

Radiaciones frente a radiaciones: Perspectivas de la energía nuclear

Análisis comparativo de las radiaciones en nuestro medio ambiente

por Abel J. González y Jeanne Anderer

Muchas personas sienten inquietud por las liberaciones de materiales radiactivos en el medio ambiente y sus posibles consecuencias para la humanidad. Sin embargo, a lo largo de la historia las personas han vivido en un medio ambiente con niveles de radiación cambiantes. Una fracción de esos niveles es natural, la otra artificial. Gradualmente, incluso esta fracción artificial se ha integrado al medio ambiente de radiaciones estable. La interacción humana con ese medio ambiente y las modificaciones resultantes acentúan la dinámica del cambio: el medio ambiente de radiaciones de hoy es diferente al de ayer y continuará transformándose en el futuro.

La paradoja se extiende aún más: la energía nuclear, cuya contribución a la dosis media de radiación recibida por las personas es insignificante, constituye el principal motivo de preocupación del público, en tanto que la medicina radiológica, la mayor de las fuentes de exposición artificiales, es objeto de una prudente acogida por los beneficios que representa. La aprensión es menor aún respecto de las fuentes de exposición más vastas y menos controladas: las fuentes naturales de radiación.

De hecho, resulta virtualmente imposible para las personas evitar la exposición a las radiaciones provenientes del medio en que viven, aunque algunas están más expuestas que otras debido al tipo de vivienda que habitan, el lugar donde ésta se encuentra, el estilo de vida y el nivel de atención médica que reciben.

Existen buenas razones para creer que la apreciación objetiva y prudente de la exposición a las radiaciones provenientes de todas las fuentes pone en una perspectiva adecuada el impacto de la energía nuclear en el medio en que se vive. El discernimiento que se alcanza a partir de este enfoque comparativo puede ayudar a ilustrar cómo la humanidad vive en un medio ambiente de radiaciones y cómo lo modifica y, más importante aún, cómo se pueden emitir juicios razonables sobre todas las prácticas humanas que tienen que ver con la radiación. El propósito de este artículo es contribuir a esa comprensión. Su principal fuente es el informe de 1988 del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR).* Ese informe y sus anexos científicos

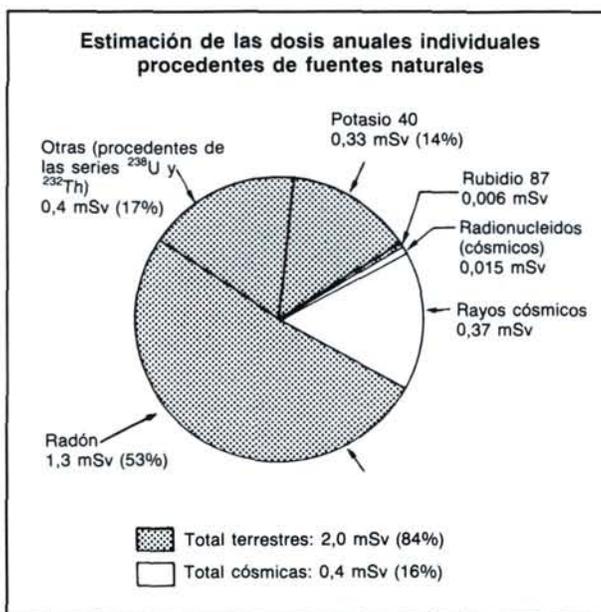
proporcionan una base fáctica autoritativa e imparcial para examinar las radiaciones provenientes de todas las fuentes.

La comparación de las exposiciones a la radiación en el medio ambiente se hace en términos de dosis de radiación, y los resultados se expresan sobre una base individual, con valores medios (*per caput*) y extremos, y sobre una base colectiva, con valores representativos del impacto colectivo total de la radiación producido por una fuente o práctica determinadas.

El medio ambiente de radiación natural

Las fuentes naturales producen la más alta de las dosis de radiación que reciben las personas normalmente. (Véase el gráfico adjunto.) La dosis anual media proveniente de fuentes naturales es de unos 2,4 milisievert (mSv), valor que se utiliza en este trabajo como nivel de referencia de la radiación natural de fondo. En esta media estadística están comprendidas dosis individuales que fluctúan desde 1 hasta 5 mSv al año y, en casos extremos, hasta 1 Sv o más.

Las dos fuentes de radiación natural más importantes son el cosmos, que irradia a las personas continuamente con rayos cósmicos, y la biosfera de la tierra, que contiene radionucleidos que han existido principalmente en la corteza terrestre durante miles de millones de años. La irradiación se produce externamente, mediante exposiciones a la radiación extraterrestre y a la procedente de materiales radiactivos naturales que permanecen fuera del cuerpo humano; e internamente, mediante



El Sr. González es Subdirector de la División de Seguridad Nuclear y la Sra. Anderer es funcionaria de la División. Este artículo se ha preparado a partir de un documento presentado en septiembre de 1988 en el Decimotercer Simposio Internacional del Instituto del Uranio, celebrado en Londres.

* *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, informe presentado a la Asamblea General de las Naciones Unidas, y anexos, Nueva York (1988).

exposiciones a radionucleidos naturales que están presentes biológicamente en el cuerpo humano o que están incorporados en el aire que se inhala y las bebidas y los alimentos que se ingieren. Esta distinción es importante, ya que la radiación terrestre es, con mucho, la mayor fuente de irradiación natural (aporta hasta un 85% de la dosis anual media). Además, más de dos tercios de la irradiación natural se produce internamente, y es posible controlar una fracción sustancial de tales exposiciones por medios técnicos.

La fuente cósmica. Todas las irradiaciones cósmicas provienen en realidad de una fuente: los rayos cósmicos. Los niveles de rayos cósmicos son relativamente estables en la superficie de la tierra, pero se ven afectados por el campo magnético de la tierra y las regiones polares reciben más rayos cósmicos que las zonas ecuatoriales. Más importante aún, el nivel aumenta notablemente con la altitud, llegando casi a duplicarse cada 1500 metros. La mayoría de las personas viven al nivel del mar o cerca de él, de modo que hay poca variación en la dosis media de radiación cósmica de 0,37 mSv. No obstante, en ciudades que se encuentran a mucha altitud (como por ejemplo Denver (Estados Unidos), Bogotá (Colombia) y La Paz (Bolivia)) la dosis cósmica anual que reciben sus habitantes puede ser de hasta cuatro veces el nivel normal y llegar a 1 mSv o más.

Asimismo, los pasajeros y tripulantes de las aeronaves están expuestos a irradiación cósmica anormalmente elevada, aunque por períodos limitados.

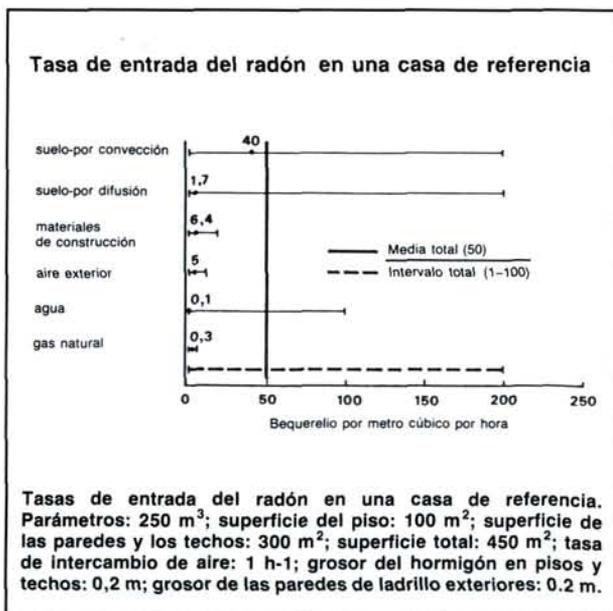
Fuentes terrestres. En el medio ambiente hay radiaciones terrestres a varios niveles, según las concentraciones de actividad que se encuentren en materiales naturales tales como las rocas, los suelos, el agua, el aire, los alimentos e incluso el cuerpo humano. Las fuentes terrestres más importantes son el potasio 40, el rubidio 87 y las dos series de elementos radiactivos provenientes de la desintegración del uranio 238 y el torio 232. Otros radionucleidos, tales como los de las series de desintegración del uranio 235, tienen escaso efecto en la exposición total a las radiaciones.

