

Energía nuclear, contaminación radiactiva y sus efectos en la salud



Michel Picquart
Marco Antonio Zepeda
Izayana Carrasco



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Energía nuclear,
contaminación radiactiva
y sus efectos en la salud

Energía nuclear, contaminación radiactiva y sus efectos en la salud

Michel Picquart

Departamento de Física
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

Marco Antonio Zepeda

Departamento de Atención a la Salud
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Izayana Carrasco

Departamento de Atención a la Salud
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Universidad
Autónoma
Metropolitana





Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Rector General

Dr. Salvador Vega y León

Secretario General

M. en C.Q. Norberto Manjarrez Álvarez

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-XOCHIMILCO

Rectora

Dra. Patricia E. Alfaro Moctezuma

Secretario

Lic. G. Joaquín Jiménez Mercado

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

Director

Mtro. Rafael Díaz García

Secretaria Académica

Dra. Leonor Sánchez Pérez

Energía nuclear, contaminación radiactiva y sus efectos en la salud

Primera edición: 2016

ISBN: 978-607-28-0869-0

D.R. © UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Unidad Xochimilco

Calzada Del Hueso 1100 Col. Villa Quietud, Del. Coyoacán

C.P. 04960, México, D.F., Tel.: 5483 7000 ext. 3783

Esta obra se publicó en el marco de la Convocatoria para la obtención de apoyo para publicaciones, emitida por la Rectoría de la Unidad Xochimilco en enero de 2016.

Impreso y hecho en México

Contenido

Presentación	11
Capítulo I. Sobrevivir... y vivir	15
Capítulo II. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes	55
Capítulo III. La contaminación radiactiva	121
Perspectivas y conclusiones	173
Anexo A	187
Anexo B	193

La cultura no es tener el cerebro lleno de fechas, nombres o cifras, es la calidad del juicio, la exigencia lógica, el apetito de la prueba, la noción de la complejidad de las cosas y de la dificultad de los problemas. Es el hábito de la duda, el discernimiento en el recelo, la modestia de opinión, la paciencia de ignorar, la certeza que uno nunca tiene todo lo verdadero por compartir; es tener el espíritu firme sin tenerlo rígido, es estar armado en contra de lo confuso y también en contra de la falsa precisión, es rechazar todos los fanatismos y hasta los que se autorizan de la razón; es sospechar de los dogmatismos oficiales pero sin provecho para los charlatanes, es reverenciar el genio pero sin hacerlo ídolo, es siempre preferir lo que es a lo que nos gustaría que hubiera sido.

Jean Rostand, *Le droit d'être naturaliste*, París, Stock, 1963

A los grandes males, los pequeños remedios no aportan pequeños alivios, no aportan nada.

John Stuart Mill, *Principios de economía política*, 1848

A través de la liberación de la energía atómica, nuestra generación ha traído al mundo la fuerza más revolucionaria desde el descubrimiento prehistórico del fuego. Esta energía básica del universo no puede ajustarse al concepto anticuado de nacionalismos estrechos. No hay ningún secreto y no hay ninguna defensa, no hay ninguna posibilidad de control excepto a través de la clara comprensión y la insistencia de los pueblos del mundo.

Nosotros: científicos reconocemos nuestra responsabilidad ineludible de llevar a nuestros conciudadanos la comprensión de los hechos simples de la energía atómica y sus consecuencias para la sociedad. En esto radica nuestra única seguridad y nuestra única esperanza [...] creemos que una ciudadanía informada actuará para la vida y no para la muerte.

Albert Einstein, 1947

Science sans conscience n'est que ruine de l'âme.

François Rabelais, *Pantagruel*, 1532

PRESENTACIÓN

En referencia a la catástrofe nuclear de Fukushima en Japón en el 2011, el periodista catalán Vicent Boix, en uno de sus artículos señala que “el cambio climático, la crisis en los precios de los alimentos, 1 000 millones de hambrientos, invasiones bélicas por petróleo, deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación atmosférica, desigualdad, ‘tarifazos’, ‘pensionazos’, reformas laborales regresivas, ‘euribors’”,¹ ex presidentes untados por transnacionales, crisis ecológica, económica, financiera, energética, agrícola, moral... y un largo etcétera han hecho de vivir en este siglo un deporte de alto riesgo” [1].

El hombre honesto de hoy debe tener una opinión personal sobre una evolución que le concierne en alto grado: ¿cuál es la herencia que va a dejar a sus hijos? El objeto de este escrito es hablar de las posibilidades y riesgos de la energía nuclear. Por diversas razones, el hombre siempre ha tenido miedo de los fenómenos insólitos; y el miedo, mal consejero, ha sido fácil de utilizar por los gobiernos a fin de manipular la opinión pública.

En los últimos 150 años se han construido trenes, autos, aviones, etc. Desde la Segunda Guerra Mundial, los brujos de los gobiernos han sacado de su caldero mágico, donde hormiguean los átomos, bombas atómicas y reactores nucleares a fin de fortalecer su poderío militar y mantener control sobre pobla-

¹ El Euribor (acrónimo de *European Interbank Offered Rate*, es decir, *tasa europea de oferta interbancaria*) es un índice de referencia publicado diariamente que indica el tipo de interés promedio al que las entidades financieras se prestan dinero en el mercado interbancario del euro. Se calcula usando los datos de los 42 principales bancos europeos, y su valor mensual es utilizado como referencia para los préstamos bancarios.

ciones y países; con su propaganda han pretendido que los ciudadanos acepten de manera pasiva su ley. Paul Valéry, quien estaba muy lejos de ser un izquierdista o un anarquista, supo resumir muy bien este programa: “La política es el arte de impedir a la gente ocuparse de lo que les concierne”. Esto es, se trata de mantener a los ciudadanos en la ignorancia de los principales problemas de su tiempo. Se trata de informar sobre los problemas de los vecinos y de minimizar los propios –cuando no se puedan callar–; a la población se le debe informar que tiene el mejor gobierno posible.

En lo que concierne a la energía nuclear, la opinión pública está condicionada por “expertos” escrupulosamente escogidos por los gobiernos. Se informa al público que la estructura atómica de la materia es un asunto sumamente complicado y que es mejor, por el bien de todos, dejarlo sólo en manos de expertos.

Toda la materia, todos los cuerpos físicos que conocemos, desde un grano de arena, un insecto o una galaxia, están conformados por múltiples partículas. Las partículas se reagrupan en átomos y éstos en moléculas, esto es física. La química estudia la asociación entre las moléculas; actualmente se conoce una enorme cantidad de moléculas y cada día se conocen más. La biología estudia, entre otras cosas, a la célula viviente que reagrupa a millones de moléculas. Al margen de la problemática química que representa la célula, todavía no se ha podido entender por qué una célula vive. Hasta el día de hoy tampoco se ha podido fabricar químicamente a una célula.

En este libro, escrito por dos físicos, uno especialista en física biológica y el otro en epidemiología, y una médica, maestra en investigación clínica, todos docentes de la Universidad Autónoma Metropolitana ubicada en la Ciudad de México, hemos querido presentar al público de idioma castellano, de manera accesible, los problemas mayores que plantea la industria y energía nuclear en general, civil o militar, señalando algunos de los problemas relacionados con la salud. No se trata de un libro de texto sobre el uso medicinal o no de las radiaciones nucleares, de sus ventajas o desventajas, sino de problemas de contaminación, considerando esencialmente a la energía nuclear y sus efectos en la salud. Hemos revisado y estudiado centenas de artículos científicos, artículos de prensa, escritos de ONG, de organizaciones oficiales, tanto a favor como en contra de la energía nuclear, con el objetivo de presentar una síntesis del avance de la investigación sobre el tema hasta marzo del 2016, a treinta años de la catástrofe de Chernóbil y a cinco años de la de Fukushima.

En el 2007, Ralph Nader, abogado, escritor y activista en materia de consumo estadounidense, escribió: “Vuelven a la carga. Después de treinta años

sin un pedido en firme, las compañías de energía atómica están presionando para el regreso de su costosa tecnología radiactiva a expensas de todos nosotros, contribuyentes. El viejo argumento de los años setenta era que la electricidad producida a través de la energía nuclear reduciría nuestra dependencia del petróleo extranjero. Actualmente, con solo el tres por ciento de nuestra electricidad procedente de la combustión del petróleo, el lobby pro-nuclear se sube al carro del calentamiento global. El uranio, dicen, no desprende gases de efecto invernadero como el carbón o el petróleo.

Lo que los lobbies nucleares ignoran es la cantidad de carbón y petróleo que se necesita quemar para enriquecer el uranio, transportar los residuos radiactivos por autopistas y ferrocarril con vehículos protegidos y garantizar la seguridad, ya que serían un blanco prioritario para el sabotaje” [2].

También en el año 2007 se publicó en España un informe de Científicos por el Medio Ambiente (Cima)² escrito por tres médicos comprometidos por la salud laboral y la defensa del medio ambiente que retoma las mismas ideas [3].

La discusión y preocupación es internacional.

Recientemente, el Premio Nobel de Literatura 2015 fue dado a la periodista belarusa Svetlana Alexievitch por su obra. Dentro de ella, hay que destacar el libro *Voces de Chernóbil*, escrito en 1997, que describe de manera conmovedora y aterradora el drama humano, cotidiano que ha seguido la explosión de la central nuclear a través de los testimonios de los sobrevivientes [4]. A la fecha, muchos libros sobre energía nuclear han sido publicados; sin embargo, desafortunadamente, los aspectos relacionados con la salud todavía no han sido debidamente desarrollados. La literatura especializada menciona algunos de los peligros que conlleva la producción de energía nuclear; se discute sobre las causas de los accidentes nucleares, el problema energético, etcétera, pero se han abordado poco los problemas de salud debidos a la contaminación nuclear o a la irradiación. Con este libro pretendemos darle al lector una visión más profunda sobre la problemática de salud asociada al desarrollo de la industria y energía nuclear. Actualmente, por fortuna, ya se escuchan importantes voces que mencionan la necesidad de que el desarrollo tecnológico contemporáneo no se apoye ciegamente sobre la industria y energía nuclear.

Esperamos que la lectura del presente libro despierte y desarrolle, en los lectores, la inquietud por estar mejor informado sobre el significado, alcances y peligros que involucra la energía nuclear y, con ello, se encuentre en mejo-

² Científicos por el Medio Ambiente [en línea] <<http://www.cientificos.org.es/>>.

res posibilidades para participar y opinar en este debate contemporáneo que a todos nos incumbe.

Los autores

Referencias

1. Boix, V., Belianís, “El aviso de Fukushima” [en línea] <<http://www.rebellion.org/noticia.php?id=125937>>.
2. Nader, R., “La industria nuclear vuelve a la carga”, en *Sin Permiso* [en línea], <<http://www.sinpermiso.info/textos/la-industria-nuclear-vuelve-a-la-carga>>.
3. Cirera A., J. Benach y E. Rodríguez Farré, *¿Átomos de fiar? Impacto de la energía nuclear sobre la salud y el medio ambiente*. Madrid, Libros de la Catarata, 2007.
4. Alexievitch, S., *Voces de Chernóbil. Crónica del futuro*, [en línea]. España, Siglo XXI, 2006. <<http://www.fiuxy.com/ebooks-gratis/4198195-libro-voces-de-chernobyl.html>>.

Capítulo I

SOBREVIVIR... Y VIVIR

El título de este capítulo hace referencia al boletín *Survivre... et vivre* editado a principio de los años setenta por científicos cuyo objetivo fue “la lucha para la sobrevivencia de la especie humana y de la vida en general, amenazada por el desequilibrio ecológico; creado por la sociedad industrial contemporánea [...], por los conflictos militares y los peligros de los conflictos militares”; a partir de esta posición cuestionaron tanto la política nuclear francesa como la política nuclear internacional. Estos científicos fueron los iniciadores de un movimiento que más adelante dio origen a la creación del Grupo de Científicos para la Información sobre la Energía Nuclear (GSIEN por sus siglas en francés), el cual continúa en actividad [1].

Antecedentes

El 8 de noviembre de 1895, mientras estudiaba la corriente eléctrica en un tubo de Crookes, el físico alemán Wilhelm Konrad Röntgen (premio Nobel de física en 1901) hizo un descubrimiento extraordinario, un elemento desconocido hacía luminiscente a una pantalla de platino-cianuro de bario colocada a un metro de distancia. A partir de este hecho, Röntgen dedujo que su aparato emitía rayos invisibles, muy penetrantes, a los cuales decidió denominar, por su naturaleza misteriosa, “rayos X”. Adicionalmente, constató que estos rayos podían imprimir placas fotográficas y permitían visualizar los huesos del interior del cuerpo (fig. 1).



Figura 1. Radiografía de la mano de Bertha Röntgen.

Algunos meses más tarde, el físico francés Henri Becquerel, siguiendo los trabajos de Röntgen utilizando luz solar, depositó sales de uranio sobre placas fotográficas, pero como llovía en París, guardó las placas en una gaveta. Unos días después, cuando Becquerel sacó las placas, a pesar de haber estado guardadas en la oscuridad, observó que estaban impresas y con mayor intensidad que las que exponía habitualmente al sol. Becquerel comprendió que el mineral emitía rayos, pero de dónde provenía la energía necesaria para su emisión. Este problema, como lo menciona C. Vincent, fue abordado por Marie Curie en su trabajo de tesis [2].

En 1898, Marie Curie y su marido Pierre lograron aislar, a partir de un mineral de uranio (pechblenda), dos nuevos elementos mucho más radiactivos: el polonio y el radio. El 10 de diciembre 1903, Pierre Curie, Marie Curie y Henri Becquerel recibieron el premio Nobel de física precisamente por el descubrimiento de la radiactividad.

En esta época todavía no se estudiaban los efectos biológicos de la radiactividad. Los Curie lograron medir la actividad radiactiva. Para cuantificar esta actividad se utilizaron el roentgen (R) y el curie (Ci). El roentgen mide la cantidad de ionización en el aire causada por el decaimiento radiactivo de los núcleos atómicos, en tanto que el curie da cuenta del número de partículas emitidas por segundo, por el elemento radiactivo. En 1911, Marie Curie preparó una masa de 21.99 mg de cloruro de radio, de alta pureza, que depositó

en el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Este primer patrón de medida de la radiactividad indica que 1 Ci, definido como el número de partículas que 1 g de radio emite en un segundo, equivale a 37×10^9 partículas emitidas en un segundo, lo cual resulta ser un número demasiado grande. Ante esta circunstancia, en 1975, se decidió reemplazar al curie por el becquerel (Bq) el cual equivale a una partícula emitida por segundo.

En 1934, Irène y Frédéric Joliot-Curie investigaron sobre la radiactividad; en particular, bombardearon una hoja de aluminio con rayos α y estudiaron la emisión subsecuente. En 1935 ambos científicos recibieron el Premio Nobel de Química por las investigaciones realizadas. Años más tarde, los dos murieron a los 58 años. Irène Joliot-Curie murió por leucemia causada por la exposición a las radiaciones, tal como le sucedió a su madre Marie Curie en 1934; Frédéric Joliot-Curie murió a causa de una “enfermedad misteriosa”. Como antecedente a estas muertes, Röntgen ya había muerto en 1923, a causa de cáncer de hueso [3].

En 1938, los físicos alemanes Otto Hahn y Friedrich Wilhelm Strassmann descubrieron la fisión nuclear, a partir del bombardeo de núcleos de uranio con neutrones.

Núcleos, átomos y moléculas

Todos los cuerpos de la naturaleza están compuestos por átomos. El átomo, dicho de manera simplificada, posee un núcleo central que contiene nucleones, alrededor del cual dan vuelta los electrones, describiendo diferentes órbitas más o menos alejadas del núcleo. La velocidad de los electrones es tan grande que se habla de nubes de electrones alrededor del núcleo. Los electrones poseen una carga negativa.

Los nucleones son de dos tipos: protones y neutrones. Ellos también dan vuelta unos alrededor de otros, con altas velocidades. Los protones y neutrones poseen una masa parecida, equivalente a casi 2 000 veces la masa del electrón. Los protones poseen una carga igual y opuesta a la de los electrones y en el átomo se encuentran en igual número que los electrones. En el átomo los electrones son atraídos por los protones del núcleo, de tal manera que a distancias grandes el átomo es neutro. Los neutrones no poseen carga eléctrica.

Existen cientos de átomos que difieren esencialmente por el número de neutrones y protones que tienen en su núcleo. El átomo de hidrógeno es el más sencillo, posee sólo un protón en el núcleo y, por lo tanto, sólo un electrón peri-

férico. Después viene el deuterio, éste tiene un protón y un neutrón en el núcleo y, por lo tanto, sólo un electrón. El átomo de helio posee un núcleo de cuatro nucleones (dos protones y dos neutrones) y dos electrones periféricos. El átomo de aluminio posee veintisiete nucleones (trece protones y catorce neutrones) y trece electrones alrededor del núcleo. Para representar este hecho se utiliza la siguiente notación, en donde el superíndice indica el número total de nucleones y el subíndice el número de neutrones. De manera general, con la letra Z se designa al número de protones (en el caso del átomo de aluminio anterior, $Z = 13$) y con la letra N al número de neutrones (en el mismo caso, $N = 14$). En la figura 2 están representados los átomos conocidos. En el centro de la línea se encuentran los átomos con núcleo estable, indicando el número de protones y neutrones de cada uno de ellos. A su alrededor se encuentran otros átomos con núcleos inestables radiactivos. Los ocho últimos puntos representan átomos con núcleos radiactivos que se encuentran en la naturaleza, los cuales tienen una filiación radiactiva con el uranio. Adicional a los átomos que se encuentran en la naturaleza, artificialmente se ha logrado fabricar diferentes átomos con núcleos inestables (como el plutonio), llegando a valores de $Z = 105$ y $N = 160$.

Los átomos que poseen un número Z de protones diferente, tienen nombre diferente y corresponden a elementos químicos diferentes. Existen en la naturaleza 92 elementos químicos unos estables y otros no (por ejemplo: $Z = 1$ corresponde al hidrógeno, $Z = 2$ corresponde al helio, etcétera, hasta el uranio [$Z = 92$]).

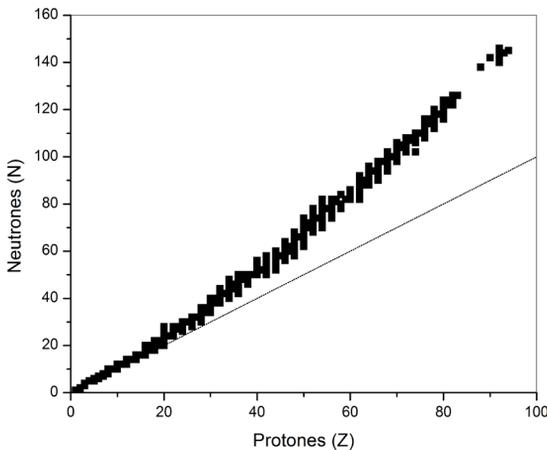


Figura 2. Número de nucleones para diversos átomos estables e inestables (naturales y artificiales). La línea punteada representa la igualdad entre el número de neutrones y de protones.

A los átomos cuyo núcleo posee el mismo número de protones, pero un número diferente de neutrones, se les denomina isótopos (por ejemplo: el carbono doce ^{12}C y el carbono catorce ^{14}C ; el primero tiene seis protones y seis neutrones, en tanto que el segundo tiene seis protones y 8 neutrones). Debido a que las propiedades químicas de un átomo dependen de los electrones, dos isótopos del mismo elemento tienen, por tanto, propiedades químicas idénticas; la única diferencia, es el número de neutrones. Adicional a los isótopos naturales también existen isótopos artificiales que han sido fabricados por el hombre. En principio, se puede construir un isótopo de cualquier elemento, agregando un número adecuado de neutrones. Para lograr lo anterior, por lo general, se necesitan partículas a altas energías, lo cual se logra mediante grandes aceleradores de partículas.

Cuando dos o más átomos de un mismo elemento o de elementos diferentes se asocian, se obtiene una molécula. Así, la molécula de agua está constituida por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno, H_2O . La cohesión de una molécula es más débil que la de un átomo. La estabilidad de la molécula, en primera aproximación, depende del movimiento permanente de los electrones alrededor de los núcleos. En la molécula de agua, por ejemplo, si el electrón de uno de los átomos de hidrógeno se mueve hacia el núcleo del oxígeno, este último se vuelve más negativo, mientras que el hidrógeno se vuelve más positivo y por lo tanto ambos átomos se atraen. Debido a la equivalencia química existente entre los isótopos de un elemento, químicamente no existe ninguna dificultad para que los isótopos radiactivos sustituyan a los isótopos estables que se encuentran en las moléculas y en las células del cuerpo humano. No se sabe por qué las moléculas se agrupan para formar células, pero se sabe que cada célula contiene de 10^9 a 10^{14} átomos, y que el cuerpo humano está formado de 10^{16} células. En principio, cualquiera de estos átomos puede ser sustituido por un isótopo.

Las células

El cuerpo humano está constituido por diferentes órganos, cada uno de los cuales está formado por uno o varios tipos de tejidos, los cuales a su vez están compuestos por células. La célula viviente es el componente básico de toda forma de vida, con estructuras y funciones complejas, constituida por gran cantidad de elementos químicos. En la tabla 1 se muestra la composición química promedio del cuerpo humano.

Desde el punto de vista de la radiación que nos concierne, es necesario tener en cuenta algunos aspectos fundamentales de la célula. La célula puede considerarse como una diminuta bolsa rodeada por una membrana constituida por lípidos y proteínas. En su interior está el citoplasma, en el cual se encuentran el núcleo y los diferentes organelos; el citoplasma y el núcleo están constituidos, aproximadamente, por 70% de agua, pero su estructura es compleja. El núcleo es una parte vital de la célula, rige la vida celular, así como su multiplicación, y es altamente activo desde el punto de vista químico.

Muchas células del cuerpo humano tienen una vida corta. La actividad celular perdura gracias a que en cierto momento de su vida, la célula se divide, presentándose el proceso de mitosis. La mitosis es más frecuente en el periodo del crecimiento del individuo que la muerte celular, lo cual permite que el cuerpo se desarrolle y crezca. En el adulto, la mitosis de las células sanas compensa a la muerte celular y el volumen de los órganos se mantiene más o menos constante.

En el momento de la división celular aparecen en el núcleo estructuras en forma de hileras, denominadas cromosomas. El número es diferente para cada especie; en el caso de las células humanas, aparecen 23 pares de cromosomas. En estos cromosomas se encuentran los genes que determinan los caracteres hereditarios del individuo. Cuando la célula se divide, cada nueva célula recibe una copia exacta de los cromosomas y por lo tanto de la información genética contenida en la célula original. En un proceso normal, por lo general, ningún cambio, ningún error de copia tiene lugar. Una mutación es una alteración de los genes o de los cromosomas. Cuando la célula posee un cromosoma que involucra una mutación, ésta es transmitida a su copia.

Tabla 1. Composición química promedio del organismo humano adulto

Elemento	Masa (%)	Masa promedio para un hombre adulto (g)
Oxígeno	65	45 500
Carbono	18	12 600
Hidrógeno	10	700
Nitrógeno	3	2 100
Calcio	1.5	1 050
Fósforo	1	700
Azufre	0.25	175
Potasio	0.2	140
Sodio	0.15	105
Cloro	0.15	105
Magnesio	0.05	35
Hierro	0.006	4
Manganeso	0.00003	0.02
Cobre	0.0002	0.1
Yodo	0.00004	0.03

El desarrollo de los órganos y de todo el cuerpo humano se efectúa a partir de una célula formada por la unión de dos células germinales (gametos), una que proviene del hombre (espermatozoide) y otra de la mujer (óvulo). Esta nueva célula formada rápidamente presenta muchas divisiones y al principio todas ellas se parecen. Posteriormente, las células producidas se diferencian, llevando a cabo diversas funciones especializadas en el cuerpo humano. La mayoría de ellas realizará alguna función somática, otras, una función genética reproductora. Cualquier alteración en las células reproductoras puede ser transmitida a los descendientes, mientras que las alteraciones de las células somáticas no se transmiten a la descendencia. Las células pueden ser alteradas y/o dañadas de diferentes maneras, ya sea por medios químicos o físicos, especialmente por la radiación, que puede afectar directamente a los cromosomas.

Las radiaciones

En física se denomina radiación tanto a una onda electromagnética como a un flujo de partículas; la onda electromagnética puede ser luminosa o puede no serlo; el flujo de partículas puede ser de electrones, de núcleos de helio, etc. De la mecánica cuántica sabemos que la radiación presenta un comportamiento, algunas veces, de tipo onda y algunas otras de tipo partícula; dicha característica se denomina dualidad onda-partícula. Al hablar de radiación y de sus efectos en la salud humana es importante considerar su origen.

En cualquier cuerpo o sustancia las partículas que lo componen están en movimiento. Este movimiento o agitación aumenta con la temperatura en que se encuentre dicho cuerpo, es decir, con su energía interna; mientras más elevada sea la temperatura, más energía interna posee dicho cuerpo y más agitadas se encuentran las partículas. Bajo estas circunstancias, un cuerpo puede emitir energía en forma de radiación; por lo general, a temperaturas suficientemente bajas los cuerpos no radian.

A nivel del átomo el intercambio de energía con el exterior se hace sobre todo mediante emisión de rayos X. Cuando un átomo absorbe una radiación X, uno o varios de sus electrones periféricos pasan a órbitas más alejadas del núcleo; con ello, el átomo pierde cohesión. Cuando los electrones regresan hacia sus órbitas originales el átomo emite por radiación la energía que había absorbido y gana cohesión. Esta radiación puede ser visible, como es el caso de la fluorescencia o el de una flama, o invisible.

Desde la más baja temperatura que se conoce, -273°C , hasta las decenas de millones de grados centígrados en el interior del Sol, la energía térmica disocia progresivamente todas las estructuras. A baja temperatura, las moléculas están animadas de movimientos de vibración y de rotación de pequeña amplitud y se quedan ligadas las unas a las otras, constituyendo el estado sólido (ejemplo, el hielo). Cuando la temperatura se incrementa, la agitación de las moléculas también aumenta y la energía de agitación se vuelve mayor que la energía de enlace; en estas circunstancias, las moléculas se mueven unas con respecto a otras, constituyendo el estado líquido (ejemplo, el agua). Si la temperatura se eleva todavía más, la agitación de las moléculas es tal que se vuelven totalmente independientes en su movimiento e incluso pueden chocar entre sí (ejemplo, el vapor de agua). La energía térmica del vapor de agua puede sentirse a distancia; este calor se debe a que la energía de enlace entre moléculas se escapa en forma de radiación infrarroja. Estas temperaturas de licuefacción y vaporización son diferentes de un cuerpo a otro y dependen justamente de

la estructura molecular del cuerpo. Si la temperatura aumenta al orden de miles de grados, la agitación de los átomos es tal que la molécula misma se rompe. En las moléculas de agua, por ejemplo, a temperatura alta los átomos de hidrógeno se separan de los de oxígeno. En esta situación, el calor radiado es mucho mayor, presentándose emisión de radiación infrarroja y de rayos X. En el orden de millones de grados, los propios átomos se ionizan, perdiendo todo o parte de sus electrones.

En física, un plasma es una mezcla de electrones libres y de átomos más o menos ionizados (por ejemplo, los bordes del Sol). El plasma emite rayos X de muy alta energía y electrones que se denominan rayos β menos (β^-). Si la temperatura es suficiente, del orden de decenas de millones de grados, como es el caso del Sol, la agitación de los nucleones dentro del núcleo es tal, que pueden ser eyectados del núcleo; bajo esta circunstancia puede llegarse a la desintegración del núcleo. En este caso, la radiación electromagnética emitida tiene una energía considerablemente mayor, la cual se denomina radiación gamma (γ). En los fragmentos del núcleo desintegrado, además de neutrones y protones, frecuentemente se encuentran núcleos de helio, denominados radiación alfa (α).

Dado que el Sol y las estrellas son fuentes calientes, permanentemente recibimos radiación proveniente de ellos; esta radiación, compuesta de rayos y partículas (gamma, electrones, protones, etc.) de gran energía, se denomina radiación cósmica. La radiación cósmica, antes de llegar a la Tierra, es atenuada en la atmósfera; no obstante, una parte de ella tiene tal energía, que le permite atravesar el globo terrestre. Así, cada centímetro cúbico de nuestro cuerpo, en promedio, es atravesado permanentemente por una decena de partículas por minuto.

La energía permite realizar trabajo y, por su parte, el trabajo necesariamente involucra el consumo de energía. La energía, trabajo y calor se miden en las mismas unidades: joule. El trabajo que realiza una persona al subir un peldaño es del orden de 100 joules. La explosión de una tonelada de TNT libera una energía del orden de 10^9 joules; la energía liberada por la bomba atómica de Hiroshima fue 13 000 veces más grande. En la escala microscópica de los átomos, el joule resulta ser una unidad demasiado grande para medir energía; en su lugar, se utiliza el electrón-voltio (eV), que resulta ser una unidad más adecuada para estas dimensiones. Así, 10^{12} MeV son equivalentes a 160 milésimas de joule.

Se sabe que la energía de la radiación emitida aumenta conforme se incrementa la temperatura del cuerpo que radia; también se sabe que la longitud de

onda de esta radiación emitida se hace más pequeña conforme la energía aumenta. Si consideramos la equivalencia entre masa y energía, podemos trabajar con relaciones de proporcionalidad entre estas diferentes cantidades. Así, a una energía de 1 eV le corresponde una temperatura de 10 000 °C. Para conocer la energía E (eV) de una radiación con longitud de onda λ_0 (cm) conocida, basta hacer uso de la siguiente fórmula $E = 0.0001/\lambda_0$. La energía almacenada en 1 g de materia equivale a 5×10^{26} MeV.

