

LA RADIOPROTECCION: FUNDAMENTOS DE SU REGLAMENTACION

José Luis HERNANDEZ VARELA

INTRODUCCION

No parece que exista una razón por la cual se pueda imputar a los técnicos que trabajamos en la energía nuclear una especial falta de conciencia profesional o de conciencia en general. Mientras no se demuestre lo contrario, debe concedérsenos el beneficio de la duda y admitir que entre nosotros hay personas que no consideramos la utilización de la energía perjudicial para la sociedad en su conjunto.

Esta afirmación viene respaldada, además, por el hecho de que, con el desarrollo alcanzado por la energía nuclear en los últimos años, el espectro de las técnicas que intervienen en el diseño, fabricación, construcción y explotación de centrales y demás instalaciones nucleares abarca muchas especialidades. Todos ellos tienen así oportunidad de asomarse al panorama nuclear y esporádicamente surgen las críticas tales como el científico Mancuso o el técnico Pollard que arremeten contra la energía nuclear. Estos casos no son más que la excepción que confirma la regla, ya que constituyen una minoría abrumadora.

Entre los especialistas que conocen las diversas técnicas que intervienen en la concepción, construcción y explotación de las centrales nucleares hay un elevado número que consideran este género de producción eléctrica compatible con un desarrollo y armónico de la industria y del progreso de la humanidad.

Sentado ese principio, no debe extrañar que algunos de los más antiguos militantes entre los defensores de la energía nuclear hayan tenido en algún momento el deseo de hacer un análisis crítico de las bases en que se sustenta su opinión de que los inconvenientes de la energía nuclear no tienen peso alguno frente a los beneficios que aporta. Este trabajo es el resultado del análisis de las bases de la radioprotección con el fin de evaluar los riesgos que, para los individuos o la sociedad, entraña la energía nuclear.

Debe mencionarse que a este análisis no se llega tanto por la duda sobre la sensatez de aprovechar esta nueva fuente de energía, como por el deseo de demostrar que cualquiera que desee profundizar en estos temas dispone de una notoria información sobre ellos. Así pues, puede concluirse que los que se manifiestan alarmados ante la energía nuclear lo hacen bien movidos por mala fe, o por la ignorancia fruto de la falta de interés por indagar en el tema.

RADIACION

La radiación originada en las reacciones nucleares se caracteriza por su elevado contenido energético. Tanto si está constituida por partículas materiales como por ondas electromagnéticas o fotones, sus cuantos de energía son muy elevados.

Esto significa que sus interacciones con la materia son violentas, dando lugar a notorios fenómenos de carácter nuclear, físico y químico. Esta es la razón de una de las características más notables de estas radiaciones: la facilidad con que se detectan. Es precisamente por esta causa por la que se emplean los radioisótopos, emisores de radiación nuclear, como trazadores, ya que allí donde van se ponen inmediatamente de manifiesto por sus emisiones.

También esa facilidad de detección es la causa de que los radioisótopos y la propia radiación sean unos agentes contaminantes extraordinariamente bien conocidos, cuya evolución y efectos pueden seguirse mucho mejor que los correspondientes a sustancias químicas nocivas.

Paradójicamente, las radiaciones nucleares no actúan sobre ninguno de nuestros sentidos, y, por tanto, para el lego en la materia se presentan como un factor misterioso que puede causar grandes y nefastos efectos sin ser advertido. Esta es posiblemente una de las razones más íntimas de que la energía nuclear despierte recelos tan acusados entre la gente. De hecho hay otros productos que ejercen un efecto nocivo a niveles de concentración a los que no son detectables por los sentidos y ni siquiera es factible su detección por medios tan sencillos y sensibles como un contador Geiger o un detector del tipo del electrómetro. Sin embargo, la atención popular no ha pretendido hacer de esos productos plataforma para la expresión de sus frustraciones económicas, sociales o políticas, de forma comparable a como lo hace con el tema nuclear.

DAÑO BIOLOGICO

La interacción entre la radiación nuclear y la materia viva tiene un carácter nocivo. Si algunos tipos de radiación nuclear pueden llegar al núcleo del átomo y alterarlo, si muchos de ellos pueden modificar la estructura electrónica de los átomos, y si todos ellos pueden alterar los niveles energéticos de los electrones de todos los átomos, es evidente que ejercen unos profundos cambios en las sustancias químicas. Ade-

más, dada su capacidad de penetración, pueden producir esos fenómenos en el interior de la célula sin que la membrana de ésta constituya un obstáculo ni siquiera para una partícula α , que entre todas las radiaciones es la más pesada y, por tanto, la menos penetrante.

Así pues, la radiación puede alterar el carácter químico de las sustancias en el seno de las células y constituye claramente una agresión para ellas.

El resultado de esta agresión puede clasificarse en cuatro categorías:

- La alteración fisicoquímica de algunos átomos es transitoria, volviendo todos los elementos a su estado primario sin que haya ruptura de enlaces químicos. La célula no se altera.

- La alteración química perdura, originándose nuevos enlaces químicos extraños a la naturaleza de la célula. Esta tiene sus propias defensas que le permiten eliminar la sustancia extraña o anularla de alguna manera. Aquí tampoco la célula se altera a la larga.

- La alteración o las alteraciones, en el caso de que la dosis sea suficientemente elevada, no pueden ser superadas por la célula y ésta muere.

- La alteración modifica las funciones reproductoras de la célula sin provocar su muerte.

La muerte de unas cuantas células puede ser inocua para el organismo, que repara, si se le da tiempo, el daño originado en los tejidos y el individuo no experimenta ningún perjuicio. Si la dosis es suficientemente elevada como para producir una lesión apreciable de algún órgano, se pueden producir notables resultados para la salud del individuo. Esos resultados son beneficiosos cuando se trata de eliminar o de retardar los crecimientos malignos, o son nocivos si el daño se infiere a un órgano sano.

El grado de daño producido por la radiación ionizante depende del órgano afectado y de la intensidad de la interacción. Cuando todas las partes del cuerpo reciben dosis análogas decimos que el individuo ha recibido esa dosis al cuerpo entero. Esta es la situación que se produce por la radiación de fondo, la ambiental y, generalmente, cuando se trata de exposiciones profesionales.

En cambio, cuando se aplican las radiaciones ionizantes con fines terapéuticos se actúa para que la dosis a un determinado órgano sea substancialmente mayor que para el resto del organismo. También en los casos de contaminación interna por un radioisótopo se produce normalmente una dosis más elevada en ciertas partes del organismo.

UNIDADES DE RADIOACTIVIDAD

La radiactividad de una sustancia es la manifestación de las transformaciones nucleares que sufre espontáneamente. La propiedad de producir radiactividad se denomina simplemente actividad y es característica de cada radionucleido. Las unidades empleadas son el Becquerel (Bq) que representa una desintegración cada segundo, o el Curio (Ci) que es la actividad manifestada por un gramo de radio equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

La interacción de la radiación con la materia entraña la transferencia de energía a la misma. La cantidad de energía impartida a la unidad de masa se denomina dosis física. No sólo depende de la radiación que llega, sino también de la sustancia irradiada. La unidad es el Gray (Gy), que representa la absorción de un julio por un kg de materia. También se utiliza el rad que representa la absorción de 100 ergios en un gramo y, por tanto, 1 Gy equivale a 100 rads.

La dosis física definida anteriormente no tiene una correspondencia exacta con el daño biológico, que es más intenso cuando la dosis está impartida por partículas pesadas o por radiación muy energética. El producto de la dosis física por el factor de eficacia biológica de la radiación absorbida se denomina dosis equivalente. La unidad de dosis equivalente es el Sievert (Sv) y representa la absorción de 1 Gy de rayos γ en un tejido. También se utiliza el rem, equivalente a un rad de rayos γ . 1 Sv equivale a 100 rem.