La radiactividad de algunas rocas y suelos es la principal fuente de irradiación terrestre de los individuos cuando se encuentran al aire libre. Generalmente, las rocas ígneas, como el granito, son más radiactivas que las sedimentarias, pero hay excepciones notables como los esquistos y las rocas fosfatadas altamente radiactivas. En estudios recientes de los niveles de radiación externa al aire libre realizados en 23 países, que representan más de la mitad de la población mundial, se encontraron sólo pequeñas variaciones. De estos estudios se desprende que alrededor del 95% de la población mundial vive en zonas en que la dosis anual media de 0,4 mSv está distribuida normalmente. No obstante, hay zonas, sobre las que se cuenta con suficientes datos, en que las personas están expuestas a niveles de irradiación terrestre excepcionalmente altos. En las zonas costeras de Kerala y Tamil Nadu en la India, las arenas monacitadas ricas en torio dan origen a tasas de dosis que pueden ser hasta 1000 veces más altas que la radiación normal de fondo. En otras partes, como en las zonas brasileñas de Guarapari, Meaibe, y Poços de Caldas, las tasas de dosis pueden ser hasta 100 veces superiores al nivel normal.

Debido a que las personas pasan la mayor parte del tiempo bajo techo, los niveles de radiación existentes en las viviendas son muy importantes para sus exposiciones. En la práctica, la mayor parte de la irradiación terrestre interna puede imputarse a una fuente que se halla por doquier: el gas radón inodoro. (En este texto el radón se refiere a los nucleidos radio 222 y radio 220 y a la cadena de sus productos de desintegración, llamados hijos del radón.)

Por término medio, el radón constituye algo más de la mitad de la dosis *per caput* proveniente de la radiación natural de fondo (o 1,3 mSv por año). Existen diversas vías por las que el radón penetra en los edificios, de los cuales la más importante es la de los suelos subyacentes o cercanos y, en menor grado, los materiales de construcción, el aire del exterior, el agua corriente y el gas natural. (Véase la figura adjunta.) Sólo en los últimos tiempos se ha dispuesto de resultados de estudios realizados en interiores, y es probable que en muchas zonas del mundo se registrarán niveles de radón excepcionalmente altos en viviendas que se han construido sobre materiales altamente radiactivos, o con ellos.

La irradiación interna a partir de fuentes terrestres distintas del radón proviene principalmente de la ingestión de potasio 40, plomo 210 y polonio 210. En comparación con las exposiciones al radón, su aporte al nivel de dosis anual media resulta pequeño. Debido a que la ingestión de potasio 40 es controlada homeostáticamente por el organismo, la escala de variabilidad es baja. Por el contrario, los hábitos dietéticos pueden influir en las exposiciones internas al plomo 210 y al polonio 210. Por ejemplo, estos nucleidos se concentran en los mariscos; en el Japón, lugar donde éste es uno de los alimentos preferidos, se determinaron concentraciones que eran 5 veces más altas que en la República Federal de Alemania y la India y 10 veces más altas que en los Estados Unidos. También se sabe de una ingestión excepcionalmente alta de estos radionucleidos en el extremo norte del hemisferio septentrional, donde decenas de miles de personas subsisten a base de carne de reno y de caribú. Estos animales, que pastan en



líquenes que concentran plomo y particularmente polonio, aportan a ese grupo de personas expuestas dosis que son unas 10 veces más altas que el nivel normal. También se ha detectado plomo 210 y polonio 210 en el humo del tabaco y los cigarrillos.

Modificación del medio ambiente de radiaciones

Existen tres importantes prácticas humanas, no relacionadas con la producción de electricidad de origen nuclear, que alteran el medio ambiente de radiaciones: la creciente utilización de las radiaciones con fines médicos, los ensayos de armas nucleares en la atmósfera y los procesos industriales que comprenden radionucleidos naturales. Las exposiciones ocupacionales conexas parecen desempeñar un papel modificador más modesto.

Utilización de las radiaciones con fines médicos. Las irradiaciones con fines médicos son un importante elemento modificador del medio ambiente de radiaciones. La dosis anual media es de 0,4 a 1 mSv, según la metodología que se utilice para calcular las dosis.

La radiación médica se utiliza principalmente en los exámenes de diagnóstico con rayos X, incluida la radiografía médica y dental, la medicina nuclear de diagnóstico con empleo de radionucleidos administrados internamente, y la radioterapia para el tratamiento del cáncer y otras enfermedades. En el contexto de este artículo la radioterapia se destaca de los otros usos. Las personas se someten frecuentemente y con indiferencia a radiografías dentales y otros exámenes radiológicos, pero consideran a la radioterapia como sumamente improbable y como una práctica que nada tiene que ver con sus vidas y no guarda relación alguna con su medio ambiente de radiaciones. La radiación proveniente de las prácticas terapéuticas, como tal, no preocupa directamente a las personas. En efecto, los riesgos de esta práctica de radiación han permanecido fuera del orden del día de los debates públicos sobre los peligros de las radiaciones. Desde el punto de vista estadístico, quizás la realidad sea otra: es probable que una cuarta parte de la población necesite radioterapia en algún momento de su vida. Con todo, las exposiciones a la radiación proveniente de las prácticas médicas con fines terapéuticos se excluyen de este análisis comparativo.

Desafortunadamente, la información fiable y bien definida sobre las radiaciones en las prácticas médicas de que se dispone se refiere sobre todo a la población de los países altamente desarrollados, y esa población representa menos de un cuarto de los 5000 millones de habitantes del planeta. Respecto de otro cuarto se dispone de información más escasa, y sobre los más de 2500 millones de habitantes restantes no se conoce virtualmente nada sobre las irradiaciones médicas que reciben, si es que reciben alguna. Esta laguna en la información indica una situación realmente desproporcionada, lo cual lleva a algunos expertos a sacar la conclusión de que casi las tres cuartas partes de la humanidad no ha recibido una asistencia sustancial en materia de diagnóstico radiológico.

Radiografía de diagnóstico. Casi el 95% de la dosis total que reciben las personas anualmente de la irradiación médica proviene de los exámenes de diagnóstico con rayos X. Estos totales no revelan las grandes

variaciones que existen tanto en la intensidad del radio-diagnóstico como en la repercusión de esta práctica. Por ejemplo, en los países que poseen el nivel más alto de atención médica (según los grupos confeccionados por el UNSCEAR), una máquina de rayos X es compartida por 4000 personas, mientras que en los países con los niveles más bajos es compartida por 170 000 personas. En el primer grupo de países se realizan, por término medio, 800 exámenes anualmente por cada 1000 personas; en el otro grupo, menos de 30 exámenes por cada 1000 personas.

Independientemente de la intensidad de la práctica, las dosis individuales también difieren en función de factores tales como el tipo de examen, el procedimiento adoptado y el comportamiento del equipo. Por ejemplo, en la mayoría de los países desarrollados ya no se considera pertinente la práctica ordinaria de los exámenes masivos del tórax con rayos X, mientras que en muchos países en desarrollo la situación parece ser la opuesta. En algunos países asiáticos, por ejemplo, más de tres cuartos de todos los exámenes médicos de diagnóstico son del tórax. Más importante aún, mientras que en la mayoría de los países desarrollados para los exámenes del tórax se utilizan exclusiva o extensamente técnicas radiográficas, la información de que se dispone sobre los países en desarrollo indica el empleo en gran escala de técnicas fluoroscópicas, que pueden exponer a los pacientes a dosis 15 veces más altas que la radiografía.