La energía de enlace entre moléculas es del orden de 0.1 eV; por ello, a una temperatura aproximada de 1 000 °C, estos enlaces pueden romperse y encontrarse como partículas libres; la longitud de onda de las radiaciones emitidas por estas moléculas excitadas es del orden de 0.001 cm. La energía de los electrones en los átomos es del orden de keV y, a una temperatura aproximada de 10^7 °C, se encuentran libres, con longitudes de onda del orden de 10^{-7} cm.

La radiactividad

Uno de los problemas actuales, que aún no está totalmente resuelto, es por qué algunos núcleos que no están sometidos a temperaturas elevadas pueden ser inestables, a tal grado que pueden desintegrarse. Este problema nos lleva al tema de las fuerzas nucleares.

En un átomo la unión de un número arbitrario de neutrones y protones en el núcleo no necesariamente produce un núcleo estable. Para fabricar el carbono ^{12}C , por ejemplo, es necesario juntar 6 protones y 6 neutrones. Para obtener el ^{13}C se necesitan 6 protones y 7 neutrones, que es un isótopo estable del carbono. Sin embargo, con 6 protones y 5 neutrones se obtiene el ^{11}C , que es otro isótopo del carbono, pero es inestable; el isótopo ^{11}C espontáneamente se transforma en ^{11}B por emisión de un rayo β^+ (emisión de un positrón o anti-electrón). Con 6 protones y 8 neutrones se obtiene otro isótopo inestable del carbono, el ^{14}C ; este isótopo se transforma en nitrógeno ^{14}N por emisión β^- (emisión de un electrón). Los núcleos radiactivos son núcleos que poseen “demasiados” protones con respecto a su número de neutrones o viceversa. El núcleo es estable sólo para un cierto número de nucleones. En caso contrario, el núcleo se transforma emitiendo partículas extras, produciéndose así lo que se denomina radiactividad. La unidad de medida de la radiactividad es el curie (Ci); 1 Ci de radiactividad corresponde, como ya se mencionó, a 37×10^9 partículas emitidas en un segundo. En el caso del radio, estas partículas expulsadas son núcleos de helio-4 y un curie, para el radio-226, representa 1 g de mate-

ria que se transforma expulsando los núcleos de helio-4. En el caso del estroncio-90, 1 Ci representa 7 g de materia que se transforma emitiendo electrones.

En general, la desintegración no es instantánea, se lleva a cabo durante un periodo, el cual puede ser grande. La ley de desintegración de cualquier material radiactivo sigue una forma exponencial, dada por

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

donde N representa el número de núcleos radiactivos presentes en el momento t , N_0 el número inicial de núcleos radiactivos y λ la constante de desintegración exponencial de dicho material.

Cada tipo de núcleo radiactivo tiene una semivida³ ($T_{1/2}$) característica, definida como el tiempo necesario que debe transcurrir para que una cantidad dada del material radiactivo se reduzca a la mitad de la cantidad original; este valor corresponde a $\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Se define también el concepto de vida promedio (τ) el cual se obtiene por

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} t dN = \frac{\lambda}{N_0} \int_0^{\infty} tN dt = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$

Este valor corresponde precisamente al inverso de la constante de desintegración exponencial de dicho elemento.

Así, a manera de ejemplo, la vida promedio del ^{11}C es de $\tau = 29$ minutos, aproximadamente; esto significa que debido a la desintegración, este material radiactivo tardará alrededor de 20 minutos en reducirse a la mitad y después de 29 minutos, sólo quedará aproximadamente 37% de una cantidad inicial dada de los núcleos radiactivos; en este tiempo, 63% de ellos se habrá transformado en ^{11}B .

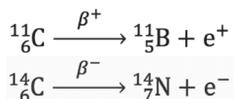
El carbono ^{14}C , que continuamente se forma a partir del nitrógeno ^{14}N atmosférico por los rayos cósmicos, tiene una semivida de 5 730 años, lo que significa que tarda mucho tiempo en desintegrarse. La radiación cósmica regularmente regenera al carbono 14, el cual se encuentra en concentración constante en el suelo. Antes de 1954 ya se conocía cuánto carbono absorbían los seres vivos; por ello, para conocer la edad de cuerpos encontrados en investigaciones arqueológicas bastaba con medir la cantidad de ^{14}C presente en el

³ Se llama también, periodo de semidesintegración, vida media, vida mitad o hemivida.

cuerpo correspondiente. Desde 1954, debido a las explosiones termonucleares con fines militares, la cantidad de ^{14}C en la atmósfera aumentó y la estimación de las edades se ha vuelto más difícil.

El radio ^{226}Ra tiene una semivida de 1 600 años, el uranio ^{238}U de 4.47×10^9 años, el plutonio ^{239}Pu de 24 100 años.

Las transformaciones espontáneas de ^{11}C en ^{11}B o de ^{14}C en ^{14}N se denominan reacciones nucleares:



Estas transformaciones también pueden lograrse por medios artificiales. Por ejemplo, si se bombardean átomos de ^{12}C con núcleos de ^4He , se pueden obtener núcleos de oxígeno, ^{16}O . También se pueden fabricar núcleos de oro, pero el proceso no es nada rentable.

Una reacción nuclear importante que también puede presentarse es la fisión nuclear. Hemos dicho que cuando una radiación incide sobre un núcleo, éste aumenta su energía. Algo análogo sucede si al átomo se le envía un neutrón. Por ejemplo, cuando un núcleo de uranio ^{235}U (vida media de 7.04×10^8 años), absorbe un neutrón, se transforma en ^{236}U y la agitación de los nucleones es tal que el núcleo se rompe (fig. 3). En este proceso el núcleo generalmente se divide en dos fragmentos grandes y se emiten dos o tres neutrones. Este proceso se ve acompañado por liberación de energía en forma de calor, rayos luminosos, rayos γ , rayos X, etc., que en el caso del ^{236}U es del orden de 200 MeV.

Los dos o tres neutrones emitidos pueden a su vez encontrar otros núcleos de ^{235}U que van, a su vez, a ser fisionados y así puede provocarse una reacción en cadena. En los reactores nucleares estas reacciones son controladas; sin embargo, en las bombas atómicas especialmente, estas reacciones no son controladas.

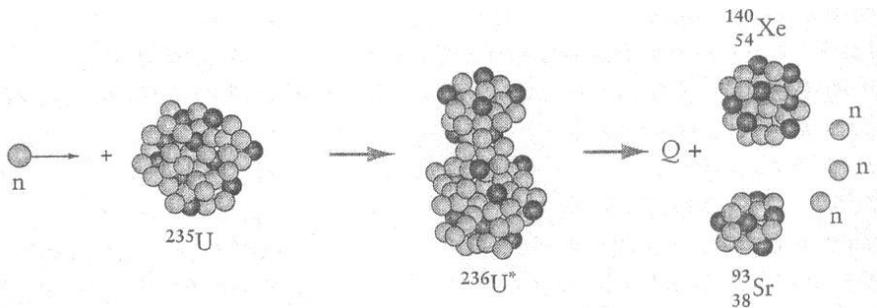


Figura 3. Esquema de la reacción básica de la energía nuclear: un material fisil como el uranio-235, absorbe un neutrón que lo desestabiliza. Su fisión libera la energía Q y produce algunos neutrones que, a su vez, pueden ser absorbidos por átomos de uranio-235.

En el reactor el control de la reacción se efectúa introduciendo otros elementos (boro, grafito, cadmio, etc.) que logran absorber a los neutrones liberados, evitando así producir fisión nuclear adicional. A la fecha, en los fragmentos resultantes de los procesos de fisión nuclear se han encontrado 288 núcleos diferentes, unos más abundantes que otros, algunos estables (255) y otros radiactivos (33).

Las centrales nucleares

Teóricamente, una central nuclear funciona de la misma manera que una central de carbón, sólo que ahora, en este caso, el combustible utilizado no es carbón sino algún material fisil. En general, las centrales nucleares utilizan dióxido de uranio UO_2 , ya sea con uranio natural (99.3% de ^{238}U y 0.7% de ^{235}U) o enriquecido (2 a 3%) en ^{235}U .

Los reactores nucleares se clasifican, de acuerdo a la velocidad de los neutrones que producen las reacciones de fisión, en reactores rápidos y reactores térmicos [4]. A su vez, de acuerdo con el tipo de moderador utilizado, los reactores térmicos se clasifican en reactores de agua ligera, reactores de agua pesada y reactores de grafito. Cada uno de estos tipos de reactor generalmente utiliza combustible y refrigerante diferentes. Los reactores más empleados en las centrales nucleoelectricas son:

a. *Reactor de agua a presión (PWR)*

Este reactor utiliza óxido de uranio enriquecido como combustible; como moderador y como refrigerante utiliza agua ligera. El refrigerante circula alrededor del núcleo del reactor, a una presión tal que el agua no alcanza la ebullición, y extrae el calor del reactor; éste es llevado a un intercambiador de calor, donde se genera el vapor que alimenta a la turbina (fig. 4).

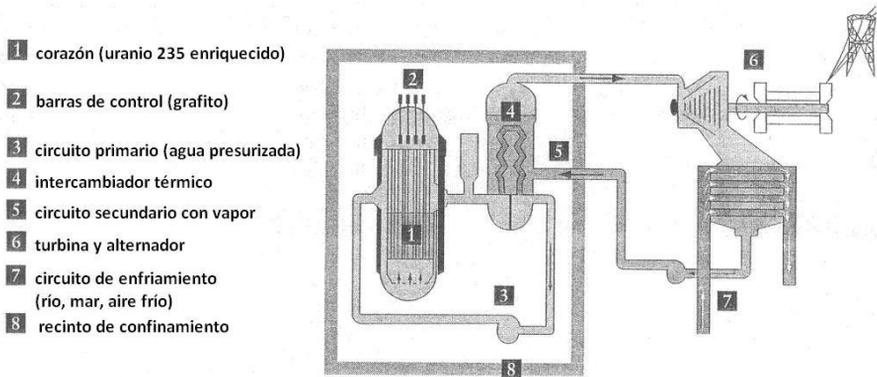


Figura 4. Diagrama del funcionamiento de una central nuclear clásica a agua presurizada (WPR).

b. *Reactor de agua en ebullición (BWR)*

Este reactor emplea elementos similares al anterior, pero ahora el refrigerante trabaja a menor presión y alcanza la temperatura de ebullición al pasar por el núcleo del reactor; parte del líquido se transforma en vapor, el cual es reducido en su contenido de humedad y se conduce hacia una turbina sin necesidad de emplear el generador de vapor.

c. *Reactor de agua pesada (PHWR)*

Este reactor utiliza como combustible al uranio natural o uranio ligeramente enriquecido; como moderador emplea agua pesada; como refrigerante, unos emplean agua pesada a presión y otros utilizan agua pesada en ebullición.

d. Reactor de grafito-gas.

Los primeros reactores de este tipo emplearon como combustible al uranio natural en forma metálica; los actuales reactores de grafito-gas, denominados avanzados de gas (AGR) utilizan como combustible óxido de uranio enriquecido; en estos reactores se utiliza grafito como moderador y CO_2 como refrigerante. Los reactores denominados de alta temperatura (HTGR) usan helio como refrigerante.

e. Reactor de agua en ebullición (RBMK), moderado por grafito

Este tipo de reactor fue desarrollado en la antigua Unión Soviética; éste es un reactor que utiliza como combustible uranio enriquecido; es moderado por grafito y refrigerado por agua en ebullición. Estos reactores no se han empleado en Europa occidental.

La tecnología de los reactores, aparentemente sencilla, es realmente complicada. En un reactor, la temperatura en el corazón (fig. 4) puede llegar a $2\,300\text{ }^\circ\text{C}$ o más; existen pocos metales, disponibles en gran cantidad, que puedan soportar tal temperatura sin llegar a fundirse. El óxido de uranio se encuentra en cilindros herméticos y se funde a $2\,750\text{ }^\circ\text{C}$, liberando en forma de gas los productos de la fisión; este gas ejerce presión en los cilindros, causando su deformación y, eventualmente, su ruptura.

f. Los reactores rápidos

En los reactores rápidos no existe el elemento moderador para los neutrones y, por tanto, el flujo de neutrones cae en la zona de los neutrones rápidos. En estos reactores el combustible de la zona central, formado por un óxido de uranio o de uranio y plutonio, se rodea de una zona de óxido de uranio empobrecido, con un contenido de ^{235}U menor o igual al del uranio natural. Con esta disposición, y usando un refrigerante que no produzca la moderación de neutrones (normalmente se emplea sodio líquido), se puede conseguir que en la capa de ^{238}U que rodea al combustible se genere más plutonio que el que se consume. De esta forma, al mismo tiempo que se está generando energía térmica, se está produciendo combustible en forma de plutonio ^{239}Pu , que puede usarse en cualquier tipo de reactor, tanto rápido como térmico.

A este tipo de reactor también se le conoce como reactor reproductor, su importancia es enorme, pues permite un mejor aprovechamiento de los re-

cursos existentes de uranio. El plutonio así producido, de muy buena calidad, puede ser utilizado para la fabricación de bombas. Actualmente, los países que tenían centrales nucleoelectricas con este tipo de reactor, o que planeaban su construcción, han abandonado sus programas. En primer lugar se encuentra Francia, con la mayor central existente, el Superphenix de 1 200 MW funcionando en Creys-Malville, cuyo costo ascendió a 9.7×10^9 de euros y fue cerrada en 1997 después de 12 años de averías diversas (funcionó en realidad treinta meses entre 1985 y 1997)[3]. Le siguen la antigua Unión Soviética con proyectos de varias centrales nucleares basadas en reactores de 600 MW y Japón con una central de 300 MW. A la fecha todas han cerrado convirtiendo esta tecnología en un desastre tecnológico y financiero.

Las dificultades tecnológicas que plantea el reactor reproductor son mucho más grandes que las encontradas en los tipos anteriores. La resistencia mecánica de los cilindros herméticos que contienen el combustible nuclear está sometida a una temperatura muy alta y a un flujo de neutrones mucho más intenso. En cuanto al refrigerante, el sodio fundido es inflamable espontáneamente al contacto con el aire, por lo que exige estar mantenido en un circuito hermético.

Actualmente el reactor reproductor ya no existe, ¿qué hacer entonces con el plutonio que se obtiene por el retratamiento de los combustibles usados? Para resolver este problema se decidió fabricar un nuevo combustible, el MOX, que mezcla 93 % de uranio empobrecido y 7 % de plutonio. Este nuevo combustible se fabrica en particular en el sur de Francia, en una fábrica que tiene permitido desechar residuos gaseosos hasta por una cantidad de dos billones de bequerels al año (incluyendo 74 millones de bequerels de emisores alfa) y 3.3 billones de bequerels por año de residuos líquidos (incluyendo 120 millones de bequerels de emisores alfa). A partir de 1985, algunos reactores fueron adaptados para funcionar parcialmente con este combustible. En particular, desde febrero de 2011, el tercer reactor de la central de Fukushima Daiichi utilizaba este tipo de combustible, el cual es más radiactivo que los combustibles anteriores [3].

La sociedad Areva⁴ (sociedad pública francesa) en coordinación con la empresa pública francesa de producción eléctrica (EDF⁵ por sus siglas en francés) y la alemana Siemens, recientemente inventaron un nuevo tipo de central nuclear que funciona a base de agua presurizada; originalmente se le denominó central

⁴ La empresa Areva está financiada por más de 87% de capitales públicos franceses.

⁵ Electricité de France.

EPR (European Pressurized Water Reactor) pero después del retiro de Siemens en el 2011, se le denominó Evolutionary Power Reactor. Las empresas involucradas en este proyecto han promovido la venta de esta tecnología, pero por el momento no han tenido mucho éxito. Actualmente están en construcción dos centrales de este tipo, una en Finlandia (Olkiluoto) y otra en Francia (Flamanville). La construcción de la central finlandesa inició en 2005; a la fecha el proyecto cuenta con un retraso de más de 4 años y un sobrecosto de 3×10^9 euros. La segunda, iniciada a finales del 2007, tiene ya más de un año de retraso y un sobrecosto de 10^9 euros; su apertura inicialmente prevista para 2014 fue nuevamente postergada, con un sobrecosto “final” estimado de 1.7×10^9 euros [5]. Con base en estos datos, parece que estos proyectos son un completo desastre industrial y financiero. Lo que está confirmado por las pérdidas de 4.9×10^9 euros para el año 2014 de Areva [6].

Aumento de la radiactividad en el ambiente

En los años 50-70 del siglo pasado se llevaron a cabo una serie de explosiones de bombas nucleares que provocaron el aumento de la radiactividad actualmente presente en el ambiente. A la fecha, estas explosiones ya no se llevan a cabo.

En el caso de los reactores nucleares no es fácil evaluar la radiactividad producida. Teóricamente, si se conoce el tipo de combustible utilizado y la energía total liberada, se puede calcular el número de núcleos que han fisionado; así, conociendo la distribución promedio de los núcleos residuales de la fisión, se puede calcular la radiactividad total producida.

En la práctica, cuando se quiere evaluar la radiactividad producida por una planta nuclear, aparecen aspectos adicionales que tienen que ser considerados. La reacción en cadena, efectivamente, se detiene cuando los neutrones emitidos no encuentran más núcleos de uranio; pero esta enorme cantidad de neutrones emitidos no desaparece. Estos neutrones emitidos encuentran otros núcleos que pueden ser a su vez transformados en núcleos radiactivos. Por ejemplo, como primer problema, y no el único, se tiene que todo lo que se encuentra alrededor del corazón del reactor se vuelve radiactivo; manipular este material se vuelve un problema delicado incluso para el propio personal de la planta nuclear.

Thomas H. Pigford, quien fue el primer jefe del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad de California en Berkeley, miembro de comisio-

nes federales y fallecido en 2010, preocupado por proteger de las radiaciones a la población en general, publicó hace aproximadamente treinta años un artículo sobre la radiactividad de los reactores nucleares [7]. En su estudio, Pigford consideró un reactor de 1 000 MW año; es decir, un generador de 3 120 MW, pues su eficacia es de 32%. El núcleo del reactor considerado contenía entre 20 000 y 40 000 cilindros metálicos de 1.3 cm de diámetro y 3.5 m de largo, llenos de óxido de uranio UO_2 , equivalente a cien toneladas de UO_2 , mismas que debían renovarse por tercio cada año. Pigford planteó que si la cantidad total de yodo y de estroncio estaba dentro del reactor, la liberación en el entorno, ya fuera en funcionamiento normal o por accidente, podría causar entonces una contaminación del aire y del agua de magnitud considerable. A partir de ello, Pigford señaló que la protección del público en general debía ser asumida como una alta prioridad.

Emissiones radiactivas por centrales nucleares en funcionamiento normal

La mayor parte de los fragmentos pesados, residuos de la fisión, se quedan en el interior de los contenedores metálicos; si el óxido de uranio alcanza su punto de fusión (2 750 °C), los residuos gaseosos de tritio, kriptón, xenón y yodo se difunden fuera de los pedazos de uranio, produciendo así una alta presión en el interior de los estuches que contienen al uranio; esta presión puede provocar la deformación e incluso la ruptura de dichos contenedores.

La ruptura de estos contenedores es bastante frecuente y generalmente no afecta el funcionamiento del reactor. Cuando esto sucede, un gran número de neutrones escapa de los estuches, produciéndose reacciones tanto en el agua del reactor como en los materiales del entorno. En estas circunstancias, simplemente se procede a remplazar el estuche defectuoso y se cambia el agua del reactor, tirando el agua contaminada en la naturaleza. Es importante tener presente que estos contenedores son el principal medio de protección contra el uranio y los residuos radiactivos.

Un reactor que tenga un funcionamiento normal produce residuos radiactivos sólidos, líquidos y gaseosos. En las plantas nucleares, en particular, los productos gaseosos se conservan alrededor de un mes a fin de que disminuya su radiactividad; posteriormente estos gases son liberados, por la chimenea, a la atmósfera. Los gases residuales contienen kriptón 85, el cual tiene una vida media de 10.8 años, aproximadamente.

Para los residuos líquidos, esencialmente agua tritiada (HTO: $^1\text{H}-^{16}\text{O}-^3\text{H}$, donde ^3H , es el tritio radiactivo con una vida media de 12.3 años, aproxima-

damente), se llevan a cabo maniobras para lograr su recuperación, lo cual resulta ser una operación bastante difícil. Por lo general, se utiliza una fuente de agua de enfriamiento en abundancia (4×10^6 m³ por día), para que la concentración de productos radiactivos en esta agua no alcance el “límite tolerado”;⁶ estos productos incluyen al cesio-137, yodo-131 y molibdeno-99 (4 curies por año) y tritio ³H (6 000 curies por año).

La mayor parte del total de residuos de la fisión nuclear es en forma de sólido. En el reactor considerado aquí (uranio, sustituido por tercio cada año), la actividad promedio anual en el seno del reactor es de 10×10^9 curies. Cada año, al momento de renovar el combustible UO₂, se extraen del reactor aproximadamente treinta toneladas de residuos, cuya actividad es 4×10^9 curies, y se depositan en agua cerca del sitio. El agua enfría a esta enorme masa todavía muy activa, que libera mucho calor, y que es peligrosa. Frecuentemente esta agua de enfriamiento, fuertemente contaminada, es vertida en la naturaleza. Estos residuos, después de tres meses, son trasladados a la fábrica de tratamiento del combustible irradiado a fin de reducir su actividad, recuperando el máximo de uranio ²³⁵U y de plutonio ²³⁹Pu, mismos que posteriormente pueden ser reutilizados en reactores o bombas, y así sólo desechar los productos que no son recuperables. La fábrica de tratamiento de estos residuos, a su vez, libera residuos gaseosos como yodo-129, kriptón-85 y tritio. Una parte del tritio se vierte en forma de agua tritiada en el agua cercana. El resto de los productos de fisión, lodos y líquidos, es concentrado al máximo, depositado en reservorios supuestamente herméticos y tirados al mar o enterrados. En el caso del reactor de 1 000 MW año ya mencionado anteriormente, el conjunto de estos residuos representa 65×10^6 curies al año en el momento del almacenamiento. En principio, estos productos deberían estar almacenados por lo menos entre 600 y 1 000 años durante los cuales son peligrosos. Actualmente, estos residuos ya no son tirados al mar sino enterrados en diferentes lugares, en minas de sal por ejemplo, en donde se supone quedarán protegidos durante todo ese tiempo. ¿Cómo pensar que estarán protegidos de modificaciones geológicas durante todo este tiempo?

⁶ Hablaremos más adelante sobre esta noción de límite tolerado, fijado por las autoridades que son a la vez juez y parte: ellas contaminan y ellas mismas fijan los límites de la contaminación.

Emisiones accidentales

El accidente más peligroso en una central nuclear consiste en una fuga en el circuito de líquido alrededor del núcleo del reactor. Si este líquido de enfriamiento falta, en 15 segundos los estuches se funden y en menos de un minuto el óxido de uranio se funde. En general, esta parte del reactor está aislada en un edificio de concreto y acero, pero no es imposible que las cien toneladas de óxido de uranio puedan llegar a su punto de fusión y produzcan, con el agua de enfriamiento del condensador, reacciones explosivas que excedan la resistencia del edificio. El producto más peligroso emitido en tal circunstancia es el yodo radiactivo gaseoso.

En caso de condiciones meteorológicas desfavorables para su dispersión (inversión de temperatura y viento débil), se prevé que a 1 km de distancia del reactor, un hombre respirando durante dos horas después del accidente, recibiría en su tiroides una dosis de 10 Gy [7]. Incluso a 5 km de distancia, en caso de no evacuación, las dosis de yodo recibidas por los pobladores sería altamente peligrosa, afectando mayormente a los niños, pues su efecto se incrementa por un factor de seis. En caso de accidente, el sistema de seguridad previsto para los reactores BWR (agua en ebullición) consiste en regar el reactor con agua preparada con un producto químico que permite captar el yodo.

En la tabla 2 se encuentra una lista de los principales productos de fisión liberados en el ambiente, bajo condiciones normales de funcionamiento, por el reactor de 1 000 MW considerado en esta discusión.

Tabla 2. Principales productos de fisión liberados en el ambiente por el reactor de 1 000 MW en funcionamiento normal

Isótopo	Vida promedio	%	Actividad anual	Estado
Tritio ^3H	17.7 años	0,008	26 500 Ci	Gaseoso y líquido
Kriptón-85	15.5 años	0,343	2.7×10^6 Ci	Gaseoso
Yodo-131	11.6 días	2.93	4.7×10^6 Ci	Muy volátil
Xenón-133	7.6 días	6.61		Gaseoso
Xenón-135	13.2 horas	6.15		Sólido
Cesio-137	43 años			

Los productos liberados en el ambiente constituyen sólo una pequeña parte de los productos radiactivos producidos por el reactor. En la tabla 3 se encuentran los productos de fisión que tienen una vida promedio mayor al año, indicando su porcentaje en masa en los núcleos que han fisionado.

Tabla 3. Vida promedio de los productos de fisión

Isótopo	Vida promedio (años)	Isótopo	Vida promedio (años)
Selenio-79	10 ⁵	Yodo-129	25×10 ⁶
Rubidio-87	68×10 ⁹	Cesio-135	2.9×10 ⁶
Estroncio-90	40	Cesio-137	43
Zirconio-93	14×10 ⁶	Cesio-144	1.1
Tecnecio-99	3×10 ⁵	Neodimio-144	7×10 ⁵
Rutenio-106	1.4	Prometio-147	3.6
Paladio-107	10×10 ⁶	Samario-147	153×10 ⁹
Cadmio-113	20	Samario-149	6×10 ¹⁴
Antimonio-125	3.9	Samario-151	134
Estaño-126	1.4×10 ⁵	Europio-155	2.5

En la fisión nuclear con uranio, ya sea realizada en un reactor o como explosivo en una bomba, es necesario tener en cuenta que adicionalmente existen otros tantos residuos radiactivos de vida promedio más corta, como son el estroncio, tecnecio y estaño.

T. H. Pigford, además de crítico, fue un defensor de la energía nuclear; recordemos su mensaje de 1979, mencionado en un artículo del *New York Times* [8] con motivo de su fallecimiento en marzo del 2010: “Cualquier tecnología impone un grado finito de riesgo a la sociedad, sea en sus operaciones de rutina sea en caso de accidente. La cuestión esencial es la estimación entre riesgos y beneficios. La comisión [de energía atómica] no ha recibido ninguna evidencia ni ha llegado a ninguna conclusión en el sentido de que los riesgos de la energía nuclear sobrepasan sus beneficios”. Sin embargo, siete años más tarde, después de la explosión del reactor de Chernóbil, Pigford participó en el cierre definitivo del reactor militar de Hanford, de construcción similar al de Chernóbil, ubicado en una reserva india en el estado de Washington. Actualmente este lugar es el sitio nuclear más contaminado en Estados Unidos [9, 10].

Del buen uso de las estadísticas y del límite tolerado

Todos los accidentes que pueden ocurrir, como los mencionados anteriormente, tienen probabilidades muy bajas de suceder. Se estima que estas probabilidades son del orden de 10^{-3} a 10^{-6} por año. Así, aplicando este criterio, debido a que la probabilidad de que un avión de pasajeros (tipo Boeing 747 o Airbus) caiga sobre un reactor nuclear es también baja, sucede que ninguna central nuclear en el mundo está diseñada para resistir tal catástrofe; pero, obviamente, probabilidad baja no significa que nunca va a suceder. Los gobiernos y las autoridades nucleares con su corte de “expertos” han apostado sólo al porvenir de nuestros descendientes a la manera en que lo resumió Luis XV (1710-1774), rey de Francia: “Après moi, le déluge!”⁷

El 28 de mayo del 1959, algunos años después de la aparición y detección de cánceres en Occidente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) firmó un acuerdo (WHA 12-40) con la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), el cual le prohíbe publicar cualquier documento que tenga algo que ver con la problemática nuclear, sin que éste haya sido validado antes por la AIEA.⁸

Alison Katz, en un artículo publicado en *Le Monde Diplomatique* del 2008 [11] señaló que, según informe del Instituto Nacional de Cáncer estadounidense, de 1950 a 1995, el número anual de casos nuevos de cáncer en Estados Unidos de América aumentó en 55%. En Europa, como en todos los países industrializados, también se ha observado una tendencia parecida a lo sucedido en Estados Unidos. Los cánceres no ligados al tabaquismo han contribuido a este aumento con un 75% y no pueden ser explicados sólo por el hecho de existir una mejor detección o por el envejecimiento de las poblaciones [12]. Este crecimiento ha seguido la evolución del producto interno bruto y de la industrialización; sin embargo, la contaminación química y radiactiva del ambiente continúa siendo ignorada por los “expertos”.

Después del descubrimiento de los rayos X en 1895 y ante el conocimiento del efecto que estas radiaciones ionizantes tienen sobre la salud, la Comisión In-

⁷ Literalmente: “Después de mí, el diluvio!”

⁸ Este acuerdo fue denunciado en una emisión de la televisión suiza italiana en el 2001 por el Dr. Hiroshi Nakajima, antiguo Director General de la OMS. En el Artículo 1, § 3 (Res. WHA-12-40) de este acuerdo se establece: “Whenever either organization proposes to initiate a program or activity on a subject in which the other organization has or may have a substantial interest, the first party shall consult the other with a view to adjusting the matter by mutual agreement”. [En línea] <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf20.shtml#note_c>.

ternacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) regularmente publica diversas recomendaciones al respecto; sus dos objetivos principales: evitar una exposición aguda y limitar la exposición crónica a niveles “aceptables”.

