

Riesgos sanitarios resultantes de la utilización de la energía nuclear para la producción de electricidad

por M. Tubiana

En los últimos años, numerosos trabajos han tratado de comparar los riesgos que para la salud crean los diferentes métodos de producción de energía. El objeto del presente artículo es:

1. Revisar los datos sobre los cuales se ha basado la evaluación de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes;
2. Evaluar las dosis recibidas por el público y por los trabajadores a causa de la producción de energía nucleoelectrónica;
3. Examinar cuáles pueden ser las consecuencias biológicas de esas irradiaciones — tanto la irradiación externa como la contaminación interna — para el público y para los trabajadores.

Datos sobre los cuales se basa la evaluación de los efectos

Se dice con frecuencia que los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el hombre son misteriosos e imprevisibles. En realidad, de todos los agentes físicos y químicos presentes en nuestro medio ambiente, las radiaciones son ciertamente las más conocidas. Roentgen descubrió los rayos-X en 1895 y Becquerel la radiactividad natural en 1896, y se tuvo conciencia casi inmediatamente de que esas radiaciones producían efectos sobre el hombre. El primer cáncer provocado por las radiaciones se observó en 1902. El primer experimento que demostró la posibilidad de provocar un cáncer en animales tuvo lugar en 1910. El efecto mutagénico de los rayos-X es conocido desde 1925.

Así, desde principios del siglo XX conocemos los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, desde los causados por dosis de muchos millares de rem (6000–7000 rem) usadas para el tratamiento del cáncer, hasta los inducidos por la acumulación de bajas dosis. Ante el peligro potencial de las radiaciones ionizantes se realizaron en esa materia investigaciones paralelas con el rápido desenvolvimiento del empleo de las radiaciones ionizantes en medicina (radiodiagnóstico y radioterapia). Las primeras víctimas de las radiaciones ionizantes fueron precisamente los físicos y médicos que estudiaban las mismas y sus efectos.

El sentimiento de culpabilidad y de inquietud que Hiroshima y Nagasaki provocaron en todo el mundo científico explica que, a partir de 1945, el estudio de los efectos de las radiaciones

El Dr. Tubiana es Profesor de la Facultad de Medicina de Paris-Sud y Director del Institut de Radiologie Clinique del INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médical).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

ionizantes en el hombre haya adquirido una dimensión todavía más vasta. Desde entonces, las sumas consagradas al estudio de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes han crecido hasta alcanzar miles de millones de dólares.

Es paradójico que la amplitud de tales investigaciones haya provocado inquietudes, aunque es comprensible el temor de que su importancia refleje la gravedad de los peligros. Además, como los otros métodos de producción de energía (carbón y petróleo) se desarrollaron en un momento en que se prestaba menos atención a los riesgos sanitarios y cuando algunos de estos riesgos, tales como los mutagénicos o cancerígenos, se ignoraban por completo, se observa una tendencia a minimizar esos peligros. Es entonces comprensible que, dado que los riesgos de las radiaciones han sido los primeros demostrados y cuantificados — por los propios promotores de la energía nuclear —, ocupen el centro de la atención; de manera que, hasta hace poco los más fáciles de detectar de todos los agentes tóxicos eran las radiaciones ionizantes debido a la alta precisión y a la extrema sensibilidad de los aparatos detectores.

A causa del interés que los radiobiólogos prestaron desde el primer momento a la protección radiológica, y gracias a los esfuerzos desarrollados para cuantificar los riesgos y establecer métodos de dosimetría, los expertos de sanidad estiman unánimemente que la protección radiológica debería servir como modelo para todos los trabajos destinados a luchar contra los agentes potencialmente nocivos. El adelanto de los radiotoxicólogos con respecto a otros expertos en materia de higiene queda demostrado por el hecho de que solo 50 años después del establecimiento de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) se ha creado un órgano similar para las sustancias químicas cancerígenas y mutagénicas.

Además de las investigaciones experimentales, nuestros conocimientos actuales sobre los efectos tardíos de las radiaciones ionizantes en el hombre son fruto del estudio de las poblaciones expuestas a dosis conocidas de radiaciones, poblaciones en las que se han investigado científicamente las consecuencias de tales exposiciones. Esos grupos comprenden varias decenas de millares de pacientes de afecciones benignas tratados con rayos X y con radisótopos; varios grupos de trabajadores (obreros que pintan esferas luminosas de relojes, radiólogos, mineros en minas de uranio, etc.); y los 285 000 sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, que se encuentran en observación desde 1945 por un equipo de 500 especialistas creado conjuntamente por el Japón y los Estados Unidos.

Numerosas conferencias y simposios han examinado esos estudios, y varios comités nacionales e internacionales de expertos, han analizado el conjunto de conocimientos adquiridos en esta esfera. En particular, cabe mencionar el informe de 1977 del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (Comité de Radiaciones), documento de más de 700 páginas, y los informes de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos. Además, en 1928 — mucho antes del advenimiento de la energía nuclear — se reunían ya grupos de especialistas, radiólogos y físicos para discutir tanto los riesgos de las radiaciones ionizantes como las precauciones que debían tomarse para limitarlos, y se creó la Comisión Internacional de Protección Radiológica, cuyas primeras recomendaciones se publicaron en 1928. Desde entonces la CIPR publica regularmente sus recomendaciones, formuladas sobre la base de los datos científicos más recientes. Estas recomendaciones han sido aceptadas siempre por todos los países, y la importancia de la CIPR es universalmente reconocida. En 1977 la Comisión publicó su 26º informe. Cabe subrayar asimismo que todos esos grupos de expertos han llegado a conclusiones esencialmente similares y que, contrariamente a la impresión que tiene a veces el público, existen escasas divergencias entre los especialistas sobre la naturaleza y la importancia de los efectos biológicos causados por las radiaciones.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 1. Principales fuentes de irradiación en Francia

Fuentes: Informe de 1977 del Comité de Radiaciones e Informe de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (Washington, 1980)

IRRADIACION DE FUENTES NATURALES	Dosis media (mrem/año) (Región de París)	Variaciones en Francia
Rayos cósmicos	30	100 a 2500 m de altitud
Radiactividad terrestre	46	200 en las regiones graníticas
Radisótopos naturales incorporados en el organismo (⁴⁰ K, Ra, Th, etc.)	24	200 en las regiones con agua rica en radiactividad
	100	250 a 300 en Bretaña, Macizo Central, etc.
IRRADIACION DE FUENTES ARTIFICIALES	Valor medio notificado con respecto a la población total (mrem/año)	
Radiología médica	100 ¹	Considerables variaciones individuales de acuerdo a la edad y a la frecuencia de los exámenes radiológicos
Dosis en 1977 debidas a las precipitaciones radiactivas resultantes de ensayos nucleares en la atmósfera (efectuados principalmente en 1956-1962)	5	
Viajes aéreos	0,1	Considerables variaciones individuales: hasta 250-500 en tripulantes
Producción nucleoelectrónica en 1976 (fuentes de irradiación externa y contaminación interna)	0,15	Pequeñas variaciones en función del lugar de residencia; el valor se eleva hasta 4 mrem por persona que viva en la proximidad de una central