El valor adoptado para este factor es el que figura en el cuadro 1.

CUADRO 1
FACTORES DE EFICACIA
BIOLÓGICA DE LA
RADIACION

Rayos X, γ y β	1
Neutrones térmicos	3
Neutrones rápidos	10
Partículas α	20

El empleo de estos factores de eficacia biológica es un medio bastante grosero de comparar los efectos de distintos tipos de radiación. Sin embargo, es frecuentemente el único medio de hacer concordar los efectos de diversas irradiaciones; tal es el caso de los análisis de los efectos de la irradiación en Hiroshima y Nagasaki, ya que en el primer caso se produjo una gran riqueza de

neutrones, lo que acentuó los efectos biológicos para iguales dosis físicas respecto de Nagasaki.

CONSECUENCIAS DE LA IRRADIACION

Es un hecho repetidamente comprobado que dosis suficientemente elevadas de radiación producen efectos nocivos en los seres vivos. Vamos a tratar de describir la relación causa-efecto entre las dosis y sus consecuencias.

Ante todo debemos distinguir entre los efectos inmediatos y los diferidos. Los primeros se presentan a las pocas horas o días de haber ocurrido una irradiación importante del cuerpo entero. Los diferidos sólo se presentan al cabo de los años. Como quiera que los efectos diferidos no presentan un cuadro sintomático propio e independiente, sino que se manifiestan como enfermedades y defectos que también pueden ser producidos por otras causas, la sola forma de relacionar los efectos diferidos con su causa radiactiva es estadísticamente: comparando las frecuencias con las que esos problemas se presentan entre grupos de población irradiados y no irradiados.

Efectos inmediatos

La absorción de 75 a 200 rem sobre el cuerpo entero en una corta exposición provoca vómitos en el 5 a 20 por 100 de los casos al cabo de unas horas, fatiga y falta de apetito. Da lugar a cambios en el recuento sanguíneo, pero estos efectos desaparecen al cabo de unas semanas.

Por debajo de 75 rem no se producen síntomas sensibles para el individuo, pero se pueden apreciar clínicamente algunos efectos tales como la disminución de leucocitos.

No se tiene noticia de que nadie haya podido establecer una relación causa-efecto rigurosa entre un trastorno fisiológico permanente y una exposición aguda del cuerpo entero inferior a una dosis de 75 rem en una persona.

Efectos diferidos

Se ha observado que las elevadas dosis recibidas por razones profesionales (antes de adoptarse limitaciones adecuadas a la irradiación profesional), terapéuticas o accidentales por grupos numerosos de personas, pueden dar lugar a ciertos trastornos que se manifiestan de forma diferida.

Entre esos trastornos se mencionan:

- Cáncer.
- Defectos genéticos.
- Defectuoso desarrollo del embrión.
- Cataratas.

La posibilidad de que dosis del orden de 1 a 9 rad aplicados al embrión el período en el que se produce la diferenciación de los tejidos pueda dar origen a defectos en su desarrollo ha surgido durante los años 70. Sin embargo, este problema no está cuantificado actualmente en el hombre debido a que la incidencia de estos trastornos es baja a niveles de irradiaciones de 50 rad.

El cristalino es particularmente sensible a la irradiación por neutrones. Se han registrado opacidades del cristalino por dosis de 20 a 50 rad de neutrones de una forma inmediata. También parece que se puede dar la catarata como efecto diferido consecuente a irradiaciones crónicas, y en este caso parece que el período de latencia es inversamente proporcional a las dosis recibidas.

En ninguno de estos dos casos últimos han logrado evaluaciones de la relación riesgo-dosis tan precisas como las obtenidas para los dos primeros trastornos mencionados. Vamos, pues, a concentrarnos en los dos primeros de los cuatro casos de efectos diferidos mencionados en la literatura como probados porque son los dos que existen datos cuantitativos concordantes en la literatura y, por tanto, son los únicos que pueden dar lugar a una discusión razonada de las relaciones riesgo-dosis.

Sin embargo, debe tenerse muy presente que esas relaciones riesgo-dosis para los efectos diferidos se establecen a un nivel de frecuencia muy bajo, y siempre para dosis superiores a los límites recomendados por los reglamentos de radioprotección.

El establecimiento de relaciones riesgo-dosis para los efectos diferidos presenta serias dificultades por una serie de circunstancias entre las que destacan:

- Los efectos no se producen como consecuencia exclusiva de la irradiación. Otras causas producen los mismos efectos y consecuentemente no hay forma de relacionar con certeza el efecto con la irradiación.
- El período de latencia es largo y variable. La obtención de datos exige laboriosas pesquisas llevadas a cabo durante largos períodos de tiempo.
- La frecuencia de aparición de estos efectos diferidos imputable a la radiación es muy inferior a la frecuencia de su aparición por otras causas. De esta forma los datos tienen muy poca precisión, pues se presentan como diferencia entre los dos números relativamente iguales.
- La irradiación sólo puede administrarse en condiciones experimentales a animales. En ese caso el experimentador puede controlar los factores ajenos a la irradiación. Se consigue así un buen cuadro de resultados, pero no son aplicables directamente al hombre.
- Los casos de irradiación del hombre

son difíciles de estudiar y analizar ya que, al no producirse en condiciones experimentales, resulta extremadamente difícil no ya controlar, sino ni siquiera conocer, los factores exteriores que pueden afectar la relación de causalidad entre la irradiación y sus posibles efectos.

- Es difícil identificar las dosis recibidas por las víctimas en muchos casos de irradiación accidental. Tal es el caso de las irradiaciones de Hiroshima y Nagasaki, o de los pescadores japoneses víctimas de las cenizas procedentes de pruebas nucleares americanas. Aun en el caso de las irradiaciones por motivos profesionales, es difícil poder conocer las dosis a causa del carácter confidencial de los datos.

COLECTIVOS IRRADIADOS

Los diversos colectivos irradiados hasta ahora, cuyo estudio ha proporcionado la base de la evaluación de los riesgos diferidos consecuentes a la irradiación, pueden agruparse en las categorías indicadas en el cuadro 2.

CUADRO 2 INFORMACION SOBRE LOS EFECTOS DE LA RADIACION

- Víctimas de las explosiones nucleares.
- Enfermos sometidos a radioterapia.
- Personas irradiadas por motivos profesionales.
- Personas sometidas a elevada radiación de fondo.

Explosiones nucleares

La fuente más numerosa de datos es la constituida por 82.000 supervivientes de las explosiones de Hiroshima y Nagasaki, que vivían en esas ciudades en 1950, y 26.500 que en esa fecha habitaban ambas ciudades pero no habían padecido el bombardeo. Además había 2.800 personas que habían sido irradiadas durante su gestación.

Analizando el lugar y la protección con los que cada individuo fue sorprendido por la explosión se ha podido establecer una dosimetría a posteriori. Uno de los problemas que existen en este respecto es consecuencia de que la bomba de Hiroshima generó muchos más neutrones que la de Nagasaki, por lo que se hace necesario introducir el factor de eficacia de los neutrones respecto de la radiación γ .

Las dosis recibidas por los supervivientes tienden a agruparse por debajo de los 50 rad, ya que los que recibieron más de esa cantidad perecieron en su mayor parte como consecuencia de la onda expansiva o de las quemaduras producidas por el fogonazo.

Hasta 1974 habían muerto 19.646 de esos supervivientes. De ellos, 3.842 debido a cáncer. La comparación con la población patrón no irradiada permite

atribuir 185 de estos cánceres a la irradiación.