En sus últimas recomendaciones sobre protección contra la radiación, para trabajadores relacionados con material radiactivo [13], la ICRP mantiene como límite máximo de exposición la cifra de 20 mSv por año, igual al valor establecido en 1991; en tanto que para el público en general establece un valor máximo de 1 mSv por año.⁹ Estas recomendaciones se basan en el principio de que incluso una dosis pequeña puede contribuir al desarrollo de procesos cancerosos. Cabe señalar que en 70 años el límite máximo de dosis recomendado para los trabajadores ha bajado en un 93%. La figura 5 muestra la tendencia decreciente en el valor máximo aceptable señalado por la ICRP durante el siglo pasado, lo cual queda explicado debido a las investigaciones que han mostrado el efecto que las bajas dosis de radiación también tienen sobre la salud.

Sin negar el hecho de que ha sido acertado que la ICRP haya bajado el valor de exposición máxima aceptable, el problema está lejos de haber sido resuelto. Diversas organizaciones consideran que las cifras de la ICRP subestiman el problema, pues se basan en un modelo matemático que se originó antes del descubrimiento del ADN y, por tanto, entre otras cosas, no considera la afinidad de algunos núcleos radiactivos con dicha molécula.

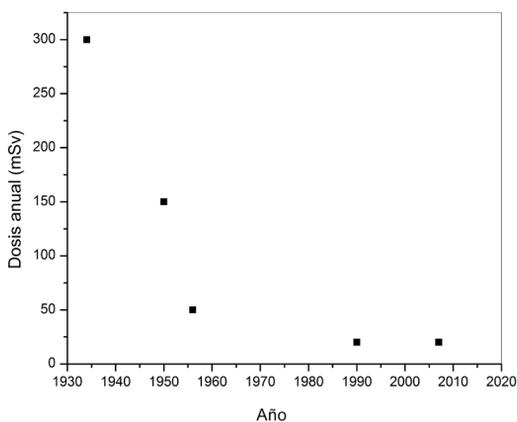


Figura 5. Puntos de corte en los valores de dosis por radiación planteados por la ICRP para los trabajadores de la industria nuclear, según el año de recomendación.

⁹ Ver capítulo II.

El Comité Europeo sobre Riesgo de la Irradiación (ECRR), organización internacional de científicos, no gubernamental, con base en un modelo más elaborado, utilizando datos de la catástrofe nuclear de Chernóbil, recomienda cifras de exposición máxima aceptables muy diferentes [14]. En el modelo considerado por el ECRR se toma en cuenta la emisión de electrones Auger por parte de los núcleos radiactivos (uranio en particular), los cuales dentro del cuerpo tienen afinidad por el ADN. Vale la pena considerar que esta organización está lejos de profesar la “conspiración mundial” como acertadamente lo señaló el doctor Alejandro Frank, director del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM en México, en relación con el accidente nuclear de Fukushima [15].

La Academia de Ciencias de Nueva York, en sus anales de 2010, publicó un trabajo sobre la catástrofe de Chernóbil [16]. En este trabajo se da un panorama completo y crítico de las publicaciones médicas y biológicas que han abordado el tema del accidente de Chernóbil; en él se analizan sus consecuencias en Ucrania, Rusia y Bielorrusia, tanto para los habitantes como para el ambiente. Según este informe, el número de vidas que se perdieron asciende a 985 000. Se considera que la magnitud de la lluvia radiactiva alcanzó el valor de 10×10^9 Ci; es decir, una magnitud que es 200 veces lo que inicialmente había sido considerado, equivalente a 100 veces la magnitud de la lluvia radiactiva provocada por las bombas de Hiroshima y Nagasaki. En la zona geográfica más irradiada, la tasa de algunos cánceres, como el de tiroides, por ejemplo, se ha incrementado en más de 40% (ver capítulo III).

Adicionalmente, este trabajo también menciona la presencia de lluvia radiactiva en Europa del Norte, América del Norte y África. En este último continente se ha detectado la presencia de lluvia radiactiva en sedimentos del Nilo.

También en relación con la catástrofe de Chernóbil, en el congreso coorganizado por la OMS en Kiev en el 2001, el doctor Gentner del UNSCEAR concluyó su presentación mencionando que en dicha catástrofe sólo hubo 30 muertes a causa de las radiaciones producidas y añadió: “Como lo dijo el doctor Gonzales (conferencista de la AIEA que le precedió), la mayoría de la población no tiene ninguna razón de tener miedo de perjuicios graves a la salud después del accidente de Chernóbil”.

Posteriormente, en septiembre de 2005, en un coloquio de la OMS realizado en Viena, esta organización aceptó una cifra posible de 4 000 muertes ligadas a la catástrofe. Después de protestas de varios grupos de defensa del ambiente y de organizaciones de médicos, la OMS modificó el número de muertes estimadas, aceptando una nueva cifra “oficial” de 16 000 muertes [11].

Hace cincuenta años los científicos que sostenían que incluso las bajas dosis de radiación tenían un efecto negativo en la salud eran una absoluta minoría. La situación ha cambiado. Actualmente, muchas organizaciones, sean pro o anti nucleares, ya no cuestionan el efecto que tienen las dosis bajas de radiación en la salud humana (ver capítulo II), sus divergencias, en todo caso, giran en torno al alcance de sus efectos en la salud y sobre cuál debe ser el valor de exposición límite tolerable.

Los argumentos de los pro-nucleares

El 5 de abril de 1979, cuatro días después del accidente de la central nuclear de Three Mile Island en Pensilvania, el físico francés Daniel Saint-James publicó un artículo en el diario francés *Le Monde*, sobre los argumentos de los pronucleares [17]. Frecuentemente los argumentos de los anti-nucleares son calificados como irracionales y ligados a un temor primitivo, enemigo del progreso mientras que los de los pro-nucleares pretenden presentarse como científicos; a manera de ejemplo, un botón de muestra: “En lo que se refiere a la energía atómica, hemos tomado tantas precauciones que la probabilidad de un accidente se volvió extremadamente débil”.

A este respecto, Saint-James comenta:

Esta frase aparentemente anodina revela, por lo que subentiende, una ignorancia cierta del método científico. En efecto, se concluye que las centrales atómicas son millones de veces más seguras que las centrales térmicas clásicas y que, como la probabilidad es tan pequeña, se pueden despreciar los accidentes correspondientes. Ahora bien, si esta conclusión es válida para el físico que desprecia tal o cual fenómeno poco probable en algún experimento de laboratorio, se vuelve dudosa cuando se trata de un accidente grave que involucra a un gran número de vidas humanas.

Aceptemos, sin discutir la afirmación, que la probabilidad de que suceda un accidente grave en una central atómica sea un millón de veces menos probable que la de una central térmica. No se puede por tanto concluir simplemente que la central atómica es un millón de veces más segura, pues una estrategia de opciones no se establece sobre probabilidades sino sobre lo que se llama la esperanza matemática, que toma en cuenta a la vez la población y la importancia del riesgo.

Supongamos una explosión de turbina en una central térmica con un saldo de diez muertos o heridos. Se puede decir que la esperanza matemática ligada a este accidente es de 10. Tomemos ahora una explosión de Superphenix, en el sur de

Francia. Para una nube radiactiva, se puede estimar un número de cien mil víctimas con muertos, irradiados, etc. Si su probabilidad es un millón de veces más pequeña que la anterior, la esperanza matemática de esa nube será $100\,000 \div 1\,000\,000 = 0.1$. El cociente de las esperanzas matemáticas es de 100. Es decir que a pesar de las enormes precauciones que hicieran de un accidente grave un acontecimiento un millón de veces menos probable, las centrales atómicas serían solamente cien veces más seguras.

[...] Este ejemplo sirve para demostrar y desarmar la falsa cientificidad de una argumentación. Esto conduce a dos comentarios. 1) La estimación de probabilidades pequeñas es, por definición y por naturaleza, muy difícil. Equivocarse por varios factores 10 en una tal estimación no tiene nada vergonzoso. Pero el accidente de Pensilvania nos recuerda una vez más que hay errores humanos en las manipulaciones de las instalaciones más sofisticadas y esto vuelve dudoso cualquier cálculo de probabilidad de accidente. 2) Uno puede preguntarse por qué cualquier estimación de probabilidad de accidente nunca se acompaña de una estimación de los efectos de estos accidentes por las personas que lo hacen. Es esta ponderación tipo esperanza matemática que hace implícitamente la opinión pública. Tal vez lo hace a partir de pulsiones irracionales, pero es ella, a fin de cuentas, la que tiene el verdadero comportamiento científico, por lo menos en ese asunto, al opuesto de los técnicos desencarnados.

Los promotores de la energía nuclear frecuentemente mencionan como argumentos importantes para favorecer el desarrollo de esta industria el respeto al medio ambiente y al entorno, la seguridad, la competitividad y la independencia energética (la sociedad Areva, en su página web, adicionalmente informa sobre el papel que a su parecer tiene la industria nuclear en la defensa de las energías renovables y el financiamiento de actividades deportivas entre otras).¹⁰ Cuando la energía nuclear fue introducida en el mundo, a mediados del siglo veinte, se mencionaba que esta industria, por ser ilimitada y de bajo costo en su producción, lograría satisfacer las necesidades energéticas crecientes. En 1954, Lewis Strauss, dirigente de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos de América, prometía que las plantas nucleares proveerían electricidad “demasiado barata para medir su precio” [18]. En esta misma dirección, veinte años más tarde, en 1974 la IAEA anunciaba que para el año 2000 habría hasta 4 450 reactores de 1 000 MW en operación en todo el mundo, y que las centra-

¹⁰ <<http://www.areva.com>>.

les reproductoras alimentadas con plutonio producirían una energía ilimitada y barata aun si el uranio se volviera difícil de encontrar [19].

La situación actual está lejos de estas predicciones. En la actualidad existen menos de 500 reactores nucleares en todo el mundo; es decir, del orden de 10% de la predicción hecha por de la IAEA. Estos reactores abarcan aproximadamente 16% de la producción total de electricidad y menos de 3% de la demanda energética mundial [19, 20]. A finales del 2002 sólo 32 reactores estaban en construcción varios de ellos ya llevaban “en construcción” 15 años y probablemente nunca sean terminados. Particularmente, en Estados Unidos de América, en los últimos 35 años no se han construido nuevos reactores; el último reactor construido en este país fue el de Palo Verde, en octubre del 1973.

Respecto al medio ambiente y al entorno

Los vendedores de centrales nucleares promueven su tecnología arguyendo que ésta es una energía limpia, sin carbono, que permite reducir el efecto invernadero. Algunos, incluso, mencionan que se trata de una energía renovable. Pero lo fundamental, a fin de cuentas, es que en realidad esta energía está muy lejos de ser una energía limpia, pues la cantidad de desechos radiactivos producidos por estas centrales es bastante grande y el riesgo de dispersión de esta materia en el ambiente no es nada despreciable.

En los últimos años se ha confirmado que el planeta se está volviendo más caliente debido a la emisión de gases, ocasionada por actividades humanas, que tienen efecto invernadero. Alrededor de la mitad de estos gases son emitidos por el sector energético. De manera natural, en la atmósfera se encuentran gases de efecto invernadero, que permiten conservar parte del calor solar en las capas bajas de la atmósfera. Esto hace que nuestro planeta permanezca caliente y la vida sea posible. El problema del sobrecalentamiento del planeta se debe a que la cantidad de estos gases va en incremento y, con ello, más calor está siendo atrapado; este fenómeno está llevando a un incremento en la temperatura promedio del planeta, con consecuencias como el derretimiento de los polos, la subida del nivel del mar y los cambios climáticos, entre otros [21].

Es cierto que la fisión nuclear por sí misma no produce gases de efecto invernadero; sin embargo, la cadena nuclear completa no está exenta de emisión de CO_2 . La explotación de minas, el enriquecimiento del uranio, la construcción y el desmantelamiento de las centrales nucleares, el procesamiento y almacenamiento de los desechos radiactivos, etc., necesitan una cantidad de energía mucho mayor que otras formas menos complejas de producción de electrici-

dad. Esta energía proviene de fuentes fósiles y, por lo tanto, de manera indirecta, la energía nuclear contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero. En la tabla 4 se presenta la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por kWh, correspondiente a diferentes modos de producción de electricidad, dada a conocer por el Instituto Öko de Alemania [22].

Tabla 4. Emisión de gases de efecto invernadero según el método de generación de electricidad [22, 23]

Método de generación	Emisión de gases de efecto invernadero (en equivalente de gCO₂/kWh)
Eólica	2.8 a 23
Biomasa electricidad	15
Hidroeléctrica	4 a 40
Nuclear	9 a 70
Solar fotovoltaico	41 a 72
Gas natural	377 a 427
Carbón	962 a 1036

A partir de estos datos se puede afirmar que la energía nuclear emite una cantidad menor de gases de efecto invernadero que las de combustible fósil, pero no menos que las de otras fuentes de energía renovable.

Las sociedades contemporáneas no solamente consumen energía en forma de electricidad, la energía térmica es también esencial. En Francia, por ejemplo, dos tercios de la energía utilizada es térmica y un tercio en forma de electricidad. En el caso de la quema de combustibles fósiles para producir electricidad también se genera, como producto, energía térmica. Tradicionalmente esta forma de energía ha sido desperdiciada y, por tanto, la eficiencia de las plantas de combustible fósil ha sido baja. Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado avances importantes para recuperar esta forma de energía y utilizarla para el calentamiento urbano o industrial. Se estima que estas nuevas plantas pueden llegar a un 90% en su eficiencia, superior a la eficiencia de 35-55% de las plantas tradicionales [19, 23].

En 2003 Francia generó 75% de su electricidad a partir de plantas nucleares. La industria nuclear suele utilizar a este país como un caso ejemplar de

las ventajas de la energía nuclear. No se menciona, sin embargo, que en el año 2000 las emisiones de gases de efecto invernadero continuaron en aumento. Estudios realizados por la Agencia Central de Planificación del gobierno francés señalan que no existe una correlación evidente entre la emisión de CO₂ y la producción de energía nuclear. Dentro de los escenarios utilizados en este estudio el modelo que produjo mínimas emisiones no fue el que usaba la energía nuclear al cien por ciento sino el que minimizaba la demanda de energía [24]. Sin embargo, en un estudio que se llevó a cabo en 2003, al realizar una comparación entre la producción de energía eléctrica que se obtendría a partir de energía nuclear o a partir de energía eólica, bajo iguales montos de inversión, esta última resultó ser mucho más favorable. Esto es, a igual monto de inversión, con la opción eólica puede generarse mucho más energía, además de la repercusión en el ámbito del empleo [25].

Seguridad

Desafortunadamente, como recientemente lo demostró el caso de Fukushima, ninguna central nuclear está protegida contra un error humano, un acto de maldad, un evento climático o un fallo técnico [26]. En términos de las consecuencias que implica, es grave que una central nuclear no pueda resistir un terremoto o un maremoto en un país donde la probabilidad de que éstos sucedan no es despreciable, a pesar de que dicho país sea considerado el “especialista” de estos acontecimientos. ¿Cuál sería el costo del kWh nuclear si las centrales estuvieran diseñadas para resistir las eventualidades arriba señaladas? Sin lugar a dudas, el costo con este tipo de centrales nucleares sería mucho mayor al de otras fuentes de energía.

Las instalaciones nucleares son vulnerables a acontecimientos climáticos extremos. A pesar de las declaraciones sobre la seguridad de las centrales nucleares, la evidencia histórica muestra lo contrario. Desde el inicio de la construcción de las centrales nucleares a la fecha, se tiene registro de varios desastres ocurridos (ver capítulo III): Windscale (Reino Unido, 1957), Chelyabinsk-40 (Rusia, 1957/8), Brown’s Ferry (Alabama, 1975), Three Mile Island (Pennsylvania, 1979), Chernóbil (Ucrania, 1986) y recientemente Fukushima (Japón, 2011). Adicionalmente, se encuentran los accidentes considerados como menores, denominados “incidentes”. En el 2003, por ejemplo, 25% del parque nuclear francés fue cerrado temporalmente a causa de la canícula y problemas para asegurar el enfriamiento de las centrales. En julio del 2006, un corto circuito fuera de un reactor provocó la suspensión de actividades en la central de

Forsmak, en Suecia. En el 2010 se presentaron varios incendios en centrales rusas. Recientemente [27], en abril 2012, se presentó una fuga de agua radiactiva seguida de dos pequeños incendios de aceite en la central francesa de Penly; lo anterior provocó que la planta fuera parada inmediatamente y, como siempre, “con ninguna consecuencia sobre el entorno”. En esas mismas fechas se presentó otro incidente en la central de Saint Laurent des Eaux [28].

Bélgica produce la mitad de su electricidad gracias a dos centrales nucleares, Doel y Thiange cuyos siete reactores de ocho siguen en actividad.¹¹ En el 2002, una ley fue aprobada, bajo la impulsión del Olivier Deleuze, quien fungió como secretario de Estado a la Energía y al Desarrollo Sustentable de 1999 a 2003 [29]. Esta ley preveía el abandono de la energía nuclear y el cierre de las centrales entre 2015 y 2025. El anuncio era firme y la voluntad clara.

En 2012, unas microfisuras fueron encontradas en el tanque del reactor 2 de la central de Thiange. En el 2014 el reactor fue parado. A principio del 2015, la empresa Electrabel, que tiene la gestión de estas centrales y filial a 100% del grupo francés Engie (antiguamente GDF-Suez)¹² confirma un aumento de las fisuras encontradas en el 2012. Pero como este reactor llegaba solamente a los 40 años de explotación en el 2022, no tiene vocación a ser definitivamente cerrado. Los reactores 1 y 2 de la central de Doel, que la ley preveía cerrar en el 2015 fueron prolongados a 10 años en diciembre del 2014 por el gobierno federal belga, al igual que Thiange 1. Hay que mencionar que se encontraron también microfisuras en el reactor Doel 3. El 17 de noviembre del 2015 la empresa Electrabel fue autorizada por la Agencia Federal de Control Nuclear belga (AFCN) a empezar la reactivación de los reactores Thiange 2 y Doel 3 a pesar de las microfisuras y de una explosión en Doel el 31 de octubre del 2015.¹³

Esta decisión es la chispa que encendió la respuesta popular. En unos días, una petición titulada “¿Algunos días para evitar un nuevo Chernóbil?” mandada a todos los gobiernos de la Unión Europea recolectó más de un millón de firmas.¹⁴

A pesar de la preocupación sobre la prolongación de los reactores belgas [30], existe en Europa el temor a un accidente mayor, equivalente a los de

¹¹ <http://deredactie.be/cm/vrtnieuws.francais/archief_FR/1.1027860>.

¹² <<http://www.engie.com/en/>>.

¹³ <<http://deredactie.be/cm/vrtnieuws.francais>>.

¹⁴ <https://secure.avaaz.org/en/belgian_nuclear_shutdown_gl_loc/?fpla>.

Chernóbil y Fukushima, en la cabeza de todos los manifestantes en contra de la prolongación de los viejos reactores. Francia, con su más antigua central en Fessenheim (1977) construida en una falla sísmica, es candidata a esta posibilidad. El presidente Francois Hollande había prometido cerrarla en el 2016 y, desafortunadamente, no será el caso. Entre 2019 y 2025 la mitad de los reactores nucleares franceses llegarán al límite de los cuarenta años, para el cual fueron concebidos. El siete de marzo del 2016, la ciudad y el departamento de Ginebra (Suiza), han pedido a Francia de cerrara también la central nuclear del Bugey, que está situada en Francia, a 35 km de Lyon (Francia) y a 70 km de Ginebra y han depositado una denuncia penal [31]. Es también cerca de esta central que se quiere construir un sitio de almacenamiento de desechos nucleares. La misma preocupación existe también en Alemania por la central nuclear de Cattenom cerca del Luxemburgo, de Bélgica y de Alemania [32].

Problemas parecidos existen para las centrales nucleares estadounidenses. Varios incidentes ocurrieron y alimentan el debate sobre la seguridad y el provenir de esta fuente energética [33]. En particular el gobernador del estado de Nueva York, Andrew Cuomo, se preocupó por una fuga en la central de Indian Point, a 65 km al norte de la ciudad de Nueva York. Muestras de aguas subterráneas carcanas a la central han mostrado la presencia elevada de tritio. El grupo que explota la central, Entergy, ha dicho que “si las tasas no eran conforme a sus propias normas, no tenían ninguna consecuencia para la salud y el público, ya que los resultados de las muestras son 1 000 veces menores a los límites admitidos por las autoridades federales”. Además, la misma empresa puso una queja en los tribunales considerando que el estado no tenía autoridad para la regulación de la energía nuclear.

No es el primer incidente en esta central, ya que según el *New York Post*, es el vigésimo desde 2001 [34]. El último incidente de diciembre 2015 se debió a un pájaro.

Igualmente en Florida, en torno a la central de Turkey Point, a 100 km al sur de Miami, donde se ha revelado un estudio pedido por el alcalde de la aglomeración donde se revela que los niveles de tritio en las aguas de la bahía de Biscayne están 215 veces superiores a los medidos normalmente en las aguas del mar. Estas centrales empezaron a producir electricidad a principio de los años setenta. Tienen ya más de 40 años. Pero las compañías piden llevar su utrilización hasta 80 años.

La red francesa “Sortir du nucléaire” tiene el mérito de seguir y vigilar diariamente lo que sucede en todas las centrales nucleares del mundo. Para tomar un ejemplo, en el mes de enero 2014 se señalaron no menos de 9 incidentes en

centrales nucleares estadounidenses, ocurridos por razones diversas [35]. El 6 de enero en la central de Beaver Valley en Pennsylvania se presentó un incidente debido a un defecto de un convertidor; el 9, en la de Robinson en Carolina del Sur, por el paro de una turbina; el 10, otro incidente en la central de Saint Lucie en Florida, después de lluvias muy importantes; el mismo día, en la central de Brunswick en Carolina del Norte, uno por la explosión de un convertidor; el 12, en la de Fort Calhoun en Nebraska, por un defecto de colocación de las barras de control; el 18, en la central de South Texas en Texas, por un incendio en el cuarto de informática; el mismo día, en la de Harris en Carolina del norte, por un incendio en el circuito eléctrico; el 20, en la de Perry en Ohio, por la contaminación con tritio en aguas subterráneas; y el 21, en la de Calvert Cliffs en Maryland, después de un falla eléctrica [36-42].

En la tabla 5, se presenta la edad de los 442 reactores nucleares en actividad en el mundo. Más de la mitad tiene en funcionamiento más de 30 años.

Tabla 5. Duración de operación de los 442 reactores nucleares en el mundo [43]

Edad (años)	Número de reactores
Más de 40 años	81
Entre 30 y 40 años	192
Entre 20 y 30 años	90
Entre 10 y 20 años	39
Menos de 10 años	40

La mayoría de estos incidentes fueron clasificados “críticos” por las autoridades de vigilancia. Lo anterior tal vez sea una prueba más del envejecimiento del parque estadounidense de centrales nucleares y de las peligrosas posibles consecuencias de la voluntad de algunos países de querer prolongar el uso de estas instalaciones después del periodo inicial previsto para su funcionamiento.

Competitividad

En los años cincuenta del siglo pasado, el General Eisenhower señaló que la energía nuclear daría a la humanidad una energía gratuita en cantidades ilimitadas. Diversos organismos y profesionales han hecho esfuerzos por lograr que la energía nuclear conserve esta reputación. Sin embargo, esta apariencia rápidamente se desvanece si se toman en cuenta los costos reales de su producción: las inversiones enormes de inicio; el costo de extracción del uranio y su preparación para ser utilizado en las centrales; el costo de operación de las centrales en condiciones aceptables de seguridad; el costo del cierre de las centrales viejas, el cual puede tardar más de 20 años, debido a que los materiales utilizados se vuelven radiactivos; el costo del manejo, tratamiento y almacenamiento de los desechos nucleares a largo plazo; el costo en caso de eventualidades diversas y accidentes graves; el costo de los seguros, etc. A manera de ejemplo, el accidente de Chernóbil costó a la URSS tres veces la totalidad de los beneficios comerciales que el país había obtenido en 36 años con todas sus centrales. Además, el costo del nuevo domo de protección (30 000 toneladas, 110 m de altura, 250 m de ancho y 150 m de longitud) ensamblado a unos 600 m de la central de Chernóbil, cuya terminación está prevista para 2017, costará al menos 2.15×10^9 euros, pagados por 46 países y organizaciones a través del Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo [44].

En el 2009, en Francia, la EDF informó que el costo promedio del kWh eléctrico era de 2.7 c€. Según datos aportados por la propia empresa, con el futuro reactor EPR, la factura ascenderá a 5.5 c€, precio equivalente al de la energía eléctrica producida por plantas eólicas o solares.

Independencia energética

Se afirma que la energía nuclear es una garantía de la independencia energética para los países; esto no es exacto, pues el uranio tiene que ser importado y es un recurso agotable al igual que el petróleo. Cabe mencionar que todas las minas de uranio francesas cerraron hace ya algunos años; el uranio utilizado en Francia viene de Canadá, Australia, África y en especial del Níger. ¡La contaminación de obreros nigerianos que trabajan en las minas de uranio parece no ser un problema!

Soluciones al problema energético

La problemática energética, sin duda, es un asunto trascendental; a este respecto, dos vías de solución parecen especialmente prometedoras. Por un lado, es necesario lograr un aprovechamiento **más eficiente de la energía disponible actual**; por otro, es necesario acudir a fuentes de energía renovables: solar, eólica, hidráulica, geotermia, etcétera.

Uno de los principales obstáculos que frena la utilización de estas fuentes alternativas de energía renovables es el factor económico, pues aparentemente esto resultaría más caro que usar los combustibles fósiles o la energía nuclear. Sin embargo, si en el cálculo del costo de producción de la energía se toma en cuenta el costo que supone limpiar la contaminación que provoca su producción, disminuir los daños ambientales y aumentar la seguridad, entonces ya no es tan claro que las energías tradicionales sean más baratas. Bajo esta consideración, el costo real de producción de energía a partir del petróleo, carbón, gas o uranio es bastante más elevado de lo ya establecido. Cabe señalar que, actualmente, parte de los costos de producción de energía, a partir de fuentes no renovables, son absorbidos directa o indirectamente por los gobiernos de los diferentes países.

En 1973 el precio del petróleo subió notablemente, en esa época creció la investigación en torno a la producción de energía a partir de fuentes alternativas, así como su uso. Posteriormente, a partir de que en muchos países desarrollados se estabilizó el consumo de energía y que el precio de las fuentes clásicas de energía bajó, se perdió parte del interés por las energías renovables. A pesar de ello, actualmente se continúa investigando sobre fuentes alternativas, particularmente sobre aquellos aspectos que las pueden hacer económicamente rentables.

En diversos ambientes se ha mencionado que una solución posible podría ser la fusión termonuclear. Se piensa que la reacción deuterio-tritio es la más factible para lograr la fusión. El tritio es un gas radiactivo, con una vida promedio aproximada de 18 años; éste se produciría a partir del litio, el cual es un recurso limitado en la Tierra. Actualmente, en el sur de Francia, se está construyendo un reactor experimental de fusión termonuclear (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER). En este proyecto internacional participan Europa, China, Corea del Sur, Estados Unidos de América, India, Japón y Rusia; el costo estimado inicial fue de 5.9×10^9 euros, ahora se estima que el costo para su construcción ascenderá a 16×10^9 euros, sin tomar en cuenta los 5×10^9 euros previstos para el funcionamiento [45].

El desafío tecnológico es elevado. Para fusionar el deuterio con el tritio se necesita un ambiente a más de 10^8 °C y confinar el plasma con campos magnéticos intensos generados por bobinas superconductoras gigantes, lo cual se logra con los tokamaks que fueron inventados en 1950 por el físico ruso Andréi Sakharov. Desde esta época existen problemas no resueltos en su funcionamiento, relacionados tanto con el confinamiento del plasma como con su inestabilidad, conocidos como fenómenos de “disrupciones”. Estos fenómenos ocurren en los pequeños tokamaks experimentales como el Tore-Supra y el JET (Joint European Torus), que tienen una corriente plasma de 1.5 millón de amperes y de 4.8 millones de amperes, respectivamente; a la fecha estos fenómenos todavía no tienen una explicación segura. Los problemas, tanto experimentales como teóricos, son muy diversos y crecen con la potencia del tokamak [45-47]. Adicionalmente, se necesita construir materiales capaces de resistir de manera duradera, la irradiación de neutrones de muy alta energía, producidos por la fusión; estos materiales actualmente no existen; se sabe que los materiales que serán utilizados en la construcción de una planta de este tipo se volverán radiactivos. La ITER está proyectada para iniciar actividades en 2019 y se espera que para 2026 puedan llevarse a cabo las primeras reacciones de fusión termonuclear. Si todo va bien, se estima que para 2040 se podría tener un prototipo industrial.

Con estas cuentas, la producción de electricidad por fusión termonuclear estaría proyectada para finales de este siglo [45]. Actualmente estamos muy lejos de haber superado los enormes problemas técnicos que esta nueva forma de producción de energía plantea, así como para dimensionar los peligros y amenazas que conlleva su utilización para la contaminación de la Tierra. Sin embargo, algunos físicos ya consideran que “La energía nuclear de fusión es la energía del futuro y ¡siempre lo será!”