¹ Este valor ha sido calculado en los Estados Unidos. En Francia, la cifra es muy probablemente similar según los datos del Servicio Central de Protección contra las Radiaciones Ionizantes y del Ministerio de Salud Pública. El valor medio para la entera población mundial es de 20 mrem/año.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 1 (continuación)

IRRADIACION DE FUENTES ARTIFICIALES	Valor medio notificaco con respecto a la población total (mrem/año)	Variaciones en Francia
Dosis prevista para el año 2000	2	
Relojes con esfera luminosa	0,50	Hasta 10 en el caso de personas que utilizan regularmente ciertos tipos de relojes luminosos
Irradiaciones varias (abonos fosfatados, televisores, combustión de carbón, etc.)	1	
TOTAL, irradiaciones de origen no médico o militar	4	

Dosis a la que pueden estar expuestos el público y los trabajadores

Por el hecho de su presencia en la superficie de la Tierra, toda persona está expuesta a los rayos cósmicos y a la radiación emitida por sustancias radiactivas naturales (radio y torio): la dosis media anual es del orden de 100 mrem al nivel del mar. Sin embargo, esta dosis varía considerablemente de un punto a otro de la Tierra. En Francia, por ejemplo, es del orden de 100 mrem por año en la región de París, pero alcanza valores de 200-300 mrem en regiones de elevada altitud (Alpes) o regiones con suelo granítico. En varias regiones del globo, la dosis anual puede elevarse a 500 o 600 mrem.

Además de esta exposición natural, hay otras fuentes de irradiación (véase el Cuadro 1). La más importante fuente de irradiación de origen humano es la utilización médica de radiaciones ionizantes, principalmente en radiodiagnósticos, de la que todos los habitantes del globo reciben, en promedio, una dosis anual del orden de 20 mrem. En ciertos países como los Estados Unidos y Francia, sin embargo, la dosis media alcanza 50 y hasta 100 mrem por año.

En comparación ¿cuál es la dosis procedente de la utilización de la energía nuclear? En 1976, según el informe del Comité de Radiaciones, representaba 0,15 mrem por año, o sea unas 600 veces inferior a la irradiación natural. Dicho de otro modo, la dosis media recibida durante todo un año debida a la energía nuclear era aproximadamente igual a la recibida durante medio día procedente de la radiactividad natural. En Francia, la dosis anual atribuible a la energía nuclear en 1976 era el equivalente del incremento de dosis que recibiría un parisiense que pasara medio día en Bretaña o en el Macizo Central.

Para el año 2000, el Comité de Radiaciones prevé valores entre 2 a 4 mrem por año si el 60% de la electricidad producida es de origen nuclear. Este valor incluye dosis debidas a la extracción y tratamiento del uranio, al funcionamiento de los reactores, a los desechos

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

nucleares y a la contaminación del aire, agua y alimentos, teniendo en cuenta las concentraciones posibles a lo largo de la cadena alimentaria y la fijación de sustancias radiactivas en el organismo humano que puedan resultar. Así, para un parisiense, ello representaría el equivalente de una o dos semanas de estancia en el Macizo Central o en Bretaña.

Contrariamente a lo que se ha dicho a veces, no se ha detectado ninguna diferencia significativa de la frecuencia de cánceres o malformaciones genéticas entre las regiones expuestas a dosis diferentes de irradiación natural.

Las dosis recibidas por los trabajadores de las centrales nucleoelectricas se conocen con precisión en todos los países. Por ejemplo, el Cuadro 2 presenta información procedente del último informe de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos. El orden de magnitud de las dosis se aproxima al de otros países, especialmente Francia. Como se ve, esas dosis son, en promedio, apreciablemente inferiores al límite indicado por la CIPR (5 mrem/año). Se debe observar, además, que la irradiación de los trabajadores o la contaminación del público debida a los reactores reproductores rápidos será más baja, por número dado de kilovatios-horas producido, que la procedente de reactores clásicos de neutrones térmicos.

Efectos biológicos de dosis bajas

El primer tipo de efectos biológicos corresponde a los efectos inmediatos o diferidos sobre los tejidos irradiados, por ejemplo: lesiones de la piel, reducción de la fecundidad, esterilidad, producción de cataratas y disminución del crecimiento de los sujetos irradiados durante la infancia. Cuando las dosis son bastante altas (por encima de un umbral de algunas centenas o millares de rad), se observan en todos los sujetos irradiados estos efectos, cuya gravedad aumenta con la dosis. Inversamente, si la dosis es baja, no se observa ningún efecto: existe por consiguiente, un umbral de dosis por debajo del cual no se observa efecto alguno. Dicho umbral de dosis varía con el efecto y el volumen del tejido irradiado; pero siempre es superior a algunas decenas de rem por año.

En el caso de otros dos tipos de efectos biológicos — en la inducción del cáncer y las mutaciones genéticas — la relación entre la dosis y el efecto es muy diferente. Lo que varía en función de la dosis no es el efecto biológico propiamente dicho, que permanece idéntico cualquiera que sea la dosis, sino la probabilidad de este efecto. En otros términos, el porcentaje de sujetos irradiados en los cuales se observa este efecto aumenta con la dosis, pero el efecto no varía.

Por ejemplo, un cáncer es siempre un cáncer, ya aparezca espontáneamente o ya haya sido provocado por las radiaciones; y no hay medio de distinguir entre uno y otro. La única forma de demostrar la inducción de cáncer en sujetos irradiados consiste en probar que en los mismos la frecuencia de cáncer es estadísticamente más elevada que en un grupo de sujetos de la misma edad y sexo que no hayan sido irradiados.

Los efectos genéticos tienen el mismo carácter probabilístico o estocástico como dirían los especialistas, sin que nada distinga las mutaciones radioinducidas de las mutaciones naturales.

Por consiguiente, en estos dos casos se sustituye el concepto de umbral por el de "riesgo variable con la dosis", que es muy pequeño para las dosis bajas y aumenta con las mismas.

