr/g Ca}$ en una muestra con unos 4 g de Ca habrá $3 \mu\mu\text{C}$ de ^{90}Sr o 6,1 dpm (desintegraciones por minuto). Aceptando una eficiencia de medición de aproximadamente 25 %, esto se convierte en 1,5 cpm (cuentas por minuto), registradas en el equipo. El fondo que registra un tubo G. M. corriente es de 10-20 cpm, y en consecuencia, es imposible estimar una actividad como la mencionada, ya que cualquier diferencia de este orden sobre el fondo se confunde con la fluctuación estadística propia de la medición del fondo.

La solución de este inconveniente se logra tomando algunas medidas que disminuyen el fondo registrado. En primer término, se protegen los detectores de las radiaciones exteriores, provenientes del suelo, fuentes que se hallen alrededor o de origen cósmico, con paredes de Pb de 5 cm de espesor. Los castillos de Pb, dentro de los cuales se encuentran los detectores, están interiormente revestidos con 2 cm de acero, para eliminar las radiaciones provenientes de las contaminaciones del mismo Pb. De esta manera, es posible reducir el fondo al 30 %.

Para obtener una disminución mayor del fondo, es necesario instalar, dentro de la torre de Pb, un equipo tipo Libby. Es decir, un anillo compuesto de tubos G. M. largos, como los que se usan para medir la intensidad de la radiación cósmica, dentro del cual se encuentra el detector, conectado en anticoincidencia con el anillo exterior. De esta manera se puede reducir el fondo de nuevo al 30 %.

Parte del fondo registrado por los tubos G. M. se debe al mismo material con el cual están contruídos. En los tubos G. M. de ventana, que generalmente se usan para esta clase de trabajo, las paredes de vidrio y la mica de la ventana, contienen ^{40}K , radioisótopo natural, que es responsable en gran parte del fondo propio de estos tubos. Por tal razón, se construyen tubos con paredes de Cu electrolítico, o O. F. H. C., y ventana de materiales plásticos, como mylar o teflon.

Tomando todas estas medidas, se logran

detectores que registran un fondo del orden de 0,5 cpm y permiten determinar las muy pequeñas cantidades de ^{90}Sr que existen en los huesos u otros materiales.

Naturalmente, otra solución es la de aumentar considerablemente la cantidad de muestra tratada, lo que puede traer a veces inconvenientes operativos.

En general, para hacer un estudio completo de la contaminación, proveniente de la precipitación radiactiva atmosférica, es necesario disponer de dos grupos de equipos: uno para el ^{90}Sr y otro para el ^{137}Cs .

a) Un registrador de radiactividad compuesto de un tubo G. M. de fondo bajo, protegido por un castillo de Pb, y un escalímetro. El fondo registrado por este equipo es del orden de 7 cpm, y su eficiencia es de un 20 %. El conjunto debe ser electrónicamente muy estable, de manera que la estadística de las mediciones sea la mejor posible. Con este equipo se puede medir la actividad de una muestra mensual o semanal de precipitación radiactiva, y en algunos casos, el contenido de éstas en ^{90}Sr , si la radiactividad precipitada es alta.

Un equipo tipo Libby, protegido de las radiaciones exteriores por una caja de acero de 10 cm de espesor, conectado a un escalímetro. El fondo registrado por este equipo es menor que 1 cpm, lo que permite estudiar la contaminación de ^{90}Sr en muestras de suelo, plantas, leche y huesos.

Para determinar la cantidad de ^{137}Cs presente en las distintas muestras, se usa un espectrómetro de centelleo con discriminador diferencial, cuyo cristal fotosensible está protegido en una forma análoga a las ya descritas.

En nuestro país, se organizó en la Comisión Nacional de Energía Atómica un Laboratorio de Medición de la Precipitación Radiactiva Atmosférica, en el que se están poniendo a punto los diversos métodos y equipos necesarios para realizar esta clase de trabajo. En colaboración con el Servicio Meteorológico Nacional se han instalado tres estaciones donde se recolectan muestras mensuales de la pre-

TABLA 1

	Mezcla de los productos de fisión de X-52 hasta IX-55	⁹⁰ Sr acumulado desde X-52 hasta X-56
Alemania Occ.	39,0 mC/km ²	2,96 mC/km ²
Argentina	23,4 "	2,10 "
Australia	25,4 - 18,4 "	2,30 - 0,94 "
Bolivia	35,9 "	2,34 "
EE. UU.	47,0 - 74,0 "	2,07 - 11,70 "
Gran Bretaña	34,0 "	3,45 "
Japón	25,5 - 39,0 "	3,28 - 4,52 "
Méjico	42,8 "	3,08 "
Sudáfrica	15,2 "	1,21 "
Singapur	37,0 "	2,25 "

precipitación radiactiva, en Mendoza, Buenos Aires y Río Gallegos. Hasta el momento se realizaron las determinaciones radioquímicas del contenido en ⁹⁰Sr de las muestras correspondientes a los meses del año en curso. Asimismo se está estudiando el contenido en ⁹⁰Sr en muestras de leche argentina, y en colaboración con la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Buenos Aires, se analizarán muestras de forrajes. Muchos hospitales han enviado ya muestras de huesos para su análisis.