La producción de electricidad contribuye con 9% de la emisión anual de gases de efecto invernadero [18]. Es necesario encontrar nuevos caminos para la reducción de emisiones del sector energético. En los últimos 15 años, el costo por kWh de electricidad producido por energía eólica ha bajado en 50% y el de la energía fotovoltaica en un 30%; se estima que su costo continuará bajando. Por otra parte, debido a los problemas de seguridad, a la dificultad de conseguir el uranio, etc., el costo de las centrales nucleares continuará subiendo. Se requiere de una política de ahorro de energía, de reducción de pérdidas en su almacenamiento y transporte, así como de una baja en la demanda. ¿Cuántos aparatos electrónicos existen en el mercado, con un sinnúmero de LEDs totalmente inútiles a su funcionamiento? Sin duda, cada uno gasta un poco de energía, ¿y al final?

Referencias

1. GSIEN [en línea], <www.gazettenucleaire.com>.
2. Vincent, Catherine,. “Radiativité, j’écris ton nom”, en *Le Monde*, 16 de abril de 2011.
3. Bourry, Chantal. *La vérité scientifique sur le nucléaire (en 10 questions)*. París, Rue de l’échiquier, 2012.
4. Ver por ejemplo, “Centrales nucléares. 2a parte”, en Centrales eléctricas [en línea], <<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo5b.html>>.
5. France Info [en línea], <<http://www.france-info.com>>.
6. AFP, “Areva annonce une perte nette record de 4,9 milliards d’euros en 2014”, en *Lepetitjournal.com* [en línea], <<http://www.lepetitjournal.com/international/france-monde/actualité/208371-areva-annonce-une-perte-nette-record-49-milliards-d-euros-en-2014?tmpl=component&print=1&layout=default&page=>>>.
7. Pigford, Thomas H. “Protection of the public from the radioactivity produced in nuclear power reactors”, en *IEEE. Trans. Nuclear Sci.* vol. 19, núms. 15-26, 1972.
8. Wald, M. L. “Thomas H. Pigford, Nuclear Engineer, Is Dead at 87”, *The New York Times* [en línea] 5 de marzo de 2010, <<http://www.nytimes.com/2010/03/05/science/05pigford.html>>.
9. Dininny, Shannon. “U.S. to Assess the Harm from Hanford. Seattle Post-Intelligencer” [en línea], en *Seattle pi*, The Associated Press, 3 de abril de 2007, <http://www.seattlepi.com/local/310247_hanford04.html>.
10. Schneider, Keith. “Agreement for a cleanup at nuclear site”, en *The New York Times* [en línea], 28 de febrero de 1989, <<http://www.nytimes.com/1989/02/28/us/agreement-set-for-a-cleanup-at-nuclear-site.html>>.

11. Katz, Alison. “L’Organisation mondiale de la santé et le nucléaire. Les dossiers enterrés de Tchernobyl”, en *Le Monde Diplomatique* [en línea], marzo de 2008, < <http://www.monde-diplomatique.fr/2008/03/KATZ/15711>>.
12. Epstein, Samuel S. *Cancer-gate. How to win the losing cancer war*. Nueva York, Baywood, 2005.
13. ICRP. *ICRP Publicación 103. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Madrid, Sociedad Española de Protección Radiológica, 2008.
14. Busby, Chris ed. “2010 Recommendations of the European Committee on Radiation Risk. The Health Effects of Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation”, en *Journal of Radiological Protection* [en línea].Aberystwyth, Green Audit Press, 2010. <www.euradcom.org>.
14. Frank, Alejandro. “El accidente nuclear de Fukushima: una valoración científica”, en *La Jornada*. México, 16 de abril de 2011.
15. Yablokov, Alexey V., Vassily B. Nesterenko, Alexey V. Nesterenko. “Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment”, en *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 1181. Nueva York, 2010.
16. Saint-James, D. “Esperance mathématique”, en *Le Monde*, 5 de agosto de 1979.
17. NIRS/WISE. “Nuclear Power: No solution to climate change”, en *Nuclear Monitor*. / Newsletter núm. 621 y 622, febrero de 2005, pp. 3-24.
18. Schneider, Mycle. *Climate Change and Nuclear Power* Gland, Suiza, WWF, 2000.
19. Hodgson, Peter e Yves Marignac. “Is Nuclear Power a Viable Solution to Climate Change?”, en *The Ecologist*, núm. 31, 2001, pp. 20-23.
20. Barry, Roger G. y Richard J. Chorley. *Atmosphere, weather and climate*. Londres, Routledge, 1992.
21. Fritsche, Uwe R. *Comparing Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Costs of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective* [en línea].

- Updated version, enero de 2006. < <http://www.oeko.de/oekodoc/315/2006-017-en.pdf>>.
22. Boulanger, Vincent. “Energies renouvelables : le retard français”, en *L'énergie autrement*, Hors-Série 54. París, Alternatives Economiques, 2012, pp. 47-50.
 23. Charpin, Jean-Michel, Benjamin Dessus, René Pellat. *Economic forecast study of the nuclear power option* [en línea]. París Comissariat Général du Plan, 2000. < <http://fissilematerials.org/library/cha00.pdf>>.
 24. Bonduelle, Antoinette y Mathias Lefèvre. « Éole ou Pluton? » 2003. París, Greenpeace, DÉTENTE, 2003.
 25. Large and Associates. *Evaluations des conséquences radiologiques de rejets accidentels du réacteur EPR proposé en France* (et de certains réacteurs existants) Ref Núm. R3150-3. Francia, Greenpeace, 2007.
 26. “Fuite d’eau radioactive à Penly”, en *Libération* [en línea], 6 de abril de 2012. <<http://www.leparisien.fr/environnement/reacteur-de-saint-laurent-des-eaux-redemarrage-prevu-vendredi-06-04-2012-1942638.php>>
 27. Condijs, Joan y Sylvain Piraux. “La Belgique éteint le nucléaire. Les sept centrales belges seront fermées entre 2015 y 2025”, en *Le Soir*. Belgique, Samedi 2 de marzo de 2002.
 28. Hanne, Isabelle. “Le nucléaire belge sous la presión de ses voisins”, en *Libération*, Francia, 2 de febrero de 2016.
 29. “Le canton de Genève réclame « la fermeture » de la centrale nucléaire du Bugey”, en *Le Monde* [en línea], 7 de marzo de 2016. < http://www.lemonde.fr/energies/article/2016/03/07/le-canton-de-geneve-reclame-la-fermeture-de-la-centrale-nucleaire-du-bugey_4878015_1653054.html>
 30. Le Hir, Pierre. “Les centrales nucléaires françaises inquiètent les pays frontaliers”, en *Le Monde* [en línea], 3 de marzo de 2016. < http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/03/03/les-centrales-nucleaires-francaises-inquietent-les-pays-frontaliers_4876180_3244.html>

31. Lauer, Stephane. “Centrales nucléaires : succession d’incidents aux Etats-Unis”, en *Le Monde* [en línea], 17 de marzo de 2016. <http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/03/17/centrales-nucleaires-succes-sion-d-incidents-aux-etats-unis_4884965_3244.html>.
32. Conley, Kirstan. “Bird poop shut down Indian Point nuclear plant”, en *New York Post* [en línea], 3 de marzo de 2016. <<http://nypost.com/2016/03/03/bird-poop-shut-down-indian-point-nuclear-plant/>>.
33. <http://www.sortirdunucleaire.org/>.
34. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140110en.html>>.
35. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140107en.html>>.
36. U. S. NRC, <<http://www.nrc.gov/reactors/pwrs.html>>.
37. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140113en.html#en49713>>.
38. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140117en.html>>.
39. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140121en.html>>.
40. U. S. NRC [en línea], <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2014/20140122en.html>>.
41. IAEA/PRIS [en línea], <<https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx>>.
42. Le Hir, Pierre. “ITER un projet solaire”, en *Le Monde* [en línea], Hors-série, diciembre de 2011.
43. *The Engineer* [en línea] <http://www.theengineer.co.uk/news/chernobyls-giant-shield-takes-shape/1019639.article?cmpid=tenews_764696%20-%20video>.

44. Reux, Cédric. *Etude d'une méthode d'amortissement des disruptions d'un plasma de tokamak*. [en línea] Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2010. <<http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00599210/en/>>.
45. Thornton, Andrew. *The impact of transient mitigation schemes on the MAST edge plasma* [en línea], Ph. D., University of York, 2011. <http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/English/ITER/These_anglaise.pdf>.

Capítulo II

EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

A la luz de la catástrofe en la planta nuclear de Fukushima en Japón, es importante abordar el tema del efecto que tienen las radiaciones ionizantes sobre la salud humana. Las radiaciones en los humanos pueden causar desde pequeñas intoxicaciones hasta la muerte del individuo; pueden causar un leve daño celular reversible, pero también pueden causar cáncer. En plantas y animales se ha observado que las radiaciones ionizantes pueden tener efectos hereditarios. En este capítulo se abordan algunos elementos básicos que ayudan a comprender los procesos físicos que involucra la radiación nuclear, sus efectos biológicos y sus consecuencias en la salud humana.

Desde hace un siglo, a partir de la realización de los primeros experimentos físicos con radiaciones ionizantes, se descubrió que éstas podían provocar efectos graves en la salud de las personas. A finales del siglo XIX, Becquerel mismo observó una quemadura en su piel a nivel del bolsillo en el cual conservaba un tubo que contenía radio. No mucho tiempo después, el físico James Arnold Crowther propuso la primera teoría del cáncer radio-inducido [1]. En esta teoría, conocida con el nombre de Teoría del Blanco, se plantea que la pérdida de actividad biológica, en un volumen determinado de material biológico (blanco), está relacionada con el número de interacciones debidas a la radiación ionizante. La hipótesis básica de esta teoría establece que una ionización al azar puede conducir a un cambio en la estructura de una molécula del material blanco, y con ello alterar los procesos biológicos.

En la teoría de Crowther la probabilidad de que una célula expuesta a radiación sea ionizada es proporcional a la intensidad de la radiación recibida, en

tanto la probabilidad de aparición de un cáncer es proporcional a la dosis. Años más tarde, Timofeev-Ressovsky y Delbrueck demostraron que la exposición a rayos X podía causar cambios hereditarios en los descendientes de moscas de fruta expuestas y lograron estimar la magnitud de este cambio [2].

En 1940 varios miembros del Comité Asesor para la Protección contra Rayos X y Radio (Advisory Committee on X-Ray and Radium Protection) de Estados Unidos de América, con base en la evidencia acumulada de que cualquier dosis de radiación podría causar “daños genéticos, comprometiendo (a) las generaciones futuras”, hicieron la propuesta de que los valores de exposición a las radiaciones que establecían las normas, disminuyeran por un factor de cinco [3].

En 1953, en este mismo país, dio inicio la campaña “Átomos por la Paz” con el objetivo de promover la energía nuclear, presentándola como una alternativa energética “limpia, segura, barata e ilimitada”. Los Estados Unidos de América gastaron decenas de miles de millones de dólares para establecer la industria nuclear en su país y poder venderla a otros países, asegurando el dominio norteamericano sobre el creciente mercado nuclear mundial. La antigua Unión Soviética, por su parte, creó un programa similar en Europa oriental. Francia, Gran Bretaña y China también desarrollaron el campo de la energía nuclear, y también el de la industria de armamentos, tanto para uso interno como para la exportación.

En 1957, con el objeto de promover el desarrollo de la industria de la energía nuclear e impedir la proliferación de armas nucleares, se creó la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA). Estas dos funciones, promoción de la industria de la energía nuclear y freno al desarrollo de armamento nuclear, hasta la fecha han resultado esencialmente incompatibles; de hecho, la promoción de la energía nuclear ha conducido directamente a la proliferación de materiales y armamento nuclear [4].

Los científicos que participaron en los programas nucleares en las décadas de los cincuenta y sesenta sabían que la tecnología nuclear implicaba importantes riesgos; sin embargo, ante la necesidad de proteger los intereses de una industria en expansión, las preocupaciones por la seguridad de la población fueron relegadas a segundo plano [5]. Desafortunadamente, en la actualidad, existe poca información pública oficial acerca de los profundos peligros que conlleva el desarrollo de la industria nuclear para la salud humana. A nivel de ejemplo, jamás se ha realizado un debate público completo acerca de los beneficios *versus* los riesgos de la energía de generación nuclear para la existencia humana.

En relación con la contaminación nuclear, no se puede recalcar de manera suficiente la situación real existente. Desde una perspectiva biológica, el resultado que actualmente tenemos es la suma de todos los daños causados, a través del tiempo y en los diversos puntos geográficos, por todas las fuentes y todos los eventos combinados que han liberado y continúan liberando venenos nucleares a la biosfera. La producción nuclear, en su operación normal, como se señaló en el capítulo anterior, libera radiactividad en el aire, en la tierra y en el agua. Cada evento asociado a la producción de energía nuclear, sin importar lo aislado que se encuentre, aporta a la suma general [6]. Y, desafortunadamente, para muchas formas de vida, incluida la humana, las dosis altas de radiación pueden conducir a la muerte en cuestión de semanas, días o incluso en un instante.

En el presente capítulo, primero se analizan los daños que a nivel molecular se presentan en la materia orgánica a causa de las radiaciones ionizantes; para ello, se tomarán como base las características atómicas y moleculares de la materia, así como el comportamiento físico de las radiaciones. Posteriormente, con base en información epidemiológica, se ilustra la asociación entre radiaciones ionizantes y daño a la salud; también se hace un recuento del daño que causan estas radiaciones en diversos tejidos y órganos del cuerpo humano. Adicionalmente, se aborda el tema relativo a los efectos deterministas y estocásticos asociados a la exposición de dichas radiaciones. Al final del capítulo se aborda el tema de bajas dosis de radiación y sus efectos.

Radiación y alteración molecular

La cadena de producción de energía nuclear se compone de un conjunto de actividades humanas, que abarcan desde la puesta en servicio de una mina, la extracción del uranio radiactivo que se encuentra en el subsuelo hasta la fisión nuclear, obtención de energía y producción de desechos nucleares. Estas actividades involucran la extracción del material radiactivo de las minas, el transporte y almacenamiento del mismo antes de que sea procesado; el procesamiento y enriquecimiento del material radiactivo, así como su uso en las plantas nucleares; el manejo del decaimiento radiactivo de este material, su enfriamiento, etcétera. Igual importancia tienen, en cuanto a contaminación se refiere, el procesamiento, almacenamiento y manejo, en general, de todos los productos secundarios, desechos y emanaciones resultantes del proceso de fisión nuclear que se lleva a cabo en los reactores.

Cada uno de los procedimientos arriba mencionados involucra un nivel de contaminación de la biosfera. Así como sucede con el viento y el agua, la radiactividad no confinada se dispersa por todas partes, en toda la Tierra. Las partículas radiactivas se mueven en el aire en forma de polvo desde la mina de extracción hacia todos los rincones del planeta, donde habitan microbios, insectos, semillas, pájaros, y otras tantas formas de vida que se encuentran en los diversos ecosistemas. Este proceso, en mayor o menor grado, se repite en las distintas etapas de producción de energía nuclear, en el uso de grandes cantidades de agua para enfriar los reactores o en las emanaciones gaseosas de las centrales nucleares, etcétera.

Al abordar el tema de radiación y sus efectos en la salud humana, es importante tener presente, como ya fue mencionado en el capítulo anterior, que la radiación puede ser en forma de onda electromagnética o como un flujo de partículas: partículas β (electrones), partículas α (núcleos de helio), radiación γ , etcétera. Cuando una radiación incide sobre la materia, las partículas incidentes pierden parte de su energía debido a los choques o interacción que tienen con las partículas del objeto. Como en el objeto hay mucho más electrones que núcleos, y además los núcleos son muy compactos, el frenado de las partículas incidentes se debe fundamentalmente a la interacción con los electrones atómicos que se encuentran en las órbitas superiores o con los electrones que se encuentran libres; en esta situación, el átomo o molécula irradiada gana energía y pasa a un estado excitado o ionizado. A manera de ejemplo, una partícula de 1 MeV puede formar una gran cantidad de iones, del orden de 50 000. En el caso de átomos en estado base que han sido excitados por la radiación, la energía de las partículas que estos átomos emiten al regresar a niveles de excitación inferiores, es menor que la energía de las partículas de la radiación incidente.

En el caso de los sólidos, la pérdida de los electrones por los átomos no tiene tanta importancia, pues los átomos pueden recuperar otros electrones. Sin embargo, debido también a la radiación, puede suceder que los átomos del objeto irradiado sean removidos de su lugar; en esta situación, dependiendo de la magnitud del efecto, el medio puede dislocarse y perder sus cualidades. Por ejemplo, en los cristales este proceso provoca que pierdan su brillantez.

Los gases y los líquidos se comportan de manera diferente a los sólidos. De especial interés es el caso del agua, pues forma gran parte de nuestro cuerpo (60% aprox. del peso total) y está presente tanto a nivel extracelular como intracelular. La molécula H_2O se mantiene ensamblada con una energía de 0.1 eV; y este ensamble se rompe en H^+ y OH^- cuando recibe una energía de 20 eV. Pos-

teriormente, a través de diversas reacciones químicas en las que participan estos iones, se presenta la formación de hidrógeno, oxígeno y agua oxigenada [7].

Los efectos biológicos que las radiaciones ionizantes desencadenan en la materia orgánica irradiada están determinados por las alteraciones que estas radiaciones ionizantes provocan en las funciones celulares. Las alteraciones en las funciones celulares, a su vez, están fuertemente asociadas a la magnitud y distribución de la ionización producida por la radiación incidente. El análisis de los procesos de ionización producidos exige, por su parte, considerar las particularidades de la forma de interacción radiación-materia; en este sentido, es importante el conocimiento y análisis de las características que presentan las trayectorias que describen las partículas de la radiación al incidir sobre la materia orgánica; se sabe que éstas dependen tanto del tipo de radiación incidente y de su energía, como de las características de la materia orgánica irradiada.

Sabemos que todas las radiaciones ionizantes, en su trayecto dentro de las células, producen partículas cargadas (pares de iones: electrón-átomo ionizado y/o electrón-molécula ionizada); este proceso de ionización provocado directamente por la radiación incidente se denomina ionización primaria; los electrones producidos en este proceso reciben el nombre de electrones primarios. Los electrones primarios, a su vez, dependiendo de su energía, pueden producir ionización adicional al interactuar con otros átomos o moléculas de la propia materia orgánica irradiada, denominada ionización secundaria; a los electrones producto de este segundo proceso se les denomina electrones secundarios. En el caso de los rayos X y rayos γ , los fotones incidentes sobre la materia orgánica pueden quitar electrones de una molécula o de un átomo, y con ello dañar a la célula y/o núcleo celular involucrado.

Los electrones que han sido arrancados en el primer proceso de ionización, en caso tener energía suficiente, pueden producir, a su vez, daño adicional afectando a otras células. Para radiaciones de altas energías, además de los electrones producidos por el efecto fotoeléctrico,¹⁵ existen fotones y electrones resultados del efecto Compton¹⁶. Por lo tanto, tenemos un paquete de electrones con una energía promedio que depende de la fuente.

¹⁵ El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se hace incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general).

¹⁶ El efecto Compton consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón de rayos X cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su energía. El cambio de frecuencia o de longitud de onda de la radiación dispersada depende de la dirección de dispersión.

Con base en lo anterior, es claro que el análisis del proceso de interacción radiación materia exige tomar en cuenta el depósito total de energía aportado por la radiación ionizante. Para ello, en el caso particular de que el objeto irradiado sea materia orgánica, hacemos uso del concepto denominado dosis absorbida. Este concepto nos indica, precisamente, desde una perspectiva macroscópica, la energía total depositada por la radiación ionizante en el tejido irradiado, expresada por unidad de masa de este tejido. La dosis absorbida se define, formalmente, como la cantidad de energía entregada a la materia irradiada, expresada por unidad de masa. La unidad de medición de la dosis absorbida se denomina Gray (Gy); 1 Gy equivale, por definición, a 1 joule/kg. A manera de ejemplo, una dosis de 4 Gy es equivalente en calor a 4×10^{-3} J por gramo de tejido, lo cual es suficiente para provocar un incremento de temperatura de 0.001°C . Esta dosis de radiación ionizante, recibida en una sola aplicación sobre todo el cuerpo humano, es igual en magnitud a la dosis denominada DL50; es decir, es la dosis que mata a la mitad de la muestra de humanos que la reciben [8].

Los rayos X, rayos γ y partículas β , al incidir sobre la materia, generalmente, siguen trayectorias cuya longitud va desde un orden de nanómetros a un orden de milímetros. Al incidir sobre la materia, estas radiaciones se caracterizan por presentar una pérdida de energía baja, expresada por unidad de longitud; de ahí que su densidad promedio de ionización, expresada también por unidad de longitud, sea baja. A estas partículas se les denomina de bajo LET (Linear Energy Transfer, por sus siglas en inglés).¹⁷ En contraste, en el caso de las partículas α , cuando inciden en el material, la pérdida de energía por unidad de longitud es mayor que el que presentan los otros tipos de radiación; esto es, las partículas α se caracterizan por tener un alto LET [9, 10].

Como fue mencionado arriba, la potencialidad del efecto biológico de las radiaciones ionizantes depende tanto del aporte de energía a las células como de la distribución espacial de esta energía. En este sentido, las radiaciones de alto LET adquieren especial importancia, pues la energía de radiación transferida a los tejidos presenta una distribución espacial densa a lo largo de las trayectorias.

En general, en principio, las sustancias tóxicas al organismo humano pueden ser diluidas a concentraciones muy bajas, y posteriormente, en caso ne-

¹⁷ La Transferencia Lineal de Energía es la energía transferida a los tejidos expresada por unidad de longitud recorrida por el electrón.

cesario, ser introducidas poco a poco en el cuerpo humano. En el caso de radiaciones es diferente. Para las radiaciones de bajo LET, la unidad mínima de dosis absorbida está determinada por la energía alcanzada por los electrones producto de la primera ionización. El electrón no puede ser dividido ni tampoco puede liberar suavemente su energía mediante su “dilución” en la célula. Así, en el caso de las radiaciones ionizantes, la transferencia de energía ocurre de manera abrupta y, en lo fundamental, durante la ionización primaria [11].

Electrones primarios

Los electrones libres, resultado de la ionización producida por la radiación, viajan en línea recta en los tejidos; ocasionalmente sufren desviación y siguen nuevamente en línea recta. La distancia total recorrida por un electrón depende de su energía inicial. En la tabla 1, se reportan los valores promedio de las distancias recorridas y el número de células atravesadas por electrones.

Tabla 1. Valores promedio de las distancias recorridas y número de células atravesadas por cada electrón primario (o paquete de electrones), según la fuente de radiación de fotones.

Fuente de fotones (energía promedio del fotón)	Distancias (µm)	Número de células atravesadas por cada electrón primario*	Número de fotones para proporcionar una dosis de 1cGy a 1 g*
Rayos X de uso médico (30 keV)	20 2 – 463	1.735 75.483	2.08×10 ⁹ 1.05×10 ⁸
Radio-226 y núcleos derivados (596 keV)	3 – 567 1 – 2517	90.268 376.869	9.43×10 ⁷ 3.88×10 ⁷
Cesio-137 (662 keV)			
Bomba A (1608 keV)			

* El cálculo de estos parámetros considera que se necesitan fotones de 6.24 10¹⁰ keV de energía para proporcionar 1cGy a 1 g de tejido (10⁻⁵ J/kg) [adaptado de 8].

En el caso de células humanas, tomando en cuenta que su diámetro es del orden de $14.2 \mu\text{m}$, se tiene que fotones con energía del orden mencionado en la tabla 1, pueden producir electrones de alta velocidad que atraviesen un buen número de células. A manera de ejemplo, un fotón de 0.6 MeV al ionizar a una molécula eyecta a un electrón que posee la mitad de energía del fotón inicial. El electrón liberado a lo largo de su trayecto va perdiendo energía en pequeñas cantidades, del orden de decenas de eV y produce del orden de 10^4 ionizaciones adicionales. Así, en la práctica, los cambios físicos y químicos en el sistema son producidos por el electrón primario y no por el fotón inicial [12].

Cuando el electrón primario pierde su energía poco a poco, pierde también velocidad y, por tanto, la distancia promedio que recorre entre las transferencias sucesivas disminuye y la cantidad de energía transferida por unidad de distancia aumenta en promedio, como se puede observar en la figura 1. Dicho de otra manera, su LET aumenta constantemente hasta que su energía sea demasiado baja y ya no pueda producir ionizaciones [8].

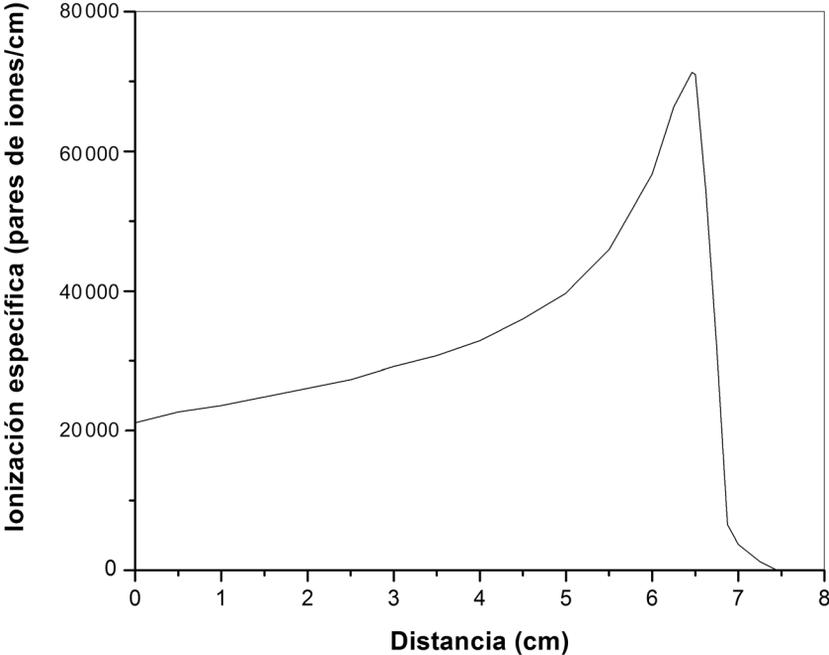


Figura 1. Cambios en la ionización específica cuando una partícula α de 7.7 MeV penetra en el aire [adaptado de 13].

Electrones secundarios y efectos a nivel celular

A lo largo de su trayectoria el electrón primario pone en movimiento electrones secundarios, conocidos como rayos delta. La distancia recorrida por la mayoría de estos rayos delta es del orden de nanómetros, la cual resulta ser muy corta si se le compara con la que recorre un electrón primario. La creación de estos electrones secundarios tiene un componente fuertemente aleatorio. Por ello, aunque dos electrones primarios tengan la misma energía inicial, su transferencia de energía nunca resulta ser la misma [8, 12]. En general, la cantidad de energía que posee la mayoría de los electrones secundarios, 75% de ellos aproximadamente, les permite alejarse de la molécula ionizada; esta energía, sin embargo, por lo general no es lo suficientemente grande como para que puedan ionizar a otras moléculas. Estos electrones van a termalizarse¹⁸ en un tiempo del orden de $10^{-11} - 10^{-13}$ s [14].

Sin embargo, aproximadamente 15% de los electrones secundarios adquieren suficiente energía (~ 40 eV) y logran remover un electrón de otra molécula. Esto ocurre en una región muy cercana al primer ion (0.4 nm); de hecho, estos dos tipos de electrones se termalizan en una región alrededor del primer ion que no va más allá que unos cuantos nanómetros. El 10% restante de los electrones adquieren tal energía que les permite arrancar electrones a dos o más moléculas adicionales. A partir del depósito de energía en la materia irradiada, la acción de los radicales libres oxidantes provoca un conjunto de reacciones químicas en diversas moléculas. El centro de estas reacciones químicas se encuentra localizado precisamente en una región muy cercana al sitio donde se producen las ionizaciones, denominada micro zona.

En el caso de las radiaciones de bajo LET se sabe que los electrones secundarios de baja energía tienen una participación destacada en los procesos químicos provocados en la materia biológica irradiada; estos electrones secundarios producen daños muy localizados y podrían ser los responsables de la mayor parte de la eficacia biológica en la irradiación de material orgánico. En un medio irradiado con fotones o electrones, se considera que los electrones secundarios participan con un 50% aproximadamente en la dosis [15, 16].

¹⁸ La termalización es el proceso por el cual las partículas (en este caso electrones) reducen su velocidad de manera gradual como consecuencia de los choques de éstos con átomos o moléculas del entorno, hasta llegar al equilibrio térmico.

La probabilidad de que un núcleo celular se vea afectado por la radiación incidente depende del número de trayectorias que lo alcancen. En el caso de rayos X de uso médico, se estima que una dosis de 1 Gy produce 130 trayectorias por núcleo, aproximadamente; en tanto que para una dosis de 7.5 mGy, se tiene una trayectoria por núcleo. Para rayos γ , se estima que una dosis de 1 Gy involucra aproximadamente 300 trayectorias por núcleo. En el caso de radio-226 o cesio-137, para una dosis de 3.3 mGy, se estima que se obtiene en promedio una trayectoria por núcleo. En el caso de la radiación proveniente de fuentes naturales, para una dosis anual de 1 Gy, se estima que el número de trayectos por núcleo en un año es menor que uno. En términos generales, cuando el resultado obtenido es en promedio una trayectoria por núcleo, se tiene que a 37% de los núcleos no los alcanza trayectoria alguna, pero otro 37% de los núcleos son alcanzados por una trayectoria, un 18% de los núcleos son alcanzados por dos trayectorias y un 6% de los núcleos son alcanzados por tres trayectorias [8].