En tanto que las primeras recomendaciones de la CIPR se basaban en los efectos somáticos no estocásticos de las radiaciones y la existencia de un umbral, a partir de los primeros años de

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

la década de 1950 se presta mayor atención al poder cancerígeno de las dosis bajas. Resultaba claramente observable para entonces que los efectos aleatorios sin umbral — es decir, cancerogénesis y mutagénesis — eran riesgos que se debían considerar prioritariamente después de toda exposición a dosis bajas de radiación. Los especialistas de protección radiológica dieron por consiguiente mayor importancia a la evaluación de estos riesgos.

Esta situación no es única, ya que en numerosas esferas de la higiene y la medicina laborales se ha observado la misma tendencia. Las medidas de protección reflejan la misma evolución en el caso del amianto, por ejemplo. Al principio se consideraba la asbestosis como el peligro principal, y el objetivo de la medicina industrial era reducir la exposición al polvo de amianto a un nivel inferior al que provocaba esta enfermedad. Más tarde, cuando las condiciones de trabajo mejoraron y los obreros no sufrían más de asbestosis y presentaban una duración más larga de vida, se descubrió que estaban sometidos a un riesgo de cancerogénesis en el pulmón o en la pleura ligeramente más elevado que el de la población en general. Fue necesario pues, establecer medidas de protección teniendo en cuenta la relación entre la concentración del amianto en el aire y la probabilidad de aparición de un cáncer.

Esta evolución de la protección radiológica a partir del criterio inicial de lesiones que aparecen en todos los sujetos irradiados, para llegar a un nuevo criterio basado sobre la probabilidad de un riesgo extremadamente grave que finalmente afectará solo a una proporción muy pequeña de sujetos irradiados, es pues una tendencia frecuente en la medicina laboral y es una consecuencia del mejoramiento de las condiciones generales de trabajo.

EVALUACION DEL RIESGO DE CANCER

Para cuantificar los efectos cancerígenos de las radiaciones contamos con la ayuda de varios estudios sobre las poblaciones de sujetos irradiados; en primer lugar, los prolongados y meticulosos estudios efectuados con los sobrevivientes de la bomba atómica. De los 285 000 sobrevivientes registrados en Hiroshima y Nagasaki, 80 000 fallecieron de muerte natural entre 1950 y 1978. Se estima que aproximadamente 400 a 500 de estas muertes se debían a cáncer inducido por radiaciones. Entre los 1200 sobrevivientes que habían recibido las dosis más altas (dosis media de 330 rad, es decir, muy cercana a la dosis mortal cuando la recibe el cuerpo entero, la cual se sitúa entre 350 y 450 rad aproximadamente), el aumento de la frecuencia de leucemia entre 1950 y 1974 fue del 1%. Así, el efecto cancerígeno es indudable, aunque, en términos absolutos, el número de supervivientes afectados era relativamente pequeño y no modificaba de manera notable la tasa global de supervivencia de la población que estuvo expuesta a la bomba atómica.

Cabe observar en este respecto que los estudios efectuados con los sobrevivientes no revelan ninguna enfermedad particular debida a la irradiación, aparte de la opacidad del cristalino y un atraso en el desarrollo talla y peso de los niños expuestos a muy temprana edad. Especialmente, no se ha observado ningún aumento de morbilidad ni aceleración del proceso de envejecimiento, ni se ha reducido la duración de vida, aparte de la directamente relacionada con la mayor frecuencia de los cánceres.

Nada permite afirmar, como algunos lo hacen a veces, que las estimaciones basadas sobre los sobrevivientes son erróneas debido a que la elevada mortalidad de los sobrevivientes durante los primeros años, ha dado por resultado que solo sobrevivieran durante muchos años los sujetos más resistentes.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

La dosis recibida por cada sobreviviente se determinó teniendo en cuenta la posición del sujeto respecto del hipocentro en el momento de la explosión. Sin embargo, la radiación recibida por los habitantes de las dos ciudades fue diferente. La bomba de Hiroshima estaba compuesta de uranio-235, y cerca de un tercio de la irradiación se debió a neutrones y el resto a rayos gamma. Como la eficacia biológica relativa (EBR) de los neutrones es de aproximadamente 10, el 80% del efecto biológico se debió a los neutrones. En cambio, en Nagasaki, la bomba, hecha de plutonio-239, era de concepción diferente y liberó casi únicamente rayos gamma. Esta diferencia justifica un análisis separado de los datos relativos a las dos ciudades y su comparación aporta información directa sobre los efectos cancerígenos relativos de neutrones y de fotones sobre el hombre.

En esas dos ciudades, el efecto cancerígeno de la radiación se manifestó en primer lugar por un aumento del número de leucemias a fines de los años 40. Después de haber pasado por un máximo durante el período de 1952 a 1970, la tasa de leucemia disminuyó constantemente en tanto que aumentaba la frecuencia de tumores sólidos inducidos por la radiación, esencialmente de la tiroide, de las mamas y de los pulmones. El período de latencia entre el momento de la exposición y la aparición del cáncer varía de acuerdo a la naturaleza del tumor y a la edad del sujeto en el momento de la exposición: para las leucemias agudas el período es de 5 a 10 años en sujetos que sufrieron la irradiación en su infancia, y de 10 a 15 años en los irradiados en edad adulta. Para los tumores sólidos el tiempo de latencia varía entre 15 y 30 años y puede ser todavía más largo en el caso de cánceres del tubo digestivo.

Por otra parte, se ha comprobado que el efecto cancerígeno varía en función de la edad. Para numerosos cánceres, el riesgo relativo es más elevado en sujetos expuestos antes de la edad de 20 años. La tasa de leucemia aguda es más elevada en sujetos irradiados a una edad inferior a 10 años o superior a 50. En lo que se refiere al cáncer de la mama, el riesgo relativo es máximo en mujeres que tenían entre 10 y 19 años de edad en el momento de la irradiación.

Hasta 1975 las leucemias representaban aproximadamente un tercio de los tumores malignos y ofrecían, en consecuencia, la mejor muestra para un estudio cuantitativo de los efectos cancerígenos. En Nagasaki, la frecuencia de leucemias no aumentó en los sujetos que habían recibido menos de 100 rad. Dicha frecuencia solo excedía la observada en el grupo no irradiado entre los sujetos que habían recibido más de 100 rad. Por encima de esta dosis, la frecuencia de leucemias aumenta la dosis. El exceso en la frecuencia de leucemias observado en los sobrevivientes de Nagasaki corresponde a una tasa de inducción cercana a 20-30 casos de leucemia por 10 000 sujetos que habían recibido 100 rad. En los sobrevivientes de Hiroshima, la tasa de inducción parece más elevada; aparentemente no existe umbral, y la frecuencia ha aumentado ya en sujetos que han recibido más de unas pocas decenas de rad.