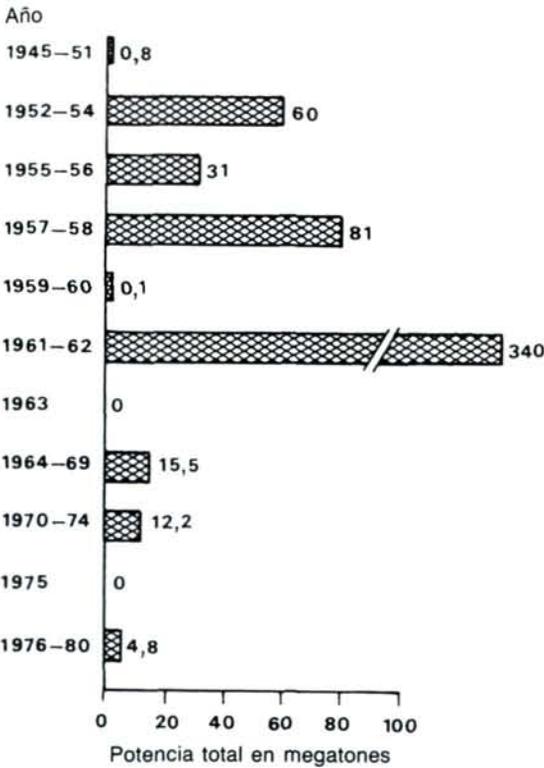
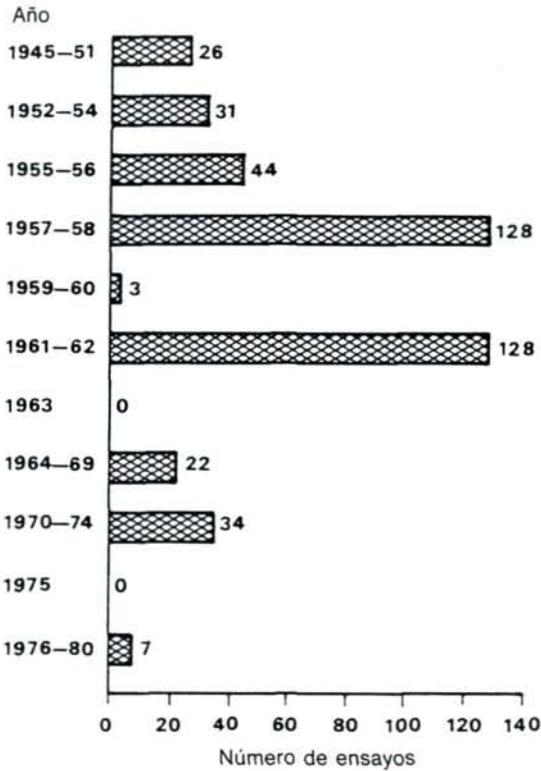
La falta de información sobre el uso de la fluoroscopia en los países con sistemas de atención médica menos desarrollados da lugar a una gran incertidumbre, que impide llegar a conclusiones firmes sobre las dosis provenientes de los diagnósticos con rayos X. Otra interrogante que tiene que ver con los niveles de dosis es el comportamiento del equipo de diagnóstico, particularmente en muchos países en desarrollo. Es significativa la estimación de que entre el 30% y el 70% del equipo funciona incorrectamente.

La radiografía dental. La radiografía dental representa solo el 1% de las exposiciones médicas y la dosis individual media es de 0,04 mSv por examen. Este es el tipo de examen de diagnóstico con rayos X que se utiliza con más frecuencia; anualmente se realizan unos 340 millones de exámenes, principalmente en países con sistemas de atención médica muy desarrollados.

Medicina nuclear de diagnóstico. La frecuencia de las prácticas médicas nucleares ha venido aumentando en todo el mundo desde su introducción hace unos 30 años. En algunos países, la frecuencia ha disminuido periódicamente debido al empleo alternativo de la tomografía computadorizada para exploraciones del cerebro con radionucleidos y otras técnicas de radiaciones no ionizantes, como el ultrasonido. Las exposiciones representan solamente el 4% de toda la irradiación médica. Todas las prácticas de irradiación médica difieren de un país a otro y dentro de ellos; la medicina nuclear de diagnóstico no es una excepción. El tipo de radionucleido utilizado (por ejemplo, el yodo 131 o el tecnecio 99m) es la causa de la amplia gama de dosis anuales medias.

Los ensayos de armas nucleares. Desde 1945 se han realizado más de 400 explosiones nucleares en la atmósfera a fin de ensayar armas nucleares; la más reciente tuvo lugar en 1980. (Véanse los gráficos, en la pág. 24.)

Número y potencia de los ensayos de armas nucleares en la atmósfera



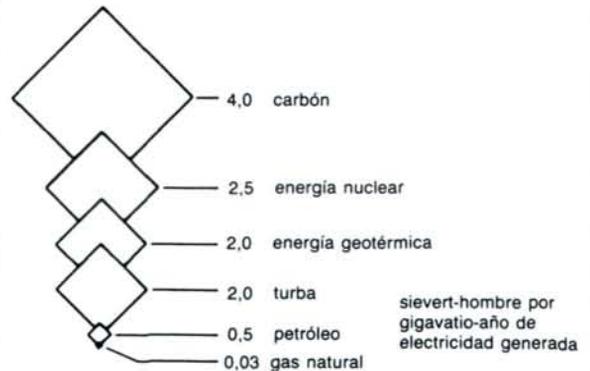
La realización de ensayos en la atmósfera tuvo dos períodos punta: 1957-1958 y 1961-1962; en cada uno de ellos se realizaron 128 ensayos, pero en el segundo período la potencia fue cerca de cuatro veces mayor que en el primero. Independientemente de los juicios que puedan emitirse sobre la ética de esta práctica, el hecho es que estos ensayos tuvieron lugar e inyectaron cantidades considerables de materiales radiactivos en el medio ambiente.

La precipitación resultante de los ensayos en la atmósfera contiene varios cientos de radionucleidos, pero sólo cuatro de ellos son causa de preocupación para las poblaciones actuales y futuras: el carbono 14 (con un período de 5730 años), el cesio 137 (con un período de 30 años), el estroncio 90 (con un período de 30 años) y el tritio (con un período de 12 años). Actualmente, alrededor de dos tercios de estas exposiciones provienen del carbono 14; dados los períodos de semidesintegración de los demás radionucleidos, al final de este siglo sólo el carbono 14 será de interés. En un período de miles de años el plutonio 239, el plutonio 240 y el americio 241 aportarán una contribución muy pequeña (0,1%) a la tasa de dosis. Individualmente, la dosis anual media es de solo 0,01 mSv, pero el compromiso de dosis colectiva para las generaciones futuras es el más alto de los que provienen de fuentes artificiales.

Procesos industriales y radionucleidos naturales.

Los procesos industriales tales como la producción de energía geotérmica y la extracción de fosfato traen a la superficie de la tierra materiales cuyas concentraciones de radionucleidos naturales son superiores a la media. En otros procesos, tales como la combustión del carbón y la producción de fertilizantes fosfatados, se tratan materiales cuyas cantidades de radionucleidos naturales son equivalentes al promedio o algo superiores, y se los concentra en uno o más productos o subproductos. La repercusión de estas exposiciones sobre el medio ambiente de radiaciones no ha sido significativa. Sin embargo, dichas exposiciones no se vigilan sistemáticamente y las modalidades de crecimiento acelerado asociadas con muchos procesos, en particular la producción de energía, pronostican claramente una fuerte

Estimaciones de los compromisos de dosis colectiva debidas a los sistemas de producción de electricidad (normalizados)



repercusión en los decenios venideros. De hecho, la generación de electricidad a partir de fuentes energéticas distintas de la nuclear da origen a exposiciones del público a las radiaciones, y el impacto radiológico de algunas centrales energéticas convencionales es comparable al de las centrales nucleares. (Véase el diagrama adjunto.)