El estudio de los habitantes de las islas Marshall, que fueron sorprendidos por las cenizas de ensayos nucleares americanos en 1954, se refiere a 244 personas que recibieron una media de 200 rad al tiroides y 50 rad a la médula espinal. Se les compara con 504 personas no expuestas y desde entonces se han producido siete casos de cáncer de tiroides entre los expuestos, frente a uno entre los no expuestos.

Irradiación terapéutica

Los estudios epidemiológicos de los pacientes tratados con rayos X o γ se refieren a órganos específicos y a dosis muy elevadas.

Unas 14.000 personas aquejadas de espondilitis anquilopoyética fueron tratadas en Inglaterra entre 1934 y 1954 con rayos X, recibiendo unas dosis de unos 350 rads en la médula espinal. Se les ha seguido durante 134.000 años-persona de riesgo y se ha llegado a la conclusión de que el riesgo es $11,4 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$.

Son múltiples los estudios epidemiológicos de grupos menos numerosos de pacientes con fines terapéuticos por diversas causas. Es frecuente que esos estudios traten de concentrarse en la incidencia de la leucemia en función de la dosis impartida a la médula ósea por efecto de la irradiación. Esta preferencia es debida a que aunque la leucemia no es la forma más frecuente de cáncer radioinducido, sí es mucho más frecuente entre los cánceres radioinducidos que entre los naturales.

Los estudios epidemiológicos sobre distintos tipos de cáncer relacionados con radioterapias específicas han conducido a las evaluaciones de riesgo que se mencionan después, pero siempre partiendo de dosis del orden de centenaes de rads.

Irradiados profesionalmente

Los radiólogos fueron víctimas de irradiaciones excesivas en los primeros tiempos del empleo de los rayos X. Sin embargo, este hecho no ha servido para definir el riesgo de esas irradiaciones, ya que las dosis recibidas, aunque frecuentemente elevadísimas hasta el punto de haber producido efectos inmediatos, no han podido ser evaluadas.

Los pintores de diales luminosos con pinturas a base de radio han sido objeto de estudios epidemiológicos que han indicado una gran incidencia de tumores óseos. Debido a la práctica de afinar los pinceles en la boca, estos obreros ingirieron notables cantidades de radio que, acumulado en los huesos, ha llegado a irradiarles con dosis de varios miles de rems.

En la naturaleza existen radiosótopos naturales que pueden clasificarse en cosmogénicos y primordiales. Los cosmogénicos están formándose constantemente debido a la absorción de la radiación cósmica por los números de la na-

turaliza. Los primordiales son el potasio 40, el uranio 238 y el torio 232; tienen su origen en la formación de nuestro planeta. Su período de semidesintegración es por tanto grande: del orden de los mil millones de años.

Tanto el uranio como el torio dan origen a las dos cadenas radiactivas naturales conocidas desde el principio de siglo (fig. 1), que constan de una serie de radiosótopos que van apareciendo y descomponiéndose sucesivamente.

En la cadena de desintegración del uranio debe destacarse el radón 222 (véase la propia figura 1) que, por ser gaseoso, juega un papel importante en la dosis recibida por los minerales tales como los del uranio, el espato flúor y los fosfatos, o en la impartida por el propio suelo o los materiales de construcción, a las personas en general, como parte del fondo radioactivo. El radón 222 que tiene un período de semidesintegración de 3,8 días, queda ocluido en el terreno o los materiales constructivos de los que se va desprendiendo, lentamente en condiciones normales o muy rápidamente en las minas, al liberarse por las labores de extracción y las de beneficio.

Aunque el radón es químicamente inerte, su inhalación da lugar a la deposición de sus descendientes radioactivos en los pulmones de los trabajadores o, en menor proporción, de la gente en general.

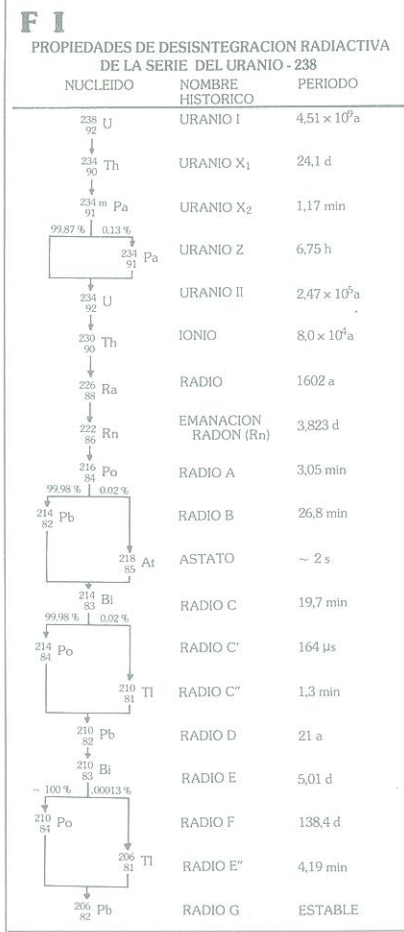
Este mismo hecho es el origen de la irradiación consiguiente en las escombreras de esas mismas y de las plantas de tratamiento de los minerales de uranio, y hasta de la irradiación producida por las cenizas procedentes de la combustión del carbón.

También juega un papel importante en el aumento de las dosis que reciben las personas en las viviendas construidas de manpostería o de fábrica de ladrillo frente a las que habitan casas de madera. A título de ejemplo, en el cuadro 3 se observan los resultados de unas mediciones realizadas en Suecia.

CUADRO 3 DOSIS MEDIDAS EN EL INTERIOR DE VIVIENDAS EN SUECIA		
Dosis en mrad durante 3.000 horas en el aire		
Tipo de vivienda	N.º de mediciones	Dosis
Madera	126	14,4
Ladrillo	93	31,8
Hormigón	43	37,5

Las dosis absorbidas por los tejidos del tracto respiratorio serán más elevadas puesto que reciben la energía procedente de los productos sólidos descendientes del radón.

Por otra parte, la ventilación de los locales juega un papel preponderante, ya que al tener el radón un período de varios días, cuando un local se deja sin ventilar durante períodos de días se produce un aumento de concentración de radón que puede hacer aumentar las



dosis según factores muy elevados, como ha demostrado el profesor Gascón en la Escuela de Minas de Oviedo.

Los efectos de la irradiación en los mineros han sido sometidos a estudio repetidas veces, estableciéndose un aumento de la frecuencia del cáncer de pulmón entre ellos. Además se ha encontrado un aumento superior de la frecuencia de este trastorno entre aquellos mineros que fuman.

Puesto que los trabajadores de la industria nuclear son reconocidos regularmente y sus dosis registradas, constituyen un buen fondo de información para los estudios epidemiológicos. Hasta hace poco no se había encontrado entre ellos un aumento de los efectos diferidos de la radiación. Ello parece constituir una confirmación de que las dosis máximas admisibles en las reglamentaciones eran conservadoras.

Ha habido, sin embargo, en los últimos años, dos estudios cuyos alarmantes resultados han sido muy aireados y están siendo muy debatidos. Se trata primero del estudio de 35.000 obreros empleados en el centro productor de materiales nucleares especiales de Hanford, en el Estado de Washington, por Mancuso, Stewart y Kucale. Parece ser que las bases estadísticas de este estudio no son rigurosas y hay serias críticas de sus resultados.

El segundo caso procede del análisis epidemiológico de los obreros de los astilleros de Portsmouth, New Hampshire, que repostan y revisan el centenar largo de navíos americanos propulsados por

energía nuclear. El estudio se refiere sólo a un tercio de los trabajadores ya fallecidos y carece de una dosimetría apropiada. Está también siendo duramente criticado.

