



Naciones Unidas

**Informe del Comité Científico
de las Naciones Unidas
para el Estudio de
los Efectos de las Radiaciones Atómicas**

**Asamblea General
Documentos Oficiales
Quincuagésimo quinto período de sesiones
Suplemento N° 46 (A/55/46)**

Asamblea General
Documentos Oficiales
Quincuagésimo quinto período de sesiones
Suplemento N° 46 (A/55/46)

**Informe del Comité Científico de las Naciones
Unidas para el Estudio de los Efectos de las
Radiaciones Atómicas**



Naciones Unidas • Nueva York, 2000

Nota

Las firmas de los documentos de las Naciones Unidas se componen de letras mayúsculas y cifras. La mención de una de tales firmas indica que se hace referencia a un documento de las Naciones Unidas.

Índice

	<i>Párrafos</i>	<i>Página</i>
I. Introducción	1-7	1
II. Presentación general	8-19	2
A. Los efectos de la exposición a radiaciones	8-10	2
B. Niveles de exposición	11-17	2
C. Las consecuencias radiológicas del accidente de Chernobil.....	18-19	3
III. Fuentes de exposición a radiación	20-49	4
A. Exposiciones a radiación natural	24-26	4
B. Exposiciones en el medio ambiente por causas humanas	27-37	5
C. Exposición a radiación médica	38-41	7
D. Exposición a radiación en el trabajo	42-45	8
E. Comparación de niveles de exposición	46-49	9
IV. Cáncer vinculado a la radiación	50-88	10
A. Efectos radiobiológicos tras bajas dosis de radiación	54-67	11
B. Efectos combinados	68-72	13
C. Epidemiología del cáncer	73-88	14
V. El accidente de Chernobil	89-105	17
A. Liberación de radionucleidos	92-94	18
B. Exposición de las personas a radiación	95-98	19
C. Consecuencias de salud	99-105	19
 Anexos		
I. Miembros de las delegaciones nacionales que asistieron a los períodos de Sesiones 44° a 49°		22
II. Lista de personal científico y consultores que han colaborado con el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas en la preparación del presente informe		24

Capítulo I

Introducción

1. Durante los últimos años, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas¹ ha examinado a fondo las fuentes y los efectos de las radiaciones ionizantes. En el presente informe², el Comité, basándose en las principales conclusiones de sus evaluaciones científicas, resume la evolución de las ciencias de las radiaciones en los años previos a nuevo milenio.

2. El presente informe y sus anexos científicos fueron preparados entre los períodos de sesiones 44° y 49° del Comité. Los siguientes miembros del Comité desempeñaron la función de Presidente, Vicepresidente y Relator, respectivamente, en los períodos de sesiones que se indican: 44° y 45°: L. Pinillos-Ashton (Perú), A. Kaul (Alemania) y G. Bengtsson (Suecia); 46° y 47°: A. Kaul (Alemania), L.-E. Holm (Suecia) y J. Lipsztein (Brasil); y 48° y 49°, L.-E. Holm (Suecia), J. Lipsztein (Brasil) y Y. Sasaki (Japón). Los nombres de los miembros de las delegaciones nacionales que asistieron a los períodos de sesiones 44° a 49° del Comité figuran en el apéndice I.

3. El Comité desea agradecer la asistencia y el asesoramiento de un grupo de consultores y colaboradores que han contribuido a la preparación de los anexos científicos (véase el apéndice II). Asistieron a los períodos de sesiones del Comité representantes de la Organización Mundial de la Salud y del Organismo Internacional de Energía Atómica. También estuvieron representadas la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas y la Comisión Internacional de Protección Radiológica. El Comité desea también agradecerles su contribución a las deliberaciones.

4. En el ejercicio de su labor, el Comité aplicó su criterio científico al material examinado y se esforzó por adoptar una postura independiente y neutral en sus conclusiones. Los resultados de su labor se presentan al lector no especializado en este informe destinado a la Asamblea General. Los anexos científicos que lo acompañan y que se publican conjuntamente con el informe como publicación de las Naciones Unidas destinada a la venta, titulada "*Sources and Effects of*

Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes", se han preparado para la comunidad científica en general.

5. El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, comité científico de la Asamblea General, es el órgano del sistema de las Naciones Unidas encargado de evaluar y dar a conocer los efectos de la exposición a radiaciones ionizantes. El hecho de que el Comité haya recibido este mandato concreto de un órgano de tanta autoridad incrementa notablemente su capacidad para prestar al mundo un servicio eficaz e independiente. Las Naciones Unidas, a través de la Asamblea, pueden atribuirse el mérito de prestar ese servicio. La información proporcionada por el Comité ayuda a la Asamblea General a adoptar recomendaciones, en particular sobre la colaboración internacional en cuestiones sanitarias, el desarrollo sostenible y, en cierto grado, el mantenimiento de la paz y la seguridad internacionales.

6. Continuamente van surgiendo nuevos problemas en relación con los niveles globales de exposición a radiación y se va disponiendo de nueva información biológica sobre los efectos de la exposición a la radiación. Por ejemplo, se han acumulado grandes cantidades de desechos radiactivos a consecuencia de la utilización de energía nuclear con fines pacíficos y de operaciones nucleares de carácter militar, y se han abandonado las fuentes de radiación utilizadas en operaciones militares y pacíficas, creando una situación propicia para el tráfico ilícito y otras actividades delictivas. Además, los riesgos potenciales de la exposición a bajos niveles de radiación, es decir la exposición a radiaciones de niveles comparables a radiaciones naturales de fondo, son objeto de intensos debates y controversias. El Comité responde y seguirá respondiendo a esos problemas con nuevas iniciativas que se incluirán en sus futuras evaluaciones de las fuentes, los niveles y los efectos de las radiaciones.

7. Gobiernos y organizaciones de todo el mundo se guían por las evaluaciones que hace el Comité de las fuentes y de los efectos de la radiación como base científica para estimar los riesgos de radiación, establecer normas de protección radiológica de seguridad

y regular las fuentes de radiación. En el sistema de las Naciones Unidas, esas estimaciones son utilizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica para cumplir su mandato de establecer normas para la protección radiológica de la salud y prever su aplicación. El Comité propone un programa de trabajo renovado para cumplir sus obligaciones con la Asamblea General.

Capítulo II

Presentación general

A. Los efectos de la exposición a radiaciones

8. La exposición a radiaciones puede dañar las células vivas, causando su muerte o modificándolas. La mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo no se ven afectados por la pérdida de células, incluso en cantidades considerables. Sin embargo, si el número de células perdidas es lo suficientemente grande, se observarán daños en los órganos que podrán causar la muerte. Estos daños se producirán en las personas que hayan estado expuestas a niveles de radiación superiores a un determinado límite. Las radiaciones también pueden causar la modificación de las células. En general estos daños pueden repararse, pero si la reparación no es perfecta, la modificación resultante se transmitirá a más células y podrá producirse cáncer. Si las células modificadas son las que transmiten información hereditaria a los descendientes de las personas afectadas, pueden producirse trastornos hereditarios.

9. La exposición a radiaciones se ha asociado con la mayoría de formas de leucemia y con cánceres de muchos órganos, como los pulmones, las glándulas mamarias y el tiroides, pero no con otros órganos como la próstata. No obstante, con una pequeña exposición adicional a radiaciones (por ejemplo, del orden de la exposición media mundial a radiaciones naturales) habría un aumento ínfimo de las probabilidades de cáncer. Además, el cáncer inducido por radiaciones puede manifestarse varios decenios después de la exposición y no difiere de los cánceres que aparecen espontáneamente o que son imputables a otros factores. La evaluación

más importante que se ha hecho a largo plazo de poblaciones expuestas a radiación es el estudio de los supervivientes (unos 86.500) de las bombas atómicas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki, en el Japón. El estudio ha revelado que entre la población estudiada se habían producido varios centenares más de muertes por cáncer que en condiciones normales. Dado que aproximadamente la mitad de esa población vive todavía, es necesario realizar un estudio suplementario para observar la evolución completa de los casos de cáncer en el grupo.

10. La exposición a radiación también puede causar efectos hereditarios en la descendencia de las personas expuestas. Anteriormente se pensaba que esos efectos podían representar una amenaza para el futuro de la raza humana al incrementar de forma inapropiada la tasa de mutaciones naturales. Sin embargo, todavía no se han detectado efectos hereditarios inducidos por radiaciones en las poblaciones humanas que han estado expuestas, si bien es sabido que el fenómeno afecta a otras especies. El Comité está preparando un informe general sobre los efectos hereditarios de la exposición a radiación que se presentará a la Asamblea General en su quincuagésimo sexto período de sesiones.

B. Niveles de exposición a radiación

11. Todo el mundo está expuesto a radiación natural. Las fuentes naturales de radiación son los rayos cósmicos y las sustancias radiactivas que se presentan en la naturaleza del planeta y en el cuerpo humano. Una contribución notable a la exposición natural de los seres humanos es la del gas radón que emana del suelo y que puede concentrarse en las viviendas. El nivel de exposición natural varía según los lugares del planeta llegando en función de un factor 3. Sin embargo, en muchos lugares los niveles habituales de exposición a radiación natural son diez veces superiores a los niveles medios y a veces el factor es incluso de 100.

12. Las actividades humanas en las que se utilizan radiaciones y sustancias radiactivas causan una exposición suplementaria a radiación, además de la exposición natural. Algunas de estas actividades simplemente incrementan la exposición a fuentes de

radiación natural. Cabe citar como ejemplos la minería y la utilización de minerales que contienen sustancias naturalmente radiactivas y la producción de energía mediante la combustión de carbón que contiene tales sustancias. La contaminación del medio ambiente con residuos radiactivos resultantes de ensayos con armas nucleares continúa siendo una fuente global de exposición de las personas a radiación. La producción de materiales nucleares con fines militares ha dejado tras sí grandes cantidades de residuos radiactivos en muchas partes del mundo. Las centrales nucleoelectricas y otras instalaciones nucleares liberan materiales radiactivos que pasan al medio ambiente y producen desechos radiactivos mientras se explotan o cuando se ponen fuera de servicio. La utilización de materiales radiactivos en la industria, la agricultura y la investigación se extiende cada vez más en el mundo y la población ha sufrido las consecuencias de la mala utilización de fuentes de radiación.

13. Estas actividades humanas suelen causar exposición a radiación que sólo representan una pequeña fracción del nivel global medio de exposición natural. No obstante, las personas que residen cerca de instalaciones que liberan material radiactivo pueden estar expuestas a mayores radiaciones. La exposición de las personas a las radiaciones reguladas está restringida por unos límites internacionalmente reconocidos, que se han fijado a un nivel ligeramente inferior al nivel global medio de exposición natural. Cabe señalar que si algunos de los lugares con altos niveles de residuos radiactivos están habitados o vuelven a estarlo, los residentes pueden resultar expuestos a radiaciones superiores al nivel global medio de exposición natural.