Examinemos ahora la segunda fuente de información: es decir, los sujetos que han recibido tratamiento de irradiación para una enfermedad no cancerosa. Una de las enfermedades en que es más común ese tratamiento es una forma particular de reumatismo: la espondiloartrosis deformante. Un estudio efectuado en Gran Bretaña a base de unos 20 000 de tales pacientes tratados con radioterapia con dosis de algunas centenas de rad. No se observó ningún efecto en los sujetos que habían recibido menos de 300 rad; en cambio, en sujetos que habían recibido dosis más elevadas, la frecuencia de cancerogénesis aumenta con la dosis. El número de leucemias observadas en esos pacientes fue unas 10 veces mayor que lo que se hubiera podido esperar dada la edad y sexo de las personas irradiadas. Además de este aumento de leucemias, también se observó un aumento mucho menor, aunque estadísticamente

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

significativo, de otros cánceres diferentes. Se observó asimismo un aumento de leucemias o de cánceres en diferentes grupos de pacientes tratados por otras afecciones no cancerosas, en tanto que en otros estudios sobre enfermedades diversas (cánceres cervicales tratados con radio, hipertiroidismo tratado con yodo radiactivo, etc.) no se observó tal aumento.

Una tercera fuente de información es la facilitada por la observación de sujetos que han recibido irradiación por razones profesionales. En el presente trabajo solo se citará un ejemplo, el de los radiólogos, que constituyen sin duda el grupo profesional que ha recibido las dosis más altas. Un estudio de los que ejercieron la profesión entre 1920 y 1939 — época en la que todavía no se conocían bien los peligros de las radiaciones ionizantes y no se tomaban aún las precauciones que se emplean hoy día — muestra que la frecuencia de leucemia en este grupo era unas 10 veces más grande que la observada entre los médicos que no utilizan las radiaciones, tales como los otorrinolaringólogos; la frecuencia entre los generalistas que efectúan frecuentemente radioscopias es intermedia.

Es interesante observar que entre los radiólogos que han ejercido a partir de 1946, es decir la fecha en que se han llegado a conocer mejor los efectos de las radiaciones ionizantes, no se ha observado ningún aumento de la frecuencia de leucemia, sin duda porque los médicos y los técnicos, como de manera general todos los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes, han respetado las normas de la CIPR. Ello muestra la importancia y la eficacia de dichas recomendaciones.

En total, los datos numéricos obtenidos en esos diferentes estudios concuerdan de manera satisfactoria. Se ha observado en los tres casos que las incidencias presentan valores muy próximos, si los resultados se expresan por 10 000 personas irradiadas con 100 rem o por un millón de personas irradiadas con 1 rem, lo que es cuantitativamente la misma cosa. Cabe notar que esta última expresión es artificial, ya que no se ha observado ningún efecto en sujetos que hayan recibido menos de 100 rem, aunque, por razones de sencillez, ésta es la presentación utilizada más frecuentemente en los informes internacionales. Así, por ejemplo, en 10 000 sujetos que hayan recibido 100 rem se deberían observar unos 30 casos de leucemia, tomando como base las observaciones hechas con los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. Tomando como base las observaciones efectuadas con los pacientes de espondiloartrosis deformante solo se observarían 12 casos, pero en estos enfermos se había irradiado solo el 40% de los tejidos hematopoiéticos, es decir la médula ósea. Teniendo en cuenta el porcentaje de la médula ósea irradiada, se encuentra que para una irradiación total se obtendría casi la misma cifra que para los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. Por último, en el caso de los radiólogos, es mucho más difícil evaluar el efecto leucemogénico ya que se ignoran las dosis que han recibido. Al tratar de evaluar las dosis recibidas por este grupo, se deben tener en cuenta los aparatos empleados, el número de radiologías efectuadas diariamente, la duración de la práctica, etc. Se llega de esta manera a estimaciones que varían entre 400 y 2000 rad. Si se toma por base de cálculo el límite superior de esta gama, la cifra sería 10 casos por millón y por rad. Si se toma como base el límite inferior, se obtendrían 50 casos por millón y por rad. Encuadran bien dentro de estos límites 30 casos por millón y por rad observados en Hiroshima y Nagasaki y en pacientes tratados por espondiloartrosis deformante para quienes la evaluación de la dosis es más precisa. Así pues, los datos, en conjunto, son coherentes y sugieren que, como causa de las leucemias, las irradiaciones crónicas podrían tener casi la misma efectividad que la irradiación con un tiempo más corto.

Hasta ahora hemos tenido en cuenta solo las leucemias dado que son el tipo de cáncer que se observa con más frecuencia en los sujetos irradiados. Huelga decir que también se han

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

estudiado con igual atención otros cánceres. Por ejemplo, en Nagasaki no se comprobó ningún aumento significativo de la frecuencia de otros cánceres para dosis inferiores a 100 rad, mientras que para dosis superiores a este nivel, el aumento es significativo desde el punto de vista estadístico.

La susceptibilidad de diferentes tejidos u órganos a un cáncer inducido por radiación es muy variable. En algunos tejidos, las dosis deben ser muy altas — varios millares de rad — para causar cánceres en el 1% de los sujetos irradiados, en tanto que en otros se obtiene el mismo efecto con dosis diez veces menores. Los tejidos más sensibles a las radiaciones comprenden, en particular, la tiroides, la mama, los pulmones y la médula ósea. Para todos esos cánceres, diferentes estudios han facilitado estimaciones que parecen concordantes dentro de los límites de precisión de cada estudio. En diversas investigaciones se ha comparado la frecuencia de todos los tumores malignos con la de la leucemia solamente, observándose que la relación varía de 3 a 5. Sabiendo que el riesgo de leucemia es de aproximadamente el 2 por mil a 100 rem, el riesgo total de cáncer debería ser del orden del 1% a 100 rem. Esta estimación concuerda bastante bien con la obtenida mediante la suma de los riesgos por cada tejido y es la evaluación que a que llegan los informes del Comité de Radiaciones y la CIPR.

Sin embargo — y tenemos que volver a esta cuestión, ya que es fundamental — estas evaluaciones se basan sobre irradiaciones con rayos X o con rayos gamma en dosis superiores a un centenar de rem. Ahora bien, una centena de rem es ya una dosis muy alta, muy superior a la que pueden recibir los trabajadores expuestos profesionalmente a las radiaciones. Con respecto a las dosis más bajas, aunque no se puede excluir la posibilidad de un efecto, se carece de datos que permitan evaluar la magnitud del riesgo, dado que éste es demasiado bajo para ser estimado directamente. Si bien ciertos resultados sugieren que dosis moderadas de rayos X — algunas decenas de rad — provocan cánceres, no es posible fiarse de esos resultados para la evaluación de la frecuencia de inducción consecutiva a tales dosis, si se tiene en cuenta la gran incertidumbre estadística asociada con los datos relativos a tales niveles de irradiación.