Las radiaciones que atraviesan al cuerpo humano, como se mencionó anteriormente, ionizan o excitan a los átomos y a las moléculas de las células que lo componen. Estas perturbaciones afectan las fuerzas atómicas y moleculares, pudiendo provocar dislocaciones diversas y rompimientos moleculares. Cuando se presenta un rompimiento molecular se producen fragmentos ionizados que actúan como radicales libres; los fragmentos producidos pueden recombinarse con otras moléculas y conformar nuevas moléculas funcionalmente diferentes a las originales. En el caso del ser humano, el número de moléculas que puede sufrir alteración por efecto de una radiación es bastante elevado, así que también es elevado en número de moléculas nuevas que pueden conformarse.

La alteración en la composición celular puede provocar alteración en su funcionamiento. El grado de alteración del funcionamiento celular, incluida la muerte celular, depende de la dosis recibida. Algunos desgastes celulares pueden ser reparados por acción de la propia célula o por sustitución de las células afectadas en un tejido mediante la mitosis de otras células sanas. En otros casos, la afectación puede ser mayor y provocar que la célula se transforme en una célula anormal; las funciones sustanciales pueden ser alteradas y puede presentarse el caso en que la célula empiece a proliferar de manera no controlada; lo que conocemos como cáncer. Dependiendo del tipo y magnitud de alteración celular, algunas veces pueden identificarse de manera inmediata y otras, debido a la constante reproducción celular, sólo pueden identificarse a largo plazo. La proporción de casos en que la irradiación lleva a la muerte celular es considerable.

La destrucción celular, debido a la interacción de los iones y radicales libres con los demás componentes celulares, produce subsecuentes efectos nocivos que pueden afectar la salud del individuo. La posibilidad de regeneración o curación de un órgano del cuerpo humano dañado por radiación, depende, entre otras cosas, del número de células de este órgano que han sido destruidas por la radiación. Si este número es grande, el órgano muere y, según el caso, el individuo también.

Cada tipo de célula del cuerpo humano tiene diferente sensibilidad a la radiación. Las células más sensibles son aquellas que se reproducen más frecuentemente y las que poseen una mayor actividad química. Las células jóvenes son más sensibles que las células adultas. En la mitosis algunas fases son más sensibles que otras. Las células de la médula ósea, de los tejidos linfoides (ganglios, bazo, etcétera) y de los órganos genitales son las células que presentan mayor radio-sensibilidad. Las células de los músculos y de los huesos son menos radio-sensibles. Los efectos a nivel celular de las radiaciones pueden presentarse de manera inmediata o en forma retardada; estos efectos pueden ser de carácter somático o involucrar efectos genéticos.

Los iones y los radicales libres son responsables de los efectos biológicos. La cantidad de iones creados por una radiación ionizante está determinada tanto por el tipo de radiación como por la energía entregada al medio irradiado, expresada por unidad de masa; por cada gray de energía absorbida, se estima que aparecerán 2×10^{17} iones en un kg de masa de la materia irradiada. El efecto de los iones presentes depende tanto de su cantidad como de su distribución en el medio irradiado. Anteriormente, la exposición a las radiaciones ionizantes se medía por el total de iones presentes por unidad de masa de aire ionizado por la radiación, utilizando el roentgen como unidad de medida. Actualmente, se acostumbra medir la dosis absorbida, cuya unidad de medida, como ya se mencionó, es el gray (Gy), que corresponde a 1 J kg^{-1} . Para medir la dosis absorbida también se puede utilizar el rad, el cual corresponde a 0.01 J kg^{-1} ; esto es, $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$. Un gray de rayos X crea 200 000 iones en una célula (10^{-9} g), 20 000 en su núcleo y 2 000 en el ADN celular (10^{-11} g).¹⁹ Se necesita una caloría (4.18 J) para elevar en $1 \text{ }^\circ\text{C}$ la temperatura de 1 gramo de agua y se calcula que 30

¹⁹ La creación de un ion en un tejido orgánico necesita, *a priori*, una energía de 13.6 eV que sea transferida al medio. No obstante, algunas de estas interacciones sólo provocan una excitación electrónica o una transferencia de energía, sin crear una ionización; por lo tanto, se considera que para crear una ionización efectiva es necesario en promedio una energía de 34 eV.

Gy corresponden a la energía necesaria para elevar la temperatura del tejido irradiado en menos de 10^{-2} °C; sin embargo, los daños biológicos causados por una dosis de tal magnitud son de considerable importancia.

La interacción de las partículas de una radiación con los átomos y moléculas de la materia irradiada así como las trayectorias que describen estas partículas en el medio irradiado depende, como ya se ha mencionado, tanto del tipo de radiación como de la energía de las propias partículas incidentes. Por ejemplo, un electrón de 1 MeV alcanza a recorrer aproximadamente 3.4 mm de tejido, mientras que una partícula α (núcleo de helio) de igual energía recorre solamente 0.7 μm . Esto es, la densidad de iones a lo largo de la trayectoria del proyectil es bastante más grande para el caso de las partículas alfa.

Procesos radioquímicos

Los iones creados en el material irradiado esencialmente son iones moleculares, es decir, moléculas a las cuales la ionización ha arrancado un electrón de uno de los orbitales moleculares; el electrón libre resultante se denomina electrón no apareado. Una vez arrancado el electrón, la molécula ionizada permanece en un estado energético inestable, muy oxidante, tratando de encontrar el electrón que le falta: es un radical libre. La agresividad de un radical es inversamente proporcional a su tiempo de vida.

En cuanto al electrón arrancado, éste pierde su energía cinética inicial debido a las diferentes interacciones sucesivas con otros átomos; finalmente, se vuelve “acuoso”. Esto es, el electrón es atrapado por el polo positivo de las moléculas de agua y puede nuevamente modificar su soporte: $e^- + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{HO}^\cdot + \text{H}^\cdot$. En este último caso, H^\cdot es nuevamente un radical libre.

Con la radiación pueden crearse numerosos radicales libres y producirse la destrucción funcional de la molécula original. El efecto puede ser directo por ionización de la molécula biológica o indirecto por creación de radicales libres provenientes del agua. El tiempo de vida de los radicales libres es del orden de 10^{-9} s. En el agua pura, los radicales libres se pueden recombinar directamente o a través de una recombinación del tipo: $\text{H}^\cdot + \text{H}^\cdot + e^- \Leftrightarrow \text{H}_2$, produciendo una muy pequeña elevación de temperatura. Sin embargo, en presencia de oxígeno o de radio sensibilizadores oxidantes, los radicales libres pueden estabilizarse, integrándose a una forma generalmente oxidante que tiene un mayor tiempo de vida: hidroperóxidos O_2H^\cdot , superóxidos, agua oxigenada H_2O_2 , peróxidos ROO^\cdot . Este efecto oxidante es utilizado en radioterapia.

Macromoléculas y ADN

El ser humano se desarrolla a partir de un huevo compuesto de un espermatozoide y un óvulo, que posteriormente se divide en varias células. Si una de estas células germinales es modificada y no muere, una parte importante de las células del producto en formación van a estar alteradas o mutadas. El caso de células genéticas merece especial atención, pues el defecto provocado en ellas por la radiación, visible o no por el momento, puede transmitirse a los descendientes.

Con radiaciones de elevada energía las macromoléculas biológicas pueden transformarse en elementos ionizados. También suceden efectos indirectos sobre las macromoléculas, lo cual es frecuente con las radiaciones utilizadas en medicina: los radicales libres provenientes del agua o los electrones “acuosos” aprovechan su corto tiempo de vida para interactuar con macromoléculas; igual sucede con las formas oxidantes más estables, como el agua oxigenada. Se pueden presentar diversas situaciones; por ejemplo, la oxidación de un grupo R-H en R-OH, la formación de un puente R-R por dehidrogenación de grupos RH, o la saturación de un doble enlace.

Las macromoléculas afectadas pueden ser proteínas, cadenas peptídicas, azúcares, lípidos, enzimas, ácidos ribonucleicos, fosfolípidos de las membranas, etcétera. A este nivel, una alteración severa de alguno de sus componentes puede provocar la muerte celular.

Especial atención merece el ADN,²⁰ portador de la información genética; cualquier alteración de esta molécula, por mínima que sea, puede crear una patología grave. De hecho, el ADN es una molécula con una gran inestabilidad. Debido al carácter oxidante del metabolismo fisiológico, a los procesos inflamatorios y a los procesos de envejecimiento, el ADN permanentemente sufre lesiones espontáneas. Las lesiones espontáneas, casi en su totalidad, son neutralizadas por diversos mecanismos de reparación con que cuenta la célula normal.

El ADN puede sufrir, de manera espontánea o por causa de radiación, ruptura de la cadena, ruptura de puentes o alteración de un azúcar o de una base (por orden de sensibilidad: guanina, citosina, adenina y timina). (Tabla 2.)

²⁰ ADN: Ácido desoxirribonucleico.

Tabla 2. Tipo y número de lesiones del ADN causadas por rayos X o espontáneas

Tipo de lesión	Número de lesiones radio inducidas por 1 Gy en 1 segundo	Número de lesiones espontáneas por hora
ADN simple hebra	1 000	5 000
ADN doble hebra	50	< 1
Bases	2 000	3 000
Azucares	1 500	
Puentes ADN-ADN	50	
Puentes ADN-proteínas	100	

La tabla 2, resume lo que se observa para 1 Gy s^{-1} de rayos X. Esta dosis es elevada y su flujo también. Los valores estimados dependen del flujo utilizado; para un gasto de 1Gy por año o de 1 Gy por segundo la diferencia en el número de alteraciones es del orden de 10^7 .

En términos de frecuencias relativas de presencia de lesiones del ADN, se tiene que la razón (número de lesiones de doble hebra) / (número de lesiones de simple hebra) es bastante mayor para el caso de lesiones radio-inducidas; esto es, con la radiación las lesiones de doble hebra se presentan con mucho mayor frecuencia que las de simple hebra. Las diferentes lesiones del ADN por parte de las radiaciones ionizantes aparecen en la figura 2.

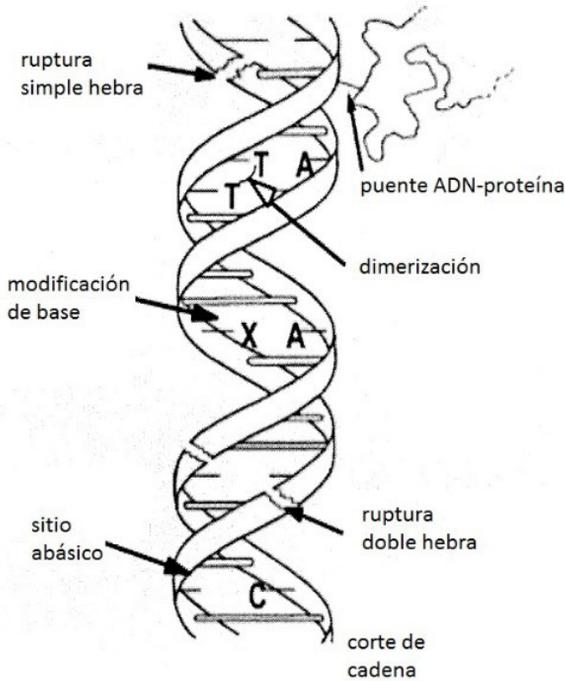


Figura 2. Las diferentes lesiones que aparecen en la cadena del ADN por parte de las radiaciones ionizantes.

En las moléculas de ARN²¹ o ADN, que transmiten de una generación a otra el mensaje proteico o genético, se encuentran el hidrógeno ¹H, el carbono ¹²C y el fósforo ³¹P. En la reproducción humana, al momento de la recombinación de la información genética contenida en el espermatozoide y en el óvulo, cada uno de estos tres átomos puede ser remplazado, respectivamente, por tritio ³H, carbono ¹⁴C y fósforo ³²P. Estos átomos son químicamente idénticos a los anteriores, pero son radiactivos. Si uno de ellos abandona su estado excitado, además de la radiación destructora que emite, se transforma en helio ³He, en nitrógeno ¹⁴N y en azufre ³²S, respectivamente. Como resultado, el mensaje genético transmitido es alterado, y con ello las funciones celulares correspondientes.

²¹ Ácido ribonucleico.

Mecanismos de reparación

No todos los radicales libres llegan a causar daño, algunos de ellos se pueden recombinar pasivamente. En la célula se encuentran varias enzimas que pueden actuar para lograr la inactivación de algunos radicales, tal es el caso de la enzima superóxido dismutasa que inactiva al ion superóxido; también están las peroxididasas y las catalasas que inactivan el agua oxigenada.

Existen también mecanismos de reparación celular cooperativos, sumamente eficaces, que sirven para corregir los errores de replicación del ADN y los errores ligados a la agresión de los radicales libres fisiológicos. Uno de los mecanismos clásicos en las lesiones de simple hebra consiste en la acción combinada de una enzima nucleasa que corta la cadena de cada lado de la lesión, con la acción de otra enzima ADN-polimerasa que reemplaza el pedazo dañado usando como patrón la hebra no dañada y la acción de una enzima ligasa que pone el pedazo en su lugar. En estos casos, en unos segundos, la propia célula logra reparar este tipo de lesión. Para las lesiones de doble hebra la situación es bastante más difícil, pues el modelo que sirve como referente ha desaparecido; frecuentemente este tipo de lesiones son letales.

Las anomalías genéticamente transmitidas son excepcionales con respecto al número de correcciones efectuadas a nivel celular; sin embargo, a dosis y flujos de radiación elevados se pueden saturar las posibilidades de corrección o verse comprometida la fidelidad de las mismas.

En sus mecanismos de replicación, la célula cuenta con la proteína p53 que le permite eliminar a las células sospechosas [17]. La célula cuenta con un dispositivo complejo mediante el cual evalúa la existencia de riesgo en dos momentos de la división celular: al final de la fase G1, antes de la replicación del ADN y al final de la fase G2, antes de la mitosis. La proteína p53 interviene, a través de fosfokinasas, centralizando gran cantidad de información para contestar de forma binaria: mitosis o apoptosis. Para ello, es necesario que el gen de la p53 no se encuentre alterado por un agente mutágeno, como sucede en algunas enfermedades hereditarias. El gen TP53 está alterado en aproximadamente 50% de los pacientes con algún tipo de cáncer.

A últimas fechas se ha encontrado que existen también efectos colaterales a la irradiación, denominados efectos “*bystander*” (o efectos de vecindad). A nivel experimental se ha descrito que después de que una muestra de material biológico ha sido irradiada, en forma unicelular, con un micro haz de radiaciones ionizantes, las células vecinas no irradiadas presentan manifestaciones moleculares y modificaciones del ADN que pueden conducir a la apoptosis.

Tales efectos han podido ser identificados tanto para células contiguas a la célula irradiada, como para células no contiguas [18]. Estos efectos sorprendentemente también han sido observados en células donde sólo el citoplasma ha sido irradiado y en células no irradiadas pero que han crecido en el medio de cultivo de las células irradiadas. Se considera que en estos efectos subyace una especie de señalización intercelular [19].

Unidades de dosis de radiación

Ya hemos mencionado que el efecto de ionización producido por una radiación que incide en una muestra de materia orgánica depende tanto del tipo de radiación y de su energía, como de las características de la materia orgánica que está siendo irradiada. Es importante contar con una unidad de medida estándar para la dosis, que considere todos los tipos de radiaciones sobre el cuerpo humano y su efecto sobre la salud; para ello, es necesario introducir dos factores.

El primer factor queda definido por el tipo de radiación considerada, denotado por W_R , denominado “factor de ponderación de radiación” (tabla 3); el segundo, corresponde a un factor de ponderación de tejido, denotado por W_T (tabla 4), que toma en cuenta el tipo de tejido que es irradiado. La suma de los factores W_T correspondientes a todos los tejidos del cuerpo debe ser 1. En el caso particular de la irradiación natural, la cual concierne al cuerpo humano entero, el factor de ponderación de tejido aplicado es de 1.

Tabla 3. Factor de ponderación por tipo de radiación[20]

Tipo de radiación	W_R
Fotones, electrones, muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas α , fragmentos de fisión y iones pesados	20
Neutrones	f

La función f mencionada en la tabla 3 es una función continua de la energía de los neutrones, dada por:

$$f = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-\frac{(\ln E_n)^2}{6}} & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.2e^{-\frac{(2 \ln E_n)^2}{6}} & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-\frac{(0.04 \ln E_n)^2}{6}} & 50 \text{ MeV} < E_n \end{cases}$$

Esto es, para el caso de una radiación de neutrones, el factor de ponderación depende de la energía de la radiación utilizada.

Tabla 4. Factor de ponderación por tipo de tejido [20]

Órgano	W_T
Médula ósea roja	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estómago	0.12
Mama	0.12
Restantes*	0.12
Gónadas	0.08
Vejiga	0.04
Hígado	0.04
Esófago	0.04
Tiroides	0.04
Piel	0.01
Superficies Óseas	0.01
Cerebro	0.01
Glándulas salivales	0.01

* Tejidos restantes (14 en total): glándulas suprarrenales, región extra torácica, vesícula biliar, corazón, riñones, ganglios linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, cuello uterino.

Con base en lo anterior se define el concepto de dosis equivalente, denotado por H_T , el cual corresponde a la dosis absorbida D (en gray) multiplicada por el factor de ponderación W_R . La unidad de medida para esta dosis es el sievert (Sv). También se define el concepto de dosis efectiva, denotada por E , la cual

corresponde a la sumatoria de todas las dosis equivalentes ponderadas en todos los órganos y tejidos del cuerpo humano que han recibido radiación; la unidad de medida de la dosis efectiva también es el sievert. La expresión $E = D \times W_R \times W_T$ permite presentar una exposición localizada como fracción de la dosis de exposición del cuerpo entero. Esto es, para caracterizar el riesgo, la dosis efectiva toma en cuenta tanto el tipo de radiación como el tipo de tejido irradiado; aquí se considera que el riesgo es de carácter acumulativo.

El daño producido a la salud humana por una radiación de un carácter específico es función del nivel de exposición. Particularmente, para dosis de exposición menores de 100 mSv, a la fecha, aún no se cuenta con datos concluyentes sobre los efectos producidos. Se sabe que para este nivel de dosis el organismo no es indiferente; sin embargo, por el momento, todavía no ha sido posible identificar las manifestaciones clínicas correspondientes a las alteraciones producidas.

El riesgo de que un feto presente malformaciones durante el primer trimestre de gestación se vuelve significativo a partir de dosis de 200 mSv de rayos X o rayos β^- . A partir de 500 mSv, pueden aparecer algunas manifestaciones clínicas. En hombres adultos, la dosis DL50 (dosis letal para 50% de los sujetos) es del orden de 6 Sv [21].

Las fuentes de radiación ionizante pueden ser naturales o artificiales. Estas fuentes pueden exponer al hombre a la irradiación externa, a la contaminación radiactiva externa (que se deposita sobre la piel) y a la contaminación radiactiva interna (vía cutánea, inhalación, ingestión). La exposición natural anual promedio es de 2.4 mSv. Las fuentes principales de exposición a radiación naturales son los rayos cósmicos (0.4 mSv), los núcleos radiactivos terrestres (0.4 mSv), lo que incorporamos de átomos (^{40}K , ^{14}C , ^3H) presentes en la naturaleza que entran en la constitución del organismo (0.4 mSv) y la inhalación de radón (1.2 mSv). A estas fuentes naturales de radiación hay que añadir las fuentes artificiales provenientes de las aplicaciones civiles médicas (del orden de 1.0 mSv por año), industriales (0.02 mSv por año) y militares (0.05 mSv por año).

Evidencia epidemiológica

A fin de estudiar los efectos que las radiaciones tienen sobre la salud humana se han llevado a cabo diversos estudios epidemiológicos en distintos lugares del mundo, con diferentes poblaciones. Por ejemplo, se han realizado diversos estudios con individuos sobrevivientes a las bombas atómicas de Hiroshima y

Nagasaki; se han realizado otros estudios con pacientes que han recibido radioterapia para enfermedades no cancerosas, con trabajadores de las minas de uranio, o con trabajadores accidentados en fábricas y laboratorios donde se manipulan productos radiactivos, entre otros. También se han llevado a cabo estudios con animales de laboratorio, etcétera.

Algunos de estos efectos son inmediatos y bien conocidos. En el caso de explosiones nucleares grandes, como lo fue la de 1945 en Japón, para 200 000 personas, o como lo fue la de Chernóbil para el equipo de servicio en la central nuclear, la muerte puede ocurrir inmediatamente.

Dosis menores de radiación también pueden tener efectos graves; el desarrollo de algún tipo de cáncer es una posibilidad, particularmente si la exposición es durante un periodo largo [10]. En la tabla 5 se muestran datos de muertes por leucemia, provenientes del estudio de sobrevivencia Life Span Study (LSS), llevado a cabo con las personas que resultaron irradiadas en Hiroshima y Nagasaki [22]. Claramente se observa que la irradiación, expresada en sieverts, correlaciona con la presencia de leucemias. A cada uno de los grupos de exposición a la radiación le corresponde un porcentaje de fallecimientos en exceso, el cual es mayor conforme mayor es la dosis: a mayor dosis, mayor el riesgo de desarrollar leucemia [23].

El riesgo o probabilidad de que un individuo irradiado desarrolle algún tipo de cáncer varía según sean las características de éste. Factores que influyen en el valor del riesgo son la edad, sexo, etcétera. En la tabla 6 se muestra la dependencia, respecto a la edad del riesgo de desarrollar cáncer de tiroides radio-inducido, para la población de Hiroshima y Nagasaki arriba mencionada. Se observa que el exceso de riesgo relativo para los niños de 9 años o menores es bastante más grande.

Tabla 5. Número de fallecimientos observados y previstos por leucemia, según dosis efectiva en la cohorte Life Span Study de Hiroshima y Nagasaki [22]

Dosis (en mSv)	Fallecimientos observados	Fallecimientos previstos	% de fallecimientos en exceso
5 - 200	70	60	14
200 - 500	27	14	48
500 - 1000	23	6	74
> 1000	56	9	84

Estudios realizados con la población de Chernóbil, para este mismo tipo de cáncer, confirman dramáticamente el hecho de que el factor edad de los individuos al momento de recibir la irradiación juega un papel fundamental [24].

Tabla 6. Exceso de riesgo relativo (ERR) de cáncer de tiroides radio-inducido, según edad, para la cohorte Life Span Study de Hiroshima y Nagasaki [22]

Edad (en años)	Casos observados	ERR
0 - 9	33	9.5
10 - 19	51	3.0
20 - 39	75	0.3
> 40	66	0.2

En 1957, el profesor Edward B. Lewis, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), genetista y Premio Nobel en Medicina en 1995, publicó su trabajo sobre la asociación entre la exposición a radiación ionizante y leucemia [25]. Este trabajo, titulado “Leukemia and Ionizing Radiation”, ha sido ampliamente citado por haber realizado una de las primeras estimaciones del riesgo de leucemia debido a radiaciones, con base en datos de exposición y enfermedad de individuos expuestos a radiaciones de alta energía. Este estudio consideró individuos sobrevivientes a las bombas atómicas, adultos sobrevivientes que habían recibido radioterapia para espondilitis anquilosante entre 17 y 35 años, niños irradiados para el tratamiento del crecimiento del timo y radiólogos norteamericanos expuestos a radiaciones durante varios años. Con base en esta información, se obtuvo una curva lineal dosis-respuesta y se estimó un riesgo anual del orden de 2×10^{-4} por cada Gy.

Este estudio epidemiológico llegó en pleno debate sobre los efectos en la salud humana de las lluvias radiactivas de los ensayos nucleares [26]; mostró la posibilidad de que las lluvias radiactivas podían provocar leucemia en los humanos. Mucho se ha discutido y mucho se ha criticado este trabajo, pero no tanto por la estimación del riesgo de leucemia que lleva a cabo, sino por la curva lineal dosis-respuesta obtenida. Para los genetistas, la linealidad obtenida es coherente con los resultados observados entre dosis de radiación y mutaciones en la *Drosophila*, para dosis no mayores a 0.25 Gy [27]. Este resultado,

que concuerda con la hipótesis de Muller en cuanto a que el cáncer resulta de mutaciones somáticas [28], no fue aceptado en los medios científicos ni por los médicos de la época. En esos años, un gran número de científicos consideraba que existía un valor umbral debajo del cual las radiaciones no representaban peligro alguno. Vale la pena señalar que Lewis no encontró evidencia alguna sobre la existencia de dicho umbral; por su parte, los científicos y médicos de la Atomic Energy Commission (AEC) nunca fueron capaces de proponer uno [26].

La hipótesis de Muller, relativa a que en el cáncer en los humanos subyacen las mutaciones somáticas [28], establece un posible mecanismo para explicar la razón por la cual la incidencia de leucemia tiene un comportamiento lineal respecto a la dosis. Sin embargo, para los oponentes, las radiaciones debían comportarse como cualquier sustancia tóxica en el organismo, con presencia de mecanismos efectivos para aniquilar pequeñas cantidades de toxinas [29].

Por su parte, Lewis también consideró la posibilidad de que una parte de la incidencia “espontánea” de leucemia pudiera ser causada por la radiación natural de fondo; utilizando datos epidemiológicos publicados por Clark y MacMahon sobre leucemia en la población blanca de Brooklyn [30], estimó un riesgo anual de leucemia del orden de 10×10^{-4} por cada Gy. En un trabajo posterior [31], Lewis también demostró que las lluvias radiactivas, en particular las de yodo-131, a través la contaminación de la leche, estaban asociadas con un aumento de la irradiación de tiroides en los niños.

Adicionalmente, en 1969, R.W. Miller presentó las observaciones realizadas hasta esa fecha, por la Comisión Americano-Japonesa, sobre los efectos a largo plazo de las radiaciones nucleares en la población de Hiroshima y Nagasaki [32]. Los sobrevivientes irradiados presentaron una frecuencia de anomalías cromosómicas mayor que la que presentaron los no irradiados; en las personas que tenían 30 años o más al momento de la explosión y que fueron irradiadas, 61% presentó estas anomalías; en los sobrevivientes expuestos también se observó un incremento en la presencia de varios tipos de leucemia y cáncer de tiroides, así como un incremento en la tasa de mortalidad. En los niños que fueron irradiados *in utero*, es decir, niños que nacieron de madres que se encontraban embarazadas al momento de la explosión, adicional al incremento en la frecuencia de anomalías cromosómicas, se observó disminución en algunas medidas antropométricas; en particular, se observó disminución en el diámetro craneal, asociado a retraso mental. En los niños concebidos después de las explosiones atómicas, de padre o madre irradiados durante la explosión, no se observaron efectos genéticos o citogenéticos a causa de la irradiación de los padres. Es importante señalar que en experimentos realizados con animales,

se ha observado la presencia de una gran variedad de malformaciones congénitas por irradiación de la madre.

Desde la década de los ochenta a la fecha se han dado a conocer un gran número de investigaciones epidemiológicas, llevadas a cabo en distintos países, sobre el riesgo de adquirir leucemia o algún tipo de cáncer en población infantil que vive en zonas cercanas a centrales nucleares o plantas de reprocesamiento de combustible nuclear [33-46]. En fecha reciente, 2008, se publicaron los resultados de un estudio realizado en Alemania para investigar acerca de este problema, denominado Estudio KIKK [45, 46]. Este estudio consideró datos del periodo 1980-2003, un total de 24 años; en este periodo las 20 plantas nucleares alemanas estuvieron en actividad. El estudio tomó en cuenta la distancia entre las casas de la localidad y la planta nuclear correspondiente. Como resultado se encontró que los riesgos de cáncer y de leucemia en población infantil fue mayor conforme mayor fue la proximidad de la vivienda a la planta nuclear; para los niños menores de 5 años que vivían en un radio de 5 km alrededor de las centrales nucleares, la tasa de incidencia de cánceres presentó un incremento de 60% y la de leucemia de 117%, aproximadamente.

En un artículo publicado en 1999, López-Abente *et al.*, estudiaron, para el periodo 1975-1993, la mortalidad por tumores hematológicos en las ciudades próximas a siete centrales nucleares y cinco plantas de procesamiento de uranio de España [47]. A pesar de no encontrar asociación con la mortalidad debido a leucemia cerca de las centrales, encontraron un exceso de riesgo en la vecindad de dos plantas de procesamiento de uranio. Encontraron también un exceso de riesgo de mortalidad debido a mieloma múltiple cerca de la planta nuclear de Zorita, España.

Por su parte, en 2003, Silva-Mato *et al.*, mostraron un exceso de cánceres cerca de las plantas de Zorita y Trillo (España), con una dependencia lineal entre el riesgo y la proximidad de las casas a la central nuclear [48].

Recientemente, en un artículo de revisión que toma los resultados de 63 años de estudio y el seguimiento de una población de más de 200 000 personas, se informó sobre la presencia de un exceso de cataratas, enfermedades de la tiroides, complicaciones vasculares, cardíacas, pulmonares y digestivas en la cohorte japonesa estudiada; cabe mencionar que más de 40% de esta población aún sigue viva; también se informó que fue observado un envejecimiento acelerado de los tejidos en individuos de esta cohorte. En los casos en que la exposición fue menor, las complicaciones tardaron más tiempo en manifestarse [49].