14. La utilización médica de la radiación es la principal fuente artificial de exposición a radiación, cada vez más frecuente, que incluye la radiología de diagnóstico, la radioterapia, la medicina nuclear y la radiología de intervención. Son aún numerosas las poblaciones, particularmente de países en desarrollo, que no pueden beneficiarse de muchos de esos procedimientos médicos por no estar disponibles en todo el mundo. Por consiguiente, esas personas están de momento menos expuestas a las radiaciones con fines de diagnóstico y tratamiento médico que las personas que viven en países con procedimientos médicos más avanzados, una

situación que previsiblemente cambiará en el futuro y que el Comité deberá seguir atentamente.

15. Los niveles medios de exposición a radiación debido a las aplicaciones médicas de la radiación en países desarrollados equivalen aproximadamente al 50% del nivel global medio de exposición natural. En esos países las tomografías por computadora representan sólo un bajo porcentaje de los procedimientos pero al mismo tiempo casi la mitad de las exposiciones con fines de diagnóstico médico. Se han producido graves lesiones causadas por radiaciones a causa de la deficiente aplicación de algunas técnicas de intervención (como procedimientos radiológicos para vigilar la dilatación de las arterias coronarias) y de radioterapia.

16. La exposición a radiación afecta también a las personas en sus actividades laborales, por ejemplo, a los trabajadores en la industria, en la medicina y en la investigación cuando se utilizan radiaciones o sustancias radiactivas, y a los pasajeros y tripulaciones de aviones durante los vuelos. Las radiaciones afectan mucho a los astronautas.

17. En general, el nivel medio de exposición en el trabajo es similar al nivel global medio de exposición a radiación natural. No obstante, un bajo porcentaje de trabajadores están expuestos a un nivel de radiación varias veces superior a la exposición natural media. La exposición de los trabajadores a radiación está sujeta a límites internacionalmente reconocidos, que corresponden a un nivel aproximadamente diez veces superior a la exposición media a radiación natural.

C. Las consecuencias radiológicas del accidente de Chernobil

18. El accidente de la central nucleoelectrica de Chernobil fue el accidente más grave con exposición a radiación, a consecuencia de la cual fallecieron en pocos días o semanas 30 trabajadores y sufrieron lesiones de radiación más de 100 trabajadores. A raíz del accidente, en 1986, fueron evacuadas de inmediato unas 116.000 personas de las cercanías del reactor y después de 1986 se trasladaron permanentemente a otros lugares unas 220.000 personas de Belarús, la Federación de

Rusia y Ucrania. El accidente causó asimismo graves trastornos sociales y psicológicos en las vidas de las personas afectadas y enormes pérdidas económicas en toda la región. Amplias zonas de los tres países quedaron contaminadas y en todos los países del hemisferio norte pudo detectarse la deposición de radionucleidos liberados en el accidente.

19. Se han registrado unos 1.800 casos de cáncer de tiroides en niños que estuvieron expuestos en el momento del accidente y, si se mantiene la tendencia, puede haber más casos durante los próximos decenios. Exceptuando este incremento, 14 años después del accidente no existen pruebas de que haya habido importantes consecuencias de salud negativas imputables a la exposición a la radiación. No existen pruebas científicas que corroboren el aumento de la incidencia general de cáncer o de la mortalidad por esta causa o de trastornos no malignos relacionados con la exposición a radiación. El riesgo de leucemia, uno de los principales problemas debido al breve plazo en que puede estar latente, no parece muy alto, ni siquiera entre los trabajadores que intervinieron después del accidente. Si bien esas personas tan expuestas corren un mayor riesgo de sufrir los efectos asociados a la radiación, es improbable que la mayoría de la población experimente graves problemas de salud a consecuencia de la radiación provocada por el accidente de Chernobil.

Capítulo III

Fuentes de exposición a radiación

20. La radiación ionizante consiste en ondas y partículas electromagnéticas que pueden ionizar, es decir, separar un electrón de un átomo o molécula del medio por el que se propagan. La radiación ionizante puede emitirse en el proceso de degradación natural de algunos núcleos inestables o tras el estímulo de átomos y de sus núcleos en reactores nucleares, ciclotrones, máquinas de rayos X u otros instrumentos. Por razones históricas, el fotón, como componente (electromagnético) de la radiación ionizante emitida por el núcleo estimulado se conoce como rayos gamma y el emitido por las máquinas corresponde a los rayos X. Las partículas cargadas

emitidas desde el núcleo se conocen como partículas alfa (núcleos de helio) y partículas beta (electrones).

21. El proceso de ionización en materia viva modifica necesariamente los átomos y las moléculas, al menos transitoriamente, y puede así dañar las células. Si los daños celulares no se reparan adecuadamente, pueden impedir que la célula sobreviva, se reproduzca o desempeñe sus funciones normales. También puede ocurrir que las células sean modificadas pero resulten viables.

22. La cantidad básica utilizada para expresar la exposición de materia como la del cuerpo humano es la dosis absorbida, que se mide por la unidad denominada gray (Gy). Sin embargo, los efectos biológicos por unidad de dosis absorbida varían con el tipo de radiación y con la parte del cuerpo expuesta. A fin de tener en cuenta esas variaciones se utiliza una cantidad ponderada que se denomina dosis eficaz y que se mide por la unidad llamada sievert (Sv). Al informar sobre los niveles de exposición humana, el Comité suele utilizar la dosis eficaz. En el presente informe, la dosis absorbida y la dosis eficaz suelen denominarse simplemente "dosis", que se diferencian debidamente con las unidades. Las fuentes radiactivas se describen por su actividad, que es el número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo. La unidad de actividad es el becquerel (Bq). Un becquerel corresponde a una desintegración por segundo.

23. A fin de evaluar los efectos de la exposición de un grupo demográfico definido, puede utilizarse la suma de todas las dosis adquiridas por los miembros del grupo, que se denomina "dosis colectiva" (en unidades de Sv-hombre). El valor de la dosis colectiva dividido por el número de personas del grupo demográfico expuesto es la dosis *per capita*, en Sv. Los procedimientos generales empleados por el Comité para evaluar las dosis de radiación se presentan en el anexo A de este informe, titulado "*Dose assesment methodologies*".

A. Exposiciones a radiación natural

24. Todos los organismos vivos están continuamente expuestos a radiación ionizante, que siempre ha existido en la naturaleza. Las fuentes de esa exposición son los

rayos cósmicos que provienen del espacio ultraterrestre y de la superficie del Sol, los radionucleidos terrestres que existen en la corteza de la Tierra, en materiales de construcción y en el aire, en el agua y en los alimentos, así como en el propio cuerpo humano. Algunas de las exposiciones son relativamente constantes y uniformes para todas las personas en todas partes, por ejemplo, la dosis de ingestión de potasio-40 en alimentos. Otras exposiciones varían ampliamente de un lugar a otro. Los rayos cósmicos, por ejemplo, son más intensos a grandes altitudes y las concentraciones de uranio y torio en los suelos son elevadas en determinadas zonas. Los grados de exposición pueden también variar a consecuencia de las actividades y prácticas humanas. En particular, los materiales de construcción de las casas y el diseño de los sistemas de ventilación tienen una gran influencia en los niveles de gas radiactivo radón y de sus productos de descomposición en las casas, que contribuyen notablemente a las dosis mediante inhalación.

25. En el presente informe se han reevaluado los componentes de las exposiciones resultantes de fuentes de radiación natural sobre la base de nuevos datos e información sobre mediciones y análisis de los procesos concretos. Los resultados se presentan en el anexo B, titulado “*Exposures from natural radiation sources*”. Se han sumado los componentes de exposición para determinar el nivel estimado de exposición global media. La exposición global media no corresponde a la de ninguna persona, ya que hay amplias distribuciones de las exposiciones de cada fuente y las consiguientes dosis eficaces se combinan de diversos modos en cada lugar, en función de la concentración específica de radionucleidos en el medio ambiente y en el cuerpo, así como de la latitud y altitud y de muchos otros factores.

26. La dosis eficaz anual *per capita* en todo el mundo se obtiene sumando los diversos componentes, resumidos en el cuadro 1. La dosis eficaz anual *per capita* en todo el mundo debida a fuentes de radiación natural es de 2,4 mSv. No obstante, la gama de dosis individuales es muy variada. En cualquier gran población se calcula que un 65% de las personas tendrían dosis eficaces anuales entre 1 y 3 mSv, alrededor del 25% de la población tendría dosis eficaces anuales de menos de 1 mSv y el 10% tendría dosis eficaces anuales superiores a 3mSv.

Cuadro 1

Dosis media de radiación de fuentes naturales (en miliSv)

Fuentes	Dosis eficaz	
	anual media en todo el mundo	Margen habitual
Exposición externa		
Rayos cósmicos	0,4	0,3-1,0 ^a
Rayos gamma terrestres	0,5	0,3-0,6 ^b
Exposición interna		
Inhalación (principalmente radón)	1,2	0,2-10 ^c
Ingestión	0,3	0,2-0,8 ^d
Total	2,4	1-10

^a Margen habitual desde el nivel del mar hasta mayores altitudes.

^b Según la composición en radionucleidos del suelo y de los materiales de construcción.

^c Según la acumulación de gas radón en las casas.

^d Según la composición en radionucleidos de los alimentos y del agua potable.

B. Exposiciones en el medio ambiente por causas humanas

27. En varias actividades, prácticas y acontecimientos en que intervenían fuentes de radiación ha habido liberación de materiales radiactivos en el medio ambiente y poblaciones humanas han quedado expuestas a esos materiales. En el anexo C del presente informe, titulado “*Exposures to the public from man-made sources of radiation*”, se presenta una evaluación de las exposiciones que se han producido. La principal causa humana de exposición de la población mundial han sido las pruebas de armas nucleares realizadas en la atmósfera entre 1945 y 1980. En cada ensayo nuclear se liberaban en el medio ambiente cantidades sustanciales de materiales radiactivos que se dispersaban ampliamente en la atmósfera y caían en todos los puntos de la superficie de la Tierra.

28. El Comité ha prestado especial atención a la evaluación de las dosis de explosiones nucleares en la atmósfera. En el informe de 1982 del Comité se evaluó la dosis eficaz colectiva en todo el mundo derivada de esa práctica mediante numerosas mediciones de la deposición mundial de Sr⁹⁰ Cs¹³⁷ y de la incidencia de esos radionucleidos y otros radionucleidos del mismo

origen en la dieta y en el cuerpo humano en el momento en que se realizaron los ensayos nucleares.

29. Se ha obtenido nueva información sobre el número de ensayos nucleares y sus efectos. Anteriormente, los países que realizaban los ensayos no revelaban esos datos por razones militares. En el presente informe (véase el anexo C) figura una lista actualizada de los ensayos nucleares atmosféricos llevadas a cabo en cada uno de los lugares de prueba. Si bien se han divulgado todos los resultados de las explosiones de cada ensayo, siguen ocultándose casi todos los datos sobre fisión y fusión. Se han adoptado algunas hipótesis generales para posibilitar la mención de los datos de fisión y fusión de cada ensayo a fin de poder evaluar las cantidades de radionucleidos producidos en las explosiones. El total estimado de productos de fisión de los distintos ensayos coincide con la deposición mundial de los principales radionucleidos de fisión Sr^{90} y Cs^{137} registradas por las redes mundiales de vigilancia.