Radiación de fondo elevada

Se ha intentado determinar una incidencia anómala de efectos diferidos de la radiación en aquellos lugares en los que el fondo radiactivo imparte dosis que, en algunos casos, llegan a ser veinte veces superiores al promedio mundial. El resultado ha sido negativo, constituyendo la prueba más clara de la inocuidad de las dosis del orden de centenares de mrad. Esas poblaciones reciben, y han recibido durante muchas generaciones, dosis muy elevadas sin que discernirse un estado de salud diferente al de otras poblaciones sometidas a un fondo normal. En la figura 2 se recogen los histogramas de distribución de la población en función de las dosis absorbidas en el aire en los lugares que habitan para las poblaciones de la República Federal de Alemania, Italia, Japón y EE.UU. Los dos grupos de población destacados en el caso de Italia corresponden a la mayor dosis encontrada en el Lazio y Campania.

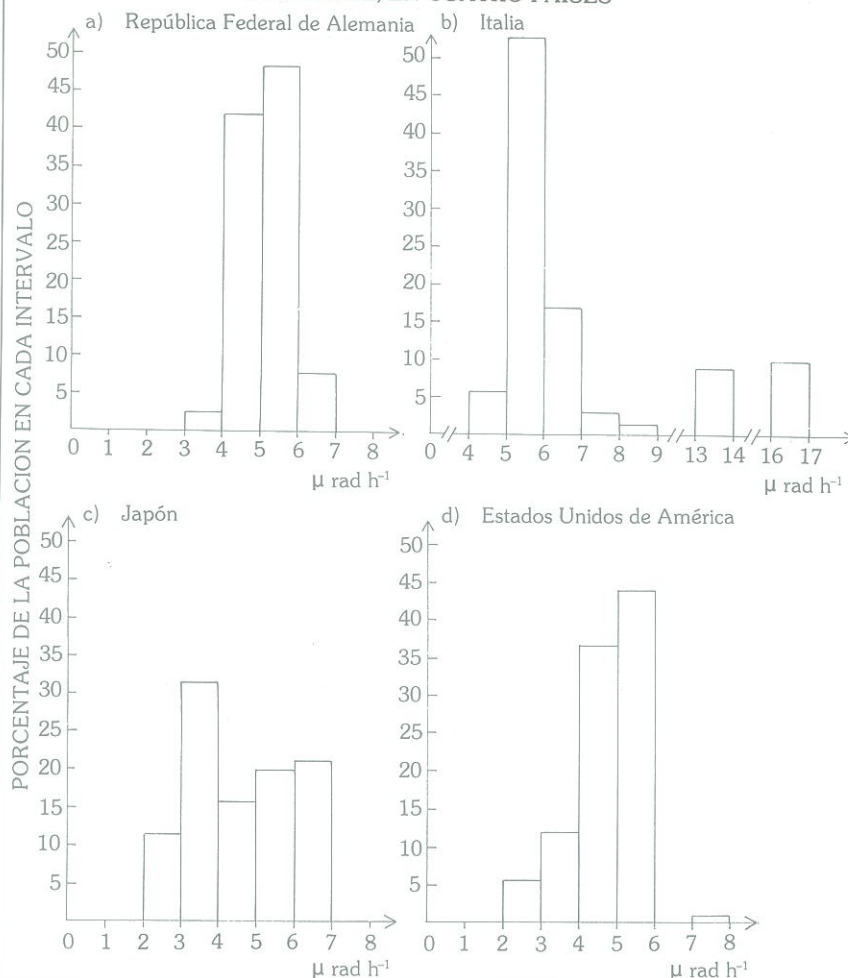
En el Estado de Minas Gerais (Brasil), existe una zona costera en la que la dosis absorbida en el aire es muy elevada. En el pueblo de Guarapari, de 12.000 habitantes y una población flotante de 30.000 veraneantes, la dosis en el aire oscila entre 100 y 200 $\mu\text{rad/h}$. En Poços de Caldas hay una colina en la que se alcanzan los 2.800 $\mu\text{rad/h}$.

Se adopta como valor promedio mundial de las dosis en el aire dentro de edificios y al aire libre los valores 5,3 $\mu\text{rad/h}$ y 4,5 $\mu\text{rad/h}$ procedentes de la radiación terrestre. Eso corresponde a unos 32 mrad anuales. El promedio de dosis recibidas por unos 70.000 habitantes de la India en los Estados indios de Kerala y Tamil Nadu asciende a 380 mrad anuales. Un 6 por 100 de esta población recibe dosis anuales superiores a 1 rad procedentes de la radiación terrestre.

En los EE. UU. cabe distinguir a este respecto tres regiones diferentes que están señaladas en la figura 3, con mención del rango de variación terrestre registrado en cada una de esas regiones y su valor medio. Esas diferencias son esencialmente debidas a razones geológicas.

De forma análoga a la irradiación terrestre, la contribución de la radiación cósmica a la dosis ambiental que constantemente estamos recibiendo varía notablemente. Lo hace con la latitud, pero fundamentalmente con la altura. En nuestras latitudes y a nivel del mar, la radiación cósmica nos somete a unos 28 mrad anuales al cuerpo entero. Este es también su valor medio en EE. UU. Pero los habitantes de Denver, en Colorado, están sometidos a 50 mrad debido a que esta ciudad está situada a 1.600 m sobre el nivel del mar.

F II DISTRIBUCION PONDERADA POR LA POBLACION DE LAS TASAS DE DOSIS ABSORBIDAS EN AIRE DEBIDAS A LA RADIACION TERRESTRE, EN CUATRO PAISES



Si las dosis incrementales del orden de decenas de mrad anuales fueran causantes de aumentos en la frecuencia de los efectos diferidos de la radiación, tanto somáticos como genéticos, deberían ponerlo de manifiesto los estudios epidemiológicos de ciertas enfermedades y trastornos. Sin embargo nunca ha podido ponerse en evidencia una correlación entre las diversas frecuencias con las que se presentan esos trastornos, tanto somáticos como genéticos, y la distinta dosis ambiental que los diversos grupos de población reciben y han recibido durante siglos.

Para ser rigurosos hay que decir que dosis marginales de radiación ionizante de decenas y hasta centenas de mrad anuales de radiación de baja transferencia lineal de energía no producen efectos discernibles al ser aplicados a grupos amplísimos de la población mundial. El nivel de dosis en el que actualmente se discute la existencia de efectos diferidos de la radiación es el de varios rad al año, no estando demostrado que estos efectos sean causados por dichas dosis.

PROBLEMA ESTADISTICO

Puede afirmarse que para niveles de dosis del orden de 1 rad e inferiores es prácticamente imposible llegar a esta-

blecer por métodos epidemiológicos una relación causa-efecto con la aparición de efectos diferidos de las radiaciones ionizantes.

Esta afirmación tiene una notable importancia, pues consecuentemente los intentos de relacionar dosis colectivas con riesgos de producir ciertas enfermedades carecen no sólo de fundamento

científico actualmente, sino que no hay procedimiento epidemiológico que permita esperar su esclarecimiento en el futuro.

Afirmaciones tales como la que el accidente de T.M.I. no produjo más que una determinada fracción de probabilidad de originar un cáncer en la población son el resultado de emplear las hipótesis de relación lineal efecto-dosis que se utilizan con fines reguladores, pero que están muy lejos de poder ser comprobadas a los niveles de dosis a los que se refieren.