Algunos estudios han pretendido observar un aumento de la frecuencia de leucemias y/o de otros tumores malignos en adultos que habían recibido dosis bajas durante su trabajo profesional como consecuencia de exámenes radiológicos. El mejor conocido de estos estudios es el de Mancuso, Stewart y Kneale.

Estos autores analizaron las causas de defunción de 2184 trabajadores expuestos a las radiaciones y de 1336 trabajadores no expuestos a las radiaciones que habían desempeñado funciones en la central nuclear de Hanford (Estados Unidos) y llegaron a la conclusión que los sujetos que habían muerto de cáncer habían recibido dosis más altas que los otros trabajadores. De ello dedujeron que el riesgo de cancerogénesis resultante de las radiaciones era más elevado que lo que se había creído anteriormente. Un segundo análisis basado en 4033 decesos, aunque produjo diferencias menores, parecía, en opinión de esos autores, confirmar el primer estudio. Sin embargo, otros investigadores, utilizando los mismos datos sobre la mortalidad de los trabajadores de Hanford, llegaron a conclusiones totalmente diferentes. El estudio de Mancuso y colaboradores ha sido criticado desde el punto de vista estadístico por numerosos autores y comités de expertos, quienes estimaban, en particular, que las diferencias señaladas con respecto a algunos cánceres se debían probablemente a fluctuaciones estadísticas causadas por el uso de una muestra de población demasiado pequeña. Este error se agrava debido a la subdivisión de casos de cáncer en un número demasiado grande de subgrupos. Si se buscan diferencias en la frecuencia de aparición de cánceres en un gran

número de pequeñas poblaciones, no es sorprendente que se pueda observar en algunas de ellas y para ciertos cánceres una diferencia estadística aparentemente significativa, aunque en realidad desprovista de valor estadístico.

Parece poco probable hoy día que este tipo de investigación pueda aportar alguna aclaración sobre los efectos de las dosis bajas de irradiación. Además, los cálculos presentados en el informe del Comité de Radiaciones muestran que, a menos que las estimaciones actuales de la tasa de inducción total de cáncer no sean groseramente erróneas, sería preciso efectuar investigaciones que cubran algunos millones de años-hombre de trabajadores expuestos a dosis anuales medias de cuerpo entero de más de 1 rad para poder evaluar directamente el riesgo de cáncer relacionado con tales dosis. Es pues poco probable que en un futuro cercano puedan obtenerse datos fiables sobre los efectos de las dosis bajas.

● Evaluación del riesgo resultante de irradiaciones de dosis bajas y de la relación dosis-efecto

Para evaluar el riesgo resultante de las dosis a las cuales están expuestos los trabajadores o la población se debe hacer una extrapolación muy importante, ya que el riesgo que se evalúa es el causado por dosis aproximadamente 100 o 10 000 veces menores que aquellas sobre las que se dispone de datos fiables. Una extrapolación de tal magnitud requiere un conocimiento preciso de la forma de la curva, es decir la función que relaciona la dosis y el efecto.

La hipótesis más pesimista — la que predice el número mayor de cánceres — es la relación lineal sin umbral. Según esa hipótesis, si una dosis de 200 rem recibida por 10 000 personas produce 200 cánceres, una dosis de 1 rem en 10 000 individuos producirá 1 cáncer. Tal relación se observa raramente en farmacología. Con respecto a la mayoría de las sustancias medicamentosas o tóxicas (por ejemplo el alcohol), el efecto de dosis pequeñas es proporcionalmente muy limitado si no nulo. Lo probable es entonces que tal relación lleve a una evaluación excesiva del riesgo real. No obstante, son posibles otras hipótesis sobre la relación dosis-efecto, y se puede recurrir a diversas fuentes de información para determinar cuál de ellas es la más apropiada.

La primera consiste en analizar los datos referentes a seres humanos. En el caso de los sobrevivientes de Nagasaki que estuvieron expuestos a una dosis media de 350 rad, la probabilidad de radioleucosis es de 35 por millón por rad. Si la relación dosis-efecto fuera lineal, la probabilidad por rad sería la misma para los sujetos expuestos a 100 rad. En realidad, el efecto por rad se reduce casi a la mitad, lo que significa que entre 100 rad y 350 rad la relación es definitivamente no lineal. Esta relación del efecto en función de la dosis sugiere decididamente, pero sin probarlo, que la relación dosis-efecto en los sobrevivientes de Nagasaki no es lineal, sino más bien una función potencial (del tipo $y=bx^n$). Para las dosis menores de 100 rad no se ha observado ningún aumento de la frecuencia de leucemias, y hasta la incidencia observada es en realidad ligeramente inferior a la normal, aunque esta diferencia no es significativa desde el punto de vista estadístico. Cabe señalar, sin embargo, que si bien una relación lineal se ajusta menos bien con los datos, no se la puede excluir completamente.

Por otra parte, en el caso de los sujetos irradiados en Hiroshima, en quienes el efecto leucemogénico es debido a los neutrones, la relación dosis-efecto parece lineal: en otras palabras, la frecuencia de las leucemias es proporcional a las dosis de neutrones.

Esta diferencia entre las formas de la relación dosis-efecto para los rayos X y para los neutrones concuerda con los efectos observados experimentalmente en las células, así como con las predicciones teóricas. Sin entrar en detalles, el efecto es proporcional a la dosis en el caso de partículas fuertemente ionizantes tales como los neutrones, ya que existe una probabilidad muy grande de que una sola partícula pueda crear lesiones muy graves en el núcleo de una célula (ruptura de las dos cadenas de moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN)). En este caso, es de esperar un efecto proporcional a la dosis, es decir, una relación lineal ($N = \alpha D$).

Sin embargo, en el caso de partículas poco ionizantes tales como los rayos X o los rayos gamma, las transferencias de energía son mucho más pequeñas y las lesiones causadas por el paso de cada partícula son mucho menos graves y fácilmente reparables, salvo cuando dos o más partículas pasan casi simultáneamente por la misma región de un núcleo celular (para romper las dos cadenas de la molécula de ADN se necesita en general la acción conjunta de dos partículas). Ahora bien, la probabilidad de que dos partículas pasen a través del mismo volumen es proporcional al cuadrado de la dosis (βD^2).