Efectos deterministas y efectos estocásticos

Cuando una célula es lesionada por la radiación y las moléculas de ácido nucleico son afectadas pueden desencadenarse diversos procesos. Una posibilidad es que la célula proceda a una restauración integral, superando el daño; otra posibilidad es que se provoque la muerte celular; una tercera posibilidad es que se produzca una mutación. El caso de la muerte celular por radiación, corresponde a una situación en la que existe un valor umbral de la dosis, a partir del cual el efecto siempre se presenta; el caso de las mutaciones corresponde a situaciones en las que no existe un valor umbral mínimo. La figura 3 muestra, de manera esquemática, estas diferentes posibilidades.

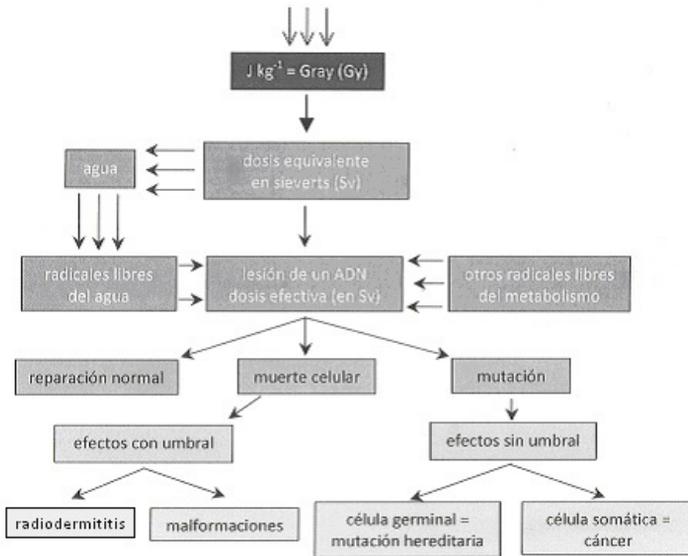


Figura 3. Diagrama de las consecuencias de una irradiación [adaptado de 49].

Efectos deterministas

En los efectos de carácter determinista de las radiaciones ionizantes sobre la salud de los individuos, estamos seguros de que siempre se obtienen los mismos efectos conocidos e idénticos de un sujeto a otro; estos efectos se presentan una vez que hemos rebasado una cierta dosis mínima de radiación. Por lo general,

el valor umbral para que se presente un efecto determinista corresponde a una dosis de 500 mGy aproximadamente; dependiendo del tejido irradiado, este valor puede variar ligeramente.

Los efectos deterministas involucran la muerte en un número considerable de células, lo cual compromete la función que realizaban. Una vez rebasado el valor umbral, la intensidad de las manifestaciones depende de la dosis. Por lo general, la manifestación del daño aparece algunos días después de la exposición (excepto para el tejido cristalino en el ojo); este plazo depende de la renovación celular; las células más jóvenes son las primeras afectadas y el efecto se manifiesta cuando las células maduras y más resistentes han desaparecido.

Efectos estocásticos

No todos los efectos de la radiación sobre la salud tienen carácter determinista, existe un número importante de efectos que tienen un comportamiento estocástico. En esta categoría de efectos estocásticos, unos actúan a nivel somático, ya sea de manera inmediata o retardada; en tanto que otros actúan a nivel genético, teniendo efectos hereditarios.

Los efectos somáticos, ya sea en el ser humano o en animales, pueden corresponder al efecto causado por irradiación total o parcial del cuerpo o por irradiación de un órgano particular. Según sea la función del órgano lesionado y la magnitud de ésta, se pueden inducir efectos en otros órganos.

Efectos somáticos en órganos y tejidos del cuerpo humano

Sangre y médula ósea: los glóbulos rojos proveen a las células de nutrientes, de oxígeno y remueven los desechos; se forman en la médula ósea de los huesos. Los glóbulos blancos combaten las infecciones y se forman en la médula ósea, en los ganglios y en el bazo. Los glóbulos blancos son los primeros afectados por las radiaciones, su número disminuye conduciendo a leucopenia, quedando el cuerpo vulnerable a las infecciones. Si la irradiación es mayor, después de algunas semanas, los glóbulos rojos también disminuyen en cantidad, conduciendo a una situación de anemia que conlleva un debilitamiento global de la persona irradiada. Las plaquetas en sangre también son afectadas, su número disminuye y de esta manera se perturban los procesos de coagulación.

Sistema linfático: la linfa baña a los tejidos y sirve de intermediario entre la sangre y las células. Este líquido es transparente y alimenta diversas glándulas,

entre ellas el bazo. Después de una irradiación estas glándulas pueden presentar signos de hemorragia e infección.

Tubo digestivo: las células del tubo digestivo secretan sustancias que transforman a los nutrimentos, de manera que éstos puedan pasar al torrente sanguíneo. Cuando las células del tubo digestivo se lesionan pueden presentarse náuseas y vómitos; en caso de desprendimiento de estas células, se presentan úlceras. Si existe irradiación importante del tubo digestivo se presenta infección, falta de absorción de nutrimentos y deshidratación por diarrea. En los casos no controlados, se llega a la muerte del individuo irradiado.

Órganos genitales: la irradiación de los órganos genitales puede también tener efectos somáticos. En particular, una irradiación de 1.50 Sv produce esterilidad.

Sistema nervioso: la médula espinal y los nervios son muy resistentes a las radiaciones, pero el cerebro es mucho más sensible. La irradiación del cerebro afecta en primer lugar su función; las lesiones pueden afectarlo ya sea de manera directa o por falta de irrigación sanguínea, con las secuelas correspondientes.

Glándula tiroides: esta glándula, ubicada en la región anterior de la base del cuello, secreta las hormonas tiroxina (T4) y triyodotironina (T3), las cuales participan en el control del metabolismo basal, regulan la función de los órganos, la producción de energía y calor, la frecuencia cardíaca, el periodo menstrual, la memoria, etcétera. La hormona tiroxina es esencial para el crecimiento y el desarrollo del individuo. La glándula tiroides contiene alrededor de 65% de yodo. Esta glándula es bastante resistente a las radiaciones externas, pero puede ser dañada en caso de inhalación de yodo radiactivo (I^{129} , I^{131}). Las lesiones en esta glándula provocan una disminución de la producción de tiroxina, lo cual a su vez provoca una alteración en el metabolismo. Los tejidos musculares no reciben el oxígeno que necesitan y, con ello, el individuo queda en un estado de salud afectado.

Ojos: el cristalino de los ojos es muy sensible a las radiaciones, la retina es menos sensible. El organismo no tiene capacidad de reemplazar a las células del tejido cristalino dañadas por la radiación, por tanto, cuando son afectadas, después de un tiempo de latencia, pierden su transparencia, produciéndose cataratas; éste es un efecto somático retardado, el cual se provoca más fácilmente en los jóvenes que en los ancianos.

Pulmones: los pulmones son órganos que no son muy afectados por la radiación externa. Como en el caso de la tiroides, la irradiación interna por polvos o gases es más agresiva.

Hígado, vesícula, riñones: como en el caso anterior, el hígado, los riñones y la vesícula biliar son más sensibles a la irradiación interna. Algunos isótopos ra-

diactivos pueden concentrarse en el hígado, provocando hepatopatías hasta en un 66%, en edades tempranas.

Huesos: la médula ósea, como ya se comentó, es muy sensible a las radiaciones; por su parte, las células y las fibras óseas son relativamente más resistentes. Cuando los isótopos radiactivos, como el estroncio y el plutonio, llegan a la médula o al tejido óseo pueden presentarse, después de varios años, lesiones importantes.

El estudio de los efectos somáticos tardíos provocados por irradiación es complejo, debido precisamente a la dificultad que existe para establecer con certeza una relación causa-efecto, considerando el largo periodo que transcurre. Tal es el caso de algunos tipos de cáncer de piel, de pulmones, de huesos y de la médula ósea, que involucran periodos de latencia de varios años.

En un inicio, cuando se empezaron a estudiar los efectos tardíos de las radiaciones sobre la salud humana, únicamente se consideraban los cánceres y las enfermedades hereditarias. En las últimas décadas, muchas investigaciones han mostrado nuevos efectos, antes no considerados. Ahora se sabe que también pueden presentarse enfermedades no cancerosas; por ejemplo, tanto en sobrevivientes a explosiones atómicas, en trabajadores de la industria nuclear como en pacientes que han recibido radioterapia se ha logrado observar la presencia de algunas enfermedades circulatorias como trombosis y derrame cerebral [50-52].

A la fecha, también se ha observado la presencia de procesos fisiológicos que involucran efectos “*bystander*”, ya antes mencionados, mismos que se caracterizan por la aparición de una respuesta por parte de las células no irradiadas que se encuentran en una vecindad de las células irradiadas, etcétera. Sin duda alguna, el asunto de los efectos tardíos que las radiaciones ionizantes tienen sobre la salud es sumamente complejo y todavía hay muchas cosas por decir a este respecto. Por fortuna, éste es un tema que en la actualidad preocupa a la comunidad científica y existen esfuerzos diversos dirigidos a profundizar en el entendimiento de los procesos biológicos que subyacen en los efectos tardíos de las radiaciones ionizantes sobre la salud [53].

Dosis bajas

El estudio de los efectos tardíos de las radiaciones ionizantes sobre la salud es particularmente importante en el caso de bajas dosis de radiación [19]. A la fecha todavía no existe una explicación única sobre estos efectos. En experi-

mentos con cultivos de células de fibroblastos de humanos, sujetos a bajas dosis de radiación de partículas α , se ha logrado mostrar que el efecto tardío de la radiación depende de la comunicación intercelular [54-56]. En función del tipo de células y condiciones experimentales, el daño producido por la radiación puede amplificarse o incluso suprimirse, dependiendo de la activación de mecanismos de protección [57-59]. Actualmente se investiga sobre estos mecanismos de comunicación intercelular a través de citoquinas y otras especies reactivas oxigenadas [60-65].

Varios de los efectos que se presentan a dosis bajas de radiación, además de su carácter retardado, tienen un comportamiento aleatorio, con la característica de que la probabilidad de aparición del daño es directamente proporcional a la dosis. Se estima que, por ejemplo, para dosis débiles la probabilidad de aparición del daño es del orden de 10^{-5} . Por ello, los efectos que comparten estas dos características, retardo y aleatoriedad, presentan mayores dificultades para su medición; dichos efectos sólo se evidencian en forma estadística a partir de amplios estudios epidemiológicos.

En animales se ha logrado observar que los efectos a largo plazo corresponden a mutaciones que el organismo ha dejado pasar. En el caso de células germinales, las mutaciones son heredadas a la descendencia; en el caso de células somáticas, estas mutaciones favorecen la presencia de oncogenes. A la fecha, en el humano, no se han observado anomalías cromosómicas radio-inducidas. Por tanto, es posible pensar que en el humano pudieran existir mecanismos de rechazo que impiden su establecimiento o que estas mutaciones son necesariamente letales.

Diversos estudios han mostrado la aparición de leucemias y de tumores malignos en individuos después de varios años de haber sufrido la irradiación. Sin embargo, en la población afectada por el accidente de Chernóbil, por ejemplo, a sólo cinco años de haber ocurrido la catástrofe, se logró constatar la presencia de cáncer de tiroides; la precocidad de este hecho sorprendió a la comunidad científica. Relacionado a estos hechos, con base en un modelo lineal probabilidad/dosis sin umbral, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) afirma que los cánceres han aumentado en un 5% por sievert.

Actualmente, con las técnicas moleculares recientes, es posible estudiar las anomalías que presenta el ADN; tal es el caso del Método FISH (Fluorescent In Situ Hybridization) y de algunas otras técnicas proteómicas. En particular, se ha observado que unas horas después de que se ha llevado a cabo la irradiación, se presenta la activación o supresión de algunas expresiones genéticas, incluido el caso de pérdida de material genético. Para dosis moderadas, del

orden de 1 mGy, se ha observado *in vitro* la presencia de inestabilidad genómica radio-inducida, la cual se transmite de célula a célula durante decenas de generaciones. Este efecto, de estar presente en humanos, significaría “padres expuestos, hijos en riesgo”. Datos recientes indican que para dosis bajas, del orden de decenas de mGy, los detectores específicos de las lesiones del ADN no se activan y, por tanto, las lesiones no son corregidas por los procesos celulares de reparación; las células en esta condición presentan mayor letalidad.

En relación con el efecto que las dosis bajas de radiación tienen en la salud humana, los científicos se han preguntado sobre la existencia de un valor límite de dosis, debajo del cual se podría considerar que los efectos de las radiaciones ionizantes son nulos o, al menos, despreciables o indiscernibles de otras causas [66, 67]. El problema es complicado, debido al hecho de que permanentemente todos estamos sometidos a la radiactividad natural. Linus Pauling [68], quien fuera Premio Nobel de Química en 1954, estimó que la radiactividad natural es la causa de 10% de las mutaciones genéticas que subyacen en las malformaciones congénitas físicas o alteraciones mentales. Según esto, por tanto, puede entonces considerarse que cualquier dosis recibida necesariamente tiene efectos biológicos.

Varios grupos de investigadores han dedicado sus esfuerzos a estudiar este problema, obteniendo resultados muy diversos y, a veces, incluso contradictorios [69].

Algunos investigadores han sugerido que las bajas dosis de radiación producen pocos radicales libres, que en cantidad son mucho menos de los que normalmente participan en el metabolismo; en consecuencia, consideran que no tienen tanto efecto [70, 71]. Esta afirmación apoya la hipótesis de que la naturaleza de los daños debidos a los radicales libres del metabolismo, son equivalentes a los daños causados por los radicales libres creados por las radiaciones y que, por tanto, basta comparar la cantidad de radicales libres presentes, para poder comparar los daños.

Sin embargo, Gofman [72], apoyándose en los trabajos de Ward [73-75], señala que la transferencia de energía que produce la radiación ionizante, incluso a bajas dosis, es del orden de 60 eV, situación no presente en la célula, pues los procesos bioquímicos normales de la célula involucran una transferencia del orden de 10 eV o menos. En consecuencia, considera que los daños producidos al ADN por la radiación ionizante son de carácter distinto a los daños rutinarios que sufre el ADN y que la célula no tiene capacidad de repararlos.

Al haber radiación incidente en alguna parte del cuerpo humano, necesariamente existen partículas que inciden o atraviesan las células y/o a sus nú-

cleos. Por mínima que sea esta dosis, y por mínima que sea la tasa de dicha dosis, siempre existirá un número mínimo de trayectorias que incidan o atraviesen a la célula, por unidad de tiempo. Por tanto, por mínima que sea la probabilidad de que una partícula incidente ionice a una molécula, no se puede asegurar la ausencia de ionizaciones. La presencia de ionizaciones significa presencia de electrones primarios y radicales en el organismo, producto de la irradiación, que actúan en los procesos celulares. Las alteraciones moleculares no le son ajenas al organismo; la célula cuenta con mecanismos de reparación molecular, pero éstos no son infalibles. De hecho, se sabe que la presencia de cáncer está asociada a alteraciones moleculares que el sistema de reparación del organismo no corrige. A la fecha, no existe teoría alguna que asegure que todas las alteraciones moleculares producidas por radiación sean reparadas; tampoco existe teoría alguna que garantice que toda alteración molecular producida por radiación y que no sea corregida es inocua. Por tanto, no existe dosis de radiación que, *per se*, no cause daño. Dicho de otra forma, la única opción de garantizar que existe un valor umbral para la dosis de radiación debajo del cual no se presenta daño, es asegurar que el organismo se encarga de reparar todas las alteraciones moleculares producidas por la radiación en el cuerpo humano y, en caso de existir alteraciones no reparadas, dichas alteraciones no involucran posibilidad de daño alguno en los procesos biológicos.

En situación extrema se pueden considerar todas las alteraciones moleculares asociadas a cáncer; a la fecha, no existe teoría alguna que pueda establecer, en todos los casos conocidos, cuáles de estas alteraciones provienen por exposición a radiación y cuáles provienen de otras fuentes [10].

Si prevalece la idea de que existe un valor umbral de radiación debajo del cual no hay peligro para la salud, idea que por lo demás tiene algo de respaldo [76, 77], entonces podrían incrementarse las exposiciones –voluntarias o no– de humanos, y con ello se incrementaría la incidencia de algún tipo de cáncer en caso de que dicha idea fuera falsa. Esto es, la apuesta a la existencia de un valor umbral sin duda es, a todas luces, peligrosa.

Desde Boveri en 1914 [78] hasta la actualidad, la opinión científica mayoritaria sostiene que el cáncer se produce por daños al material genético de la célula.

Con la irradiación de una célula, como ya fue mencionado anteriormente, existe la posibilidad de que una hebra de la doble hélice del ADN se rompa. Se sabe que la célula posee una alta eficiencia para la reparación de los daños presentes en una sola hebra de la doble hélice. Se estima que cada día, por ejemplo, cada célula enfrenta por lo menos 10 000 daños inducidos por

fuentes químicas (incluyendo los causados por radicales libres producidos por la propia célula). En este tipo de casos, todo se presenta como si no hubiera daño alguno; los mecanismos de reparación actúan para reparar el daño y no se presentan consecuencias.

Una situación más complicada se establece cuando se presenta el rompimiento simultáneo de las dos hebras de la hélice del ADN, lo cual puede ser provocado por radiaciones ionizantes que tienen la fama de los agentes tóxicos denominados quebradores de cromosomas (*chromosome-breaker* en inglés).

Diversos investigadores han realizado experimentos para medir la velocidad de reparación de daños del ADN; se ha estudiado tanto el caso en que sólo una hebra es dañada, como el caso en que el daño afecta a las dos hebras simultáneamente [79-84]. Se estima que para daños causados por radiación, con dosis altas, del orden de 1 Gy, el proceso de reparación se lleva a cabo en menos de 8 horas; la mayor parte de la reparación sucede en las primeras dos horas. Incluso para dosis iguales o mayores que 5 Gy, el sistema de reparación no deja de actuar. Por tanto, la presencia de daños residuales no parece ser la falta de acción del mecanismo de reparación o la falta de tiempo para reparar, más bien parece ser una incapacidad del sistema de reparación para arreglar todos los daños producidos en las moléculas genéticas.

Desde la década de los ochenta se llevaron a cabo estudios importantes sobre los mecanismos y posibilidades de reparación de las moléculas de ADN. A este respecto, en 1987, Kellerer [11] comentó sobre un tipo de lesión radio inducida difícil de reparar: “*Un ejemplo sencillo sería el de rupturas vecinas en cada una de las hebras opuestas del ADN*”. En 1988, Brackenbush y Braby [85] señalaron: “*Ya que la mayoría de las células reparan los daños de radiación en un tiempo característico de algunos minutos a algunas horas, es evidente que en los daños no reparables o mal reparados deben de dominar los efectos de radiaciones de bajo LET a baja tasa*”. En ese mismo año, Feinendegen *et al.* [86], confirmaron, respecto a células irradiadas, que “*no todas las dobles rupturas son totalmente reparadas*”. Dada la importancia del tema, en esas fechas el problema también fue abordado por el Comité de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) [87].

La presencia de una anomalía cromosómica radio inducida en una célula no necesariamente provoca su muerte, ni impide que se lleve a cabo la mitosis; en esta situación, cuando la célula se divide, el daño cromosómico se replica en las células descendientes. En los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki a la bomba atómica, 40 años después del bombardeo, se ha observado la presencia de anomalías cromosómicas; con la particularidad de que a mayor dosis de radiación que fue recibida, mayor frecuencia de anomalías presentes

[88, 89]. Adicionalmente, en estudios realizados con sangre que ha sido irradiada en laboratorio, humana y animal, a partir de dosis de 20 mGy se ha podido detectar la presencia de cromosomas no reparados o mal reparados [90-92].

En el caso de bajas dosis de radiación a baja tasa, también se ha observado que pueden provocar daños. En un estudio en indígenas de Alaska que habían sido irradiados por lluvia radiactiva, con dosis del orden de 0.8 mGy durante 10 años, Kohlhoff reportó haber encontrado daño cromosómico [93]. Hallazgos análogos se han encontrado en estudios realizados en obreros de astilleros nucleares que recibieron menos de 50 mGy por año [94] y en varias poblaciones donde la radiación natural está arriba del promedio [95, 96].

El tema no se agota aquí, ya desde el último cuarto del siglo pasado se cuenta con un buen número de investigaciones epidemiológicas sobre los efectos que los diferentes tipos de radiación tienen sobre la salud humana; estos estudios, en conjunto, consideran radiaciones con muy distintas características en diversas poblaciones y bajo diferentes condiciones de exposición; el espectro de estos estudios es amplio, en ellos se incluye el estudio de los efectos de los rayos γ de alta energía, de los rayos X de uso médico, etcétera; diversas poblaciones humanas de fetos, niños, adolescentes, mujeres jóvenes, adultos, etcétera; y diversas condiciones de exposición con dosis agudas, lentas o acumuladas. En todos estos casos se ha encontrado efecto [97-112].

En un estudio realizado en mujeres que habían recibido bajas dosis de radiación, debido a que se les habían practicado fluoroscopías de pecho en repetidas ocasiones, se observó la presencia de cáncer radio-inducido. Tomando en cuenta el lapso de tiempo que transcurrió entre un examen y otro, puede considerarse que fue suficiente para que los mecanismos de reparación actuaran. Se estima que estas mujeres recibieron, en cada examen, una dosis que les produjo aproximadamente entre 6 y 10 trayectorias de electrones por núcleo celular, lo cual, para el caso de 6 trayectorias, corresponde a una dosis estimada entre 20 y 50 mGy. Se considera que los casos de cáncer observados en estas mujeres se debieron a una alta dosis acumulada [100, 101].

Actualmente existe consenso entre científicos de gran reputación en torno a que no es posible establecer un valor umbral de radiación, por debajo del cual se pueda asegurar que no se presenten daños a la salud en los individuos; esto es, ninguna dosis es inofensiva [113, 114]. Se sabe que las dosis de radiación bajas producen mucho más daño del que inicialmente se pensaba. La exposición prolongada a la denominada radiación de bajo nivel puede causar problemas graves y perdurables a la salud, tanto en las personas expuestas como en su descendencia [113].

Una cuestión fundamental a definir en esta discusión es, sin lugar a dudas, qué significa dosis baja. A este respecto, primero recordemos que el sievert (Sv) es una unidad de medida para la dosis equivalente, la cual toma en cuenta la efectividad del tipo de radiación en la producción de ionizaciones; esto es, la dosis equivalente es la dosis absorbida, medida en gray (Gy), ponderada (multiplicada) por el factor de peso correspondiente al tipo de radiación recibida.

Se estima que la radiación natural de fondo, que incluye rayos cósmicos, radiactividad telúrica y radiación interna, tiene un valor promedio de 2.4 mSv por año; en algunos lugares geográficos específicos este valor puede llegar a ser cinco veces mayor [115]. Por otro lado, se sabe que las dosis anuales mayores a 150 mSv producen efectos severos en la salud humana, que pueden observarse de manera inmediata. Por tanto, las dosis de este orden de magnitud son consideradas como dosis elevadas.

Con base en los valores arriba mencionados, se considera que una dosis de radiación ionizante es baja si su valor anual, expresado en sievert, se encuentra entre 2.4 mSv y 150 mSv. El debate sobre este asunto no ha terminado, pues se sabe que algunas dosis de radiación que se encuentran en este rango no producen efectos notorios e inmediatos en la salud humana; pero que los daños causados sobre la salud humana no sean observables de manera inmediata no significa que no existan. Grupos de investigadores han insistido en la necesidad de estudiar, con métodos apropiados, los efectos a largo plazo producidos por estos niveles de radiación.

Existen muy pocos trabajos publicados en cuanto a los efectos que la radiación natural de fondo tiene sobre la salud. Una de las razones principales es que se ha considerado que como ésta radiación siempre ha existido y que la vida se ha desarrollado en este contexto, entonces no debe de tener efecto alguno. No obstante, existen algunos estudios epidemiológicos realizados en diversas zonas donde existe una fuerte radiactividad natural, en particular en Brasil [116], en China [117], en India [118, 119] y en Irán [120, 121]. Algunos de los resultados de estos estudios son contradictorios y todavía no cuentan con un sustento epidemiológico adecuado; se menciona, por ejemplo, un exceso de casos de síndrome de Down en India y en Brasil, así como la presencia de anomalías genéticas y aberraciones cromosómicas. Sin embargo, algunos de estos estudios no cuentan con un tamaño de muestra suficiente que les permita que los resultados sean más concluyentes. En una revisión de los trabajos realizados sobre estas diferentes regiones, se concluye de manera contundente que “cualquier aseveración sobre estudios de los efectos protectores o nefastos de la exposición a las radiaciones en las regiones de alta radiactividad natural es

prematura” [122]. A pesar de esto, algunos hablan del bien que nos puede hacer vivir en estas regiones [123-125].

Un estudio realizado en Bavaria estimó que el riesgo de cáncer debido a la radiación natural es del orden de 0.24/Sv, mayor a lo que actualmente considera la ICRP (0.05/Sv) [126]. Otro estudio realizado en Gran Bretaña mostró que el efecto de la radiación natural en la incidencia de leucemia en niños podría ser del orden de 15 a 20% [127].

En su Informe de 2006, el Comité de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) abordó el asunto de los efectos tardíos que tienen las radiaciones ionizantes sobre la salud humana. En este informe no se aclara el problema, más bien se generan grandes incertidumbres sobre el asunto. Bajo estas circunstancias, y considerando que es la salud humana la que puede estar comprometida, más vale conducirnos bajo el principio de precaución [128].

El Modelo Lineal sin Umbral (LNT, por sus siglas en inglés: *Linear No-Threshold*) permite estimar el riesgo a la salud asociado a una radiación ionizante; en este modelo se considera que: *i*) cualquier dosis, por pequeña que sea, conlleva un riesgo, *ii*) el riesgo por unidad de dosis es constante y aditivo, esto es, se incrementa con la dosis y *iii*) la variable más importante es la dosis, comparada con las otras variables biológicas [129].

Los riesgos de cáncer causados por dosis de radiaciones ionizantes del orden de 1 mSv, o menos, son demasiado pequeños y difícilmente pueden ser estimados directamente a partir de datos epidemiológicos [130]. El modelo LNT permite estimar los riesgos de cáncer para los casos en que la dosis se encuentre en el rango de dosis bajas; esto es, para dosis entre los valores 2.4 mSv y 150 mSv. Por tanto, mediante extrapolación lineal, pueden obtenerse estimaciones del riesgo correspondiente a dosis bajas de interés, menores a 2.4 mSv.

Uno de los problemas mayores para la detección de las alteraciones celulares es la poca sensibilidad de las técnicas moleculares existentes. Actualmente se están desarrollando técnicas más sensibles para tratar de determinar los daños más serios causados por la radiación sobre el ADN; particularmente, interesa detectar el daño causado por la ruptura de doble hebra del ADN (DSB, por sus siglas en inglés: *double strand break*).

En una investigación reciente, Brenner *et al.* [131], hicieron una revisión de varios trabajos con la intención de clarificar la problemática relativa a bajas dosis de radiación; en la tabla 7, se muestran los valores de radiación estimados para algunas actividades comunes, que estos autores señalan.

Tabla 7. Dosis de radiación correspondiente a diversas actividades [131]

Exposiciones típicas en la sociedad	Dosis promedio individual (mSv)
Vuelo ida y vuelta Nueva York - Londres	0.1
Mamografía	3
Radiación natural	3/año
Dosis recibida (durante un periodo de 70 años) por 0,5 millón de personas cerca de Chernóbil	14
Dosis en un radio de 20 manzanas alrededor de una hipotética acción de terrorismo nuclear	3-30
Tomografía computarizada pediátrica	25
Límite de exposición de un trabajador	20/año
Exposición en la Estación Espacial Internacional	170/año
Estimaciones a partir de algunos estudios epidemiológicos, con bajas dosis	
Sobrevivientes de la bomba A	200
Rayos X médicos	100
Obreros de la industria nuclear	20
Exposiciones <i>in útero</i>	10

Tomemos los valores indicados en la tabla 7 como referencia y veamos el siguiente ejemplo para ilustrar la dificultad existente para estimar riesgos correspondientes a dosis bajas de radiación, a partir de datos epidemiológicos. Asumamos, primero, que el riesgo es proporcional a la dosis. Asumamos también que el tamaño de muestra necesario para estimar el riesgo es proporcional al inverso del cuadrado de la dosis. Supongamos, ahora, que para cuantificar el riesgo que implica una dosis de 1 000 mSv fuera necesario considerar una muestra de 500 individuos. Bajo estas condiciones, para estimar el riesgo correspondiente a una dosis de 100 mSv, se requeriría entonces de una muestra de tamaño 50 000; en caso de que la dosis fuera de 10 mSv, se requeriría una muestra de tamaño 5 millones de personas [131]. En el supuesto de que sean necesarios 500 individuos para estimar un riesgo correspondiente a 1 000 Sv esté sobrepasado, podemos volver a realizar este mismo ejercicio suponiendo que sólo se necesitan 50; de todos modos, el tamaño de muestra resultante para

dosis pequeñas de 10 mSv resultaría ser del orden de 500 000. Este ejercicio nos ilustra una de las grandes dificultades que enfrenta la epidemiología para estimar los riesgos correspondientes a dosis muy bajas de radiación; se requiere de estudios epidemiológicos a gran escala para estimar, con precisión adecuada, el riesgo que significan las radiaciones a bajas dosis para la salud humana.

Por tanto, la estimación del riesgo para dosis pequeñas, fuera del rango de dosis bajas, tiene que realizarse vía la extrapolación de las estimaciones realizadas, ya sea con el modelo LNT o con algún otro que se considere pertinente.

Bajo las consideraciones arriba señaladas, en el contexto de dosis bajas de radiación, abordemos ahora el asunto del valor mínimo de dosis de una radiación, ya sea de rayos X o de radiación γ , para el cual existe evidencia de riesgo elevado significativo de cáncer en humanos.