30. Con estimaciones mejoradas de la producción de cada radionucleido en la diversas pruebas y utilizado un modelo de transporte atmosférico empírico, es posible determinar la evolución en el tiempo de la dispersión y deposición de radionucleidos y estimar las dosis anuales de diversas trayectorias en cada hemisferio. De este modo se ha calculado que la dosis eficaz media anual en todo el mundo alcanzó un nivel máximo de $150 \mu\text{Sv}$ en 1963 y desde entonces ha disminuido a un nivel de $5 \mu\text{Sv}$ en 2000 de radionucleidos residuales en el medio ambiente, principalmente C^{14} , Sr^{90} y Cs^{137} . En el hemisferio norte, donde se efectuaron la mayoría de los ensayos las dosis anuales medias son un 10% superiores a las registradas en el hemisferio sur. Si bien había una preocupación considerable en la época en que se realizaron los ensayos, las dosis anuales siguieron siendo relativamente bajas, alcanzando a lo sumo un 7% del nivel de fondo de las fuentes de radiación natural.

31. Utilizando la información disponible también se han evaluado los niveles de exposición de las poblaciones locales en los alrededores de los lugares en que se efectuaron los ensayos. Los datos aún no son suficientemente detallados para documentar los niveles de exposición con gran precisión. En los primeros años en que se aplicaron los programas de ensayos no se

prestó gran atención a las condiciones locales ni a las posibilidades de exposición. Sin embargo, con los esfuerzos de reconstrucción de dosis se trata de aclarar esa experiencia y de documentar los niveles de exposición locales y regionales y las dosis que se registraron.

32. Los ensayos subterráneos sólo causaban exposición más allá de los emplazamientos si se filtraban o evacuaban gases radiactivos. La mayoría de los ensayos subterráneos habían dado resultados muy interiores a los ensayos atmosféricos y en general era posible contener los residuos. Entre 1962 y 1990 se realizaron 50 o más ensayos subterráneos por año. Si bien la mayoría de los países están dispuestos a aceptar que se prohíba la realización de más ensayos, tanto atmosféricos como subterráneos, aún no ha entrado en vigor el Tratado de prohibición completa de los ensayos nucleares (véase la resolución 50/245 de la Asamblea General). Se han efectuado más ensayos subterráneos, por lo que no puede afirmarse que la práctica haya desaparecido.

33. En la época en que se constituían los arsenales de armas nucleares, especialmente en los primeros años (1945-1960), se liberaron radionucleidos que pasaron a la atmósfera con la consiguiente exposición de las poblaciones locales que se encontraban río abajo o a la merced del viento procedente de instalaciones nucleares. Dado que se conocían poco los potenciales de exposición y la vigilancia de los radionucleidos liberados era limitada, la evaluación debe basarse en la reconstrucción de las dosis. Todavía se están obteniendo resultados que documentan la experiencia. Las prácticas han mejorado enormemente y los arsenales se están reduciendo. Las exposiciones del ciclo del combustible militar han disminuido a niveles muy bajos.

34. Una práctica continua es la generación de energía eléctrica mediante reactores nucleares. Suponiendo que esta práctica dure 100 años, la dosis colectiva máxima puede deducirse de las dosis acumuladas durante el período de práctica. La cifra truncada y normalizada de 100 años es de 6 Sv-hombre por gigavatio anual. Suponiendo que la actual generación anual de 250 gigavatios anuales continúe, la dosis colectiva truncada por año de práctica es de 1.500 Sv-hombre para

la población mundial, lo cual da una dosis *per capita* máxima estimada de menos 0,2 μSv por año.

35. Salvo en el caso de accidentes o de emplazamientos en que se acumulan residuos, donde pueden registrarse notables niveles locales de contaminación, no existen otras prácticas que causen importantes exposiciones o radionucleidos expulsados al medio ambiente. Se están revisando las estimaciones de liberaciones de isótopos producidos y utilizados en aplicaciones industriales y médicas, pero en esos casos no se producen, al parecer, más que exposiciones de escasa importancia. A medida que se adquiere experiencia, pueden revisarse las posibles prácticas futuras, como el desmantelamiento de armas, la puesta fuera de servicio de instalaciones y los proyectos de gestión de residuos, pero esas prácticas apenas deberían provocar la liberación de radionucleidos y sólo en dosis despreciables. Con respecto a las prácticas médicas, las dosis individuales máximas que pueden recibir los familiares que vivan en contacto con pacientes sometidos a tratamientos de I^{131} son de unos 0,5 μSv .

36. Cuando se producen accidentes, la contaminación del medio ambiente y el nivel de exposición de las personas pueden ser importantes. El accidente de la central de Chernobil fue un ejemplo notable. Los niveles de exposición fueron máximos en las zonas situadas en los alrededores del reactor, pero pudieron detectarse niveles inferiores de exposición en la región europea y en todo el hemisferio norte. Durante el primer año posterior al accidente, las máximas dosis medias anuales entre las regiones europeas fuera de la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas fueron inferiores al 50% de la dosis natural de fondo. Los niveles subsiguientes disminuyeron con rapidez. Se están investigando las dosis superiores y las posibles consecuencias del accidente para la salud de las personas de la región.

37. Varias industrias procesan o utilizan grandes volúmenes de materias primas que contienen radionucleidos naturales. Los residuos de estas plantas industriales, que pasan al aire o al agua, y la utilización de productos secundarios y de materias residuales pueden contribuir a una mayor exposición de la población en general. Los niveles máximos de

exposición estimados son los derivados de la producción de ácido fosfórico, los de las industrias de elaboración de arena mineral y los de las centrales eléctricas que utilizan carbón. Si bien los habitantes de las cercanías podían recibir dosis anuales de unos 100 μSv , las dosis oscilaban generalmente entre 1 y 10 μSv .

C. Exposición a radiación médica

38. La utilización de radiación ionizante para fines de diagnóstico y terapia en la medicina es una práctica muy extendida en todo el mundo. La práctica de radiología médica y los recursos disponibles para ese fin varían notablemente de un país a otro. En general, la exposición de origen médico se limita a la parte anatómica afectada y tiene fines clínicos específicos consistentes en beneficiar directamente a la persona examinada o tratada. Los niveles de exposición a que están sujetos los pacientes a los que se hace un diagnóstico son relativamente bajos (las dosis eficaces suelen oscilar entre 0,1 y 10 mSv) y en principio son suficientes para obtener la información clínica requerida. En el cuadro 2 se presentan las dosis *per capita* resultantes para las poblaciones. En cambio, las exposiciones con fines terapéuticos suponen dosis mucho más altas que se aplican precisamente a los tumores (las dosis prescritas suelen oscilar entre 20 y 60 Gy) con el fin de erradicar una enfermedad (principalmente el cáncer) o de aliviar los síntomas. En algunos casos poco numerosos se expone a radiación a voluntarios con fines de diagnóstico o terapéuticos en el marco de estudios controlados de investigación. La radiología médica se practica de forma sistemática y muy raras veces se producen accidentes de radiación.

39. El Comité ha evaluado los niveles de exposición en procedimientos médicos de radiación sobre la base de información obtenida de cuestionarios repartidos entre todos los Estados Miembros. Se han distinguido cuatro niveles de atención sanitaria en función del número de médicos disponible por un determinado número de habitantes de los países. Estas categorías van desde un médico por cada 1.000 habitantes en el nivel máximo (nivel I de atención sanitaria) hasta un médico para más de 10.000 habitantes (nivel de atención sanitaria IV). Se

ha hecho el promedio de los datos disponibles a fin de obtener frecuencias representativas de procedimientos o de exposición en los países en cada nivel. A continuación en el cuadro 2 se han extrapolado los datos a la población de todos los países en cada nivel y a la población total del mundo. Los resultados detallados de la evaluación del Comité figuran en el anexo D, titulado “*Medical radiation exposures*”.

Cuadro 2

Exposiciones a radiación en exámenes médicos con rayos X con fines de diagnóstico

Nivel de atención sanitaria	Número de habitantes por médico	Número anual de exámenes médicos por cada 1.000 habitantes	Dosis eficaz media anual de la población (miliSv)
I	Menos de 1.000	920	1,2
II	1.000-3.000	150	0,14
III	3.000-10.000	20	0,02
IV	Más de 10.000	Menos de 20	Menos de 0,02
Promedio mundial		330	0,4

40. Las tendencias temporales registradas en las estimaciones del número de procedimientos de radiología médica realizadas en los distintos estudios del Comité reflejan un aumento constante. Cabe esperar un mayor aumento de la utilización de radiaciones con fines médicos y de las dosis resultantes a medida que evolucionen las pautas de atención sanitaria facilitadas por los adelantos tecnológicos y la evolución económica. Por ejemplo, es probable que aumente la utilización de rayos X y que, en particular, adquieran una mayor importancia la tomografía computadorizada y los procedimientos de intervención. En las prácticas de medicina nuclear destacará la utilización de radio fármacos nuevos y más específicos para el diagnóstico y la terapia y habrá una mayor demanda de radioterapia debido al envejecimiento de la población. Además, cabe esperar que aumente la utilización de la radiología médica en los países en desarrollo que actualmente aún carecen, en algunos casos, de las instalaciones y los servicios necesarios.

41. En consecuencia, es necesario que el Comité realice nuevos estudios de autoridad sobre las prácticas mundiales, recopilando sistemáticamente los datos sobre los nuevos estudios nacionales, en particular de regiones en que escaseen los conocimientos e investigando modelos mejorados para poder presentar evaluaciones más precisas de los niveles de exposición en el mundo. Esta importante tarea ayudará a vigilar los niveles y tendencias de las dosis y la rápida evolución de la importante práctica de la radiología médica y a informar al respecto, y también fomentará evaluaciones y exámenes críticos de las prácticas seguidas por unos y otros países.

D. Exposición a radiación en el trabajo

42. Hay una serie de ocupaciones en que los trabajadores se ven expuestos a fuentes artificiales de radiación, como en las instalaciones nucleares o en las clínicas médicas, mientras que otros trabajadores están expuestos a mayores niveles de radiación natural. El Comité utiliza la expresión “exposición en el trabajo” para definir las exposiciones que son consecuencia directa del trabajo realizado. Los niveles de exposición a radiación en el trabajo han sido evaluados a partir de los datos presentados al Comité por las autoridades nacionales en los cuestionarios. Los datos resumidos en el anexo E, titulado “*Occupational radiation exposures*”, son muy amplios. Se indican los promedios quinquenales para diversas ocupaciones de 1975 a 1994. Se presta la máxima atención a la exposición a fuentes artificiales; los países suelen registrar esos datos con fines de reglamentación. Si se necesita el nivel medio de exposición de los trabajadores, se considera que el número de trabajadores corresponde al número de trabajadores estudiados.

