

| |
|------------------------|
| Activ. Epec. máxima |
|------------------------|

| |
|--------|
| Bq/mol |
|--------|

| |
|---------------------|
| 1 . 10 ⁵ |
|---------------------|

| |
|-----------------------|
| 31 . 10 ¹² |
|-----------------------|

| |
|-----------------------|
| 41 . 10 ²⁰ |
|-----------------------|

| |
|-----------------------|
| 99 . 10 ²⁰ |
|-----------------------|

| |
|-----------------------|
| 39 . 10 ²¹ |
|-----------------------|

| |
|-----------------------|
| 33 . 10 ¹⁹ |
|-----------------------|

ipalmente

LOS MODELOS DOSIMETRICOS DE HIROSHIMA Y NAGASAKI

Eduardo R. Felizia

*Gerencia de Area Asuntos Regulatorios
de Seguridad Radiológica y Nuclear
Comisión Nacional de Energía Atómica*

Un problema importante en radioprotección es la consideración de los efectos estocásticos de la radiación en el dominio de las bajas dosis, principalmente de la carcinogénesis. Interesa esencialmente determinar la relación entre el número de casos de cáncer inducidos en un grupo humano expuesto a la radiación y las dosis recibidas por dicho grupo; la principal dificultad radica en el hecho que la radiación provoca el mismo tipo de cáncer que se produce, ya sea espontáneamente o por la acción de otros agentes cancerígenos.

Es posible, sin embargo, correlacionar el número de casos de cáncer con las dosis recibidas mediante el análisis estadístico en estudios epidemiológicos que demuestren que un grupo de personas expuestas a la radiación tiene mayor incidencia de cáncer que un grupo similar de personas no expuestas a la misma. No obstante, a dosis muy bajas el número de casos de cáncer puede confundirse con el fondo, salvo que el estudio implique a un grupo humano lo suficientemente numeroso como para que los

resultados tengan un nivel de significación estadística aceptable.

Muchos grupos humanos estuvieron expuestos a la radiación por diversas razones y en diversas circunstancias, pero el único grupo anterior al accidente de Chernobil y que mejor verifica los requisitos para un estudio epidemiológico es el de los sobrevivientes a las explosiones nucleares en Hiroshima y Nagasaki, en 1945.

Las bombas nucleares estallaron a gran altura sobre estas dos ciudades japonesas; la radiación provino casi totalmente de la explosión, siendo despreciable la cantidad inhalada o incorporada con los alimentos. Por lo tanto, varios centenares de miles de personas fueron expuestas, en condiciones prácticamente muy similares, a distintas dosis según la distancia a que se hallaban del centro de la explosión y de acuerdo al blindaje que proporcionara el tipo de vivienda en que se encontraban.

Los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki fueron estudiados sistemáticamente desde el año 1950.

Las estimaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (en inglés, ICRP) del riesgo de cáncer inducido por radiación en el ser humano, se basan en el exceso de mortalidad por leucemia y tumores registrado en estos sobrevivientes. Dado que aproximadamente el 60% de los individuos bajo estudio se encuentran aún hoy con vida, se infiere que todavía queda por registrar una parte substancial de los datos estadísticos correspondientes.

El estudio debió tomar en cuenta numerosos factores. Por ejemplo, la probabilidad que una dosis dada de radiación provoque cáncer depende, entre otras cosas, de la edad del individuo expuesto, de su sexo y de sus características genéticas; asimismo, el riesgo es diferente según sea el tipo de cáncer que se considere. El estudio, por ende, debió contemplar una subdivisión de la población total de sobrevivientes en grupos, reduciéndose así el número de individuos en cada grupo y —consecuentemente— la representatividad estadística de los mismos.

Otro aspecto que debió considerar el estudio fue la evaluación de las dosis de radiación recibidas por los sobrevivientes; cierto material importante reunido por expertos japoneses —por ejemplo, placas fotográficas sin revelar— y que hubiera sido de utilidad en los cálculos dosimétricos, fue destruido o extraviado durante las operaciones militares de ocupación. Los científicos debieron realizar, por lo tanto, una elaborada reconstrucción de los sucesos del año 1945: se erigieron en el desierto de Nevada réplicas de las viviendas típicas que existían en Hiroshima y Nagasaki antes del bombardeo nuclear, y se aprovecharon las explosiones nucleares atmosféricas de prueba, reali-

zadas por el gobierno de EE.UU. en dicho desierto durante la década del sesenta.

El estudio así realizado se conoce con el nombre de T65D (*Tentative 1965 Dosimetry*).

La leucemia contribuye aproximadamente con un sexto al número total de casos de cáncer fatal provocados por la radiación. Los científicos han estado estudiando este tipo de cáncer en la sangre más intensamente que otros, debido a que es el primero en aparecer luego de la exposición a la radiación. En efecto, la leucemia suele manifestarse dos años después de haberse recibido la dosis, en contraste con los aproximadamente quince años requeridos por los otros tipos de cáncer. Por consiguiente, y dado el lapso transcurrido, la mayor parte de los casos de leucemia asociados a las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki deben haberse producido, mientras que los otros tipos de cáncer tienen aún chance de manifestarse mientras existan sobrevivientes del desastre que todavía vivan.