En muchos países el carbón es una opción energética viable para satisfacer la demanda creciente de electricidad. En realidad, casi el 70% de las $2,7 \times 10^9$ toneladas equivalentes de carbón que se produjo en el mundo en 1981 fue utilizado para generar electricidad, el 20% para coquefacción y el 10% para calefacción y cocina domésticas. El carbón, como la mayoría de los materiales naturales, contiene radionucleidos naturales que se liberan durante la combustión. La cantidad que se libera depende de la concentración de actividad en el carbón, el contenido de ceniza, la temperatura de combustión, la separación de las cenizas de escorias pesadas que yacen en el fondo del horno de combustión y las cenizas volantes más ligeras, y la eficacia de los dispositivos de control de las emisiones. En el mundo existen dos tipos básicos de centrales energéticas alimentadas con carbón: las centrales energéticas "antiguas" que emiten alrededor del 10% de las cenizas volantes, y las centrales "modernas", dotadas de dispositivos avanzados de control de la contaminación, que emiten solamente el 0,5% de las cenizas volantes. Suponiendo que dos tercios de las centrales del mundo sean típicamente antiguas, la generación de un gigavatio-año de energía eléctrica tendría como resultado un compromiso de dosis colectiva normalizada de 4 Sv-hombre.

La utilización del carbón también da lugar a otros peligros de radiación. Gran parte de las cenizas volantes acumuladas por los dispositivos de control de las emisiones se utilizan luego para fabricar cemento y hormigón, por lo que el empleo de este material radiactivo en la construcción puede aumentar el grado de exposición a las radiaciones. Lo que no tiene aplicación comercial generalmente se vierte en las proximidades de la central eléctrica, lo cual plantea posibles peligros de radiación a causa de la resuspensión y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Desafortunadamente, no existen estimaciones de las dosis de radiación provenientes de estas prácticas.

La energía geotérmica es otra fuente de exposición a las radiaciones. Si bien su contribución a la producción de energía eléctrica es pequeña, se prevé que su importancia relativa aumentará. La mayor parte de la actividad concentrada en los fluidos geotérmicos proviene de la cadena de desintegración del uranio, concretamente del radón. A partir de mediciones del radón presente en los fluidos geotérmicos realizadas en varios países, el compromiso de dosis colectiva normalizada se calcula en 2 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

En diversas zonas del planeta, y sobre todo en los países nórdicos, se quema turba para producir energía. Los flujos de aguas superficiales y freáticas conducen los radionucleidos naturales a los pantanos de turba, donde finalmente son absorbidos por la materia turbosa. Se dispone de poca información sobre las descargas al medio ambiente de radionucleidos naturales provenientes de las centrales energéticas alimentadas

con turba. Partiendo del supuesto de que es necesario quemar 5000 millones de kilogramos de turba para generar un gigavatio de energía eléctrica al año, se calcula que el compromiso de dosis colectiva normalizada es de 2 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada. A largo plazo, el almacenamiento y la evacuación de cenizas de turba ricas en uranio pueden tener importantes consecuencias radiológicas.

Tanto el petróleo como el gas natural desempeñan un papel menos importante en las exposiciones a la radiación provenientes de la generación de electricidad en todo el mundo. Los compromisos de dosis colectiva normalizada son comparativamente bajos: 0,5 y 0,03 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada, respectivamente.

Exposiciones ocupacionales. La radiación natural también da lugar a exposiciones por razón de la ocupación. Es obvio que las tripulaciones de las aeronaves se ven sometidas a niveles de irradiación cósmica excepcionalmente altos. Según la información disponible para el período 1979-1983, la dosis individual anual se acercó a una máxima posible de 15 mSv. Los que trabajan en oficinas, tiendas y talleres donde los niveles de radón son altos, e incluso el personal doméstico de viviendas con altas concentraciones de radón, también están sujetos a niveles de dosis naturales que podrían ser sorprendentemente altos —mucho más altos que los límites de dosis ocupacionales que se utilizan para la industria nuclear.

La información disponible sobre las exposiciones ocupacionales derivadas de las actividades industriales en que se utilizan radionucleidos naturales se refiere solo a unos pocos países, e incluso en esos casos no está bien definida. Por ende, los cálculos solo pueden ser aproximados. Las exposiciones de los trabajadores de las centrales alimentadas con carbón son causadas principalmente por la inhalación de cenizas volantes en suspensión en el aire. La dosis colectiva mundial es de aproximadamente 60 Sv-hombre. Las dosis provenientes de la elaboración y el transporte de rocas fosfatadas se estiman colectivamente en 20 Sv-hombre. Para quienes participan en la manipulación de fertilizantes fosfatados, la dosis colectiva en todo el mundo puede llegar hasta 50 Sv-hombre. No se dispone de información sobre las exposiciones ocupacionales para los ciclos del combustible relacionados con los ensayos de armas. Sin embargo, dada la radiotoxicidad de algunos de los radionucleidos que se utilizan, y el hecho de que para estas prácticas no siempre se adoptan las mismas medidas estrictas de protección radiológica que se aplican en los usos pacíficos de la energía nuclear, no parece que las consecuencias radiológicas sean insignificantes.

Para las personas que en razón de su ocupación tienen que ver con todos los usos de la irradiación médica, la dosis equivalente colectiva anual es de 1 Sv-hombre por millón de habitantes. Si bien las prácticas de irradiación médica van en aumento en todo el mundo, los escasos datos sobre las tendencias indican reducciones del 10% al 20% en las dosis anuales cada decenio.

La radiación y la energía nuclear

A continuación se examinan los niveles de radiación provenientes de la generación normal de energía nucleoelectrónica. Desde que la primera central nuclear

comercial comenzó a funcionar en 1956, la industria nucleoelectrica mundial ha acumulado más de 5000 años-reactor de explotación en condiciones de relativa seguridad. No obstante, la generación nuclear de electricidad, como todas las empresas humanas, conlleva la posibilidad de accidentes, si bien es una posibilidad sumamente improbable. El accidente ocurrido en la Unidad 4 de la central nuclear de Chernobil, en la Unión Soviética, subrayó esa posibilidad, sobre todo al llevar al plano de la realidad el análisis de exposiciones accidentales graves. Dada la distribución desigual de las exposiciones, no es seguro que las exposiciones causadas por el accidente de Chernobil se puedan comparar con las provenientes de otras fuentes continuas, incluida la radiación natural. Aun así, estas comparaciones son útiles para comprender las consecuencias de este caso extremo.

Puesto que la cuestión de la evacuación de los desechos nucleares radiactivos es objeto de atención en los debates públicos sobre el desarrollo de la energía nuclear, conviene examinar brevemente el posible impacto radiológico de estos desechos. Frecuentemente, la preocupación pública dimana de la falsa noción de que el control o la gestión de los desechos radiactivos en condiciones de seguridad no es posible por períodos largos. Estas preocupaciones contrastan marcadamente con las opiniones de los especialistas, quienes confían en las soluciones técnicas. En resumen, el impacto radiológico de la evacuación adecuada de los desechos resultantes de un tratamiento correcto del combustible nuclear gastado es tan insignificante, que aun en los supuestos más pesimistas las dosis para la población (hipotética) que viva dentro de miles de años sería efectivamente nula. Por esta razón, el tema de la evacuación de desechos no se examina en el análisis comparativo de los niveles de radiación.

Generación habitual de electricidad de origen nuclear. Normalmente, la generación de electricidad de origen nuclear libera solo cantidades despreciables de materiales radiactivos en el medio ambiente. En promedio, la dosis anual atribuible a todas las prácticas del ciclo del combustible nuclear es solo una fracción muy pequeña (menos del 0,1%) de la que se recibe de la radiación natural.

Las exposiciones debidas a la producción de energía nuclear ocurren en todas las etapas del ciclo del combustible, y las dosis de radiación que reciben el público y los trabajadores se evalúan en función del espacio y el tiempo. (Véanse los gráficos adjuntos.)