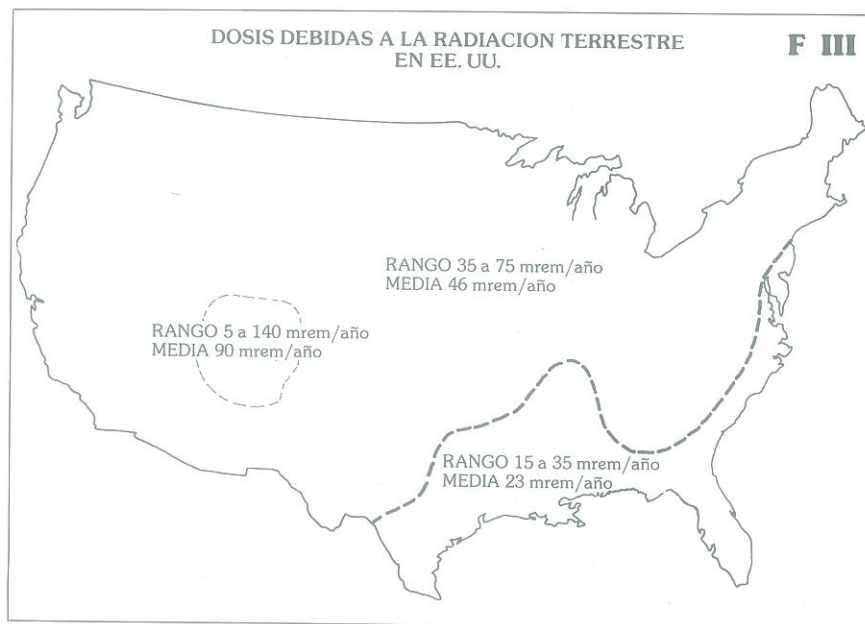
La aplicación de los conocimientos estadísticos conduce a esta conclusión para los niveles de riesgo resultantes de la extrapolación lineal a estas dosis de los datos obtenidos a dosis cien veces mayores.

Esto es consecuencia (fig. 4) de que la desviación media cuadrática es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de individuos que componen el colectivo, lo que hace extremadamente costoso, en términos de número de individuos reconocidos, el aumentar la precisión de la media.

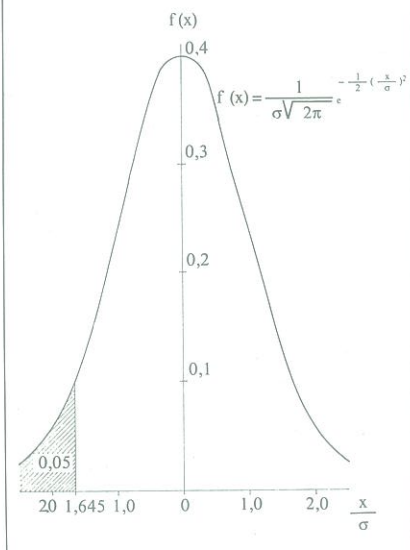
El caso de la leucemia es el más fácil de determinar, porque se trata de una enfermedad relativamente poco frecuente y es uno de los más notorios, por su elevada frecuencia, de los efectos diferidos de la irradiación a dosis del orden de 100 rad.

Si admitimos que el riesgo de contraer leucemia es proporcional a la dosis y suponemos que se dispone de un colectivo de $N/2$ personas que han recibido un rad en la médula ósea a los 35 años, se necesita que el número de individuos que lo componen sea del orden de millones para determinar dicho riesgo con relativa certeza, comparando dicho grupo con otro de $N/2$ personas sin irradiar. Además nuestro estudio de más de un millón de personas ha de abarcar por lo menos 15 años, ya que el período de latencia es de unos 10 años en promedio.

Para comprender este hecho basta



F IV DISTRIBUCION NORMAL DE FRECUENCIAS



con analizar las propiedades de la distribución normal que aparecen en la figura 5. Se ha supuesto que cualquier determinación del riesgo debido a la irradiación no es significativa si resulta inferior a 1,645 multiplicado por la desviación media cuadrática, ya que eso es lo que ocurriría en el 95 por 100 de los casos si el riesgo fuera nulo. Se ha expresado la probabilidad de que la determinación produzca un resultado negativo y un resultado significativo. Asimismo se indica el valor mínimo y el medio de todas las determinaciones que cumplen la definición de ser significativas, es decir $\leq 1,645$.

Aplicaremos estas propiedades a las distribuciones que se obtendrían suponiendo que se verifican las frecuencias que se indican en los siguientes párrafos a colectivos de 10.000 a 10.000.000 de individuos.

- El riesgo medio de contraer leucemia por causas naturales entre los 35 y 50 años se eleva a 43,7 por millón de americanos anualmente.
- La extrapolación de los datos obtenidos entre los supervivientes de los bombardeos del Japón hasta una dosis de un rad, representa tres casos anuales por millón.

Suponemos que para cada colectivo se somete la mitad de sus individuos a una irradiación de 1 rad a la médula ósea a los 35 años, observando el número de leucemias registradas cada año durante 15 años y comparando las frecuencias entre los irradiados y no irradiados. De tales observaciones (figs. 6 y 7) se ha deducido que para un colectivo de un millón se obtendrían estimaciones negativas del riesgo en el 19 por 100 de los casos y significativas sólo en el 22 por 100. Además en las dos últimas columnas se ve claramente que las determinaciones que son mayores que 1,645 veces la desviación media cuadrática, y por ello dignas de crédito, representan una sobreestimación notable del riesgo para colectivos reducidos.

ORGANISMOS DEDICADOS A EVALUAR LOS RIESGOS DE LAS RADIACIONES

Ningún agente potencialmente nocivo para el hombre ha sido estudiado tan minuciosamente como la radiactividad. Varias instituciones han sido creadas para estudiar los efectos de la radiación en el hombre a nivel internacional y en diversos países. La International Commission on Radiological Protection (ICRP) y el Comité de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) son prominentes a nivel internacional. En los EE. UU. deben mencionarse: el National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) y el Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR). El primero es una asociación de especialistas en el tema y el segundo es un Comité encuadrado en el National Research Council de la Academia de Ciencias.

Todos estos organismos carecen de cualquier poder ejecutivo y su función no es ni siquiera consultiva. Se limitan a hacer recomendaciones que, en general, constituyen la base de los reglamentos técnicos.

La ICRP es el más prestigioso y antiguo de todos los organismos empeñados en la radioprotección. Fue creado en 1928 bajo el nombre de International X-ray and Radium Protection Commission, estando compuesto de un presidente y no más de doce miembros elegidos entre las personalidades internacionales destacadas en el campo de la radioprotección.

Antes de 1956 las dosis máximas recomendadas por el ICRP era 300 mrem/semana. Con el desarrollo industrial de la energía nuclear las personas podían tener ocasión de recibir todas las semanas de su vida la dosis máxima permisible, con lo que podía acumularse en 50 años de trabajo los 750 rem. Esta dosis podía considerarse como nociva y la ICRP decidió recomendar dosis menores. En 1959 editó su publicación número 2, «Permissible Dose for Internal Radiation». Partía de la recomendación de no exceder sistemáticamente una dosis tres veces menor que la anterior. Esta recomendación adoptada la fórmula:

$$D \leq 5 (N-18)$$

F V

RADIOPROTECCION
Aplicación de las propiedades de la distribución normal

TASA NATURAL DE LA ENFERMEDAD	r
RIESGO DEBIDO A LA VARIABLE IRRADIACION	δ
TASA ENTRE LOS INDIVIDUOS IRRADIADOS	$r + \delta$
VARIANZA DE UNA DETERMINACION	$r + \delta$
VARIANZA DE UNA DETERMINACION EN UN COLECTIVO DE N INDIVIDUOS	$\frac{r + \delta}{N}$
DESVIACION MEDIA CUADRATICA	$\sigma = \sqrt{\frac{r + \delta}{N}}$
MINIMA ESTIMACION SIGNIFICATIVA	$\delta_s = 1,645 \sigma$
PROBABILIDAD DE QUE LA ESTIMACION RESULTE NEGATIVA	$P_- = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2} d \frac{x}{\sigma}$
PROBABILIDAD DE QUE LA ESTIMACION RESULTE SIGNIFICATIVA	$P_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{1,645 - \frac{\delta}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2} d \frac{x}{\sigma}$
ESTIMACION SIGNIFICATIVA MEDIA	$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e - \frac{1}{2} \left(1,645 - \frac{\delta}{\sigma} \right)^2 \frac{\sigma}{P_s} + \delta$

Es decir, a lo largo de la vida del individuo no debe superarse en ningún momento una dosis acumulada equivalente a la absorción de cinco rem anuales desde los 18 años en adelante. Además no debiera acumularse más de tres rem en cualquier período de 13 semanas para evitar las irradiaciones intensivas de personas no irradiadas con anterioridad.