43. Las estimaciones de los niveles de exposición a radiación en el trabajo ofrecidas en el presente informe se han beneficiado de una base de datos mucho más amplia y completa que la que anteriormente tuvo a su disposición el Comité. Los esfuerzos de los países por registrar y mejorar los datos dosimétricos se reflejaban en las respuestas dadas al estudio del Comité sobre la exposición a radiación en el trabajo y han permitido

mejorar las estimaciones de las dosis recibidas en el trabajo.

44. La estimación que hace actualmente el Comité de la dosis eficaz colectiva recibida por trabajadores de todo el mundo por los trabajadores de fuentes artificiales a principios del decenio de 1990 (2.700 Sv-hombre) es aproximadamente un 2% inferior a la que hizo el Comité para fines del decenio de 1970. La reducción se debe en gran parte al ciclo del combustible nuclear, en particular a la extracción de uranio. No obstante, las reducciones se observan en todas las categorías principales: los usos industriales, los usos médicos, las actividades de defensa y la educación. Esta tendencia se refleja también en la dosis eficaz anual media en todo el mundo, que ha pasado de aproximadamente 1,9 a 0,6 mSv. En el cuadro 3 figuran las dosis anuales medias recibidas por trabajadores de diversas ocupaciones.

Cuadro 3
Exposición a radiación en el trabajo

<i>Fuente/práctica</i>	<i>Número de trabajadores estudiados (miles)</i>	<i>Dosis eficaz anual media (mSv)</i>
Fuentes artificiales		
Ciclo del combustible nuclear (incluida la extracción de uranio)	800	1,8
Usos industriales de radiación	700	0,5
Actividades de defensa	420	0,2
Uso médico de radiación	2.320	0,3
Educación/veterinaria	360	0,1
Total fuentes artificiales	4.600	0,6
Fuentes naturales aumentadas		
Viajes aéreos (tripulación)	250	3,0
Minería (excepto carbón)	760	2,7
Minería del carbón	3910	0,7
Elaboración de minerales	300	1,0
Lugares de trabajo no subterráneos (radón)	1.250	4,8
Total fuentes naturales	6.500	1,8

45. No se ha intentado deducir ninguna tendencia de las estimaciones de dosis de exposición en el trabajo a

fuentes naturales aumentadas de radiación, ya que los datos en que se basan son en cierto modo limitados. En el informe de 1988 se hizo para esa fuente una estimación aproximada de 20.000 Sv-hombre que posteriormente se revisó a la baja, quedando en 8.600 Sv-hombre en el informe de 1993. La cifra comparable para 1990-1994 es de 5.700 Sv-hombre; sin embargo, se ha añadido, para ese período, un nuevo elemento importante, que es la exposición en el trabajo a niveles elevados de radón y su progenie, con lo cual la estimación global de la dosis colectiva asciende a 11.700 Sv-hombre. Esta cifra tampoco se considera exacta y se requieren datos más precisos. Este es el problema que deberá afrontar el Comité en su próxima evaluación

E. Comparación de niveles de exposición

46. En el cuadro 4 se comparan las dosis de radiación recibidas por la población mundial de las diversas fuentes de exposición. A efectos de comparación cabe referirse a dos cantidades. Para las fuentes que son constantes o que cambian únicamente a raíz de procesos naturales, se utiliza la dosis eficaz *per capita* anual en el mundo. Esa cantidad se utiliza también para las fuentes que emiten todo su potencial en un breve período. Para las fuentes que continúan causando exposición durante largos períodos, es necesario indicar la tendencia en el tiempo. Las cifras indicadas en el cuadro 4 son los promedios de las dosis anuales de la población mundial, que no corresponden necesariamente a las dosis de cada persona. Debido a las considerables variaciones en los niveles de exposición, que dependen de la ubicación, los hábitos personales, la dieta y otros factores, las dosis que reciben las personas difieren.

47. La radiación que más contribuye a la exposición es con mucho la de origen natural. La dosis *per capita* anual es de 2,4 mSv y en circunstancias 'normales puede oscilar entre 1 y 10 mSv. Sin embargo, hay pequeños grupos de personas que pueden estar expuestos a niveles muy superiores. En algunos lugares, el contenido de radionucleidos naturales en el suelo crea altos niveles de exposición externa; estos lugares se conocen como zonas de alta exposición de fondo. Respecto de la

concentración de radón en el aire de las viviendas, la variabilidad es mucho mayor y mucho más generalizada.

48. La segunda fuente más importante de exposición de las personas a radiación en el mundo es la derivada de los procedimientos de radiación médica. Existe una tendencia creciente a este tipo de exposición, que refleja la amplia difusión de los servicios de radiación médica en todo el mundo.

49. Se consideraba que la exposición de la población mundial a los efectos de los ensayos nucleares con explosiones en la atmósfera fue sumamente alta en la época en que se realizaron más ensayos (1958-1962), cuando se tomó conciencia de la envergadura del problema. Con los ensayos se liberaron sin restricciones grandes cantidades de materiales radiactivos que pasaron directamente a la atmósfera. De todos los experimentos o hechos de origen humano, lo que provocaba la mayor liberación de radionucleidos eran las pruebas nucleares en la atmósfera. Las dosis anuales alcanzaron un promedio de 7% de la radiación natural de fondo, registrando su nivel máximo en 1963. Los niveles residuales de los radionucleidos de mayor vida que subsisten en el medio ambiente no contribuyen en gran medida al nivel de exposición anual de la población de todo el mundo.

Cuadro 4

Dosis eficaces anuales *per capita* en 2000 de fuentes naturales y artificiales

<i>Fuente</i>	<i>Dosis eficaz anual per capita en todo el mundo (mSv)</i>	<i>Márgenes de exposición o tendencias</i>
Entorno natural	2,4	Suele oscilar entre 1 y 10 Sv-hombre, en función de las circunstancias y de los lugares concretos, con una parte considerable de la población expuesta a 10-20 mSv.
Exámenes médicos con fines de diagnóstico	0,4	Oscila entre 0,04 y 1,0 mSv en los niveles mínimo y máximo de atención sanitaria.
Ensayos nucleares en la atmósfera	0,005	Ha disminuido desde que alcanzó el nivel máximo de 0,15 mSv en 1963. El nivel de

<i>Fuente</i>	<i>Dosis eficaz anual per capita en todo el mundo (mSv)</i>	<i>Márgenes de exposición o tendencias</i>
Accidente de Chernobil	0,002	exposición es más alto en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. Ha disminuido desde que alcanzó su nivel máximo de 0,04 mSv en 1986 (promedio para el hemisferio norte). El nivel de exposición es mayor en las inmediaciones del lugar del accidente.
Producción nucleoelectrica (véase el párrafo 34)	0,002	Ha aumentado con la expansión del programa, pero ha disminuido con los mejoramientos en la práctica.

Capítulo IV Cáncer vinculado a la radiación

50. La radiación causa daños en las células con las interacciones que provoca. Los daños pueden matar las células o modificarlas afectando al funcionamiento normal de los órganos y tejidos. La mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo no se ven afectados por la pérdida de células, aunque sean muchas. No obstante, si el número de células perdidas es muy grande, el órgano o el tejido presentará daños, que afectarán a todo el organismo. Estos daños sólo se producirán si la dosis de radiación es lo suficientemente grande para matar un gran número de células. Este tipo de daños se produce en todas las personas que reciben dosis críticas por encima del límite pertinente y se denominan daños "deterministas".

51. Si la célula no es destruida sino sólo modificada por la radiación, los daños sufridos por células viables suelen ser reparados. Si la reparación no es perfecta, la modificación se transmitirá a las células que generen las primeras y puede acabar apareciendo cáncer en el tejido u órgano de la persona expuesta. Si se trata de células que transmiten información genética a los descendientes de la persona expuesta, pueden producirse trastornos hereditarios. Estos efectos sufridos por las personas o por

sus descendientes se denominan “estocásticos”, lo cual significa que son fruto del azar.

52. En breve, sólo se producirán efectos deterministas (agudos) si la dosis de radiación es sustancial, como en el caso de accidentes. Los efectos estocásticos (cáncer y efectos hereditarios) pueden producirse a causa de daños en una única célula. A medida que la dosis que recibe el tejido va aumentando desde un nivel bajo, aumentan también las células dañadas y las probabilidades de que ocurran efectos estocásticos.

53. Durante los 45 años en que el Comité ha examinado información sobre los efectos biológicos de la radiación se han producido notables adelantos científicos y se han ampliado los conocimientos sobre el tema. A continuación se resumen los conocimientos actuales de los efectos de la radiación y los principales resultados de las evaluaciones del Comité.

A. Efectos radiobiológicos tras bajas dosis de radiación

54. El Comité ha examinado el amplio tema de los estudios experimentales de los efectos de la radiación en los sistemas celulares y en plantas y animales. Muchos de estos efectos y los factores que los modifican constituyen una base para el conocimiento de los efectos de la radiación humana y pueden a veces evaluarse con mayor detalle que los estudios de seres humanos. Además, actualmente la radiobiología fundamental engloba la radiobiología molecular, que contribuye al conocimiento de los mecanismos de reacción ante la radiación.

55. El principal factor desencadenante de los daños a largo plazo en los órganos y tejidos del cuerpo humano son los daños que causa la radiación al ácido desoxirribonucleico (ADN) en el núcleo. Las rupturas en doble fibra del ADN se consideran las causas más probables de daños críticos. Un simple haz de radiación puede causar rupturas de doble cadena que, de no repararse eficientemente, puede ocasionar daños a largo plazo, incluso con las dosis mínimas. Los daños en otros componentes celulares (cambios epigenéticos) pueden

influir en el funcionamiento de la célula y en su evolución hacia la malignidad.

56. Muchos genes intervienen en la reacción celular ante la radiación, incluidos los que reparan los daños en el ADN y regulan el ciclo celular. La mutación de esos genes produce varios trastornos que dan a las personas sensibilidad a la radiación y predisposición al cáncer. Por ejemplo, es posible que con la mutación de uno de los numerosos genes de control no quede tiempo suficiente para reparar los daños, debido a que la célula, tras la exposición a la radiación, ya no puede retrasar la evolución en el ciclo celular.

57. Las células disponen de una serie de vías bioquímicas que les permiten reconocer y afrontar determinadas formas de daños. Este tema se examina en el anexo F, titulado “*DNA repair and mutagenesis*”. Un gene que desempeña un papel clave es el eliminador de tumores *TP53*, que en más de la mitad de todos los tumores humanos se ha perdido o se ha mutado. La proteína p53 producida por el gene controla la detención del ciclo celular y una vía de apoptosis (la muerte celular programada que sirve para impedir que las células dañadas evolucionen y pasen a la fase de transformación y crecimiento maligno). Algunas de esas vías bioquímicas intervienen también en las reacciones o en los procesos de adaptación con los que se trata de limitar el alcance o las consecuencias de los daños. Aun cuando esos procesos de protección sean activados y funcionen, es evidente que si un daño causado por una radiación no es reparado debidamente hay posibilidades de inducción al cáncer o de enfermedades hereditarias.