Minería y tratamiento del uranio. Las operaciones que se llevan a cabo en las minas dan lugar a la presencia de efluentes radiactivos, principalmente en el aire que sale de las minas subterráneas o en las emisiones de los pozos de las minas a cielo abierto. Las pilas de minerales y otros materiales provenientes de la extracción del uranio producen emisiones atmosféricas a corto plazo y, en mayor medida, a más largo plazo. La práctica actual consiste en almacenar las colas en pilas descubiertas, o con una cubierta sólida o líquida en represas o diques dotados de las condiciones técnicas requeridas. El radón que se libera durante 5 años a causa de las actividades de *minería y tratamiento produce compromisos de dosis de 0,1 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada. Los compromisos de dosis colectiva de las*

poblaciones locales y regionales causados por las actividades de minería y tratamiento son de 0,3 y 0,04 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada, respectivamente.

Fabricación de combustible. En términos comparativos, la fabricación de combustible produce muy pocas emisiones atmosféricas y acuáticas. La mayor parte de los compuestos de uranio son sólidos y pueden eliminarse fácilmente de las corrientes de efluentes en suspensión en el aire. El compromiso de dosis colectiva del público es de 0,003 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

Explotación de reactores. Aun cuando la capacidad de generación de electricidad aumenta, las dosis que recibe el público a causa de la explotación de los reactores se han venido reduciendo continuamente en los últimos años. Esto se atribuye, en parte, a los amplios sistemas de protección radiológica existentes en las centrales nucleares y, en parte, al aumento de la eficacia operacional de la central. Por ejemplo, las descargas de carbono 14 en la atmósfera debidas a la explotación de reactores son ahora casi la mitad de las comunicadas por el UNSCEAR en 1982. Ello es significativo, por cuanto el carbono 14 representa una buena parte del compromiso de dosis colectiva del público de 2,5 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

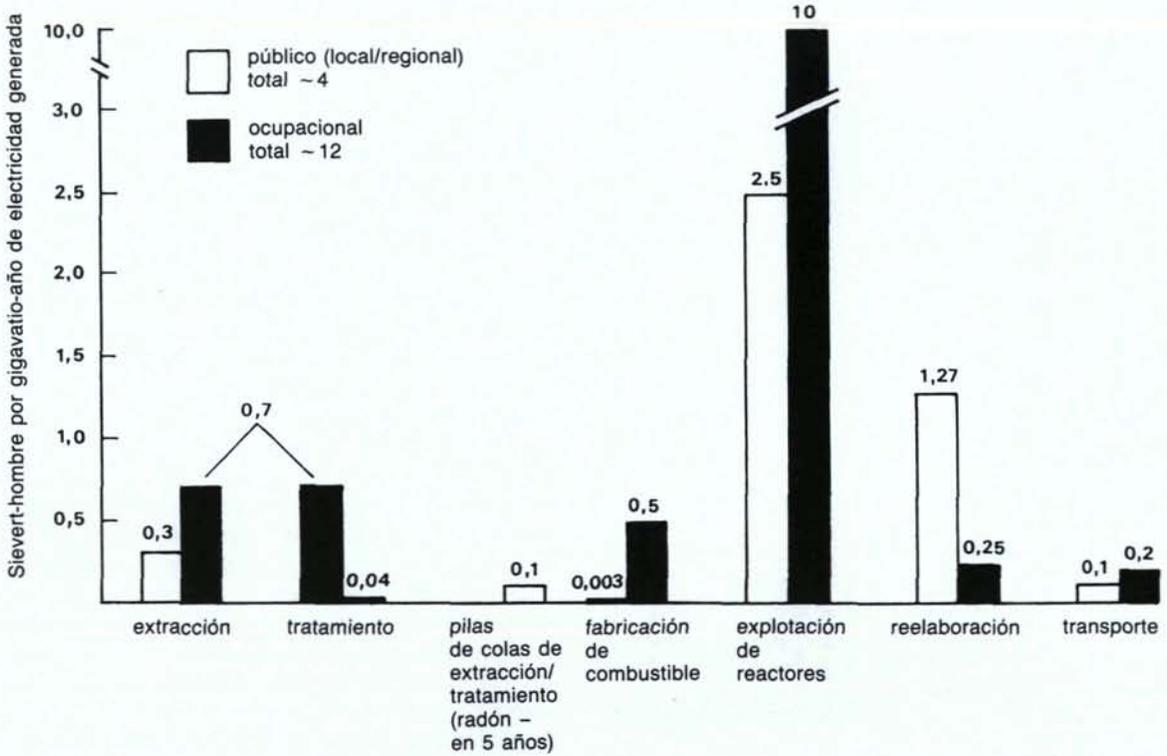
Reelaboración. Existe un pequeño número de plantas de reelaboración que se explotan comercialmente, incluidas las de Sellafield (anteriormente Windscale) en el Reino Unido, y La Hague y Marcoule, ambas en Francia. Estas instalaciones reelaboran solo un pequeño porcentaje del combustible irradiado del mundo. El resto se ha almacenado, en espera de que los países adopten decisiones de política en materia de reelaboración. Los nucleidos de período largo (por ejemplo, el carbono 14, el tritio, el criptón 85 y el yodo 129) en los efluentes de la reelaboración son los que causan mayor preocupación. A las descargas de líquidos de las plantas de reelaboración corresponde la mayor parte del compromiso de dosis colectiva de 1,27 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

Transporte. Las exposiciones de las poblaciones locales y regionales debidas al transporte a lo largo de la cadena del ciclo del combustible son comparativamente bajas; el compromiso de dosis colectiva es de alrededor de 0,1 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

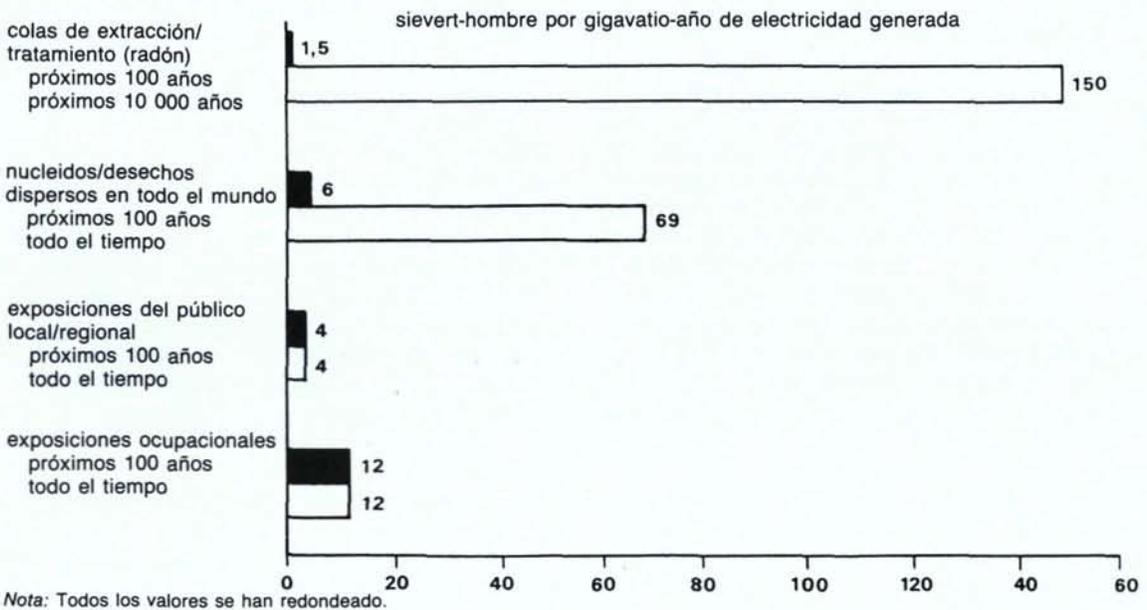
Irradiación ocupacional. Existen marcadas diferencias entre las irradiaciones que recibe el personal que trabaja en las diversas instalaciones de la industria nucleoelectrica. El personal encargado del mantenimiento, y sobre todo el personal de reparación de las centrales nucleares, recibe las dosis más elevadas. Los trabajadores de las minas de uranio, principalmente los que trabajan en las minas subterráneas, enfrentan los peligros de radiación que plantean el radón y sus hijos.