En el análisis de este problema es necesario hacer una distinción entre dosis única de radiación recibida en un periodo corto de tiempo y dosis acumulada de radiación recibida durante un periodo.

Exposición a dosis baja única

A la fecha, el estudio epidemiológico que mayor potencia estadística²² posee para la evaluación de los riesgos a bajas dosis, es la cohorte LSS de los sobrevivientes de las bombas atómicas [134, 135], pues se trata de una cohorte grande de individuos, el seguimiento de los participantes ha sido bastante largo y completo, y las dosis de radiación que recibieron los sobrevivientes han sido bien caracterizadas.

Para esta cohorte, los individuos que recibieron dosis bajas de radiación, del orden de 5-100 mSv, presentaron una tasa más elevada de cáncer comparados con los individuos que tuvieron una exposición menor a 5 mSV [136].

Ozasa *et al.* [137] llevaron a cabo un estudio con la cohorte Life Span Study de sobrevivientes a la bomba atómica (LSS) con la intención de obtener información sobre la relación dosis-respuesta y modificación del efecto, como función del sexo, la edad a la que el individuo fue expuesto y la edad alcanzada, sobre el riesgo de muerte para varios tipos de cáncer sólido, leucemia y otras enfermedades no carcinogénicas.

²² La potencia estadística es la probabilidad de rechazar una H_0 falsa en una prueba estadística; la potencia está dada por $1-\beta$, donde β es la probabilidad de cometer un Error Tipo II, esto es, la probabilidad de “No rechazar una hipótesis nula falsa”.

Para estimar los efectos de la radiación, este estudio consideró el seguimiento, para el periodo 1950-2003, de aproximadamente 86 611 sobrevivientes a las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki; la cohorte quedó constituida por 41.2% de hombres y 58.8% de mujeres.

La estimación de la dosis de radiación recibida por los sujetos bajo estudio se llevó a cabo utilizando el sistema de dosimetría DS02.

Para estimar la dependencia del riesgo de mortalidad en función de la dosis de radiación (d) fueron utilizados modelos de regresión de Poisson; en estos cálculos se tomó en cuenta la ciudad de residencia del individuo expuesto (c) y el año de nacimiento (b); como covariables fueron considerados el sexo (s), la edad a la que se fue expuesto a la radiación (e) y la edad alcanzada (a).

Los modelos utilizados para estudiar el riesgo fueron el modelo de exceso de riesgo relativo y el modelo de exceso de riesgo absoluto, dados por

$$\lambda_0(c, s, b, a) = [1 +]$$

y

$$\lambda_0(c, s, b, a) + ERR(d, s, e, a)$$

respectivamente. En estas ecuaciones, ERR y EAR indican el término correspondiente al exceso de riesgo relativo y al exceso de riesgo absoluto; λ_0 representa la tasa de mortalidad basal, considerada a dosis de radiación cero. Los autores asumieron que el ERR y el EAR pueden ser modelados considerando que pueden ser expresados como un producto de funciones de la forma

$$\rho(d) \varepsilon(s, e, a)$$

donde $\rho(d)$ describe la forma funcional dosis-respuesta y $\varepsilon(s, e, a)$ representa el factor de modificación del efecto, en función del sexo (s), edad a la que fue expuesto (e) y edad alcanzada (a).

En el análisis de los datos, utilizando estos modelos, fueron considerados tres diferentes casos para la forma funcional dosis-respuesta; a saber, el modelo lineal (L : $\rho(d) = \beta_1 d$), el modelo lineal-cuadrático (LQ : $\rho(d) = \beta_1 d + \beta_2 d^2$) y el modelo cuadrático puro (Q : $\rho(d) = \beta_2 d^2$). En relación con el factor de modificación del efecto, se consideró que está dado por

$$\varepsilon(s, e, a) = \exp(\tau e + \nu \ln a) (1 + \sigma s)$$

En el periodo de estudio, 58% del total de individuos con registro de dosis DS02 ya fallecieron; 22% de las muertes se debieron a algún tipo de cáncer sólido, 1.4% a enfermedades linfoides y hematopoyéticas, 71% a enfermedades no neoplásicas y 5% a causas externas.

Tanto para el total de muertes como para las muertes debidas a cáncer sólido el ERR/Gy fue estadísticamente significativo; a saber, 0.22 [IC 95%: (0.18, 0.26)] y 0.47 [IC 95%: (0.38, 0.56)], respectivamente. En ambos casos, el ERR/Gy femenino fue el doble del masculino.

Para el cáncer sólido el ERR/Gy presentó un incremento de 29% [IC 95%: (17%, 41%)] por cada 10 años de decremento en la edad de exposición.

Para las muertes debidas a cáncer sólido, el EAR/10⁴ persona-año/Gy fue estadísticamente significativo; a saber, 26.4 [IC 95%: (20.3, 32.8)]. En este caso no se observó diferencia significativa según sexo. Para este caso, muertes debidas a cáncer sólido, el EAR presentó un incremento de 19% [IC 95%: (7%, 31%)] por cada 10 años de decremento en la edad de exposición.

En términos de la existencia de un posible valor umbral de radiación debajo del cual el ERR no presentara valores positivos; esto es, debajo del cual el riesgo relativo no fuera mayor que uno, los autores concluyen, a partir del análisis de datos que llevaron a cabo con los modelos utilizados y de los resultados que obtuvieron, que dicho valor umbral es cero. Lo anterior justifica y valida el amplio uso que ha tenido el modelo lineal sin umbral (LNT) para analizar y estimar los riesgos asociados a la exposición a radiación ionizante para diferentes tipos de enfermedades y padecimientos causantes de muerte. En relación a la validez del modelo lineal sin umbral (LNT) para estimar los riesgos de daño a la salud causados por la exposición a radiación ionizante, Doss [138, 139] asegura la existencia de un fenómeno de hormesis causado por la exposición a bajas dosis de radiación; esto es, un fenómeno consistente en que la exposición a bajas dosis de radiación producirían un mecanismo protector contra la muerte por cáncer, lo cual, de ser cierto, invalidaría la utilización del modelo LNT. En apoyo a su afirmación, Doss sostiene que el cálculo de la tasa de mortalidad basal por cáncer puede estar afectado por grandes sesgos sistemáticos, causados por la considerable variabilidad anual que presentan las tasas de mortalidad por cáncer y su también amplia variabilidad según ubicación geográfica de los grupos poblacionales.

Puesto que el ERR está definido según la ecuación siguiente:

$$\frac{R}{B} = 1 + ERR$$

donde R y B representan la tasa de mortalidad por cáncer, para los individuos expuestos a la radiación y la tasa de mortalidad basal por cáncer, respectivamente; se observa que sesgos en la medición de la tasa de mortalidad basal por cáncer implican necesariamente sesgos en el valor del ERR obtenido. Doss asume, con base en plausibilidad matemática, que los sesgos en la medición de la tasa basal de mortalidad han producido permanentemente valores inferiores respecto a su valor real, lo cual ha tenido como consecuencia la obtención de valores incrementados del ERR. También con base en plausibilidad matemática, a saber, la forma de la curva obtenida para el ERR en función de la dosis de radiación, Doss asume que el valor de la tasa basal de mortalidad utilizado para los diversos grupos de edad se encuentra un 20% por debajo del valor real; con base en este supuesto, el ERR obtenido en diversos estudios, particularmente el de Ozasa *et al.* [137], estaría incrementado respecto del valor que Doss considera sería el valor real. Bajo estas consideraciones, existe la posibilidad de que valores pequeños de ERR mayores de cero se transformen en valores menores de cero, justificando, por tanto, el supuesto carácter protector de las radiaciones ionizantes a bajas dosis, dando lugar, así, al fenómeno de hormesis por radiación. Lo que nunca informa Moss en sus artículos es la razón por la cual, durante los 60 años que se ha realizado el cálculo de las tasas basales de mortalidad por cáncer, el sesgo siempre se ha producido en la misma dirección y con un valor aproximado de 20% menor del valor que él supone es el real.

Como comentario, cabe señalar que si las conclusiones sobre el efecto de las radiaciones ionizantes sobre la salud humana reposan fuertemente en plausibilidad matemática, es necesario considerar entonces el universo de posibilidades matemáticamente plausibles, de forma tal que no se arribe apresuradamente a conclusiones que sólo son soportadas bajo unas suposiciones, pero no necesariamente por otras suposiciones matemáticas, también plausibles, que no fueron tomadas en cuenta.

En un artículo publicado recientemente, Woloshak plantea sin ninguna duda que existen efectos benéficos de la exposición a bajas dosis de radiación identificados a nivel celular [140]. Para justificar su postura, hace referencia a los trabajos de dos grupos de investigación [141-145]. En estos trabajos se muestra, sin ambigüedad, que el tiempo de vida se acorta y que se desarrollan cánceres.

res en las muestras irradiadas y que este efecto varía linealmente (y en algunos casos supralinealmente), dentro de las incertidumbres del estudio, en función de la dosis. Además, se muestra que este efecto es mayor en las poblaciones jóvenes. Non obstante, reinterpretando los resultados de los autores, Woloshak concluye al uso benéfico de bajas dosis de radiaciones, en particular a temprana edad.

Adicionalmente, se sabe que, en el caso de exposición *in utero*, cuando el embrión o el feto reciben una dosis de 10 mSv se produce un aumento significativo en el riesgo de cáncer. Un estudio realizado en Gran Bretaña con niños que recibieron dosis de radiación debido a los exámenes prenatales practicados sobre la madre, mostró que a partir de 6 mSv existe asociación entre dosis de radiación y muerte por cáncer, con un OR²³ de 1.23 [146]. Otro estudio realizado en Alemania confirma este resultado [147].

Exposición a dosis baja acumulada

Generalmente se menciona que las dosis bajas acumuladas durante un periodo largo están asociadas a riesgos menores [132, 133].

A este respecto, consideremos a los trabajadores de la energía nuclear, cuya condición permite estudiar los efectos que tienen las radiaciones ionizantes sobre la salud, cuando son aplicadas a bajas dosis durante periodos largos. En varios países se han llevado a cabo estudios de este tipo: Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Francia [148-154]. En los estudios canadienses se encontró que los trabajadores de la energía nuclear presentaron un incremento en la tasa de cáncer, con un riesgo relativo de mortalidad, significativo para dosis promedio de 6.5 mSv. En el caso de los trabajadores del Reino Unido no se encontró asociación; pero en un estudio que incluyó a trabajadores de Estados Unidos de América, Canadá y Reino Unido, se encontró un aumento en el diagnóstico de leucemia [152].

En 2007 se dieron a conocer los resultados de un estudio que incluyó a trabajadores de la industria nuclear de 15 países, quienes en promedio recibieron una dosis acumulada de 19.4 mSv. Este estudio incluyó a más de 400 000 trabajadores, lo cual permitió llevar a cabo estimaciones para dosis bajas

²³ OR (del inglés Odd Ratio: Razón de Momios) es la medida de asociación entre dos eventos, en general exposición y enfermedad, en los estudios epidemiológicos de casos y controles. Un valor de 1 del OR significa no asociación; un valor mayor que uno significa asociación directa (a mayor exposición mayor probabilidad de que se presente la enfermedad).

de radiaciones, las cuales difícilmente se pueden lograr cuando se consideran muestras pequeñas. Particularmente se encontró que existe una asociación significativa entre dosis baja acumulada con cáncer de pulmón y algunos tipos de mielomas; también se observó que varios años después de la exposición a la radiación pueden aparecer diversos tipos de cáncer. La edad de los trabajadores que desarrollaron cáncer fue entre 36 y 57 años [153-155].

En un estudio realizado en Suecia con personas que durante su infancia, antes de los 18 meses de edad, habían recibido radiación, debido que fueron tratados con radioterapia por presentar hemangiomas cutáneos, se encontró asociación entre este evento y la presencia de algunas deficiencias en las habilidades cognitivas una vez llegados a la edad adulta [156].

Recientemente, en un estudio que incorporó a más de 200 000 trabajadores de la energía nuclear en Japón, que habían recibido una dosis promedio acumulada de 12.2 mSv, se muestra que estos trabajadores presentan un exceso de riesgo relativo de mortalidad de 1.26, considerando todos los tipos de cáncer, excepto leucemia; en este estudio también se menciona la posibilidad de causas adicionales como alcoholismo [157].

En un trabajo sobre las dosis bajas de radiación recibidas en la cohorte LSS, Dropkin encontró que el modelo lineal subestima los riesgos correspondientes a dosis que se encuentran en el rango 0-20 mSv y muestra que los resultados son compatibles con un efecto *bystander* [158].

Existe fuerte evidencia epidemiológica en el sentido de que a dosis altas, del orden de 1 Gy o más, el riesgo de desarrollar cáncer se incrementa [159]. Algunos investigadores sostienen que este efecto también se presenta para dosis pequeñas, del orden de 10 mGy [154, 160]. Para el caso de dosis muy bajas, menores de 1 mGy, los estudios epidemiológicos difícilmente aportan información estadísticamente útil que permita estimar el riesgo. A fin de resolver esta situación, como ya anteriormente se mencionó, utilizando el modelo LNT se llevan a cabo extrapolaciones para estimar el riesgo que corresponde a dosis muy bajas de radiación.

En un estudio publicado en 2009, Brenner aporta argumentos biofísicos que apoyan el método de extrapolación del riesgo a partir del modelo LNT, correspondiente a dosis bajas acumuladas [160]. Este investigador menciona que, si tomamos como referencia los rayos X utilizados en radiología en mamíferos, a dosis de 1 Gy los núcleos de las células son atravesados por varias trayectorias de las partículas; a dosis del orden de 10 mGy, en promedio, los núcleos son atravesados por una sola trayectoria; para dosis del orden de 1 mGy el proceso es análogo al caso anterior, sólo que ahora son menos los núcleos al-

canzados por la radiación. Con base en este razonamiento, considerando que no hay cambio en el tipo de daño que sufren las células, para el caso de bajas dosis de radiación, la extrapolación lineal para estimar el riesgo puede considerarse pertinente.

A la fecha, existe debate en torno a diversos puntos que todavía no han sido resueltos sobre los procesos biológicos que subyacen para el caso de bajas dosis de radiación ionizante; entre ellos, la comunicación intercelular, la vigilancia inmune cuando el número de células malignas es bajo; la posibilidad de presencia de procesos radiobiológicos diferentes para el caso de dosis muy bajas, etcétera. [130]

Por su parte, en relación con este problema, Gofman señala que para evaluar el riesgo a la salud que tiene una exposición a radiación dada, es necesario contar con una estimación sobre el número de trayectos de fotones/electrones que cruzan a los núcleos celulares. Así, Gofman lleva a cabo una estimación sobre el número de trayectos por núcleo con base en datos aportados por diferentes estudios epidemiológicos en los que se conoce el nivel de exposición de los individuos, a saber [8]: a) estudio de fluoroscopías en Nueva Escocia [101, 161]; b) estudio de irradiación del cuero cabelludo en Israel [108, 109]; c) estudio de fluoroscopías en Massachusetts [100, 101]; d) estudio de fluoroscopías en Canadá [153]; e) estudio *in utero* de Stewart [100, 101, 163-165]; f) estudio *in utero* de MacMahon [104]; g) estudio de los productos de contraste luminiscentes [97, 98, 166]; h) estudio *in utero* de gemelos [102], e i) estudio de cáncer de pecho después de la irradiación del cuero cabelludo, en Israel [108].

En la tabla 8 se calcula el número total células atravesadas por los fotones/electrones correspondientes a 1 cGy/g. Por razones de simplicidad en los cálculos, podemos aproximar a una célula esférica de tamaño 14.2 μm con un núcleo esférico de diámetro 7.1 μm como si fuera cúbica con núcleo cúbico, con aristas de 11.4 μm y 5.7 μm , respectivamente. Si suponemos que las trayectorias de los electrones son perpendiculares al área “vista” por el electrón, esta aproximación permite simplificar los cálculos.

Tabla 8. Cálculo del número promedio de trayectos por célula a una dosis de 1 cGy/g, considerando 6.75×10^8 núcleos por gramo de tejido

Fuente de fotones (energía promedio / fotón)	Número de fotones para proporcionar una dosis de 1 cGy/g	Número de células atravesadas / electrón o paquete de electrones	Número de células atravesadas con una dosis de 1 cGy/g	Número promedio de trayectos por núcleo para 1 cGy/g
Rayos X médicos (30 keV)	2.08×10^9	1.735	3.61×10^9	1.3378
Radio 226 e hijos (596 keV)	1.05×10^8	75.483	7.93×10^9	2.9370
Cesio 137 (662 keV)	9.43×10^7	90.268	8.51×10^9	3.1556
Bomba A (1608 keV)	3.88×10^7	376.869	1.46×10^{10}	5.4074

Tabla 9. Número promedio de trayectos por núcleo según la exposición a Rayos X involucrada en nueve estudios epidemiológicos

Estudio	Exposición (cGy)	Trayectos/núcleo para 1 cGy	Número promedio de trayectos/núcleo en cada exposición	
			Exacto	Redondeado
a	7.5	1.3378	10.0335	10
b	7.5	1.3378	10.0335	10
	9.0	1.3378	12.042	12
c	4.6	1.3378	6.1539	6
d	4.6	1.3378	6.1539	6
e	0.5	1.3378	0.6689	< 1 51% sin trayectos
f	0.9	1.3378	1.2040	1
g	0.1	2.9370	0.2937	< 1 75% sin trayectos
h	1.0	1.3378	1.3378	1
i	1.6	1.3378	2.140	2

Una vez obtenido el número promedio de trayectos por núcleo (última columna de la tabla 8), ahora se puede calcular el número promedio de trayectos por núcleo en función de la exposición real a la radiación (tabla 9). Finalmente, considerando que el número promedio de trayectos por núcleo sigue una distribución de Poisson, se puede calcular la probabilidad de que un núcleo sea atravesado por 0, 1, 2, ... trayectos para cada uno de los nueve estudios mencionados anteriormente.

De lo anterior, Gofman deduce, en particular, que un trayecto de ionización primario es la perturbación mínima que puede suceder a nivel celular; y considerando que existen fallas en el sistema de reparación de alteraciones moleculares, que este trayecto puede iniciar un proceso patológico que conduzca a

cáncer. De lo anterior, se concluye que no existe valor umbral alguno de dosis bajo el cual se pueda asegurar que no existe peligro para la salud.

En 2006, el informe BIER VII confirmó que cualquier exposición a radiaciones, incluyendo la radiación natural, incrementa el riesgo de desarrollar cáncer. Sin lugar a dudas, las dosis bajas tienen como resultado un riesgo menor que las dosis altas; pero aún a dosis bajas, los riesgos relativos de cáncer en mujeres y niños son mucho mayores que en hombres [167].

Como lo señala Beyea en una publicación reciente [168], con respecto al número de casos de cáncer, en la cohorte LSS a dosis baja y muy baja, en los últimos decenios el nivel de las bajas dosis disminuyó a 100 mSv y, en el mismo periodo, el riesgo estimado se vio multiplicado por diez desde 1980. Este problema no es sencillo, frecuentemente sucede que cuando se presentan estudios que muestran que la dosis “mínima” tiene que ser más baja, también se presenta discusión y polémica entre los partidarios de la energía nuclear y sus oponentes o entre los defensores de un umbral de dosis y los que consideran que dicho umbral no existe [169, 170].

A este respecto, vale la pena destacar tres estudios epidemiológicos importantes: el estudio de los obreros de la energía nuclear de quince países realizado por Cardis E. *et al.* [171], las investigaciones sobre los efectos de la contaminación del río Techa cerca de la planta de Chelyabinsk (ver capítulo III) [172-176] y el estudio de los obreros de la energía nuclear en el Reino Unido realizado por Jacob *et al.* [177]. Todos estos trabajos convergen hacia la misma conclusión: el efecto de una dosis es el mismo, ya sea que se trate de una dosis única o una dosis acumulada.

En particular, en el trabajo de E. Cardis que incluyó a obreros de la energía nuclear de quince países, destacado en un comunicado de Prensa (junio 2005) del Centro Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC por sus siglas en inglés), se señala que las dosis bajas de radiación están asociadas a un leve aumento del riesgo de cáncer. Esta investigación estudió a más de 400 000 trabajadores de la industria nuclear en quince países. Para todos estos trabajadores se contó con las mediciones de dosis externa recibida. El promedio de dosis recibida fue de 19 mSv por trabajador. Al momento del estudio, 6 519 trabajadores habían fallecido por cáncer y 196 por leucemia (sin incluir la leucemia linfocitaria crónica). La estimación de riesgo se llevó a cabo considerando el nivel de dosis absorbida, encontrándose un aumento leve pero significativo de la mortalidad por cáncer [178].

Los hallazgos de este trabajo concuerdan con las estimaciones realizadas a partir de los estudios con los sobrevivientes de los bombardeos de Hiroshi-

ma y Nagasaki. Lo que a final de cuentas importa, es la dosis total recibida, ya sea que se trate de una dosis única o una fraccionada. Podemos concluir como concluye Beyea [168]: “*Está claro que las dosis fraccionadas no protegen contra el cáncer inducido por radiaciones*”, lo cual contradice de manera contundente los argumentos frecuentemente emitidos por los partidarios de la energía nuclear.

Cabe mencionar que en las últimas recomendaciones de la CIPR (2007), la eficiencia de bajas dosis a bajo gasto se considera dos veces menos peligrosa [179]; en tanto que las Academias Nacionales de Estados Unidos de América proponen un valor de 1.5 [167] y no descartan que este valor pueda ser diferente a nivel de órganos y tejidos particulares.

En el último decenio se ha abordado también la problemática relativa a los efectos sobre la salud de núcleos radiactivos que son ingeridos o inhalados (emisores internos). Particularmente, se ha planteado la pregunta sobre la pertinencia de usar los modelos que permiten evaluar riesgos correspondientes a radiación externa, para ahora evaluar riesgos correspondientes a radiación interna. En el 2001, el ministro del medio ambiente británico en turno, Michael Meacher solicitó que una comisión realizara esta evaluación. Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 2004 [180]. Este informe señala que los electrones y las partículas producto de la exposición interna presentan características diferentes a los de la exposición externa; particularmente, los depósitos de energía en los tejidos en el caso de la radiación interna tienen una distribución más heterogénea. Por lo tanto, la magnitud del efecto biológico en lugares de mayor depósito de energía puede ser mayor que el correspondiente a la exposición externa. A la fecha, todavía existe dificultad para estimar de manera adecuada las dosis en el caso de emisores internos y continúan revisándose los modelos de estimación de riesgo, a fin de tomar en cuenta estos aspectos. Sin lugar a dudas, es una necesidad continuar con las investigaciones en laboratorio [180].

A manera de cierre y conclusión de este capítulo, recordemos las palabras del biólogo Jean Rostand, en su conferencia impartida en 1962 en el Instituto de la Vida [181]:

[...] El peligro de las explosiones nucleares es tanto más temible pues no es el único, ni mucho menos, que amenaza el patrimonio hereditario humano.

Debemos también contar con los desarrollos de la industria atómica de paz. Dado el agotamiento, relativamente cercano, de las otras fuentes de energía – carbón, petróleo –, estamos casi obligados a aceptar el principio de esta industria; y por otra parte, si no fuéramos obligados, no tendríamos la sabiduría de postergar

su creación, dadas las inmensas posibilidades que abre a la actividad humana en todas sus formas.

Pero esta era atómica, en la cual entramos, por la buena o por la mala, y en todo caso demasiado temprano, sin habernos preparado suficientemente, no puede ser vista con buenos ojos por el genetista... A pesar de sus probables beneficios, la desintegración atómica no es “simpática” para el especialista de la vida, ya que ahora se sabe que deberemos coexistir más y más íntimamente con estas radiaciones nocivas, insidiosas, que son los peores enemigos del protoplasma y sobre todo del protoplasma germinal.

La presencia de centrales atómicas en las grandes ciudades, o en proximidad de las grandes ciudades, creará un peligro permanente, tan sólo por la eventualidad de sabotajes, accidentes, etcétera.

La eliminación de los desechos radiactivos por sí sola plantea serios problemas, y justifica la inquietud.

Sin querer despertar una discusión de hace poco tiempo, a propósito de la inmersión de los desechos en los ríos, lo menos que se puede decir es que las decisiones tomadas en esta circunstancia, y sin el asentimiento de biólogos calificados, son el testimonio de una cierta ligereza.

A propósito de los desechos, podemos acordar que no existe, por el momento, una solución satisfactoria. Se ha proyectado juntarlos en bloques herméticos de concreto, para depositarlos en minas en desuso, en desiertos, en regiones polares, en los océanos; se ha pensado también mandarlos a la luna, al sol, por medio de cohetes [...]

Por el momento, sobre todo, es cuestión de hundirlos en el océano. Ahora bien, a pesar de lo que nos afirman en cuanto a la solidez de las paredes del recipiente, del contenedor, es cierto que éstas no resistirán un tiempo indefinido; y a partir del momento en que los desechos entren en contacto con el agua de mar, un nuevo factor intervendrá, a saber la concentración de los productos radiactivos en los tejidos vivos, el cual los físicos del átomo desprecian demasiado.

De hecho, sería un gran error creer que los productos radiactivos van tranquilamente a diluirse en el mar de manera homogénea: ciertos organismos poseen la singular propiedad de retener una radiactividad diez mil veces, y hasta treinta mil veces más elevada que la del entorno; observaciones de este tipo han sido hechas para el plancton, las algas filamentosas, los nenúfares, ciertos moluscos como las ostras, ciertos peces migratorios; de tal manera que el eminente naturalista Roger Heim²⁴ – gran protector de la naturaleza, que se muestra aquí buen protector del

²⁴ Roger Jean Heim, micólogo francés (1900-1979), profesor en el Muséum national d'histoire naturelle de Paris, director del mismo de 1951 a 1965); fue también presidente de la Académie Nationale des Sciences de Francia. Heim fue uno de los fundadores, en 1948, de la UICN (Union

hombre – escribió: “No tiremos agua estancada a las fuentes bautismales, no hagamos del océano una cloaca...”

¿Tenemos que decir algo sobre los peligros que corre el personal de la industria atómica? ¿Peligro de mismo orden tanto para los obreros que trabajan en las minas de uranio como para los que manipulan los productos luminosos, a base de torio, que se usan para que el cuadrante o las agujas de ciertos relojes sea fosforescente?

Dejemos ahora el amplio tema del átomo, y hablemos de otro peligro, el de los rayos X, empleados de manera abusiva –hasta estos últimos años por lo menos– por los médicos y los dentistas.

Hoy, es bien sabido que las dosis médicas de rayos X constituyen para las células reproductoras, para sus genes, un verdadero peligro –y en este momento mucho mayor que el peligro atómico.

Evidentemente, no se trata de renunciar a exámenes o tratamientos a menudo útiles, a veces necesarios, pero conviene, en este asunto como en muchos otros, sopesar con discernimiento las ventajas para el individuo y los inconvenientes para la descendencia.

Ya, al respecto, los médicos tienen una loable prudencia: evitan las radioscopias cuando esto es posible y las sustituyen, cuando es posible, por radiografías que tienen una exposición mucho más breve y por lo tanto ofrecen menos peligro.

Pero, tanto respecto a las dosis médicas como a las dosis que vienen de las explosiones nucleares, repetimos sin cansancio, que no existe un umbral de nocividad; y por tanto, cualquier exposición a las radiaciones, por breve que sea, aumenta la tasa de mutaciones. Según Demerec y Sams [182] “una dosis del orden de la que recibe cualquier paciente con su dentista en una radiografía, empieza a aumentar la tasa de mutación en una bacteria de tipo *Escherichia coli*”.

Explosiones nucleares, industria atómica, rayos X de uso médico... Aquí están amenazas seguras para el patrimonio hereditario humano.

En otra parte de la misma intervención Rostand señala:

[...] Podemos concluir, con certeza, que las explosiones nucleares, como factor aditivo a la radiactividad natural – sea por aumento de la radiactividad atmosférica, sea por el aumento de la radiactividad de los alimentos ingeridos – son responsables de un excedente de mutaciones.

Debido a ellas, el hombre contribuye de manera segura al “daño biológico”

internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources), de la cual fue presidente de 1954 a 1958. Su libro de 1973, *L'angoisse de l'an 2000* (Fondation Singer-Polignac, Paris), es testimonio de su compromiso.

causado por las mutaciones naturales. Agrava él mismo su carga genética. Del sólo hecho de las explosiones nucleares que ya han tenido lugar aparecerá, en las generaciones futuras, un aumento de alteraciones de cualquier tipo: hemofílicos, ciegos, sordos, deficientes mentales, etc. que de otra forma no hubiera existido.

Sobre este punto, nadie puede discutir, o por lo menos nadie debería de discutir, en tanto que la causa es nítida.

Pero donde la discusión empieza, y se vuelve legítima, es sobre la evaluación del peligro, sobre la estimación de este daño genético cuya realidad no tendría que ser cuestionada. [...]

Dañar a los genes, es peor que matar, es crear mala vida; se ponen en circulación malos genes, que continuarán proliferando sin fin; no es solamente un crimen que se comete hacia el porvenir, sino un crimen en continuo y vivo, que se alimenta a sí mismo.»