58. Los protooncogenes (genes que pueden activarse inadecuadamente y participar en la génesis de tumores) y los genes eliminadores de tumores controlan una compleja gama de vías bioquímicas por las que se producen señales e interacciones celulares, crecimiento, mitogénesis, apoptosis, estabilidad genómica y diferenciación. La mutación de esos genes puede mermar esos controles y contribuir a la aparición de cáncer en varias etapas.

59. La activación de los protooncogenes por trasvase cromosómico se asocia a veces con las fases iniciales de formación de leucemias y linfomas, aunque también hay

pérdida de genes. Para muchos tumores sólidos es indispensable que haya una mutación con pérdida de función de los genes eliminadores de tumores que controlan la proliferación celular en determinados tejidos. La subsiguiente aparición de inestabilidad genómica mediante ulteriores mutaciones en clones de células puede ser un factor decisivo que haga que lo benigno se transforme en maligno. También se considera que la pérdida de control por apoptosis es importante en todo el proceso de génesis de tumores.

60. En el anexo G, titulado “*Biological effects at low radiation doses*”, se examina el proceso de formación de tumores, que tiene lugar en varias fases. Sobre este proceso se desconocen todavía muchos detalles. Si bien el hecho de que las mutaciones secuenciales de los genes y su interacción son la causa principal de la génesis de tumores ya está más demostrado, aún no se comprende del todo la compleja interacción entre esos hechos y las consecuencias del comportamiento celular y de la homeostasis de los tejidos; también existe incertidumbre sobre la contribución a la evolución maligna de fenómenos celulares no debidos a mutaciones (epigenéticos) como la paralización de los genes y los cambios en las comunicaciones celulares.

61. No se dispone de pruebas directas concretas sobre la naturaleza de los factores desencadenantes de los tumores humanos a causa de la radiación y no cabe esperar rápidos progresos al respecto. En cambio, se están haciendo progresos en la solución de los factores anteriores en los tumores de ratones modelo provocados por radiaciones. Estas observaciones moleculares corroboran la opinión expresada en el informe de 1993 de que la génesis de tumores inducida por radiaciones tenderá a avanzar mediante pérdidas relativas a los genes; sin embargo, no habría que descartar que intervinieran en ello hechos epigenéticos previos.

62. Gran parte de la información pone de manifiesto la importancia crucial que tienen en la formación de tumores la reparación del ADN y otras funciones de reacción frente a los daños. Las funciones de reacción ante los daños del ADN determinan que se produzcan hechos iniciales en el proceso de varias etapas y reducen la probabilidad de que un tumor benigno adquiera espontáneamente las mutaciones secundarias necesarias

para volverse plenamente maligno. Así, las mutaciones de los genes de reacción frente a los daños del ADN en los tumores desempeñan un importante papel en la aparición espontánea de inestabilidad genómica.

63. En la reparación de lesiones de la doble cadena del ADN, a veces complejas, pueden ocurrir muchos errores y la reparación es un importante factor determinante de los efectos de la dosis, del porcentaje de dosis y de la calidad de la radiación en las células. Sigue habiendo incertidumbre acerca de la importancia que tienen para la génesis de tumores las reacciones adaptadas a los daños del ADN; aún no se ha caracterizado bien la base mecanicista de esas reacciones, si bien parece probable que haya asociaciones con la inducción de reacciones con tensiones bioquímicas. Los recientes adelantos científicos ponen de manifiesto las diferencias entre el grado de complejidad y reparabilidad de las lesiones del ADN de carácter espontáneo y de las provocadas por radiaciones. Esos datos inducen a pensar que no conviene basar los juicios sobre la respuesta a bajas dosis en comparaciones de la abundancia general de lesiones sino más bien en su naturaleza.

64. Las conclusiones de las investigaciones sobre las reacciones de adaptación a las radiaciones en células y organismos fueron examinadas en el informe de 1994 y a continuación se describe la forma en que normalmente se produce una reacción de adaptación. El fenómeno se ha interpretado como el resultado de una pequeña dosis inicial que activa un mecanismo de reparación que a su vez reduce la reacción ante una ulterior dosis superior (contradosis). Según se observa, la gama de este tipo de dosis es limitada, el plazo para la presentación de la contradosis es crítico y esa contradosis debe ser de magnitud razonable. La reacción varía enormemente entre los distintos donantes de linfocitos. No obstante, se ha observado la respuesta de adaptación en muchos sistemas, incluidos los linfocitos humanos, diversas células de ratones y con algunos agentes químicos como el peróxido de hidrógeno y la bleomicina así como con radiaciones. Sin embargo, no ha habido hasta la fecha ninguna reducción generalmente reproducible de la inducción a la formación de tumores tras una irradiación de bajas dosis.

65. Las premisas básicas de la reacción ante las radiaciones son que toda interacción de la radiación con el ADN produce daños que, de no ser reparados o de ser reparados incorrectamente, pueden desencadenar un proceso de génesis tumoral. La mutación de genes suele modular su expresión, con pérdidas de productos de los genes (proteínas) o alteración de sus propiedades o cantidades. De este modo puede perturbarse el equilibrio bioquímico de la célula, mermando el control del sistema de señales o alterando los mecanismos de proliferación y diferenciación. Así, puede ocurrir que las células mutadas, en vez de ser controladas o eliminadas, evolucionen y crezcan clonalmente. Algunos hechos o daños no mutacionales (epigenéticos) pueden intervenir en esos cambios o contribuir a ellos. En algunos casos se puede desestabilizar el genoma, dejando que se acumulen otras mutaciones, lo cual puede hacer avanzar el proceso de génesis tumoral.

66. La cuestión de si existe un límite del nivel de exposición por debajo del cual no hay reacción biológica puede juzgarse con criterios mecanicistas. Concretamente, es preciso saber si a dosis muy bajas los procesos de reparación son más eficientes y tal vez son fomentados por la reacción de adaptación, impidiendo así que los componentes celulares sufran eventuales daños. Ese límite sólo podría existir si los procesos de reparación fueran totalmente eficaces con ese margen de dosis o si un único haz no pudiera producir efectos. A falta de indicaciones coherentes sobre excepciones notables en el carácter lineal de las reacciones tumorígenas a bajas dosis en los límites de las células (aberraciones cromosómicas, mutación de genes, transformación de células), la actividad de los procesos de reparación de ADN bien caracterizados y con tendencia a los errores y las pruebas sobre la naturaleza de los daños espontáneos en el ADN de las células mamarias desmienten el argumento de que los procesos de adaptación u otros procesos pueden establecer una dosis límite para los efectos de la radiación. Los procesos celulares como la apoptosis y la diferenciación celular que pueden proteger al organismo de fases posteriores de génesis tumoral se consideran eficientes pero pueden eludirse; no existe ningún motivo para creer que esas defensas actúen de modo distinto según si se trata de tumores espontáneos o inducidos por radiaciones o que dependan de las dosis recibidas.

67. Por consiguiente, cabe llegar a la conclusión de que, según consta, la radiación, incluso con bajas dosis, puede provocar mutaciones y la formación de tumores y de que es improbable que las defensas contra ese peligro reaccionen de otro modo con dosis bajas. En general, la reacción contra la formación de tumores no parece pues representar una función compleja del aumento de la dosis. La representación más simple es una relación lineal, que se ajusta a la mayoría de los datos mecanicistas y cuantitativos disponibles. Puede haber reacciones diferentes según los tipos de tumor y es inevitable que haya variaciones en las estadísticas para cada conjunto de datos. Se observan excepciones en la linealidad en los datos correspondientes a la leucemia, para los cuales se utiliza una función lineal-cuadrática. El cáncer de piel y algunos cánceres inducidos por emisores alfa pueden tener límites virtuales. Dado que el proceso de génesis tumoral consta de múltiples etapas, sólo se utilizan funciones lineales o lineales-cuadráticas a efectos de representación al evaluar los posibles riesgos de la radiación. La reacción que realmente se produzca puede suponer múltiples procesos antagónicos pero aún no claramente diferenciables.

B. Efectos combinados

68. Las exposiciones combinadas a radiación y a otros agentes físicos, químicos o biológicos del medio ambiente son una característica de la vida. Las características y los efectos de las exposiciones combinadas se examinan en el anexo H, titulado "*Combined effects of radiation and other agentes*". Si bien los efectos combinados sinérgicos y antagónicos son frecuentes a altas exposiciones, no existen pruebas firmes de que en muchos casos no haya efectos aditivos en las exposiciones controladas en el trabajo o en el medio ambiente. Esto es válido para las consideraciones mecanicistas, los estudios de animales y las evaluaciones basadas en la epidemiología. Por consiguiente, a pesar de la importancia potencial de los efectos combinados, se considera en general que los resultados de las evaluaciones de los efectos de agentes concretos en la salud son aplicables a situaciones de exposición con múltiples agentes.

69. La ausencia de efectos aditivos depende de la especificidad de los agentes para las distintas fases del proceso que lleva a los efectos clínicos. Sin embargo, estos efectos sólo pueden darse en casos en que ambos agentes son responsables de una gran parte de las transiciones totales producidas durante el proceso. Para los agentes que actúan independientemente y con mecanismos y procesos diferentes, se prevé un simple efecto aditivo.

70. Dada la frecuencia de la exposición simultánea al humo del tabaco y al radón, ese efecto combinado reviste especial importancia. El humo del tabaco es una mezcla compleja de agentes químicos y físicos y aún se desconoce el funcionamiento de los mecanismos de interacción. Los datos epidemiológicos indican claramente que la interacción a niveles de exposición intermedios y altos propician efectos más que aditivos en el cáncer de pulmón. Por ejemplo, los estudios mineros del radón corroboran el aumento de los riesgos de la radiación para los fumadores (más que aditivos pero menos que multiplicativos).

71. Con la excepción de la radiación y del humo del tabaco, los datos epidemiológicos no parecen indicar la necesidad de adaptarse a fuertes efectos combinados antagónicos o sinérgicos. La mera falta de datos pertinentes sobre los efectos combinados no permite deducir que no se producen interacciones entre la radiación y otros agentes y que esas interacciones no influyen en el riesgo de radiación a bajas dosis. De hecho, en la dieta cotidiana se consumen sustancias con actividades promotoras o inhibidoras de los tumores y, por lo tanto, el riesgo de cáncer depende del estilo de vida, y en particular de los hábitos dietéticos. Estos agentes no sólo pueden modificar la incidencia del cáncer natural o espontáneo sino que además pueden alterar el potencial cancerígeno de la radiación. Esas modificaciones repercutirían en el resultado, en particular cuando los riesgos de radiación se calcularan en relación con la incidencia del cáncer espontáneo.