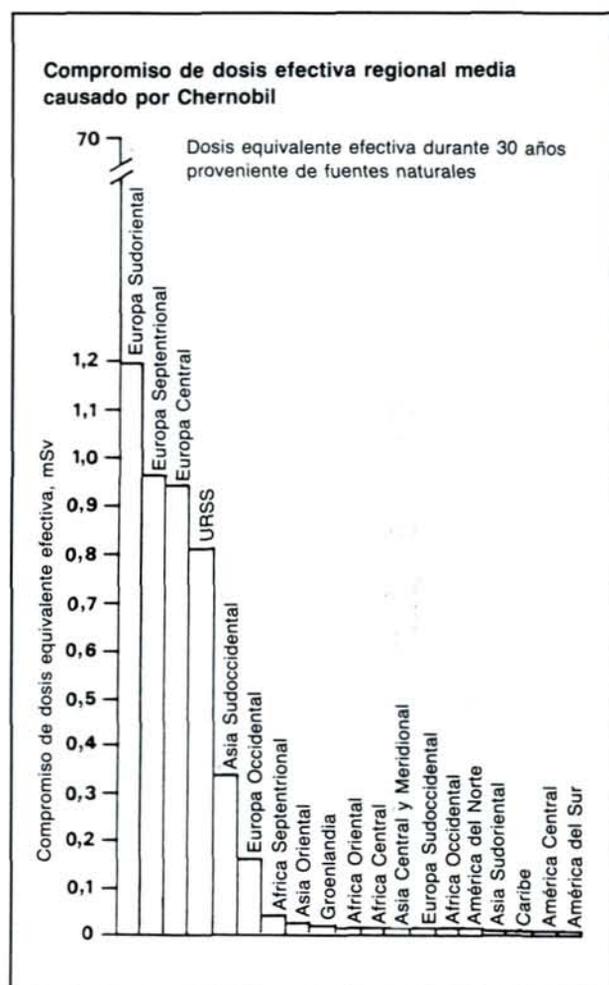
Perspectivas a largo plazo. Las operaciones del ciclo del combustible también producen radionucleidos de período mucho más largo que permanecen en la biosfera durante miles de años. Partiendo del supuesto de que las dosis de esos radionucleidos se reciben durante un período infinito hipotético, el compromiso de dosis colectiva es de 69 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada. No obstante, durante los próximos

Estimaciones de los compromisos de dosis colectiva a corto plazo de las poblaciones local y regional, y exposiciones ocupacionales debidas al ciclo del combustible nuclear (normalizado)



Estimación de los compromisos de dosis colectiva a largo plazo debidos al ciclo del combustible nuclear (normalizado)





100 años sólo se recibirá el 10% de ese total. Durante los próximos 10 000 años, las exposiciones al radón procedente de colas de tratamiento integrarían dosis de hasta 150 Sv-hombre por gigavatio-año de electricidad generada.

El accidente de Chernobil: de la hipótesis a la realidad. Si bien las consecuencias radiológicas de la generación habitual de electricidad de origen nuclear son muy pequeñas, persisten las preocupaciones en torno a la repercusión de posibles accidentes. En la actualidad, empero, las exposiciones a las radiaciones debidas al accidente de Chernobil pueden analizarse con una óptica realista, constituida por el amplio caudal de información proporcionado por los grupos internacionales y nacionales que reúnen y analizan datos sobre la precipitación radiológica desde que se produjo el accidente de Chernobil. En particular, el UNSCEAR, junto con la Organización Mundial de la Salud y el OIEA, evaluaron el impacto radiológico global del accidente, tomando como base datos procedentes de casi 40 países.

El accidente. El accidente ocurrido el 26 de abril de 1986 en la Unidad 4 de la central nuclear de Chernobil tuvo lugar cuando se desconectaron los sistemas de seguridad durante una prueba mecánica de baja potencia. Las inestabilidades que se sucedieron, fuera de todo control, causaron explosiones e incendios que dañaron severamente el núcleo del reactor y las estructuras de contención. Se dispersaron en el medio ambiente

gases y partículas de polvo radiactivos: 25% el primer día, y el resto durante los nueve días siguientes. Diez días después del accidente el incendio fue extinguido y se selló el núcleo del reactor. En la actualidad el reactor está sepultado con carácter permanente en una estructura hermética que aísla la radiactividad residual.

Los materiales radiactivos liberados inicialmente se dispersaron en dirección norte impulsados por los vientos; las liberaciones subsiguientes se dispersaron hacia el oeste y el sudoeste, así como en otras direcciones. El transporte por la atmósfera a grandes distancias dispersó por todo el hemisferio septentrional la radiactividad liberada. En el hemisferio meridional, sin embargo, no se depositó ninguna actividad en suspensión en el aire. La precipitación de materiales radiactivos suspendidos en el aire se produjo principalmente por lluvias esporádicas. El yodo 131, el cesio 134 y el cesio 137 fueron los radionucleidos más importantes que se depositaron, y dieron lugar a exposiciones externas e internas a causa de la contaminación del suelo y de la ingestión de alimentos contaminados, respectivamente.

La respuesta. Las enérgicas medidas de protección de la salud pública que adoptaron de inmediato las autoridades soviéticas a raíz del accidente y los programas de salud pública en curso han reducido sustancialmente el riesgo de exposición del público a las radiaciones. Las medidas de descontaminación, la extracción de la capa superficial del suelo, la vigilancia y destrucción de alimentos y ganado y las restricciones a la producción agrícola han disminuido los niveles de las dosis de radiación en la región a cantidades bastante inferiores a las de las evaluaciones del caso más desfavorable realizadas poco después del accidente y antes de que las medidas de emergencia radiológica surtieran efecto en las zonas contaminadas y su población. En el verano de 1987 se habían descontaminado 60 000 viviendas y otras estructuras de unos 600 asentamientos.

Fuera de la Unión Soviética, las medidas adoptadas en muchos países inmediatamente después del accidente disminuyeron efectivamente las dosis individuales y colectivas.

Dosis de radiación: ¿cuánto, dónde y por qué? Los resultados obtenidos en relación con los principales radionucleidos liberados indican la existencia de amplias variaciones en la estimación de las dosis que recibe el público. Las dosis comprometidas a raíz del accidente abarcarán principalmente los próximos 30 años aproximadamente y se deberán sobre todo, a la exposición continua al cesio 137. Incluso el compromiso de dosis regional media más alto (cerca de 1,2 mSv), registrado para las poblaciones de Europa sudoriental, representa solo una pequeñísima fracción de la dosis integrada durante 30 años (unos 70 mSv) que por término medio recibirá inevitablemente la población, durante ese período a causa de la radiación natural de fondo. (Véase la figura adjunta.)

Las dosis recibidas durante el primer año siguiente al accidente tampoco son alarmantes. Para la población expuesta de la región de Bielorrusia, la dosis media del primer año fue del orden de un año de exposición a la radiación natural de fondo. En otros lugares de Europa, las dosis del primer año variaron entre el 25% y 75% de las dosis anuales debidas a la radiación natural de fondo. Los países situados en el extremo occidental de Europa,

así como los de Asia, Africa septentrional y América del Norte y Central resultaron menos afectados. Estos resultados concuerdan con el esquema del depósito.