De esta manera se dispondrá en el futuro de un registro, lo más completo

posible, de la contaminación en nuestro país, proveniente de las explosiones nucleares.

A continuación se consignan algunos datos correspondientes a determinaciones realizadas por laboratorios especializados de los EE. UU. hasta fines de 1956 y los más recientes, obtenidos en nuestro laboratorio, hasta fines de 1957.

Precipitación Radiactiva Atmosférica

Los datos que se consignan en la 2ª columna de la tabla 1 representan la actividad de la mezcla de productos de fi-

TABLA 2. — *Precipitación radiactiva atmosférica mensual en papeles engomados*

Estación	Novbre. 1956		Dicbre. 1956		Enero 1957		Febrero 1957		Marzo 1957	
	mC/km ²	Lluvia mm.	mC/km ²	Lluvia mm.	mC/km ²	Lluvia mm.	mC/km ²	Lluvia mm.	mC/km ²	Lluvia mm.
La Quiaca	—	—	2,25 (1)	40,1 (1)	7,27	87,2	1,88	61,2	1,94	31,3
Buenos Aires .	4,63 (2)	17,3 (2)	9,27	5,9	9,24	114,1	3,50	55,0	0,37	15,0
Cipolletti	—	—	9,80 (3)	10,0 (3)	4,41	—	4,77	15,1	2,08	41,4

(1) Desde el 20/XII/1956.

(2) Desde el 9/XI/1956.

(3) Desde el 12/XII/1956

TABLA 3. — *Precipitación radiactiva atmosférica mensual en recipiente (Buenos Aires)*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sepbre.	TOTAL
Precipitac. pluvial (mm)	141,1	55,0	15,0	88,2	194,3	93,0	62,2	49,0	12,2	674,0
Actividad total (mC/km ²)	9,72	8,25	1,3	2,56	35,0	44,0	22,8	16,1	3,95	143,68
Actividad al 1/I/ 1958 (mC/km ²) .	3,58	3,45	0,48	1,34	6,68	10,2	7,64	5,8	2,3	41,4
⁹⁰ Sr calculado (mC/km ²)	0,123	0,120	0,021	0,049	0,105	0,135	0,096	0,062	0,028	0,739
⁹⁰ Sr determinado (mC/km ²)	0,150	0,680	0,115	0,080	0,190	0,290 (1)	0,198	0,166	0,067	1,986

(1) Valor obtenido aplicando a la actividad calculada el factor promedio $\frac{^{90}\text{Sr determinado}}{^{90}\text{Sr calculado}} = 2,14$. Desde mayo a setiembre de 1957.

sión acumulada desde octubre 1952 hasta setiembre 1955 extrapolada al 1º de enero de 1956⁷. Los de la 3ª columna corresponden a la cantidad de ⁹⁰Sr acumulada desde octubre 1952 hasta setiembre de 1958⁸.

A continuación se consignan los resultados obtenidos por nuestro laboratorio¹¹. En la tabla 2 figuran los resultados obtenidos con papeles engomados desde noviembre de 1956 hasta marzo de 1957, época en la cual se abandonó este método. En la tabla 3 figuran los datos correspondientes a la precipitación radiactiva mensual controlada con el método del recipiente, durante los meses enero hasta setiembre de 1957. Asimismo figura el contenido de ⁹⁰Sr en estas muestras, calculado según las curvas de Hunter y Ballou¹⁰ y determinado radioquímicamente.

El gráfico 1 presenta la actividad total mensual en mC/km², comparada con la precipitación pluvial correspondiente a los meses respectivos. Además a cada actividad se le ha asignado la fecha de nacimiento aparente.