Desde el punto de vista estadístico, para la mayoría de los casos de cánceres humanos, la relación lineal resulta poco verosímil y parece conducir a cálculos por exceso del efecto de las dosis pequeñas. Sin embargo, ciertos datos sobre seres humanos, especialmente los relativos a los cánceres del tiroides y de la mama, son compatibles tanto con una relación cuadrática como con una lineal, no permitiendo por consiguiente excluir uno u otro de esos tipos de la curva dosis-efecto.

¿Qué informaciones podemos esperar obtener de las investigaciones experimentales que puedan ayudarnos a escoger la adecuada relación dosis-efecto?

Generalmente se admite que la inducción de un tumor es el resultado de una sucesión de sucesos aislados. El estudio del cáncer inducido por productos químicos muestra que se pueden distinguir por lo menos dos etapas independientes: la "iniciación" y "promoción". La iniciación es un proceso rápido e irreversible por el cual una célula normal adquiere características neoplásicas. La promoción es un proceso por el cual una célula así transformada da origen a un tumor que puede crecer e invadir los tejidos vecinos. Los "promotores" son generalmente agentes que estimulan la proliferación celular. La iniciación va probablemente asociada a una lesión del material genético, y algunos datos sugieren que para esta transformación, una relación lineal para dosis bajas de rayos X o de rayos gamma conduciría a una estimación por exceso del efecto. Pero no se pueden asimilar "transformación" y "cancerogénesis", especialmente dado que la célula "iniciada" o "transformada" puede permanecer indefinidamente en un estado "latente" sin proliferar.

Las dificultades relacionadas con el proceso de transformación desde la iniciación celular al cáncer propiamente dicho, están realizadas por las considerables variaciones en la inducción del cáncer según los tejidos de que se trate, después de la irradiación total durante la cual todas las células han recibido las mismas dosis. Así, la frecuencia de cánceres es relativamente elevada en la tiroides y en la mama y muy baja o virtualmente nula en la próstata y en el testículo, aunque todavía no se conozcan las causas de esas diferencias. Además, se observan diferencias muy apreciables en determinados tejidos, en función de la edad: en el caso de la mujer, por ejemplo, la susceptibilidad a la radiocancerogénesis es relativamente elevada entre 15 y 20 años, pero muy baja antes de la pubertad y en la edad adulta y la senescencia.

La aparición de tumores después de la irradiación ha sido objeto de detenidos estudios en animales. Para los tumores consecutivos a una exposición de rayos X, el efecto por unidad

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

de dosis absorbida decrece con la tasa de la dosis; no ocurre lo mismo cuando se trata de irradiación con partículas pesadas. En la mayoría de los tumores observados en los animales (leucemias, tumores del riñón, de la piel y del pulmón) los datos sobre la cancerogénesis provocada por bajas dosis de rayos X pueden ser representados por una relación polinómica de segundo grado, o por una curva lineal dosis-efecto con umbral o cuasi umbral, en tanto que los cánceres inducidos por las partículas pesadas corresponden más bien a una relación lineal de dosis-efecto. En ciertos casos, la incidencia de tumores disminuye realmente con dosis bajas, mientras que en un caso (neoplasia mamaria en el ratón Sprague-Dawley) se obtuvo una curva lineal sin umbral después de una exposición a rayos X. Estas diferencias sobre el tipo de forma matemática de las relaciones dosis-efecto no resultan sorprendentes en vista de la diversidad y la complejidad de los procesos carcinógenos.

En la protección radiológica nos interesamos en los efectos de las bajas dosis recibidas durante períodos largos. Teóricamente, por consiguiente, sería necesario no solo estimar los efectos de las bajas dosis sobre la base de lo observado para las dosis altas: también se debería tener en cuenta el hecho de que la tasa de dosis es mucho más baja. Todos los datos experimentales sugieren que, cuando una dosis determinada de radiación se extiende durante un período de tiempo más largo, sus efectos se reducen: por ejemplo, el efecto mutagénico de radiación a tasas de dosis bajas es tres veces menor que a dosis elevadas. Esto es igualmente válido para la mayoría de otros agentes tóxicos (el efecto de ingerir un litro de alcohol no es igual si se bebe el mismo en una hora o en un mes). Sin embargo, se ignora voluntariamente este factor y, a los fines de la protección radiológica, se considera que los riesgos relacionados con las tasas bajas son iguales que los de las tasas altas.

En resumen, si bien existen abundantes informaciones que permiten una evaluación satisfactoria del riesgo que las dosis altas y las tasas de dosis elevadas significan para el ser humano, esos datos no nos permiten formular conclusiones definitivas sobre la forma de la relación dosis-efecto en lo que se refiere a la cancerogénesis humana, ni sobre el efecto provocado por dosis bajas de rayos X. Los análisis teóricos y los datos obtenidos con sistemas simples o con animales sugieren que, con respecto a los rayos X o a los rayos gamma, una relación de tipo lineal sobreestima los efectos de las dosis bajas, y todos los datos concuerdan en sugerir que, para dosis del orden de algunos rad, el riesgo real es probablemente de 4 a 10 veces inferior al previsto por extrapolación lineal. El riesgo es probablemente todavía inferior en el caso de dosis más pequeñas y de tasas de dosis más bajas.

Sin embargo, en toda evaluación de efectos perjudiciales es preferible sobreestimar más bien que subestimar el riesgo. En consecuencia, es probable que se continúe usando por algún tiempo todavía la relación lineal sin umbral.

EVALUACION DEL RIESGO GENETICO

El medio ambiente humano contiene numerosos agentes mutagénicos que, cuando las mutaciones afectan a las células del ovario o del testículo, pueden causar daños genéticos. La radiación fue el primero de estos agentes que se descubrió, es el mejor conocido, pero hay otros: por ejemplo, las moléculas producidas durante la combustión del carbón, del petróleo, del tabaco. Los datos más recientes sugieren que el riesgo genético humano de las radiaciones es menor que lo que se pensaba. El hecho más importante es que los estudios sobre Hiroshima y Nagasaki no revelaron ningún efecto genético anormal; los datos obtenidos sobre la frecuencia de las taras congénitas, la morfología y la duración de vida no

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

revelan ningún efecto perceptible en los descendientes de los sobrevivientes de Horishima y de Nagasaki, en comparación con los hijos de padres que no fueron irradiados. En investigaciones realizadas con animales, se expusieron más de 100 generaciones de ratones a razón de 200 rads por generación, sin que fuera posible detectar efectos adversos en materia de viabilidad o fecundidad de sus descendientes. Los resultados de esas irradiaciones intensivas son tranquilizantes.