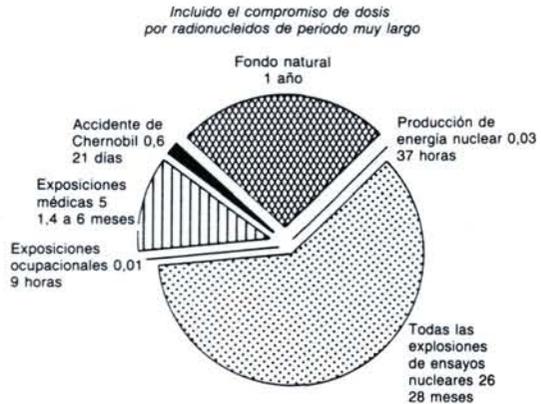
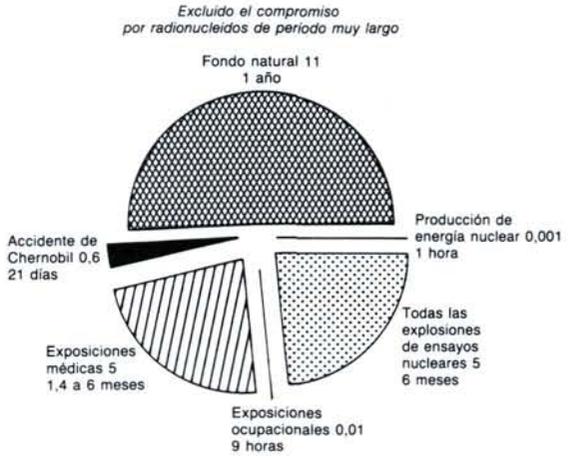
No hay motivos de preocupación. Chernobil constituyó, sin duda, la emergencia radiológica más grave que ha experimentado la humanidad. Además de las seguridades que se derivan del informe del UNSCEAR, en enero de 1988 la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos publicó los resultados de su evaluación de la precipitación radiactiva proveniente del accidente registrada en los países de la OCDE. En la evaluación se concluye que es poco probable que los habitantes de los países de la OCDE hayan resultado expuestos a una dosis de radiación significativamente mayor que la recibida durante un año de exposición a la radiación natural de fondo. Por consiguiente, el riesgo medio para toda la vida de daño relacionado con la radiación no ha cambiado de manera apreciable para los individuos del público a causa del accidente; el número de posibles efectos sobre la salud (cánceres y efectos genéticos) que puede derivarse al calcular las dosis colectivas no constituirán una adición discernible a la incidencia natural de efectos similares en la población.

Recapitulación

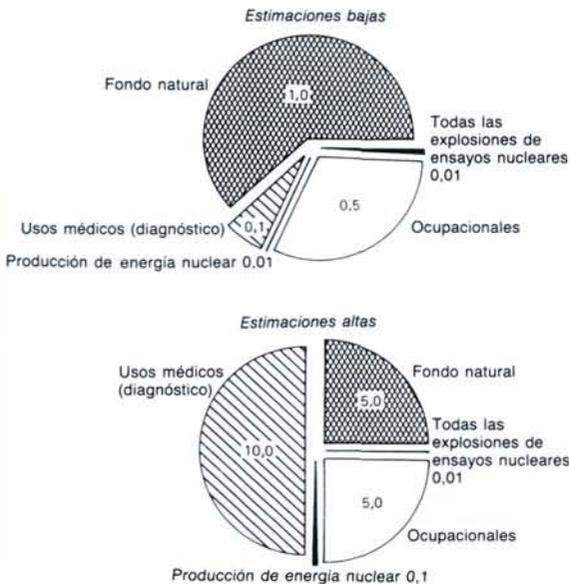
En la actualidad es posible realizar un análisis comparativo de la radiación en el medio ambiente, sobre una base individual y también colectiva atendiendo a los compromisos de dosis de la población del mundo. Para ello, existe una clara base objetiva.

● La contribución de la energía nuclear al medio ambiente de radiaciones se puede considerar insignificante: es inferior en varios órdenes de magnitud a la irradiación que una persona recibe de todas las demás fuentes. Desde el punto de vista del compromiso de dosis colectiva, en condiciones normales y excluido el

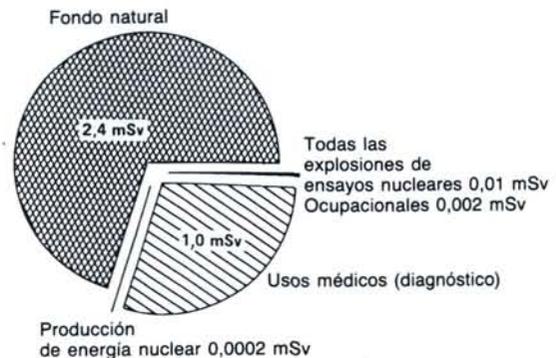
Compromisos de dosis colectiva (millones de sieverts-hombre) y tiempo equivalente de exposición a radiación natural de fondo



Dosis anuales actuales para individuos típicamente expuestos (mSv)



Dosis actuales de radiación individual por año (per caput) provenientes de fuentes naturales y artificiales



compromiso imputable a los radionucleidos de período muy largo, la exposición global del público debida a un año de producción de electricidad de origen nuclear es equivalente a poco menos de una hora adicional de exposición a la radiación natural de fondo en ese año. Si se incluyen estos radionucleidos (sobre todo el carbono 14), la dosis comprometida es equivalente a unas 37 horas adicionales de irradiación natural. (*Véanse los gráficos.*)

Incluso en el caso extremo de Chernobil, el compromiso de dosis colectiva (fundamentalmente a causa del cesio 137, dosis que se recibirá durante los próximos 30 años) equivale a solo 21 días de exposición adicional a la radiación natural de fondo.

- La irradiación médica es un importante modificador del medio ambiente de radiaciones. La dosis anual media que se recibe del empleo de radiaciones con fines médicos, sobre todo de los exámenes de diagnóstico con rayos X, es del 20% al 45% de la que recibe anualmente un individuo medio a causa de la radiación natural de fondo. La frecuencia e intensidad de estas prácticas varían espectacularmente entre la población, ya que existen individuos típicos que reciben dos veces más irradiación de los usos médicos que de la exposición natural. En conjunto, las exposiciones debidas a la irradiación médica equivalen a 1,4–6 meses de exposiciones adicionales a la radiación natural de fondo. Además, es posible que en los próximos decenios aumente la irradiación médica a medida que aumente la expectativa de vida y que los servicios médicos lleguen a una parte mayor de la población del mundo en desarrollo. Es probable que en el año 2000 la dosis colectiva haya aumentado en un 50%, y en el 2025 en un 100%.

- Obviamente, la irradiación debida al carbono 14 influye sobre el compromiso de dosis procedente de los ensayos nucleares que se han llevado a cabo en la atmósfera durante los últimos decenios. Si en la estimación se incluye la exposición humana a este radionucleido de período muy largo, el compromiso de dosis colectiva equivale a 28 meses de irradiación natural adicional.

- Para completar el panorama, cabe señalar que las irradiaciones ocupacionales equivalen a poco menos de 9 horas de irradiación natural adicional por año.

Las consecuencias

El problema de la comunicación. Lógicamente, cabe concluir que la generación normal de electricidad de origen nuclear no entraña cambios significativos en el medio ambiente de radiaciones. Visto con una óptica adecuada, las consecuencias del accidente de Chernobil no son tan catastróficas como suelen describirse erróneamente. Entonces, ¿por qué se ha interpretado tan equivocadamente el impacto de la energía nuclear? Una posible explicación es que las personas ven la radiación con cierta miopía: se la considera fundamentalmente como un elemento relacionado con la energía nuclear que no proporciona beneficios tangibles. De hecho, la irradiación debida a otras prácticas humanas se acoge con agrado o se tolera. Para un paciente, los beneficios de la irradiación médica son evidentes. Para una persona poco inquisitiva y acostumbrada a las conveniencias de la electricidad, las ventajas de la energía nuclear y las desventajas de su eliminación gradual resultan menos obvias.

El problema de la comunicación es grave y ello obedece a la falta de niveles comunes de entendimiento entre los especialistas bien informados acerca de la baja intensidad de la irradiación debida a la energía nuclear y un público preocupado, cuyo desasosiego no se disipa fácilmente con las tenues seguridades dadas por los especialistas. Es preciso analizar abiertamente las inquietudes del público en torno a la radiación y establecer una comunicación objetiva, en un lenguaje que fomente la comprensión, la confianza y la credibilidad. La evaluación del UNSCEAR proporciona la oportunidad de subsanar esta deficiencia.