En esta publicación número 2 de la ICRP se recopilan además: las constantes biológicas y físicas de los radioisótopos y fundamentalmente las siguientes magnitudes referidas a 240 radionucleidos.

- Máximo contenido permisible en la totalidad del cuerpo.
- Máxima concentración en el aire.
- Máxima concentración en el agua para las personas profesionalmente expuestas.

En realidad dichas concentraciones son coherentes con la dosis máxima anual de cinco rem, que constituye la base de estas recomendaciones.

Las recomendaciones de la ICRP fueron adoptadas en España por Orden de la Presidencia del Gobierno de 22 de diciembre de 1959. Esto fue consecuencia de nuestra participación en la OCDE y del hecho de que esta organización hizo suyas las recomendaciones de la ICRP.

En realidad la NCRP americana había trabajado en colaboración con la

F VI

CARACTERISTICAS ESTADISTICAS DE LA ESTIMACION EPIDEMIOLOGICA DE LA INCIDENCIA DE LA LEUCEMIA RADIOINDUCIDA

N	σ/δ	P_-	P_s	δ_s	$\bar{\delta}_s$
10^4	11,6	,47	,060	57,1	72,0
10^5	3,7	,39	,085	18,1	23,1
10^6	1,16	,19	,22	5,7	7,7
10^7	,37	,001	,87	1,8	3,3

ICRP y había adoptado las mismas tablas que esta comisión.

Las dosis límites para el personal requieren la periódica vigilancia médica del individuo. Para el público en general las dosis límites recomendadas por la ICRP son la décima parte de las relativas a la exposición profesional a la radiación ionizante.

Pero repetidas veces todos estos organismos llamaban la atención desde los años 50 sobre la conveniencia de reducir la irradiación al máximo compatible con la utilización de la radiactividad y la energía nuclear.

En 1965 la ICRP adoptó una resolución que decía literalmente:

«Puesto que cualquier exposición a la radiación puede entrañar riesgo en alguna medida, la Comisión recomienda que se evite cualquier exposición superflua, y que las dosis impartidas se mantengan tan bajas como **buenamente** (readily) sea factible, teniendo en cuenta las consideraciones económicas y sociales.»

En 1973 la Comisión intentó lo que pretendía recomendar con la expresión «tan bajas como buenamente sea factible, teniendo en cuenta las consideraciones económicas y sociales». Para ello introdujo el concepto de análisis costo/beneficio, que no consiste más que en evaluar en términos monetarios o de otra índole, pero siempre en un mismo tipo de unidades, los beneficios y los costos, con el fin de poder tomar las decisiones que permitan alcanzar el beneficio al mínimo costo. Es evidente que el problema estriba en asignar un costo a las dosis y, por tanto, con esta acción la ICRP se inhibía de los temas reguladores.

ORGANISMOS REGULADORES

Los organismos reguladores de las actividades que tienen relación con la radiación ionizante han adoptado una actitud bivalente ante su responsabilidad. Han implantado los límites recomendados por la ICRP y demás organismos científicos como reglamentos de obligado cumplimiento. Por otra parte, han propugnado reducir las dosis al público en general de una forma ilimitada en términos absolutos.

Tal es el caso del Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes español, que promueve la reducción de las dosis equivalentes impartidas tan bajo como sea razonablemente posible y en su Apéndice II establece unos límites de dosis determinados para diversos casos de exposición.

Otros países que siguen la misma filosofía tratan de concretar las medidas de protección exigibles en cada instalación por aplicación de un análisis coste-beneficio. Este método trata de comparar los riesgos que produce una irradiación con los beneficios de la actividad que la origina. Inmediatamente se tropieza con la dificultad de evaluar unas y otras de una forma objetiva. Al final se

establecen una serie de recomendaciones de carácter más o menos general que en resumen tratan de hacer una aplicación homogénea de los recursos disponibles para reducir las dosis equivalentes impartidas a unos niveles determinados.

HIPOTESIS LINEAL SIN UMBRAL

En primer lugar el regulador debe evaluar el riesgo como elemento clave en el análisis costo/beneficio.

Puesto que carece de datos de daños causados por la radiación a los niveles de dosis en que el público puede quedar afectado, extrapola los datos obtenidos a partir de dosis miles de veces superiores. Como quiera que no se sabe qué ley puede seguir la relación dosis/daño, adopta la más sencilla: linealidad sin umbral. Esta expresión, que por supuesto tiene carácter estadístico, niega toda capacidad de recuperación del organismo del daño por la radiación. Las inmediatas consecuencias de esta hipótesis son absolutamente inválidas para los riesgos que entrañan otros agentes nocivos de los que el organismo se recupera. Además esta hipótesis no se verifica para las propias dosis a partir de las cuales se hace la extrapolación.

Según ella el daño es directamente proporcional a la dosis integrada por la población. Consecuentemente implica que:

- El daño no depende del tiempo que tarda en recibirse la dosis.
- Estadísticamente, el mismo daño produce una determinada dosis en un individuo que la milésima parte de esa dosis a cada uno de mil individuos.

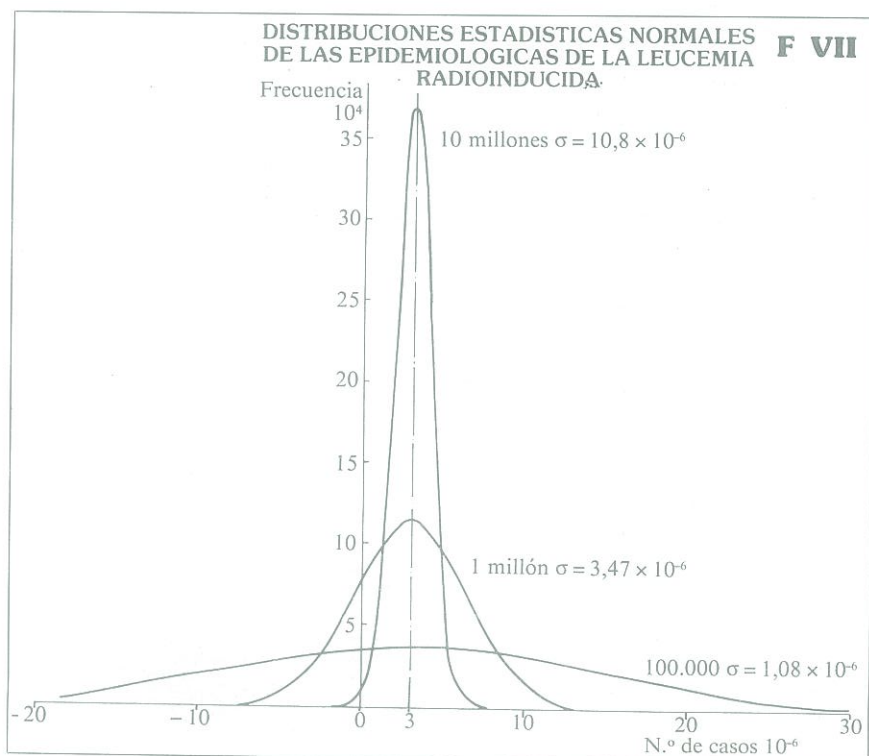
Los resultados del empleo de esta hipótesis son muy simples de aplicar y constituyen indudablemente una buena herramienta a emplear con finalidades reguladoras. Sin embargo ha sido empleada por los medios de información con completa ignorancia de su sentido.