GRÁFICO 2

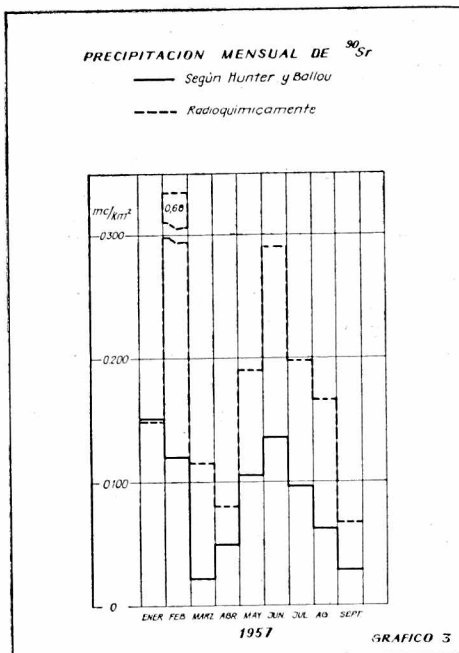
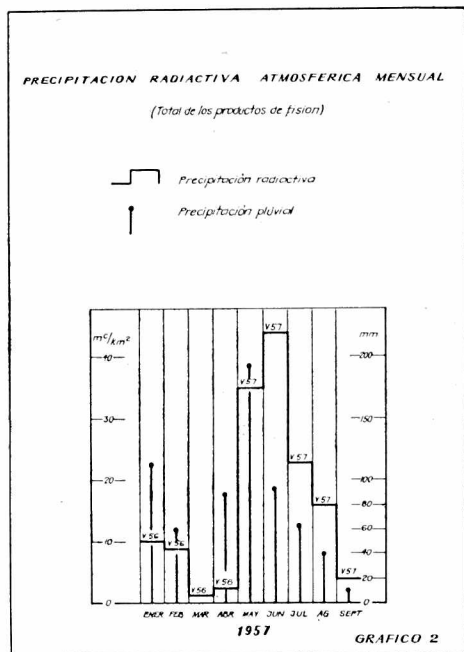


GRÁFICO 3

El gráfico 2 presenta en forma comparativa, los datos de ⁹⁰Sr contenido en las muestras mensuales de la estación de Buenos Aires (Obs. Meteorológico de Villa Ortúzar), calculados según las curvas de Hunter y Ballou, y obtenidos radioquímicamente.

El estudio del gráfico 2 indica la existencia de dos picos de precipitación radiactiva atmosférica: uno que corresponde aproximadamente al último trimestre de 1956 y el otro, que corresponde al segundo y tercer trimestre de 1957. El estudio de la edad de las actividades mensuales correspondientes a estos dos picos, revela dos orígenes bien diferenciados: en el primer caso, el grueso de la actividad precipitada sería originado en mayo de 1956, mientras que el origen de las actividades causantes del segundo pico sería mayo de 1957.

Durante mayo de 1956 se realizó una serie de experiencias, tanto en el hemisferio norte como en el sur. Estas últimas, realizadas en las islas Montebello y en el desierto de Maralinga (Australia) serían

las lógicamente responsables del aumento en la precipitación radiactiva registrada.

Asimismo, en mayo de 1957 se realizaron experiencias termonucleares en el hemisferio sur, de manera que éstas serían las responsables del notable aumento de la precipitación radiactiva, revelada por la magnitud del segundo pico. No se han identificado productos de fisión originados en octubre de 1956, época durante la cual tuvo lugar una serie de experiencias nucleares en Australia.

En lo que se refiere al contenido en ^{90}Sr , se observa que únicamente en el caso del segundo pico existiría una relación relativamente constante entre el valor calculado según las curvas de Hunter y Ballou y el determinado radioquímicamente. El factor promedio sería del orden de 2. Este factor se utilizó para representar el contenido en ^{90}Sr de la muestra de junio de 1957, ya que no se pudo realizar su análisis radioquímico.

En general, es necesario observar detenidamente este factor a lo largo de mucho tiempo para poder decidir si tal valor representa un factor geográfico de enriquecimiento respecto de ^{90}Sr . Esto en el futuro permitiría especular sobre la cantidad de precipitación radiactiva estratosférica en esta ubicación geográfica (Buenos Aires). Naturalmente, los datos de que dispondremos en el futuro, provenientes de las estaciones de Mendoza (al pie de los Andes) y Río Gallegos (en el extremo sur del continente), nos permitirán perfeccionar nuestro conocimiento de este factor.

En las muestras anteriores al mes de abril, los datos obtenidos mediante los dos métodos descritos no son tan concordantes como en el caso anterior.

Como conclusión provisoria, pero lógica, se puede decir que cualquier experiencia nuclear en el hemisferio sur eleva

notablemente los niveles de precipitación radiactiva en nuestro país.

En lo que se refiere a la relación entre la precipitación radiactiva atmosférica y la precipitación pluvial, se observa que no hay una dependencia estricta entre ambos fenómenos, hecho que ya se había observado anteriormente.