72. En general, cabe llegar a la conclusión de que los agentes genotóxicos con comportamientos biológicos y mecanicistas similares que actúen simultáneamente, actuarán entre sí concentrando y sumando sus efectos (efecto isoadditivo). Esto significa que las exposiciones

paralelas a radiación ionizante y a otros agentes que dañan el ADN pero sin afinidad concreta con las secuencias del ADN que intervienen de forma decisiva en la aparición de cáncer tendrán por lo general efectos prácticamente isoadditivos.

C. Epidemiología del cáncer

73. El cáncer humano provocado por radiaciones se estudia en grupos demográficos que han estado expuestos a dosis de radiación tales que permitan determinar los casos de cáncer con una incidencia del medio ambiente superior a la normal. Es posible calcular los riesgos de las poblaciones cuyas dosis individuales puedan estimarse razonablemente. Esas poblaciones incluyen a los supervivientes de bombas atómicas, a los pacientes irradiados en instalaciones médicas, a las personas expuestas por su trabajo, a las personas expuestas a radionucleidos que han pasado al medio ambiente y a las personas expuestas a altos niveles de radiación natural del medio ambiente. Desde que el Comité evaluó los riesgos de cáncer inducido por radiación en su informe de 1994, se han publicado estudios epidemiológicos que han aportado información suplementaria importante. Esos datos se resumen en el anexo I, titulado "*Epidemiological evaluation of radiation-induced cancer*".

74. Se sabe actualmente que la radiación puede causar cáncer en casi todos los tejidos u órganos del cuerpo humano, si bien algunos puntos tienen mayor predisposición que otros (véase el párrafo 77). Durante los últimos años se han ido conociendo mejor los factores fisiológicos modificantes, como el sexo y la edad. Si bien las diferencias de riesgo absoluto de inducción tumoral en función del sexo no son grandes y varían de un lugar a otro del cuerpo, para la mayoría de los cánceres sólidos el riesgo absoluto es mayor en las mujeres que en los hombres. Las personas que eran jóvenes en el momento de la exposición a radiación tienen riesgos relativos y absolutos mayores que las personas de más edad, pero los riesgos también varían en función de las partes del cuerpo.

75. La observación de grupos de personas expuestas a radiación ha demostrado que sigue habiendo más cánceres de lo normal mucho tiempo después de la exposición a radiación y que, por consiguiente, las previsiones de riesgos para toda la vida pueden ser muy inciertas. Los datos referentes a los supervivientes de las bombas atómicas lanzadas sobre el Japón corresponden a una reacción a las dosis de carácter lineal o lineal-cuadrático para una amplia gama de dosis, pero la cuantificación de riesgos a bajas dosis es más incierta debido a las limitaciones de la precisión estadística, a los posibles sesgos residuales y a otros problemas metodológicos, así como la posibilidad de resultados fortuitos a causa de las pruebas estadísticas múltiples. El seguimiento más prolongado de grupos con una amplia gama de dosis, como los supervivientes de las bombas atómicas, proporcionará más información esencial sobre las dosis bajas, pero la epidemiología por sí sola no permitirá determinar si existen límites o umbrales de dosis bajas. No obstante, conviene señalar que el hecho de que no se puedan detectar mayores riesgos a dosis muy bajas no significa que esos riesgos no puedan aumentar.

76. Los estudios de los supervivientes japoneses son particularmente importantes porque el grupo incluye a una amplia población expuesta de ambos sexos, de todas las edades y con una amplia distribución de dosis. Los resultados de esa investigación aportan la base fundamental para estimar el riesgo de cáncer inducido por radiación. Entre las 86.572 personas del grupo de supervivientes de las bombas atómicas objeto del estudio de seguimiento, 7.578 fallecieron a causa de tumores sólidos entre 1950 y 1990. De esas muertes por cáncer, 334 pueden atribuirse a la exposición a radiación. Durante el mismo período, 87 de las 249 muertes por leucemia son imputables a la exposición a radiación. En 1991, año de la última evaluación, unas 48.000 personas (56%) vivían todavía. Se calcula que en 2000 el porcentaje de supervivientes será de alrededor del 44%.

77. Los datos sobre la incidencia del cáncer y la mortalidad por esta causa que figura en el estudio de seguimiento son a grandes rasgos similares y demuestran estadísticamente la importancia de los efectos de radiación para todos los tumores sólidos en el grupo, así como para los cánceres de estómago, colon, hígado,

pulmón, glándulas mamarias, ovarios y vesícula. Los datos sobre la incidencia también ilustran los mayores riesgos de cáncer de tiroides y de cánceres de piel distintos del melanoma en caso de radiación. No se observaban riesgos de importancia estadística en los datos sobre incidencia o mortalidad por cáncer de recto, vesícula biliar, páncreas, laringe, cuello del útero, útero, próstata y riñón o pelvis renal. Se observaba un vínculo con la exposición a radiación en la mayoría de los tipos de leucemia, pero no en el linfoma o el mieloma múltiple.

78. El número de tumores sólidos imputables a la exposición a radiación no es suficiente para permitir un análisis detallado de la reacción a las dosis en muchas partes del cuerpo o de muchos tipos de cáncer. Para todos los tumores sólidos combinados, la curva de reacción a las dosis es lineal hasta unos 3 Sv, pero para la leucemia es más bien una función lineal-cuadrática. Los riesgos de cáncer estadísticamente importantes en el estudio de seguimiento se observan a dosis superiores a los 100 mSv.

79. Los estudios de poblaciones expuestas a radiaciones, ya sean de origen médico, a causa del trabajo o a través del medioambiente, aportan información sobre cuestiones que no pueden determinarse con los datos de los supervivientes de las bombas atómicas, como por ejemplo los efectos de las bajas dosis crónicas, las dosis alfa de radón en el pulmón, las dosis altamente fraccionadas y la variabilidad entre poblaciones. Para algunos tipos de cáncer, como la leucemia y los cánceres de glándulas mamarias, tiroides, hueso e hígado se han obtenido resultados muy útiles, no en el estudio de seguimiento, sino en otras investigaciones. Las estimaciones de riesgo que se presentan en esos estudios suelen coincidir con las del estudio de seguimiento.

80. Los grandes estudios de personas expuestas a radiación en el trabajo aportan también valiosos datos sobre los efectos de dosis bajas. El análisis combinado de datos sobre un gran número de trabajadores nucleares indica que el riesgo de leucemia aumenta con la dosis. No obstante, la precisión estadística de esos estudios aún es baja en comparación con los resultados de los supervivientes de las bombas atómicas con altas tasas de

dosis. En consecuencia, es difícil llegar a una conclusión definitiva sobre los riesgos de cáncer en función de los niveles de dosis, en particular debido a que esos efectos pueden diferir entre los tipos de cáncer. No obstante, aún parecen generalmente razonables las conclusiones del informe efectuado por el Comité en 1993, basadas en pruebas epidemiológicas y experimentales, según las cuales había un factor de reducción inferior a 3 al extrapolar a dosis bajas o a tasas de dosis bajas.

81. Desde el informe de 1994 ha aumentado la información sobre los efectos de las dosis internas de radiación con baja y alta transferencia energética lineal. En particular, el alto riesgo de cáncer de tiroides en partes de Belarús, la Federación de Rusia y Ucrania contaminadas a raíz del accidente de Chernobyl demuestra la existencia de un vínculo con la exposición a yodo radiactivo durante la infancia. No obstante, la estimación de riesgos en relación con esas conclusiones se complica a causa de las dificultades en la estimación de las dosis y en la cuantificación del efecto de la detección médica de la enfermedad. Otros estudios realizados en la antigua Unión Soviética han aportado más información sobre las dosis internas, por ejemplo, sobre el mayor riesgo de cáncer de pulmón entre los trabajadores de la central de Mayak. Los casos de leucemia aumentaron entre la población que vivía cerca del río Techa. No obstante, las distintas fuentes de exposición a radiación (tanto externas como internas) y, en el caso de los estudios sobre el río Techa, los efectos potenciales de la migración, afectan a la cuantificación de los riesgos. En los últimos años se han publicado los resultados de varios estudios sobre casos de cáncer de pulmón y sobre el radón en el interior de las casas que, combinados, concuerdan con las extrapolaciones de los datos sobre mineros expuestos a radón, si bien en esos resultados sigue habiendo grandes incertidumbres estadísticas.

82. En el anexo I se ha prestado especial atención a los riesgos de determinados tipos de cáncer. La nueva información que se ha obtenido en los últimos años también ha ayudado a examinar algunos riesgos. Sin embargo, para algunos tipos de cáncer aún es difícil caracterizar los riesgos debido al problema de la baja precisión estadística que tienen los excesos moderados o pequeños de casos. Este factor puede limitar, por

ejemplo, la capacidad para evaluar las tendencias al riesgo en relación con factores como la edad en el momento de la exposición, el tiempo transcurrido desde la exposición y el sexo. Una excepción es el cáncer de mama en que comparando los datos entre los supervivientes de las bombas atómicas lanzadas sobre el Japón y los de las mujeres expuestas a radiaciones médicas en América del Norte se observa una transferencia absoluta de riesgos entre poblaciones. Hay algunos tipos de cáncer sobre cuya vinculación con las radiaciones existen pocas pruebas (por ejemplo, el linfoma no de Hodgkin, la enfermedad de Hodgkin y el mieloma múltiple). Si bien las evaluaciones de los linfomas se ven afectadas en parte por el pequeño número de casos en varios estudios, convendría compararlas con las evaluaciones para la leucemia (excluyendo la leucemia linfocítica crónica), que, si bien es también una enfermedad poco frecuente, en muchas poblaciones ha resultado estar claramente relacionada con la radiación.

83. Las estimaciones de riesgos para toda la vida dependen de las variaciones de las tasas de tumores relacionados con el medio ambiente y la variabilidad puede dar lugar a diferencias comparables a las diferencias asociadas al método de transporte entre las poblaciones o al método de previsión de riesgos. La variabilidad en esas previsiones pone de manifiesto la dificultad que plantea la elección de un único valor para representar el riesgo de contraer cáncer por radiación en algún momento de la vida. Además, las incertidumbres en las estimaciones de riesgo para determinados tipos de cáncer suelen ser mayores que para todos los cánceres combinados.

84. Sobre la base de los datos epidemiológicos disponibles, el Comité ha hecho estimaciones de riesgos de cáncer inducido por radiación. Para una población de todas las edades y todos los sexos con una dosis aguda de 1 Sv (baja transferencia energética lineal), se indica que las estimaciones de riesgos para toda la vida de mortalidad por cáncer sólido pueden ser de 9% para los hombres y de 13% para las mujeres. El factor de incertidumbre para las estimaciones puede ser de 2, superior o inferior. Las estimaciones podrían reducirse en un 50% para las exposiciones crónicas, como se señalaba en el informe de 1993, también con un factor de

incertidumbre superior o inferior a 2. Puede considerarse que los riesgos de incidencia de cáncer sólido son aproximadamente dos veces superiores a los de mortalidad. Las estimaciones del riesgo de tener cáncer sólido en algún momento de la vida para las personas que resultaron expuestas durante la infancia pueden ser dos veces mayores que las estimaciones para las personas expuestas durante todas las edades. No obstante, será importante seguir continuamente los estudios de esos grupos para determinar los riesgos generales de cáncer de las personas. La experiencia de los supervivientes de las bombas atómicas lanzadas sobre el Japón demuestra fehacientemente la linealidad en la estimación de los excesos de riesgo de cáncer sólido; por consiguiente, como primera aproximación, cabría utilizar la extrapolación lineal de las estimaciones de 1 Sv para evaluar los riesgos de cáncer sólido a dosis más bajas.