Un ejemplo de cómo se obtienen las evaluaciones del daño causado por una dosis colectiva determinada es el mostrado en la figura 8. Las cifras están tomadas del informe técnico 10-76 de la Atomic Bomb Casualty Commission y la incidencia de la leucemia entre los supervivientes ha sido ajustada respecto de la edad de los mismos.

La aplicación de la hipótesis de linealidad sin umbral conduce a la conclusión de que el riesgo anual de contraer leucemia es igual al valor medio de la columna RL/D, es decir: $(2,89 \pm 1,51) \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$. Así pues, puede decirse que el riesgo tiene el 95 por 100 de probabilidad de ser inferior a la magnitud $[2,89 + (1,645 \times 1,51) \times 10^{-6} = 5,37 \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}]$ y aproximadamente un 3 por 100 de ser negativo, es decir, de que la irradiación reduzca el riesgo de contraer leucemia.

Pero no puede olvidarse que este riesgo ha sido evaluado a partir de dosis de centenares de rem y su aplicación a dosis del orden de decenas de mrem implica una extrapolación por un factor 10^4 .

Consideraciones de la índole del daño biológico pueden conducir a la adopción de diversas leyes de dependencia del daño con la dosis para efectuar la extrapolación. En la figura 9 se recogen los riesgos anuales para un millón de personas irradiadas por 1 rem, obtenidos por extrapolación a 1 rem de las distintas curvas riesgo/dosis indicadas. También se aprecia la dispersión de los pun-



tos que soportan la cifra aproximada de $3,10^{-6} \text{ rem}^{-1}$ y la forma de las respectivas curvas ajustadas estadísticamente.

Ha habido en los últimos tiempos personas que tratan de defender las hipótesis que mantienen que el riesgo de la dosis es mayor a bajas dosis que a altas y por tanto defienden el argumento de que la hipótesis lineal sin umbral menosprecia el riesgo a bajas dosis. Lo único que puede decirse es que la comprobación de estas hipótesis por métodos epidemiológicos es prácticamente imposible a las dosis que pueden preocupar al público en general y aun a las personas profesionalmente irradiadas a los niveles actuales.

Si se aplica la hipótesis lineal sin umbral a los riesgos de desarrollar los distintos tipos de neoplasias radioinducidas a altas dosis, y se tiene en cuenta sus períodos de latencia, se llega a la cifra aproximada de 100 por cada millón de personas irradiadas a 1 rem, estando ese riesgo extendido a toda la vida de la población.

RADIOPROTECCION EN LAS CENTRALES NUCLEARES

El organismo que regula la actividad de las centrales nucleares norteamericanas recibe la autoridad para ello de la Ley de Energía Atómica de 1954, que ha sido enmendada repetidas veces. Primero la AEC y ahora la NRC reciben de dicha Ley la responsabilidad de regular las actividades en lo que nosotros, en España, llamamos instalaciones nucleares. Mientras la energía nuclear tenía un carácter eminentemente militar y las actividades con ella relacionadas un carácter singular, la AEC tenía suficiente autoridad para regular esta materia. Con la desmembración de la AEC se ha reforzado la intervención de otros organismos en el campo nuclear.

Hasta 1975 la regulación en materia de radioprotección se basaba en las re-

comendaciones de la ICRP que muy esquemáticamente representan los siguientes límites anuales:

- 5 rem para los trabajadores.
- 500 mrem para individuos de la población.
- 170 mrem como media de grupos específicos de población.

Poco a poco el énfasis en la reducción ilimitada de las dosis permisibles había ido aumentando.

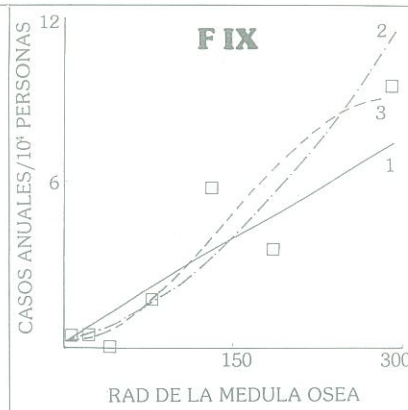
Primeramente se limitaron las concentraciones en los efluentes, tanto líquidos como gaseosos, de las centrales. Las actividades específicas en los efluentes se redujeron notoriamente sobre los que correspondían a las tablas contenidas en la publicación número 2 de la ICRP de 1959.

Posteriormente, en 1975, se cambió el procedimiento mediante el Apéndice I a la parte 50 del capítulo 10 del «Code of Federal Regulations», relativa a las autorizaciones de instalaciones nucleares del Reglamento de Energía Atómica. Ya no se exige el respeto a unas concentraciones límites en los efluentes. Se pide mantener las evaluaciones de las dosis recibidas por hipotéticos individuos dentro de ciertos límites.

El reglamento exige el sometimiento al criterio ALARA (As Low As is Reasonably Achievable), pero el Apéndice I cuantifica la aplicación de dicho criterio para el exterior de las instalaciones. El Apéndice I representa una forma satisfactoria de mantener la influencia ambiental ALABA, no siendo de obligado cumplimiento si se demuestra que concurren circunstancias que lo hacen innecesario en un caso particular.

Esa cuantificación estriba fundamentalmente en respetar los siguientes límites anuales de dosis para cualquier individuo fuera de la central.

- 3 mrem al cuerpo entero, o 10 a cualquier órgano, procedente de los efluentes líquidos.



DISTINTAS LEYES DOSIS-RIESGO DE LEUCEMIA RADIOINDUCIDA

Curva	Modelo	Riesgo anual a 1 rem
— 1	$RL = a + bD$	$2,47 \pm 0,63$
- - - 2	$RL = a + bD + cD^2$	$0,98 \pm 1,18$
- - - 3	$RL = [a + bD + cD^2]e^{-dD^2}$	$0,03 \pm 1,83$

- 5 mrem al cuerpo entero y 15 a cualquier órgano, procedente de los efluentes gaseosos.

Como se ve, estos límites son de una magnitud tal que no superan las diferencias en las dosis de fondo radiactivo causadas por circunstancias diversas de la vida de los individuos que no habían recibido previamente atención alguna de la sociedad.

IMPENETRACION DEL APENDICE I

Los parámetros limitadores considerados en el apéndice I no pueden medirse, pero el Reglamento americano establece su implementación en tres etapas:

- Para dar el permiso de construcción de una central hay que incorporar en el proyecto instalaciones de tratamiento de residuos radiactivos, cuya evaluación permita mantener que esos límites pueden ser respetados.
- Para obtener el permiso de puesta en marcha hay que establecer unas especificaciones técnicas de funcionamiento de la instalación que garanticen la eficacia con el fin de respetar la evaluación a que se refiere el párrafo anterior.
- Durante el funcionamiento es obligatorio tomar ciertas medidas cada vez que a lo largo de un trimestre se excedan las especificaciones técnicas de tal manera que las posibles dosis evaluadas superen la mitad de la dosis anual.

Estas medidas consisten en:

- Analizar las causas de esa anomalía.
- Definir e iniciar su corrección.
- Informar de ello al organismo regulador.