Amplias posibilidades de reducir las dosis. Por otra parte, existen muchas posibilidades de reducir las dosis de radiación sin comprometer los beneficios de las prácticas radiológicas. Los esfuerzos encaminados a controlar la irradiación natural están dando resultados alentadores. Por ejemplo, la aplicación de láminas de aluminio a las paredes construidas con hormigón a base de esquistos aluminíferos (radiactivo) ha reducido la tasa de entrada del radón en un 50%, y el revestimiento de las superficies de las paredes ha disminuido las tasas del radón entre un 20% y un 80%. También es posible eliminar irradiaciones médicas innecesarias. Se están utilizando nuevas técnicas de diagnóstico, como el ultrasonido y la obtención de imágenes por resonancia magnética, en lugar de los rayos X, sobre todo para la columna vertebral, los riñones y la vesícula biliar. Los adelantos tecnológicos de los últimos dos decenios han allanado el camino para que los pacientes reciban dosis mucho menores. La mayor reducción, con mucho, se debe a la sustitución de la fluoroscopia y la fotofluoroscopia del tórax por la radiografía, reducción que asciende a factores de 20 y 5, respectivamente. Entre algunos métodos sencillos y económicos que permiten obtener modestas reducciones de las dosis figuran la colimación, la filtración adicional de haces y el blindaje de las gónadas y la tiroides durante los exámenes radiográficos. La capacitación en el uso, la calibración y la garantía de calidad del equipamiento médico podría reducir las dosis, posiblemente hasta en un 50%. En muchos países, más de la mitad del personal que realiza los exámenes médicos radiológicos ha recibido poca o ninguna capacitación formalizada.

Pese a su pequeña contribución a los efectos radiológicos, la industria nucleoelectrónica puede igualar este progreso y lo está haciendo. Según la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, la exposición al radón imputable a las colas de uranio podría reducirse considerablemente; se consideran viables factores de reducción de más de 6 millones. En todo el ciclo del combustible se pueden encontrar tendencias análogas. Las dosis debidas a la explotación de los reactores nucleares disminuyen, pese al aumento de la capacidad, fundamentalmente a causa de los sistemas de protección avanzados y la difusión del uso de los robots. La parte final del ciclo del combustible no constituye una excepción: una de las funciones importantes de la reelaboración del combustible consiste en disminuir las consecuencias radiológicas de la evacuación directa de elementos combustibles gastados. En la reelaboración prevalece la tendencia a lograr una mayor eficacia, sobre todo en Sellafield.

Exposiciones a la radiación y seguridad radiológica.

Sorprendentemente, las marcadas variaciones en los aportes de las fuentes de radiación y la posibilidad de controlar estas exposiciones han tenido una influencia relativamente escasa a la hora de establecer prioridades en materia de seguridad radiológica. Resulta irónico que los esfuerzos en pro de la seguridad radiológica se hayan centrado principalmente en la energía nuclear, y que de hecho se hayan soslayado o subestimado los riesgos mucho mayores que plantean otras fuentes de radiación.

Habida cuenta de la enorme variación de los niveles de radiación y la posibilidad de reducir las exposiciones provenientes de todas las fuentes, es lamentable que estas consideraciones hayan influido tan poco en la prioridad con que debería aplicarse la seguridad radiológica.

En principio, existen normas de protección radiológica para las exposiciones ocupacionales causadas por todas las prácticas en que intervienen materiales radiactivos. Tales normas se hacen cumplir estrictamente en la industria nuclear, cuyo personal incluye a muchos profesionales altamente cualificados en la esfera de la protección radiológica. En otras prácticas, por lo general no prevalecen estos niveles de protección tan elevados, salvo notables excepciones como en los hospitales técnicamente avanzados. No obstante, las exposiciones ocupacionales de los trabajadores de las instalaciones nucleares son superiores en un orden de magnitud a las registradas para otras prácticas que emplean radiaciones, como la irradiación con fines médicos. Estas cifras se deben interpretar con cautela. Por una parte, en las instalaciones nucleares existe un amplio y estricto sistema de registros. Por otra, en todo el ciclo del combustible nuclear se aplican con carácter obligatorio avanzados sistemas de vigilancia de la irradiación ocupacional; en ninguna otra actividad existe este grado de adelanto.

Aumento o reducción de las dosis: ventajas comparativas. Con respecto a la exposición a las radiaciones, a menudo las personas tienen que sopesar ventajas comparativas, por ejemplo, entre una dosis relativamente alta causada por una tomografía computadorizada o el riesgo de no detectar ni someter a tratamiento una enfermedad. Los médicos también deben hacer frente a conflictos similares: una radiografía subexpuesta que no puede interpretarse no reporta beneficio alguno al paciente, aun cuando la dosis absorbida sea baja.

En conjunto, el objetivo de evitar o reducir la exposición a las radiaciones *per se* no siempre es lo ideal en un mundo dinámico donde la población crece, las economías se amplían, las personas viven más tiempo y las aspiraciones a una vida mejor aumentan en todo el orbe. Durante los próximos 30 años el mundo se enfrentará al más brusco crecimiento demográfico, de 5000 millones a poco más de 8000 millones en el 2015. En todo el mundo persiste la tendencia a la urbanización y se prevé que para el 2015 la población urbana representará un 57%, en comparación con la proporción actual del 30%. Tradicionalmente, la población urbana se ha beneficiado de los servicios médicos en mayor medida que la población rural. El reciente fenómeno del envejecimiento de la población, sobre todo en los países desarrollados, necesariamente aumenta la

Dosis de radiación

Dosis absorbida: La cantidad de energía de radiación absorbida por gramo de tejido. Se expresa en una unidad denominada gray (Gy).

Dosis equivalente: La dosis absorbida ponderada para tener en cuenta los diferentes tipos de radiación ionizante y sus energías. Se expresa en una unidad denominada sievert (Sv), y los submúltiplos milisievert (mSv), microsievert (μ Sv) y otros. Para la mayoría de las aplicaciones prácticas, el factor de ponderación es unitario; es decir, un sievert es igual a un gray.

Dosis equivalente efectiva. La dosis equivalente ponderada para expresar la sensibilidad de los diferentes órganos humanos a la exposición a las radiaciones. Como es una dosis equivalente (modificada), también se expresa en sievert.

Dosis equivalente efectiva colectiva: La dosis equivalente efectiva para un grupo de personas debida a una fuente de radiación dada. Se expresa en una unidad denominada sievert-hombre (Sv-hombre).

Nota: En la práctica, estas magnitudes se expresan como tasas (por ejemplo, mSv por hora, o sievert-hombre por año). Si las tasas se suman en el tiempo, la cantidad resultante se denomina generalmente compromiso de dosis. A menos que se especifique lo contrario, el tiempo de integración de un compromiso de dosis es teóricamente infinito; por ejemplo, el compromiso de dosis colectiva es la suma de todas las dosis recibidas por todos los individuos (individuos presentes y futuros durante todo el tiempo) como resultado de una práctica o actividad en que intervienen radiaciones.

demanda de servicios médicos. Mientras que en 1980 unos 380 millones de personas de todo el mundo tenían 60 años de edad o más, en el 2000 la cifra podría ser de 607 millones y ascender a casi 1200 millones en el 2025.

El desarrollo social y económico exige energía, especialmente electricidad. La energía nuclear y el carbón son opciones factibles para satisfacer las demandas de electricidad en gran escala, pero ambas provocan exposición a las radiaciones. Los consumidores de los sectores industrial y doméstico están sustituyendo el petróleo por la electricidad, no sólo por su mayor independencia energética, sino también por las ventajas económicas que entraña la elevada eficiencia de la electricidad en el uso final. Si bien los demás combustibles fósiles y las fuentes renovables pueden contribuir al suministro de energía, para la mayoría de los países la energía nuclear y el carbón constituyen las opciones más viables para responder a estas demandas en gran escala.

Los aumentos previstos en la capacidad de generación de energía nucleoelectrónica aumentarán los niveles de exposición a las radiaciones. Si se considera la cuestión desde una perspectiva adecuada, cabe estimar que en el futuro, como ahora, estas exposiciones representarán solo un pequeño porcentaje del medio ambiente de radiaciones. Con todo, el aumento de la proporción de electricidad generada por carbón entraña no solo mayores exposiciones a la radiación, sino también los innumerables riesgos ambientales que plantea el quemado de combustibles fósiles.