85. Las estimaciones de los riesgos de contraer leucemia en algún momento de la vida son menos variables. El riesgo de fallecer de leucemia, para las personas de ambos sexos, puede considerarse del 1% después de haber recibido una dosis aguda de 1 Sv. La incertidumbre de la estimación puede ser de un factor superior o inferior a 2. Dado el carácter no lineal de la reacción en función de las dosis, si la dosis recibida es diez veces inferior y pasa de 1 a 0,1 Sv, el riesgo para toda la vida disminuirá 20 veces si la dosis es aguda. Los riesgos de cáncer sólido y de leucemia son a grandes rasgos similares a los estimados en el informe de 1994.

86. Un tipo de cáncer asociado a la radiación que reviste especial importancia en los niños es el cáncer de tiroides. Existen sólidas pruebas de que el riesgo de cáncer de tiroides disminuye al aumentar la edad de exposición, de modo que los niños de menos de 15 años corren un riesgo sustancialmente mayor que los adultos de verse afectados por ese tipo de cáncer. Hasta los 5 años, los niños son cinco veces más sensibles a esta enfermedad que los de 10 a 14 años. Dada esta sensibilidad, no es sorprendente que en Belarús, la Federación de Rusia y Ucrania haya aumentado considerablemente la incidencia del cáncer de tiroides entre los niños a raíz del accidente de Chernobil en 1986. La tasa de incidencia del cáncer de tiroides entre los niños procedentes de regiones de esos países fue diez veces mayor en 1991-1994 que durante los cinco años

anteriores. Hasta 1998 se habían registrado unos 1.800 casos de cáncer de tiroides infantil. Este tema se examina con amplitud en el anexo J del presente informe, titulado "*Exposures and effects of the Chernobyl accident*".

87. El cáncer puede ser inducido por exposición prenatal. La primera vez que se habló de inducción de cánceres infantiles, leucemia y cánceres sólidos en los seres humanos a raíz de una exposición a rayos X fue en 1958, cuando el Estudio de Oxford dio cuenta de una mayor incidencia de tumores infantiles en los primeros 15 años de vida después de una exposición a rayos X durante la gestación, en comparación con los niños que no habían estado expuestos a tales rayos. La atribución de ese aumento a la exposición a radiación ha sido objeto de críticas y se ha argumentado que la condición médica y de otro tipo de las mujeres expuestas puede haber influido en el aumento de las tasas de cáncer. En otros estudios se ha considerado que sí existe una relación entre la radiación y el cáncer y se estima que el riesgo, de haberlo, es de aproximadamente un 5% por Sv. Esos efectos no se han observado entre los supervivientes de las bombas atómicas que resultaron irradiados durante la gestación.

88. Los riesgos de cáncer inducido para los adultos que estuvieron expuestos durante la gestación son mucho más difíciles de evaluar. No obstante, el hecho de que los riesgos relativos aumenten a edades inferiores de exposición entre los supervivientes de las bombas atómicas causa preocupación, ya que las personas expuestas durante la gestación podrían tener mayor predisposición al cáncer inducido que las personas expuestas durante la infancia. Los supervivientes de las bombas atómicas que fueron expuestos durante la gestación tienen ahora 55 años. Por consiguiente, es especialmente importante evaluar sus riesgos de enfermar de cáncer ulteriormente.

Capítulo V

El accidente de Chernobil

89. El Comité ha prestado una especial atención al accidente del reactor nuclear de Chernobil, que se produjo el 26 de abril de 1986. Se trata del accidente más

grave jamás ocurrido en la industria nucleoelectrica. A raíz del accidente, el reactor quedó destruido, se liberó una cantidad considerable de materiales radiactivos que pasaron al medio ambiente y muchos trabajadores resultaron expuestos a altas dosis de radiación que tuvieron consecuencias graves, o incluso fatales, para su salud (véase más abajo). Entre la población infantil de Belarús, la Federación de Rusia y Ucrania han llegado a registrarse unos 1.800 casos de cáncer de tiroides. Independientemente de los problemas derivados de los métodos de detección, la causa más probable de esos cánceres era la exposición a radiación a raíz del accidente. Se han observado muchos otros problemas de salud que probablemente no se deben a la exposición a radiación. Desde un punto de vista científico, resulta necesario evaluar y comprender las causas técnicas y los efectos del accidente. Desde un punto de vista humano, es obligado también hacer un análisis objetivo de las consecuencias del accidente para la salud de las personas. El Comité ha preparado una nueva evaluación del accidente teniendo presentes ambos objetivos.

90. Poco después del accidente, se midieron y evaluaron en toda la región afectada la deposición de los radionucleidos dispersos y la exposición resultante. El Comité utilizó esos datos para evaluar las dosis medias individuales y colectivas de los diversos países y regiones de todo el hemisferio norte. Los resultados se presentaron en el anexo D del informe del Comité correspondiente a 1988, titulado "*Exposures from the Chernobyl accident*". También se analizó la experiencia adquirida en el tratamiento de las lesiones de radiación sufridas por los trabajadores y bomberos al tratar de controlar el accidente; este análisis figura en el anexo G del mismo informe, titulado "*Early effects in man of high doses of radiation*".

91. La evaluación del grado de exposición de las personas que fueron evacuadas o que aún residen en las zonas más afectadas por el accidente ha requerido mucho tiempo y un gran esfuerzo. Las mediciones iniciales deben complementarse con información sobre cuestiones como la ubicación y la dieta de las personas en cada lugar. La acumulación de datos sobre efectos tardíos de salud también ha requerido más tiempo. Hasta ahora, unos 15 años después del accidente, no se ha podido realizar una evaluación inicial de los grados de

exposición local y de los efectos del accidente. Los resultados detallados de la evaluación realizada por el Comité figuran en el anexo J del presente informe, titulado "*Exposures and effects of the Chernobyl accident*".

A. Liberación de radionucleidos

92. El accidente del reactor de Chernobil se produjo durante un ensayo experimental del sistema de control eléctrico cuando se desconectaba el reactor para realizar un mantenimiento rutinario. Los operarios, violando las normas de seguridad, habían desconectado importantes sistemas de control, dejando que el reactor se encontrara en condiciones de inestabilidad y baja potencia. Al aumentar repentinamente la energía se produjo una explosión de vapor que fracturó la nave del reactor, con lo cual se produjeron nuevas interacciones violentas entre el combustible y el vapor que destruyeron el núcleo del reactor y causaron graves daños al edificio del reactor.

93. Cabe señalar que en un accidente anterior, ocurrido en 1979 en el reactor de Three Mile Island en los Estados Unidos de América, también se causaron graves daños al núcleo del reactor pero no hubo explosión de vapor. No obstante, en aquel caso el edificio de contención que rodeaba el reactor impidió la liberación de gases radiactivos, salvo diminutas cantidades. El reactor de Chernobil carecía de factor de contención. Tras las explosiones, hubo un intenso incendio de grafito durante diez días. En tales condiciones, pasaron al medio ambiente grandes cantidades de materiales radiactivos.

94. Las partículas y los gases radiactivos liberados durante el accidente fueron inicialmente arrastrados por el viento hacia el Oeste y el Norte. En días posteriores, los vientos soplaron de todas las direcciones. La deposición de radionucleidos obedeció principalmente a la precipitación ocurrida durante el paso de la nube radiactiva que ocasionó unas pautas de exposición complejas y variables en toda la región afectada.

B. Exposición de las personas a radiación

95. Los radionucleidos liberados por el reactor fueron principalmente de yodo-131, cesio-134 y cesio-137. El yodo-131 tiene una breve semivida radiactiva (ocho días), pero puede pasar al ser humano de forma relativamente rápida a través del aire o de la leche y las legumbres con hojas. El yodo se concentra en la glándula del tiroides. Al ingerir esos alimentos, los bebés y los niños, debido al tamaño de sus tiroides y a su metabolismo, suelen recibir dosis de radiación superiores a las que afectan a los adultos.

96. Los isótopos de cesio tienen semividas relativamente más largas (el cesio-134 tiene una semivida de dos años y el cesio-137, de 30 años). Estos radionucleidos causan exposición a largo plazo a través de la ingestión de alimentos y también de la exposición externa al depositarse en el suelo. En el accidente intervinieron muchos otros radionucleidos, que también se han tomado en consideración en las evaluaciones de los grados de exposición.

97. Las dosis medias recibidas por las personas más afectadas por el accidente eran de unos 100 mSv para los 240.000 trabajadores que intervinieron después del accidente, de 30 mSv para las 116.000 personas evacuadas y de 10 mSv durante el primer decenio después del accidente para las personas que continuaron residiendo en zonas contaminadas. Los valores máximos de la dosis pueden ser de un orden de magnitud superior. Fuera de Belarús, de la Federación de Rusia y de Ucrania, otros países europeos se vieron afectados por el accidente. En esos países, las dosis fueron a lo sumo de un 1 mSv durante el primer año después del accidente, decreciendo progresivamente en los años subsiguientes. Se calculaba que la dosis para el resto de la vida era entre dos y cinco veces superior a la dosis del primer año. Esas dosis son comparables a una dosis anual de radiación natural de fondo y, por consiguiente, tienen escasa importancia radiológica.

98. Los grados de exposición fueron mucho más altos para las personas que intervinieron tratando de mitigar los efectos del accidente y para las que residían en las

inmediaciones. Estos grados de exposición se examinan en detalle en la evaluación del Comité.

C. Consecuencias de salud

99. El accidente de Chernobil causó casi de inmediato muchos efectos graves de radiación. De los 600 trabajadores que había en la central en la mañana del 26 de abril de 1986, 134 recibieron dosis altas (de 0,7 a 13,4 Gy) y sufrieron náuseas provocadas por la radiación. De estos 134 trabajadores, 28 fallecieron durante los tres primeros meses y otros dos murieron posteriormente. Además, en 1986 y 1987 unos 200.000 trabajadores que intervinieron en la zona recibieron dosis que oscilaron entre 0,01 y 0,5 Gy. Este grupo de personas corre el riesgo de sufrir ulteriormente las consecuencias de la radiación en forma de cáncer o de otras enfermedades, por lo que se seguirá atentamente su estado de salud.