Además el explotador debe establecer un programa de análisis radiológico

F VIII

INCIDENCIA DE LA LEUCEMIA ENTRE LOS SUPERVIVIENTES DE NAGASAKI

D	PA	FL	RL	RL/D
0	214.122	$0,27 \pm 0,11$	—	—
2,1	128.288	$0,48 \pm 0,19$	$0,21 \pm 0,22$	$10,00 \pm 10,00$
11,8	71.676	$0,44 \pm 0,25$	$0,17 \pm 0,27$	$1,44 \pm 2,29$
38,9	25.651	$0,00 \pm 0,00$	$-0,27 \pm 0,11$	$-0,69 \pm 0,28$
79,0	27.295	$1,86 \pm 0,83$	$1,59 \pm 0,83$	$2,01 \pm 1,05$
132,0	14.714	$5,74 \pm 1,98$	$5,47 \pm 1,98$	$4,14 \pm 1,50$
185,8	5.414	$3,51 \pm 2,55$	$3,24 \pm 2,55$	$0,17 \pm 1,37$
286,4	7.011	$9,37 \pm 3,66$	$9,10 \pm 3,66$	$3,18 \pm 1,28$

$2,89 \pm 1,51$

D	Dosis media a la médula ósea en rad.
PA	Producto del número de personas x número de años observados.
FL	Número de casos de leucemia por cada 10^4 PA $\pm$ desviación típica.
RL	Riesgo de leucemia radioinducida por 10^4 PA para cada dosis D.
RL/D	Riesgo de leucemia por 1 rad y 10^6 PA.

del emplazamiento que, sin pretender determinar las dosis que puedan recibir las personas, mantenga un conocimiento apropiado de las actividades ambientales para:

- Comprobar que no pueden dar lugar a exceder las dosis aludidas antes.
- Confirmar que la evaluación de las instalaciones y de su funcionamiento, de acuerdo con las especificaciones técnicas, es consecuente con la realidad ambiental.

La aplicación de toda esta doctrina sería imposible de no existir las guías reguladoras, constituidas por documentos que explican una forma satisfactoria para la NRC de cumplir un determinado requisito. Por tanto, no son de obligado cumplimiento, pero permiten al administrador tener la certeza de que su forma de actuar merece la aprobación administrativa pertinente.

En el cuadro 4 se recogen los títulos de las guías reguladoras relativas al contenido del apéndice I.

La última de las guías mencionadas instruye sobre cómo efectuar un análisis requerido por el apéndice I: el **análisis costo/beneficio**. Esta prescripción exige que en el proyecto se incorporen todos los sistemas de tratamiento de residuos radiactivos que permitan, con el empleo de tecnologías de aplicabilidad industrial demostrada, reducir la dosis comprendida colectiva a un coste no superior a 1.000 dólares por hombre rem al cuerpo entero, o 1.000 dólares al tiroides, integrada a la colectividad que habita en un radio de 50 millas alrededor de la central.

Esta prescripción está destinada a mantener vivo el objetivo ALARA a medida que la técnica progresa y puede tomar una importancia progresiva y puede tomar una importancia notoria como medio para reducir las emisiones en el futuro.

La implementación del requisito ALARA para el personal de la central

no ha sido objeto de una regulación tan escrita, dejándose al personal de la central el empleo de las técnicas más apropiadas para reducir su exposición. Sin embargo, la **guía reguladora 8.19** describe la información que debe incluirse en los Informes de Seguridad para estimar la dosis colectiva de carácter profesional recibida en los reactores de agua ligera por el personal de explotación.

Es lógico que el personal de explotación trate de reducir su exposición y que lo haga con gran eficacia. Parece, pues, inútil tratar de implementar la aplicación del criterio ALARA desde el exterior de la central.

CONCLUSIONES

Los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes se han puesto de manifiesto tanto experimentalmente como consecuencia de la irradiación de animales, como en distintos grupos de personas que han sufrido irradiaciones elevadas por diversas causas.

En las personas que reciben dosis iguales o superiores a un centenar de rem al cuerpo entero se manifiestan efectos inmediatos. Estos efectos tienen evidente relación causal con la dosis recibida, y sus síntomas son tanto más agudos cuanto mayor es la dosis recibida. Los síntomas, por otra parte, son característicos de los trastornos de la salud por la radiación, y está aceptado que hay un umbral de dosis por debajo del cual no se presentan en absoluto.

En grupos de población sometidos a dosis de bastantes decenas de rem al cuerpo entero se ha observado un aumento de la frecuencia con la que se presenta ciertos trastornos que también tienen otras causas diversas. Estos trastornos tienen carácter somático o genético, pero en cualquier caso su manifestación sólo se pone en evidencia estadísticamente, ya que no puede diferenciarse el diverso origen del trastorno.

No se ha demostrado que exista un umbral de dosis por debajo del cual no

se produzca ningún aumento de la incidencia de esos trastornos. Además la pequeña frecuencia con la que parece producirse este tipo de trastornos como consecuencia de dosis del orden de centenares de rem, hace que resulte imposible poner de manifiesto una relación cuantitativa dosis/frecuencia para dosis de un rem por métodos epidemiológicos. Esta imposibilidad es debida a la necesidad de hacer estudios de este tipo que abarquen a millones de individuos durante decenios.

Ante esta incertidumbre la comunidad científica adopta una posición cauta, recomendando reducir las dosis recibidas por las personas al máximo compatible con la obtención de los beneficios que la radiactividad y la energía nuclear en general pueden reportar.

Siguiendo esta postura, los organismos reguladores adoptan la hipótesis de que el daño recibido por la población es proporcional a la dosis. En particular la industria nuclear está siendo conducida por los organismos reguladores a garantizar que las dosis recibidas por los individuos más expuestos de la población no superen la decena de mrem.

Este nivel de dosis al cuerpo entero es un factor unas diez mil veces más pequeño que aquél para el que se tiene evidencia de efectos nocivos de la radiación ionizante.

Distintos grupos de población vienen siendo sometidos por generaciones y generaciones a diferencias en las dosis ambientales superiores a decenas de mrem, sin que se haya puesto de manifiesto una diferencia en la incidencia de trastornos somáticos o genéticos imputable a la radiación.

Esta constatación constituye buena prueba de que la regulación de la industria nuclear reduce la posible incidencia de la radiación a niveles claramente inocuos.

Pero hay dos advertencias claras que deben hacerse:

No es viable mantener una industria con un mandato de reducir un parámetro ilimitadamente. La incertidumbre sobre qué se va a exigir mañana es algo incompatible con un desarrollo firme de una manera de hacer las cosas.

En segundo lugar: si la sociedad estuviese deseosa de reducir su riesgo a causa de las incertidumbres que entraña la radiación, debería adjudicar económicamente sus recursos a esa reducción. Tendría consecuentemente que regular con el mismo criterio otras actividades tales como el empleo médico de la radiación, la utilización de recursos naturales tales como fosfatos, carbones, etc., el empleo de materiales de construcción y la propia distribución sobre la Tierra.

No actuar de esta suerte constituye una notoria incongruencia que promueve en la vida moderna unos procedimientos de generar energía mucho más costosos que la energía nuclear en términos de vidas humanas, de salud pública, de agresión al medio ambiente y deterioro de los ecosistemas.

CUADRO 4

GUIAS REGULADORAS RELATIVAS AL CONTENIDO DEL APENDICE I AL CFR 50

- RG. 1.112 Cálculo de las emisiones de materiales radiactivos en los efluentes gaseosos y líquidos procedentes de reactores de agua ligera.
- RG. 1.111. Métodos para estimar el transporte y dispersión atmosféricos de los efluentes gaseosos emitidos en las emisiones rutinarias de los reactores de agua ligera.
- RG. 1.113. Estimación de la dispersión acuática de los efluentes procedentes de emisiones accidentales y rutinarias de reactores.
- RG. 1.109. Cálculo de las dosis anuales al hombre procedentes de emisiones rutinarias de reactores.
- RG. 1.110. Análisis costo-beneficio de los sistemas de tratamiento de residuos radiactivos de reactores de agua ligera.