Respecto a la relación entre precipitación radiactiva y la ubicación geográfica de las estaciones, si bien es prematuro emitir conclusiones definitivas, se ha observado que el nivel de precipitación radiactiva es mayor en la región de Buenos Aires que en la de Mendoza, a pesar de que ambas estaciones se encuentran aproximadamente a la misma latitud. Mendoza está protegida por los Andes de las masas de aire que llegan desde occidente.

El nivel parece ser menor en el extremo sur del país (Río Gallegos), lo que era de esperar de acuerdo al conocimiento que se tiene de la distribución de la precipitación radiactiva atmosférica en función de las latitudes.

Contenido de ^{90}Sr en leche

En la tabla 4 se consignan los datos publicados en los EE. UU. correspondientes a muestras de leche tomadas hasta 1956 inclusive (1, 2, 8). Los valores anotados están expresados en fracciones de la dosis máxima permitida (DMP) para ^{90}Sr , la que corresponde a 1000 $\mu\mu\text{C}/\text{gr}$ de Ca.

En los laboratorios de la Comisión Nacional de Energía Atómica se estudió el contenido en ^{90}Sr de una muestra de leche en polvo producida durante el segundo trimestre de 1957 a partir de leche proveniente de la provincia de Santa Fe (11).

El resultado del análisis por duplicado ha sido el siguiente:

Muestra	Contenido de ^{90}Sr	
1	$3,1 \pm 0,39$	C/gr de Ca ó 0,0031 DMP
2	$3,9 \pm 0,24$	" " " ó 0,0039 "

TABLA 4

	1954	1955	1956
Argentina	0,0002	—	0,001-0,0028
Australia	—	0,002	—
EE. UU.	0,0005-0,0015	0,0008-0,0033	0,002-0,0055
Francia	—	0,0015	—
Japón	0,001	0,002	—
Noruega	0,0015	—	—
Pakistán	0,0005	—	—
Turquía	0,0035	—	—

Al proponernos exponer los métodos que se utilizan para controlar la contaminación radiactiva atmosférica, se ha querido también dar la pauta de la magnitud del problema, agravado por el fin que se persigue; el de poder dar la voz de alarma cuando el peligro sea inminente.

Pero, como ha sucedido ya en otros casos, la angustia que ha provocado el amplio despliegue de esfuerzos en todo el mundo, llevando muchos investigadores de otros campos a este, ha sido la causa de la formación de laboratorios especia-

lizados en la investigación de este problema.

Si los hombres de todo el mundo logran con su esfuerzo colectivo excluir la posibilidad de una guerra nuclear, entonces quedará todo esta experiencia adquirida como un aporte útil para el aprovechamiento de la energía nuclear con fines pacíficos, ya que estaremos anticipadamente en condiciones de controlar cualquier contaminación radiactiva que sea consecuencia de este trascendental adelanto de la civilización.

BIBLIOGRAFÍA

(1) LIBBY, W. F.: Radioactive Strontium Fallout, *Proceedings of the National Academy of Sciences, U. S. A.*, 1956, 42, núm. 6.

(2) LIBBY, W. F.: Current Research Findings on Radioactive Fallout, *Proceedings of the National Academy of Sciences, U. S. A.*, 1956, 42, núm. 12.

(3) World Federation of Scientific Workers, "Unmeasured Hazards", London, 1956.

(4) KULP, J., LAURENCE-ECKELMANN, WALTER, R., SCHULERT, R. ARTHUR: Strontium-90 in Man, *Science*, 1957, 125, núm. 3241.

(5) EISENBUD, M., HARLEY, J.: Radioactive Fallout through September 1955, *Science*, 1956, 124, 251-55.

(6) EISENBUD, M., HARLEY, J.: Radioactive Dust from Nuclear Detonations, *Science*, 1953, 117, 141-47.

(7) HARLEY, J. H., HARDY, E. P., WELFORD, G. A.,

WHITNEY, I. B., EISENBUD, M.: Summary of Analytical Results from the HASL Strontium Program to June 1956, 4751 NYO (1956).

(8) HARLEY, J. H., HARDY, E. P., WHITNEY, I. B., EISENBUD, M.: Summary of Analytical Results from the HASL Strontium Program July through December 1956, NYO-4862 (March, 1957).

(9) C. G. S. I., Working Group on Nuclear Radiation. Excerpts from Final Report of the Meeting in Utrecht, January 22-26, 1957.

(10) HUNTER, H. F., BALLOU, N. E.: Fission Products Decay Rates, *Nucleonics*, 1951, 9, C-2.

(11) NUSSIS, N., HENKEL, C., MENIS, M.: La precipitación radiactiva atmosférica durante el año 1957, Contribución de la Argentina al Comité Científico para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, de las Naciones Unidas, C. N. E. A., Diciembre 1957.