100. A raíz del accidente de Chernobil quedaron contaminadas también con radiactividad extensas zonas de Belarús, la Federación de Rusia y Ucrania habitadas por varios millones de personas. Además de causar exposición a radiación, el accidente tuvo consecuencias a largo plazo en las vidas de las personas que residían en las zonas contaminadas, ya que entre las medidas encaminadas a limitar las dosis de radiación figuraban los reasentamientos, la modificación de los suministros de alimentos y la restricción de las actividades de las personas y familias. Posteriormente, a esas alteraciones se añadieron los importantes cambios económicos, sociales y políticos que tuvieron lugar al desintegrarse la antigua Unión Soviética.

101. Durante los últimos 14 años, la investigación se ha centrado en la relación entre la exposición causada por los radionucleidos liberados en el accidente de Chernobil y los efectos ulteriores, particularmente el cáncer de tiroides infantil. La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha son de tipo descriptivo y en ellos se establece una relación entre el nivel de exposición media de la población y la incidencia media de cáncer durante períodos determinados. Si no se dispone de dosimetría individual, resulta difícil determinar si los efectos se deben a la radiación y también es imposible efectuar

estimaciones cuantitativas fiables de los riesgos. La reconstrucción de las dosis individuales es un elemento clave para la futura investigación sobre la relación entre los cánceres y la radiación tras el accidente de Chernobil.

102. El número de cánceres de tiroides (unos 1.800) entre las personas que resultaron expuestas durante la infancia, en particular en las zonas de más alta contaminación de los tres países afectados, es considerablemente mayor de lo que cabía prever con los conocimientos antes disponibles. La alta incidencia y la brevedad del período de inducción son inhabituales. También pueden influir en los riesgos otros factores. Si la tendencia actual se mantiene, es de prever que se produzcan más casos de cáncer de tiroides, especialmente entre las personas que resultaron expuestas a baja edad.

103. A parte del aumento del cáncer de tiroides tras la exposición durante la infancia, no se ha observado ningún otro incremento de la incidencia general del cáncer o de la mortalidad por esta causa que pueda atribuirse a la radiación ionizante. El riesgo de leucemia, que es una de las principales preocupaciones (la leucemia es el primer cáncer que se manifiesta tras la exposición a radiación debido a su breve período de latencia, que oscila entre dos y diez años), no parece muy elevado, incluso entre los obreros que trabajaron en las zonas contaminadas después del accidente. Tampoco existen pruebas que demuestren la vinculación de otros trastornos de carácter maligno con la radiación ionizante. No obstante, conviene destacar la amplitud de las reacciones psicológicas que provocó el accidente, debidas más al temor que suscitaba la radiación que a las dosis de radiación propiamente dichas.

104. Hay una cierta tendencia a imputar el incremento con el tiempo de la incidencia de todos los tipos de cáncer al accidente de Chernobil, pero conviene señalar que en las zonas afectadas también se habían observado incrementos antes del accidente. Además, durante los últimos años se ha registrado un aumento general de la mortalidad en la mayoría de las zonas de la antigua Unión Soviética, un factor que debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados de los estudios sobre Chernobil.

105. Los conocimientos de que actualmente se dispone sobre los efectos ulteriores de una exposición prolongada

a radiación ionizante son limitados, dado que las evaluaciones de las reacciones en función de las dosis dependen sobre todo de estudios sobre la exposición a altas dosis y de experimentos con animales; es preciso hacer extrapolaciones, lo cual supone siempre incertidumbre. El accidente de Chernobil puede arrojar luz sobre los efectos ulteriores de una exposición prolongada, pero dado el bajo nivel de las dosis recibidas por la mayoría de las personas expuestas, resultará difícil detectar en estudios epidemiológicos los aumentos de la incidencia del cáncer o de la mortalidad por esta causa. Una de las tareas difíciles consistirá en elaborar estimaciones de dosis individuales, evaluando también el grado de incertidumbre, y en determinar los efectos de las dosis acumuladas durante un largo período.

Notas

- ¹ El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas fue creado por la Asamblea General en su décimo período de sesiones, celebrado en 1955 y sus atribuciones se enuncian en la resolución 913 (X), de 3 de diciembre de 1955. El Comité se componía originalmente de los siguientes Estados Miembros: la Argentina, Australia, Bélgica, el Brasil, el Canadá, Checoslovaquia, Egipto, los Estados Unidos de América, Francia, la India, el Japón, México, el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Suecia y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas. La Asamblea amplió la composición del Comité en la resolución 3154 C (XXVIII), de 14 de diciembre de 1973, por la cual pasaron a ser miembros la República Federal de Alemania, Indonesia, el Perú, Polonia y el Sudán. Por la resolución 41/62 B, de 3 de diciembre de 1986, la Asamblea fijó en 21 el número máximo de miembros del Comité e invitó a la China a incorporarse al Comité.
- ² Los informes sustantivos anteriores del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas presentados a la Asamblea General pueden verse en *Documentos Oficiales de la Asamblea General, decimotercer período de sesiones, Suplemento N° 17 (A/3838)*; *ibid.*, *decimoséptimo período de sesiones, Suplemento N° 16 (A/5216)*; *ibid.*, *decimonoveno período de sesiones, Suplemento N° 14 (A/5814)*; *ibid.*, *vigésimo primer período de sesiones, Suplemento N° 14 (A/6314 y Corr.1)*; *ibid.*, *vigésimo*

*cuarto período de sesiones, Suplemento N° 13 (A/7613 y Corr.1); ibid., vigésimo séptimo período de sesiones, Suplemento N° 25 (A/8725 y Corr.1); ibid., trigésimo segundo período de sesiones Suplemento N° 40 (A/32/40); ibid., trigésimo séptimo período de sesiones, Suplemento N° 45 (A/37/45); ibid., cuadragésimo primer período de sesiones, Suplemento N° 16 (A/41/16); ibid., cuadragésimo tercer período de sesiones, Suplemento N° 45 ((A/43/45); ibid., cuadragésimo octavo período de sesiones, Suplemento N° 46 (A/48/46); ibid., cuadragésimo noveno período de sesiones, Suplemento N° 46 (A/49/46); ibid., quincuagésimo primer período de sesiones, Suplemento N° 46 (A/51/46). Estos documentos se denominan en el texto los informes de 1958, 1962, 1964, 1966, 1969, 1972, 1977, 1982, 1986, 1988, 1993, 1994 y 1996, respectivamente. El informe de 1972, con anexos científicos, se publicó como *Ionizing Radiation: Levels and Effects, Volume I: Levels y Volume II: Effects* (publicaciones de las Naciones Unidas, N° de venta: S.72.IX.17 y 18). El informe de 1977 con anexos científicos se publicó con el título *La radiación ionizante: Fuentes y efectos biológicos* (publicación de las Naciones Unidas, N° de venta: S.77.IX.1). El informe de 1982, con anexos científicos, se publicó con el título *La radiación ionizante: Fuentes y efectos biológicos* (publicación de las Naciones Unidas, N° de venta: S.82.IX.8). El informe de 1988, con anexos científicos, se publicó con el título *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation* (publicación de las Naciones Unidas, N° de venta: S.88.IX.7). Los informes de 1993, 1994 y 1996, con anexos científicos, se publicaron con el título *Sources and Effects of Ionizing Radiation* (publicación de las Naciones Unidas, N° de venta: E.94.IX.2, S.94.IX.11 y E.96.IX.3, respectivamente.*

Apéndice I

Miembros de las delegaciones nacionales que asistieron a los períodos de sesiones 44° a 49°

Alemania	W. Burkart (Representante), U. Ehling, W. Jacobi, T. Jung, A. Kaul (Representante), A. Kellerer, J. Kiefer, G. Kirchner, W. Köhnlein, C. Reiners, F. E. Stieve, C. Streffer
Argentina	D. Beninson (Representante), E. D'Amato, D. Cancio
Australia	P. A. Burns (Representante), K. H. Lokan (Representante), J. Loy, D. I. Macnab
Bélgica	J. R. Maisin (Representante), A. Debauche, R. Kirchmann, H. P. Leenhouts, J. Lembrechts, K. Sankaranarayanan, P. Smeesters, J. van Dam, H. Vanmarcke, A. Wambersie
Brasil	J. L. Lipsztein (Representante), D. Melo, A. T. Ramalho, E. R. Rochedo
Canadá	R. M. Chatterjee (Representante), D. B. Chambers, R. J. Cornett, N. E. Gentner (Representante), R. V. Osborne (Representante), S. Vlahovich (Representante)
China	Z. Pan (Representante), N. Gu, F. He, Q. He, J. Ma, B. Mao, K. Li, P. Liu, Y. Song, Z. Tao, K. Wei, B. Xiu, H. Yang, L. Zhang, Y. Zhao, J. Zhou, B. Zhu
Egipto	A. M. El-Naggar (Representante), F. Hammad (Representante), M. A. Gomaa
Eslovaquia	D. Viktory (Representante), I. Bučina, P. Gaál, E. Kunz
Estados Unidos de América	F. A. Mettler (Representante), L. Anspaugh, J. D. Boice Jr., N. H. Harley, E. V. Holahan, C. B. Meinhold, R. J. Preston, P. B. Selby, W. K. Sinclair
Federación de Rusia	L. A. Ilyin (Representante), R. M. Alexakhin, L. A. Buldakov, K. I. Gordeev, A. K. Guskowa, J. B. Kholina, I. S. Koshkin, I. I. Kryshev, I. I. Kulyeshov, B. K. Lobach, O. A. Pavlovski, M. N. Savkin, V. A. Shevchenko
Francia	J. F. Lacronique (Representante), A. Aurengo, M. Bourguignon, A. Flüery-Hérard, J. Lallemand, C. Luccioni, R. Masse (Representante), J. Piéchowski, A. Rannou
India	K. B. Sainis (Representante), P. C. Kesavan (Representante)
Indonesia	K. Wiharto (Representante), T. Suprihadi, S. Zahir
Japón	Y. Sasaki (Representante), T. Asano, H. Iizuka, T. Isoyama, S. Kumazawa, S. Mizushita, K. Morita, Y. Muramatsu, N. Nakagawa, J. Onodera, K. Sato, T. Sato, Y. Taguchi, K. Tatsumi
México	J. R. Ortiz-Magaña (Representante), E. Araico (Representante)
Perú	L. V. Pinillos-Ashton (Representante)
Polonia	Z. Jaworowski (Representante), M. Waligorski

Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	R. H. Clarke (Representante), H. J. Dunster, V. Beral, F. A. Fry, J. W. Stather
Sudán	K.E.H. Mohamed (Representante), O. I. Elamin (Representante)
Suecia	L.-E. Holm (Representante), E. Bongtsson (Representante), U. Bäverstam, L. Moberg, W. Leitz, J. O. Snihs

Apéndice II

Lista de personal científico y consultores que han colaborado con el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas en la preparación del presente informe

L. Anspaugh

B. Bennett

A. Bouville

W. Burkart

R. Cox

J. Croft

P. Hall

H. Leenhouts

C. Muirhead

E. Ron

M. Savkin

P. Shrimpton

J. Stather

J. Thacker

A. Wrixon

00-58723 (S) 180800 210800

~~~~~