Sin embargo, ello no significa que las radiaciones no tengan efecto genético. La ausencia de efectos deletéreos al nivel del individuo sugiere más bien que los mecanismos de defensa eliminan la mayoría de los embriones portadores de taras genéticas graves desde el principio de la gestación. Pero este mecanismo no se ha tenido en cuenta en las evaluaciones del riesgo genético, que se basan en numerosos estudios que miden la frecuencia, por unidad de dosis, de diversos tipos de mutaciones genéticas provocadas en ratones e insectos, en particular en la mosca de la fruta (*Drosophila*). La comparación con los estudios recientes efectuados sobre cultivos de células humanas sugiere que la relación dosis-efecto a nivel celular tiene la misma forma en todas las especies.

El Comité de Radiaciones, la CIPR y el Comité sobre los Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes (BEIR) han analizado recientemente, cada uno por su parte, la enorme masa de información que sobre los efectos genéticos se posee en la actualidad y las conclusiones de dichos órganos, a pesar de no ser idénticas, se confirman mutuamente.

Los estudios del Comité de Radiaciones y del Comité BEIR estiman el número de defectos inducidos en los descendientes de un millón de sujetos que recibieron 1 rem en una cifra ligeramente inferior a 200. De esos defectos, tal vez una cuarta parte o la mitad se manifestarían en la primera generación y el resto durante las 10 a 15 generaciones siguientes. El análisis crítico de la CIPR llegó a conclusiones similares con respecto a todas las generaciones. Si consideramos los peligros a los cuales se encuentra expuesto un individuo, cabe pensar que el mayor daño genético que puede afectarle personalmente sería el de la aparición de anomalías en sus hijos, nietos y bisnietos. El riesgo medio sería de 30 a 40 taras genéticas por millón de descendientes después de una exposición de los padres a 1 rem, o sea aproximadamente un tercio de la cifra obtenida para el riesgo somático de cáncer. Para situar ese riesgo en su debida perspectiva es preciso compararlo con la frecuencia llamada natural, que es de aproximadamente 107 000 por millón.

Por otra parte, cuando se evalúa el daño por hombre-rem distribuido en una población activa de 20 a 65 años, o entre la población en general, cabe recordar que los dos tercios de hombre-rem no tendrán consecuencias genéticas perjudiciales ya que las mismas afectarán a individuos que ya no procrearían descendencia. Cabe asimismo observar que se sobreestima el riesgo de cáncer en los trabajadores, ya que se utilizan en los cálculos tasas medias de inducción a pesar de saberse que dichas tasas son más altas en el caso de niños y adolescentes.

RIESGOS PARA EL PUBLICO Y PARA LOS TRABAJADORES

El riesgo total máximo, incluyendo a la vez el riesgo de cancerogénesis y el riesgo genético para los descendientes, es de $1,3 \times 10^{-4}$ por rem. Es por consiguiente fácil evaluar el límite máximo del riesgo conociendo las dosis recibidas por el público gracias a las estimaciones del Comité de Radiaciones y las mediciones directas en el caso de los trabajadores (Cuadro 2). Se observará, en primer lugar, que ese riesgo es relativamente bajo aun cuando las dosis son muy altas, cercanas a las dosis mortales. El exceso del número de cánceres es relativamente

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 2. Irradiaciones profesionales

(En los Estados Unidos de América, según informe de la Academia Nacional de Ciencias – Washington 1980)

	Dosis media (mrem/año)
200 000 trabajadores profesionalmente expuestos a la radiología médica (doctores y técnicos)	300–350
200 000 trabajadores profesionalmente expuestos a la radiología dental (dentistas y técnicos)	50–125
100 000 trabajadores profesionalmente expuestos en la utilización médica de isótopos radiactivos (médicos y técnicos)	260–540
30 000 trabajadores profesionalmente expuestos en centrales nucleoelectricas e instalaciones de reactores civiles	600–800
35 000 trabajadores profesionalmente expuestos en reactores nucleares para la propulsión naval (submarinos, etc.)	130–330
100 000 trabajadores profesionalmente expuestos en actividades de investigaciones y desarrollo (centros de investigaciones civiles, universidades, etc.)	130–330

pequeño en comparación con los resultantes de otras actividades humanas; por ejemplo, en el grupo de los sobrevivientes de la bomba atómica que recibieron las dosis más altas, es equivalente al de los excesos observados en el grupo de mujeres de California que habían recibido tratamiento con estrógeno para disfunciones de la menopausia; o, para presentar otro ejemplo, el número de defunciones por cáncer provocado por las radiaciones entre los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki es por lo menos veinte veces inferior al número de defunciones por cáncer causado en esa misma población por el uso del tabaco. Por otra parte, el mero hecho de que el efecto sea tan reducido explica las dificultades que presenta su precisa evaluación.

Una dosis de 2 mrem/año a la población en el año 2000 significaría que en una población equivalente a la de Francia (50 millones de habitantes) el empleo de energía nucleoelectrica para la producción de electricidad causaría unas 2–10 muertes por cáncer cada año.

Esta cifra puede parecer importante, aunque cabe señalar que, por una parte, ese cálculo se ha hecho partiendo de una hipótesis voluntariamente pesimista y que la cifra real puede ser de muertes por cáncer (cerca de 120 000 por año en Francia (véase el Cuadro 3)) y los cigarrillos causan por sí solos 20 000 muertes por cáncer en Francia cada año. Ese cuadro contiene indicaciones sobre las principales causas de mortalidad en Francia lo que permite comparar el riesgo procedente de las radiaciones con los de otro tipo.

También se pueden evaluar de la misma manera los riesgos de otros elementos de la vida cotidiana: tomemos por ejemplo el efecto carcinogénico del tabaco. Los datos estadísticos

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 3. Principales causas de defunción en Francia

Causas	Número de defunciones por año (Francia)	Tasa de riesgo anual (por 10 ⁶ personas)
Mortalidad total	≈ 600 000	11 500
Accidentes de tráfico	≈ 15 000	285
Accidentes domésticos	≈ 5 000	≈ 100
Accidentes durante las vacaciones	≈ 3 600	180
Accidentes laborales y enfermedades profesionales	≈ 2 300	160
Incendios	≈ 2 100	40
Rayos	≈ 25	0,5
Electrocución	≈ 200	≈ 4
Total de muertes por cáncer	≈ 120 000	2 300
Leucemia	≈ 4 000	77
Tabaco	≈ 70 000	1 300
Alcohol	≈ 40 000	750

establecidos respecto de varios millones de sujetos muestran que a partir de tres cigarrillos diarios (unos 1000 cigarrillos por año) existe ya un aumento significativo del riesgo de cáncer del pulmón; si se fuman diez cigarrillos por día, el riesgo se aumenta por un factor aproximado de 8 y, para 20 cigarrillos por día, por un factor cercano a 20. Partiendo de la hipótesis de una relación lineal entre el número de cigarrillos fumados y el efecto, se puede evaluar por la regla de tres el riesgo inducido por un cigarrillo en un día o en un año, o durante toda una vida. De la misma forma se puede evaluar el riesgo de inducción cirrosis alcohólica o de cáncer de esófago por un gramo de alcohol, el riesgo de un accidente mortal de circulación por kilómetro recorrido, etc.