Es interesante destacar que el estudio epidemiológico reveló, en cuanto a los casos de leucemia, una marcada diferencia entre las dos ciudades; al respecto, la Figura 1 muestra la frecuencia de casos de leucemia por año y por millón de personas, en función de la dosis (gamma y neutrones) en médula ósea. Esta diferencia recibió inicialmente una explicación aparentemente satisfactoria: las bombas de Hiroshima y Nagasaki no eran del mismo tipo, y ello implica que las poblaciones correspondientes no estuvieron expuestas igualmente a las dos clases principales de radiación —rayos gamma y neutrones— provenientes de las explosiones. En la

de Hiroshima, una carga de explosivos provoca el desplazamiento rápido de dos porciones subcríticas de uranio-235 ubicadas en los extremos de un cilindro de acero; al reunirse las dos porciones se forma la masa crítica, produciéndose la consiguiente reacción en cadena del material fisil. Este ensamble requiere gran cantidad de hierro, el cual absorbe fácilmente los rayos gamma pero afecta mucho menos a los neutrones. La bomba de Nagasaki, en cambio, se basó en el fenómeno de implosión. Un material explosivo rodea al núcleo de plutonio-239; al activarse el explosivo, se produce la compresión del material fisil, formando así la masa crítica. El hidrógeno contenido en el explosivo no afecta a la radiación gamma, pero contribuye fuertemente a la absorción de neutrones.

Los científicos, por lo tanto, estimaron que había habido más neutrones en la explosión de Hiroshima que en la de Nagasaki. Esto es importante, pues la probabilidad de contraer cáncer, a igualdad de dosis absorbidas, es para neutrones varias veces mayor que para rayos gamma.

Estas consideraciones indicaban entonces que los efectos de la radiación observados en Hiroshima eran debidos predominantemente a neutrones, mientras que los de Nagasaki eran debidos mayormente a rayos gamma. El corolario (ver la Figura 1) es que para neutrones la relación entre dosis e incidencia de cáncer debe ser aproximadamente lineal, mientras que para rayos gamma dicha relación parece ser más bien cuadrática.

Al estimar los factores de riesgo de cáncer en función de la dosis, la ICRP adoptó prudentemente la relación lineal, promediando edades y sexos.

Esta era la situación cuando, en 1980, W. Loewe y E. Mendelsohn del Lawrence Livermore National Laboratory (California, EE.UU.) publicaron un informe donde se critica severamente el modelo dosimétrico T65D. Una de las fallas más relevantes, señalan en dicho informe los dos investigadores, radica en que no se tuvo en cuenta la humedad del aire y la consiguiente absorción de neutrones; en el desierto de Nevada, donde se efectuó la reconstrucción antes aludida, el aire es mucho más seco que el de Hiroshima cuando ocurre la explosión. El mayor mérito que tuvo este nuevo análisis de la situación fue sin duda la conclusión de que, en ambas ciudades, la contribución de los neutrones fue casi diez veces menos que la inicialmente estimada por el modelo T65D.

Una comisión especial, denominada "US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki"¹ inició la tarea de revisión del modelo dosimétrico en 1981. A mediados de 1987, se publicó el informe final conteniendo el nuevo modelo dosimétrico denominado DS86 (Dosimetry System 1986). El modelo DS86 incorpora los resultados de cálculos teóricos basados en modelos computacionales, así como datos experimentales obtenidos con nuevas técnicas tales como la termoluminiscencia, la cual aprovecha los cambios inducidos por la radiación en la estructura cristalina de los materiales expuestos a la misma. El nuevo modelo demuestra, además, que las dos explosiones nucleares producen muchos menos neu-

¹en castellano, aproximadamente: "Re-evaluación realizada conjuntamente por Japón y EE.UU. de la Dosimetría de la Radiación derivada de las Bombas Atómicas en Hiroshima y Nagasaki". (N. del T.)

trones de los estimados con la dosimetría anterior.

Los sobrevivientes fueron re-clasificados en grupos conforme a las menores dosis recibidas. Esto se hizo, en particular, con los pobladores de Nagasaki, donde se encontró que la mayor parte de los sobrevivientes se había desplazado a los grupos de menores dosis. De aquí se deriva que una dada dosis de radiación tiene asociado

un mayor riesgo de cáncer que el que se había estimado previamente (ver el Cuadro I).

Asimismo, se comprobó que las diferencias observadas entre las dos ciudades no son estadísticamente significativas, y que la relación entre dosis e incidencia de cáncer puede considerarse esencialmente lineal en el dominio de las dosis bajas◇