Si comparamos ahora esos riesgos con los causados por la irradiación (Cuadro 4) vemos que el riesgo resultante de un cigarrillo es equivalente al causado por la dosis de radiación recibida por un trabajador durante medio día de irradiación a la dosis máxima admisible o por tres años de residencia de una persona en las proximidades de una central nuclear.

Para apreciar objetivamente el riesgo en el caso de los trabajadores se debe comparar con otros riesgos profesionales.

El Cuadro 5, tomado de Reissland, indica el orden de magnitud de la reducción media de la duración de vida, en las hipótesis más pesimistas, que resultaría de una irradiación a la dosis

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 4. Riesgos comparados

Las siguientes actividades implican un riesgo de muerte de 1 en 1 millón:

650 km de vuelo en avión

100 km de viaje en automóvil

$\frac{3}{4}$ de un cigarrillo

1,5 minutos de alpinismo

20 minutos de vida a la edad de 60 años

Absorción por vía oral de píldoras contraceptivas durante 2,5 semanas

$\frac{1}{2}$ botella de vino

Exposición a 10 mrem

} Exposición a la dosis máxima admisible (profesional) de $\frac{1}{2}$ día
o
residencia durante 3 años en las proximidades de una central nuclear.

Basado en parte en Pochin.

Cuadro 5. Reducción media de la duración de vida (en días) (New Scientist 13.9.79)

	Por un año de vida profesional (sujeto de 40 años)	Por 35 años de vida profesional
Pesca en alta mar	31,9	923
Minas de carbón	3,6	103
Refinería de petróleo	2,6	74
Ferrocarril	2,2	63
Construcción	2,1	62
Industria (valor promedio)	0,5	13,5
Irradiación profesional a 5 rem/año	1,3	32
Irradiación profesional a 0,5 rem/año	0,1	3

Basado en Reissland.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

máxima admisible. Dicha reducción es comparable a la observada en las actividades profesionales corrientes. Además, la dosis media recibida por los trabajadores expuestos, como lo ha demostrado la experiencia, es por término medio diez veces inferior a la dosis admisible. La industria nuclear se clasifica entonces entre las actividades profesionales que presentan riesgos moderados.

Finalmente, numerosos trabajos (que se examinan en otra parte y que han sido presentados en varias reuniones científicas) han tratado de comparar los riesgos que representan para la población y los trabajadores los diferentes métodos de producción de energía. A los fines de comparación, estos riesgos se deben referir a la producción de 1 MWe/año por cada sistema energético de generación de energía. Es preciso señalar, sin embargo, que la industria nucleoelectrica sufre una gran desventaja en estas comparaciones. En el caso de otros sistemas se dispone de datos estadísticos sobre los efectos sanitarios, pero puesto que en la industria nuclear nunca se han observado casos de efectos nocivos sobre la salud, el riesgo se evalúa sobre la base de consideraciones teóricas que, como se ha visto, conducen, por prudencia, a una estimación exagerada del riesgo. Además, la estimación del riesgo en relación con la energía nucleoelectrica incluye el riesgo genético para la descendencia; éste es un elemento que no se aplica nunca en la metodología sanitaria tradicional ni en la estimación de los riesgos resultantes de los otros sistemas.

Se argumentará sin duda que, si bien los riesgos de la energía nucleoelectrica pueden ser mínimos en funcionamiento normal, también pueden aumentar considerablemente en caso de accidente. La respuesta a esta objeción es, en primer lugar, que la experiencia ya adquirida (varios millares de años-reactor) muestra que los accidentes son raros y que, en segundo lugar, son estadísticamente previsibles (véase, entre otros, el informe Rasmussen). La mayoría de los informes incluyen en la estimación de los riesgos sanitarios los causados por la contaminación de descargas accidentales (tipo Windscale o Three Mile Island) y aún las posibilidades de un desastre nuclear. A pesar tenerse en cuenta esas posibilidades, el riesgo sanitario de la industria nucleoelectrica sigue siendo bajo en comparación con los riesgos resultantes de otros tipos de producción de energía, tanto más cuanto que los accidentes no son sucesos exclusivos de la industria nucleoelectrica sino que ocurren en todos los sistemas energéticos. Basta recordar las rupturas de presas hidroeléctricas, los accidentes de transporte del petróleo o del metano, los incendios de refinerías, los accidentes en minas de carbón, etc.

En resumen, gracias a la extraordinaria sensibilidad y precisión de los métodos de medición y a las investigaciones realizadas desde el fin del siglo XIX, los riesgos debidos a las radiaciones ionizantes se encuentran sin duda entre los que se conocen mejor. Parecen ser relativamente muy bajos en las proximidades de las instalaciones en las que se han aplicado las medidas de protección radiológica desarrolladas por los radiólogos para su propia protección y para la de los pacientes. Es posible calcular los efectos sanitarios de accidentes, efectos que parecen bajos, gracias a las medidas de seguridad perfeccionadas que se han adoptado; más bajos o, por lo menos, comparables con los resultantes de los riesgos de accidentes en instalaciones industriales o hidráulicas convencionales. Paradójicamente, la inquietud del público se ha despertado precisamente a causa de la actitud prudente adoptada respecto de la energía nuclear y del carácter extremadamente cuidadoso de las precauciones tomadas, así como tal vez debido a la imagen muy particular que evoca en la imaginación del público y hasta en ciertos científicos la palabra "átomo".

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Referencias

CROW, J.F., "Can we assess genetic risks?".

Proceedings of the Sixth Congress of radiation Research (Ed. Tokada, et al.), Tokio (1979) 70-8.

FINCH, C.S., "Hiroshima and Nagasaki", A review of 30 years of study.

Proceedings of the Sixth Congress of Radiation Research (Ed. Tokada, et al.), Tokio (1979) 50-8.

ICRP Report No.26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP, Vol.1, No.3, Pergamon Press, Oxford, (New York City, 1977).

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1977 Report to the General Assembly, Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations publication Sales No.E.77.IX., Vol.1 (Nueva York, 1977) 1-725.

Colloque sur les risques comparés des différents modes de production d'énergie (Paris, janvier 1980).