Referencias

1. Crowther, J. A. *Some considerations relative to the actions of X-rays on tissue cells*, Proc. R. Soc. Lond. B: Biol. Sci. 96, 1924, pp. 2007-2211.
2. Timofeeff-Ressovsky, N. W., K. G. Zimmer, M. Delbrueck. *Ueber die Natur der Genmutation und der Genstruktur I*, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen (Math. Phys. Kl. Biol.) N.F. 190-245, 1935.
3. Caufield, C. *Multiple Exposures: Chronicles of the Radiation Age*. Nueva York, Harper and Row, 1989.
4. Bossew, P. et al. *The International Atomic Energy Agency - 35 Years Promotion of Nuclear Energy: A Critical Documentation of the Agency's Policy*, Gruppe Ökologie, Wien: Österreichisches Ökologie-Institut - ÖI, 1992.
5. May, J. *The Greenpeace Book of the Nuclear Age*. Nueva York Pantheon, 1990.
6. Gofman, J. W. y E. O'Connor *The Law of Concentrated Benefit Over Diffuse Injury*. San Francisco, California, CNR Book Division, 1994.
7. Alpen, E. L. *Radiation biophysics*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1990.

8. Gofman, J. W. *Radiation-Induced Cancer from Low-Dose Exposure: An independent analysis*. San Francisco, California, CNR Book Division, 1990.
9. Goodhead, D. T. *Initial events in the cellular effects of ionizing radiation: clustered damage in DNA*. Int. J. Radiat. Biol. núm. 65, 1994, pp. 7-17.
10. Goodhead, D. T. *The relevance of dose for low-energy beta emitters*. J. Radiol. Protect. núm. 29, 2009, pp. 321-333.
11. Kellerer, M. A. “Models of cellular radiation action”, cap. 7, en R.G. Freeman, ed. *Kinetics of nonhomogeneous processes*. Nueva York, John Wiley and Sons, 1987, pp. 305-375.
12. Freeman, G. R. “Stochastic model of charge scavenging in liquids under irradiation by electrons or photons”, cap. 6, en G. R. Freeman, ed. *Kinetics of nonhomogeneous processes*. Nueva York, John Wiley and Sons 1987, pp. 277-304
13. Bryan, J. C. *Introduction to Nuclear Science*. Boca Raton, EUA, CRC Press Taylor and Francis Group, 2009.
14. Paretzke, H. G. “Radiation tracks structure theory”, cap. 3 en G.R. Freeman, ed. *Kinetics of nonhomogeneous processes*. Nueva York, John Wiley and Sons, 1987, pp. 89-169.
15. Nikjoo, H. y D. T. Goodhead. *Track structure analysis illustrating the prominent role of low-energy electrons in radiobiological effects of low-LET radiations*, Phys. Med. Biol., núm. 36, 1991, 229-238.
16. Goodhead, D. T. *et al. Track structure approaches to the interpretation of radiation effects on DNA*, Radiat. Prot. Dosimetry, núm. 52, 1994, 217-223.
17. Drané, P., S. Alvarez, A. Meiller, E. May. “L’activation de la protéine p53, un événement déterminant de la réponse cellulaire aux radiations ionisantes”, en *Médecine Nucléaire – Imagerie Fonctionnelle et Métabolique*, núm. 26, 2002, pp. 139-147.
18. Persaud, R., H. Zhou, T. K. Hei, E. J. Hall. “Demonstration of a radiation-induced bystander effect for low dose low LET α -particles”, en *Radiat. Environ. Biophys*, núm. 46, 2007, pp. 395-400.

19. Prise, K. M., M. Folkard y B. D. Michael. "A review of the bystander effect and its implications for low-dose exposure", en *Radiat. Prot. Dosimetry*, núm. 104, 2003, pp. 347-355.
20. International Commission on Radiological Protection (ICRP), *Recommendations of the icrp, Publication 103* [en línea], Oxford, 2007. < <http://www.icrp.org>>.
21. Marchandise X. *et al. Biophysique pour les sciences de la vie et de la santé*. Sophia-Antipolis, Francia Omniscience, 2007.
22. Radiation Effects Research Foundation (RERF) [en línea]. < http://www.rerf.jp/radefx/index_e.html>
23. Hunter, N., C. R. Muirhead, W. Zhang "Possible selection effects for radiation risk estimates in Japanese A-bomb survivors: reanalysis of acute radiation symptoms data", en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 45, 2006, 17-26.
24. Belson, M., K. Beverly y A. Holmes "Risk factors for acute leukemia in children: a review", en *Environ. Health Perspect.*, núm. 115, 2007, 138-145.
25. Lewis, E. B. "Leukemia and Ionizing Radiation", en *Science*, núm. 125, 1957, 965-972.
26. Caron, J. *Edward Lewis and radioactive fallout. The impact of Caltech biologists on the debate over nuclear weapons testing in the 1950s and 60s*. Pasadena, California, Californian Institute of Technology, 2003.
27. Spencer, W. P. y C. Stern "Experiments to test the validity of the linear r-dose/mutation frequency relation in *Drosophila* at low dosage", en *Genetics*, núm. 33, 1948, 43-74.
28. Muller, H. J. "Artificial transmutation of the gene", en *Science*, núm. 66, 1927, pp. 84-87.
29. Friedell, H. L. *The Nature of Radioactive Fallout and its Effects on Man. Hearings Before the Special Subcommittee on Radiation of the Joint Committee on Atomic Energy Congress of the United States Eighty-Fifth Congress First Session on the Nature of Radioactive Fallout, Joint Committee on Atomic Energy*. Washington, Government Printing Office, 1957.

30. Clark, D. y B. McMahon. "Incidence of the common forms of human leukemia", en *Blood*, núm. 11, 1956, pp. 871-881.
31. Lewis, E. B. "Thyroid Radiation Doses from Fallout", *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, núm. 45, 1959, pp. 894-897.
32. Miller, R. W. "Delayed radiation effects in atomic-bomb survivors", en *Science* núm. 166, 1969. pp. 569-574.
33. Baron, J. A. "Cancer mortality in small areas around nuclear facilities in England and Wales", *Br. J. Cancer*, núm. 50, 1984, 815-824.
34. Heasman, M. A. *et al.* "Leukaemia in young persons in Scotland: a study of its geographical distribution and relationship to nuclear installations", en *Health Bull*, núm. 45, 1987, pp. 147-151.
35. Clarke, E. A., J. McLaughlin y T. W. Anderson. *Childhood Leukemia Around Canadian Nuclear Facilities – Phase I, Final Report*. Ottawa, Canada, Atomic Energy Control Board, 1989.
36. Cook-Mozaffari, P. J. *et al.* "Geographical variation in mortality from leukemia and other cancers in England and Wales in relation to proximity to nuclear installations, 1969-78", en *Br. J. Cancer* , núm. 59, 1989, pp. 476-4858.
37. Ewings, P. D., C. Bowie, M. J. Phillips y S. A. Johnson. "Incidence of leukemia in young people in the vicinity of Hinkley Point nuclear power station, 1959-86", en *Br. Med. J.*, núm. 299, 1989, pp. 289-293.
38. Hill, C. y A. Laplanche "Overall mortality and cancer mortality around French nuclear sites", en *Nature*, núm. 347, 1990, pp. 755-757.
39. Clarke, E. A., J. McLaughlin y T. W. Anderson *Childhood Leukemia Around Canadian Nuclear Facilities – Phase II, Final Report*. Ottawa, Canada, Atomic Energy Control Board, 1991.
40. Goldsmith, J. R. "Nuclear installations and childhood cancer in the UK: mortality and incidence for 0-9-year-old children, 1971-1980", en *Sc. Total Environm.*, núm. 127, 1992, pp. 13-35.

41. Hattchouel, J. M., A. Laplanche y C. Hill “Leukaemia mortality around French nuclear sites”, en *Br. J. Cancer*, núm. 71, 1995, 651-653.
42. Iwasaki, T., K. Nishizawa y M. Murata “Leukemia and lymphoma mortality in the vicinity of nuclear power stations in Japan, 1973-1987”, en *J. Rad. Protec.*, núm. 15, 1995, pp. 271-288.
43. Evrard, A. S. *et al.* “Childhood leukaemia incidence around French nuclear installations using geographic zoning based on gaseous discharge dose estimates”, en *Br. J. Cancer*, núm. 94, 2006, pp. 1342-1347.
44. Baker, P. J. y D. G. Hoel “Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities”, en *Eur. J. Cancer*, núm. 16, 2007, pp. 355-363.
45. Kaatsch, P. *et al.* “Leukaemia in young children in the vicinity of German nuclear power plants”, en *Int. J. Cancer*, núm. 1220, 2008 pp. 721-726.
46. Spix, C. *et al.* “Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003”, en *Eur. J. Cancer*, núm. 44, 2008, pp. 275-284.
47. López-Abente, G. *et al.* “Leukemia, lymphomas and myeloma mortality in the vicinity of nuclear power plants and nuclear fuel facilities in Spain”, en *Cancer Epidemiol. Biomark. Prev.* 8, 1999, pp. 925-934.
48. Silva-Mato, A. *et al.* “Cancer risk around the nuclear power plants of Trillo and Zorita (Spain)”, en *Occup. Environ. Med.*, núm. 60, 2003, pp. 521-527.
49. Douple, E. B. *et al.* “Long-term radiation-related health effects in a unique human population: Lessons learned from the atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki”, en *Disaster Med. Public Health Preparedness*, núm. 5, 2011, S122-S133.
50. Trott, K. R. “Evidence of circulatory diseases among patients treated with radiotherapy emitters in Emerging evidence for radiation induced circulatory diseases”, en A. Janssens ed., *European Commission, Radiation Protection* núm. 158, 2009, pp. 7-19.

51. Waterford, R., M. P. Little “Epidemiological evidence for circulatory diseases – Non-occupational exposure in Emerging evidence for radiation induced circulatory diseases”, en A. Janssens ed., *European Commission, Radiation Protection*, núm. 158, 2009, pp. 21-31.
52. Azizova, T. V., C. R. Muirhead “Epidemiological evidence for circulatory diseases – Occupational exposure in Emerging evidence for radiation induced circulatory diseases”, en Janssens A. ed., *European Commission, Radiation Protection*, núm. 158, 2009, pp. 33-46.
53. Baverstock, K., A. V. Karotki “Towards a unifying theory of late stochastic effects of ionizing radiation”, en *Mutat. Res.*, núm. 718, 2011, pp. 1-9.
54. Azzam, E. I., S. M. de Toledo y J. B. Little “Direct evidence for the participation of gap junction mediated intercellular communication in the transmission of damage signals from α -particle irradiated to nonirradiated cells”, en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 98, 2001, pp. 473-478.
55. Azzam, E. I., S.M. de Toledo y J. B. Little. “Oxidative metabolism, gap junctions and the ionizing radiation-induced bystander effect”, en *Oncogene*, núm. 22, 2003, pp. 7050–7057.
56. Prise, K. M. *et al.* “What role for DNA damage and repair in the bystander response?”, en *Mutat. Res.*, núm. 597, 2006, pp. 1-4.
57. Shuryak, I., R. K. Sachs y D. J. Brenner. “Biophysical models of radiation bystander effects: 1. Spatial effects in three-dimensional tissues”, en *Radiat. Res.*, núm. 168, 2007, pp. 741-749.
58. Mothersill, C., C. Seymour. “Radiation-induced bystander effects and adaptive responses—the Yin and Yang of low dose radiobiology?”, en *Mutat. Res.*, núm. 568, 2004, pp. 121-128.
59. Hickman, A. W., R. J. Jaramillo, J. F. Lechner y N. F. Johnson. “ α -particle-induced p53 expression in a rat lung epithelial cell strain”, en *Cancer Res.*, núm. 54, 1994, pp. 5797-5800.
60. Lehnert, B. E. y E. H. Goodwin . “Extracellular factor(s) following exposure to α -particles can cause sister chromatid exchanges in normal human cells”, en *Cancer Res.*, núm. 57, 1997, pp. 2164–2171.

61. Narayanan, P. K., E. H. Goodwin y B. E. Lehnert “ α -particles initiate biological production of superoxide anions and hydrogen peroxide in human cells”, en *Cancer Res.*, núm. 57, 1997 pp. 3963-3971.
62. Mothersill, C. y C. B. Seymour. “Cell-Cell Contact during Gamma Irradiation Is Not Required to Induce a Bystander Effect in Normal Human Keratinocytes: Evidence for Release during Irradiation of a Signal Controlling Survival into the Medium”, en *Radiat. Res.*, núm. 149, 1998, pp. 256-262.
63. Narayanan, P. K., K. E. LaRue, E. H. Goodwin y B. E. Lehnert “Alpha particles induce the production of interleukin-8 by human cells”, en *Radiat. Res.*, núm. 152, 1999, pp. 57-63.
64. Matsumoto, H. *et al.* “Induction of radioresistance by a nitric oxide-mediated bystander effect”, en *Radiat. Res.*, núm. 155, 2001, pp. 387-396.
65. Müller, W. E. G. *et al.* “Novel mechanism for the radiation-induced bystander effect: Nitric oxide and ethylene determine the response in sponge cells”, en *Mutat. Res.*, núm. núm. 597, 2006, pp. 62-72.
66. Huang, L., P. M. Kim, J. A. Nickoloff y W. F. Morgan. “Targeted and nontargeted effects of low-dose ionizing radiation on delayed genomic instability in human cells”, en *Cancer Res.*, núm. 67, 2007, pp. 1099-1104.
67. Mello, S. S. *et al.* “Delayed effects of exposure to a moderate radiation dose on transcription profiles in human primary fibroblasts”, en *Environ. Mol. Mutagen.*, núm. 52, 2011, pp. 117-129.
68. Pauling, L. “Genetic and somatic effects of high-energy radiations”, en *Bull. At. Scientists*, vol. 26 núm. 7, 1970, pp. 3-5.
69. Bonner, W. M. “Low-dose radiation: Thresholds, bystander effects, and adaptive responses”, en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 100, 2003, pp. 4973-4975.
70. Billen, D. “Spontaneous DNA Damage Produced by Ionizing Radiation and Its Significance for the ‘Negligible Dose’ Controversy in Radiation Protection”, en *Radiat. Res.*, núm. 124, 1990, 242-245.

71. Ames, B. N. "The Causes and Prevention of Cancer", en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 92, 1995, pp. 5258-5265.
72. Gofman, J. W. "The Free-Radical Fallacy about Ionizing Radiation: Demonstration That a Popular Claim is Senseless", en CNR [en línea], 1997. <<http://www.ratical.org/radiation/CNR/>>.
73. Ward, J. F. "Mammalian Cells Are Not Killed by DNA Single Strand Breaks Caused by Hydroxyl Radicals from Hydrogen Peroxide", en *Radiat. Res.*, núm. 103, 1985, pp. 383-392.
74. Ward, J. F. "DNA Damage Produced by Ionizing Radiation in Mammalian Cells: Identities, Mechanisms of Formation, and Reparability", en *Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol.*, núm. 35, 1988, pp. 95-125.
75. J. F. "The Yield of DNA Double-Strand Breaks Produced Intracellularly by Ionizing Radiation: A Review", en *Int. J. Radiat. Biol.*, núm. 57, 1990, pp. 1141-1150.
76. Tubiana, M., A. Aurengo, D. Averbeck, R. Masse "Recent reports on the effect of low doses of ionizing radiation and its dose-effect relationship", *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 44, 2006, pp. 245-251.
77. Jaworowski, Z. "Observations on Chernobyl after 25 years of radiophobia", en *21st Century Science & Technology*, verano de 2010, pp. 30-45.
78. Boveri, T. "Concerning the origin of malignant tumors", trad. y anot. por H. Harris en *J. Cell Sci.*, núm. 121, 2008, pp. 1-84.
79. Burns, F. J., E. V. Sargent. "The Induction and Repair of DNA Breaks in Rat Epidermis Irradiated with Electrons", en *Rad. Res.*, núm. 87, 1981, pp. 137-144.
80. Upton, A. C. "Evolving Perspectives on the Concept of Dose in Radiobiology and Radiation Protection", en *Health Phys.*, núm. 55, 1988, pp. 605-614.
81. Bender, M. A. "Significance of Chromosome Abnormalities", en J. D. Boice Jr. y J. F. Fraumeni eds., *Radiation carcinogenesis: epidemiology and biological significance*. Nueva York, Raven Press, 1984. pp. 281-289.

82. Bond, V. P. "Stochastic Basis for Dose-Response Curves, RBE, and Temporal Dependence", en J. D. Boice Jr. y J. F. Fraumeni eds., *Radiation carcinogenesis: epidemiology and biological significance*. Nueva York, Raven Press, 1984, pp. 387-402.
83. Bender, M. A., R. J. Preston. "Role of Base Damage in Aberration Formation: Interaction of Aphidicolin and X-Rays", en A. T.Natarajan, G. Obe and H. Altmann eds., *Progress in Mutation Research*, vol. 4. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Biomedical Press, 1982, pp. 37-46.
84. Preston, R. J. "The Effect of Cytosine Arabinoside on the Frequency of X-Ray-Induced Chromosome Aberrations in Normal Human Leukocytes", en *Mutation Res.*, núm. 69, 1980, pp. 71-79.
85. Brackenbush, L. W. y L. A. Braby. "Microdosimetric Basis for Exposure Limits", en *Health Phys.*, núm. 55, 1988, pp. 251-255.
86. Feinendegen, L. E., V. P. Bond, J. Booz, "Muhlsienpen H. Biochemical and Cellular Mechanisms of Low-Dose Effects", en *Int. J. Rad. Biol.*, núm. 53, 1988, pp. 23-37.
87. UNSCEAR, *Genetic and somatic effects of ionizing radiation*. Nueva York, United Nations, 1986.
88. Stram, D. O. *et al.* "Stable chromosome aberrations among A-bomb survivors: an update", en *Radiat. Res.*, núm. 136, 1993, pp. 29-36.
89. Kodama, Y. *et al.* "Stable chromosome aberrations in atomic bomb survivors: results from 25 years of investigation", en *Radiat. Res.*, núm. 156, 2001, pp. 337-346.
90. Lloyd, D. C. *et al.* "Frequencies of Chromosomal Aberrations Induced in Human Blood Lymphocytes by Low Doses of X-Rays", en *Int. J. Radiat. Biol.*, núm. 53, 1988, pp. 49-55.
91. Lloyd, D. C. *et al.* "Chromosomal Aberrations in Human Lymphocytes Induced *in Vitro* by Very Low Doses of X-rays", en *Int. J. Radiat. Biol.*, núm. 61, 1992, pp. 335-343.

92. Iwasaki, T. *et al.* “The dose response of chromosome aberrations in human lymphocytes induced *in vitro* by very low-dose X-rays”, en *Radiat. Res.*, núm. 175, 2011, pp. 208-213.
93. Kohlhoff, D. W. *Amchitka and the bomb. Nuclear testing in Alaska*. EUA, University of Washington Press, 2002.
94. Evans, H. J., K. E. Buckton, G. E. Hamilton y A. Carothers “Radiation-Induced Chromosome Aberrations in Nuclear-Dockyard Workers”, en *Nature*, núm. 277, 1979, pp. 531-534.
95. Barcinski, M. A. *et al.* “Cytogenetic Investigation in a Brazilian Population Living in an Area of High Natural Radioactivity”, en *Am. J. Hum. Genet.*, núm. 27, 1975, pp. 802-806.
96. Kochupillai, N., I. C. Verma, M. S. Grewal, V. Ramalingaswami. “Down’s Syndrome and Related Abnormalities in an Area of High Background Radiation in Coastal Kerala”, en *Nature*, núm. 262, 1976, pp. 60-61.
97. Baverstock, K.F., D. Papworth, J. Vennart. “Risk of Radiation at Low Dose Rates”, en *Lancet*, núm. 317, 1981, pp. 430-433.
98. Baverstock, K. F., J. Vennart. “A Note on Radium Body Content and Breast Cancers in U.K. Radium Luminisers”, en *Health Phys.*, núm. 44, 1983, S1, pp. 575-577.
99. Baverstock, K.F., D. G. Papworth. *Risks from radium and thorotrast, BIR Report 21*, D. M. Taylor, C. W. Mays, G. B. Gerber y R. G. Thomas eds. Londres, British Institute of Radiology, 1989, pp. 71-76.
100. Boice Jr., J. D., R. R. Monson “Breast Cancer in Women after Repeated Fluoroscopic Examinations of the Chest”, en *J. Natl. Cancer Inst.*, núm. 59, 1977, pp. 823-832.
101. Boice Jr., J. D., M. Rosenstein, E. D. Trout “Estimation of Breast Doses and Breast Cancer Risk Associated with Repeated Fluoroscopic Chest Examinations of Women with Tuberculosis”, en *Radiat. Res.*, núm. 73, 1978, 373-390.

102. Harvey, E. B., J. D. Boice Jr. M. Honeyman y J. T. Flannery. "Prenatal X-Ray Exposure and Childhood Cancer in Twins", en *New Engl. J. Med.*, en núm. 312, 1985, pp. 541-545.
103. Hoffman, D. A. *et al.* "Breast Cancer in Women with Scoliosis Exposed to Multiple Diagnostic X-Rays", en *J. Natl. Cancer Inst.*, núm. 81, 1989, pp. 1307-1312.
104. Burch, P. R. J., A. M. Stewart, G. W. Kneale "Prenatal radiation exposure and childhood cancers", en *Lancet*, núm. 296, 1970, pp. 1189-1190.
105. McMahon, B. "Prenatal X-Ray Exposure and Childhood Cancer", en *J. Natl. Cancer Inst.*, núm. 28, 1962, pp. 1173-1191.
106. Miller, A. B. *et al.* "Mortality from Breast Cancer after Irradiation during Fluoroscopic Examinations in patients being treated for tuberculosis", en *New Engl. J. Med.*, núm. 321, 1989, pp. 1285-1289.
107. Modan, B. *et al.* "Radiation-induced head and neck tumors", en *Lancet*, núm. 303, 1974, pp. 277-279.
108. Modan B., E. Alfandary, A. Chetrit, L. Katz "Increased Risk of Breast Cancer after Low-Dose Irradiation", en *Lancet*, núm. 333, 1989, pp. 629-631.
109. Modan, B., E. Ron, A. Werner "Thyroid cancer following scalp irradiation", en *Radiology*, núm. 123, 1977, pp. 741-744.
110. Stewart, A. M., G. W. Kneale "Age-distribution of cancers by obstetric X-rays and their relevance to cancer latent", en *Lancet*, núm. 296, 1970, pp. 4-8.
111. Stewart, A. M., J. Webb, D. A. Hewitt. "Survey of Childhood Malignancies", en *Br. Med. J.*, núm. 1, 1958, pp. 1495-1508.
112. Stewart, A. M., G. W. Kneale "Radiation Dose Effects in Relation to Obstetric X-Rays and Childhood Cancers", en *Lancet*, núm. 395, 1970, pp. 1185-1188.
113. Morgan, K. Z. "Cancer and low level ionizing radiation", en *Bull. Atom. Sci.*, núm. 34, 1978, pp. 30-41.

114. Bertell, R. *No Immediate Danger? Prognosis for a Radioactive Earth.*, Toronto, Ontario, Women's Educational Press, 1985
115. Wei, L. *et al. High Background Radiation Research in Yangjiang, China.* Beijing, Atomic Energy Press, 1996.
116. Barcinski, M. A. *et al.* "Cytogenic investigation in a Brazilian population living in an area of high natural radioactivity", en *Am. J. Hum. Gen.*, núm. 27, 1975, pp. 802-806.
117. Tao Z. *et al.* "Cancer mortality in the high background radiation areas of Yangjiang, China during the period between 1979 and 1995", en *J. Radiat. Res.*, núm. 41S, 2000, pp. 31-41.
118. Kochupillai, N., I. C. Verma, M. S. Grewal, "Ramalingaswami, Down's syndrome and related abnormalities in an area of high background radiation in coastal Kerala", en *Nature*, núm. 262, 1976, pp. 60-61.
119. Padmanabhan, V. T. *et al.* "Heritable anomalies among the inhabitants of regions of normal and high background radiation in Kerala: results of a cohort study, 1988-1994", en *Int. J. Health Serv.*, núm. 34, 2004, pp. 483-515.
120. Ghiassi-Nejad M. *et al.* "Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies", en *Health Phys.*, núm. 82, 2002, pp. 87-93.
121. Zakeri, F. *et al.* "Chromosome aberrations in peripheral blood lymphocytes living in background radiation areas of Ramsar, Iran", en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 50, 2011, pp. 571-578.
122. Hendry, J. H. *et al.* "Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks?", en *J. Radiol. Prot.*, núm. 29, 2009, pp. A29-A42.
123. Thorne, M. C. "Background radiation: natural and man-made", en *J. Radiol. Prot.*, núm. 23, 2003, pp. 29-42.
124. Luckey T. D. "Radiation hormesis overview", en *RSO Magazine*, núm. 8, 2003, pp. 22-41.

125. Cuttler, J. M. “Polycove M. Nuclear energy and health: and the benefits of low-dose radiation hormesis”, en *Dose-Response*, núm. 7, 2009, pp. 52–89.
126. Körblein, A., W. Hoffmann “Background radiation and cancer mortality in Bavaria: An ecological analysis”, en *Arch. Environ. Occup. Health*, núm. 61, 2006, pp. 109-114.
127. Little, M. P., R. Wakeford y G. N. Kendall “Updated estimates of the proportion of childhood leukaemia incidence in Great Britain that may be caused by natural background ionising radiation”, en *J. Radiol. Prot.*, núm. 29, 2009, pp. 467-782.
128. Fairlie, I. “Commentary on UNSCEAR 2006 Report: Annex C- the New Effects of Radiation”, en *Radiat. Prot. Dosimetry*, núm. 138, 2010, pp. 190-197.
129. Michel, R. E. J. *Low-dose radiation risk: a biological reality check.*, Tucson, Arizona, WM’01 Conference, 2001.
130. Brenner, D. J., R. K. Sachs “Estimating radiation-induced cancer risks at very low doses: rationale for using a linear no-threshold approach”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 44, 2006, pp. 253-256.
131. Brenner, D. J. *et al.* “Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know”, en *Proc. Natl. Acad. Sci.*, núm. 100, 2003, pp. 13761-13766.
132. National Council on Radiation Protection and Measurements. *Influence of Dose and Its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-LET Radiations*, Report Núm. 64. Washington, NRC, 1980.
133. Brenner, D. J. “Does Fractionation Decrease the Risk of Breast Cancer Induced by Low-LET Radiation?”, en *Radiat. Res.*, núm. 151, 1999, pp. 225-229.
134. Preston, D. L. *et al.* “Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997“, en *Radiat. Res.*, núm. 160, 2003, pp. 381-407.

135. Shimizu, Y. *et al.* "Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003", en *B. M. J.*, núm. 340, b5349, 2010.
136. Pierce, D. A., D. L. Preston. "Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors", en *Radiat. Res.*, núm. 154, 2000, pp. 178-186.
137. Ozasa, K. *et al.* "Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases", en *Radiation Research*, núm. 177, 2012, pp. 229-243.
138. Doss, M. "Evidence Supporting Radiation Hormesis in Atomic Bomb Survivor Cancer Mortality Data", en *Dose-Response*, núm. 10, 2012, pp. 584-592.
139. Doss, M. "Linear No-Threshold Model vs. Radiation Hormesis", en *Dose-Response: An International Journal*, vol. 11, núm. 4, 2013, pp. 479-497.
140. Woloshak, G. E. "Low dose effects: benefit or harm?", en *Health Phys.*, en 110, 2016, pp. 299-300.
141. Covelli, V. *et al.* "Influence of age on life shortening and tumor induction after X-ray and neutrón irradiation", en *Radiat. Res.*, núm. 100, 1984, pp. 348-364.
142. Covelli, V. *et al.* "Tumor induction and life shortening in BC3F1 female mice at low doses of fast neutron and X-ray", en *Radiat. Res.*, núm. 113, 1988, pp. 362-374.
143. Maisin, J. R. *et al.* "The effects of a fractionated gamma irradiation on life shortening and disease incidence in BALB/c mice", en *Radiat. Res.*, núm. 94, 1983, pp. 359-373.
144. Maisin, J. R. *et al.* "Life-shortening and disease incidence in C57BL mice after single and fractionated γ and high-energy neutron exposure", *Radiat. Res.*, núm. 113, 1988, pp. 300-317.
145. Maisin, J. R., G. B. Gerber, J. Vanckerkom y A. Wambersie, "Survival and diseases in C57BL mice exposed to x rays or 3.1 MeV neutrons at age of 7 or 21 days", en *Radiat. Res.*, núm. 146, 1996, pp. 453-460.

146. Mole, R. H. "Childhood cancer after prenatal exposure to diagnostic X-ray examinations in Britain", en *Br. J. Cancer*, núm. 62, 1990, 152-168.
147. Wiesel, A., C. Spix, A. Mergenthaler, A. Queisser-Luft, "Maternal occupational exposure to ionizing radiation and birth defects", en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 50, 2011, pp. 325-328.
148. Doll, R., R. Wakeford "Risk of childhood cancer from fetal irradiation", en *Br. J. Radiol.*, núm. 70, 1997, pp. 130-139.
149. Cardis, E. *et al.* "Effects of Low Doses and Low Dose Rates of External Ionizing Radiation: Cancer Mortality among Nuclear Industry Workers in Three Countries", en *Radiat. Res.*, núm. 142, 1995, pp. 117-132.
150. Ashmore, J. P. *et al.* "First Analysis of Mortality and Occupational Radiation Exposure based on the National Dose Registry of Canada", en *Am. J. Epidemiol.*, núm. 148, 1998, pp. 564-574.
151. Sont, W. N. *et al.* "First Analysis of Cancer Incidence and Occupational Radiation Exposure Based on the National Dose Registry of Canada", en *Am. J. Epidemiol.*, núm. 153, 2001, pp. 309-318.
152. Gilbert, E. S. "Studies of Workers Exposed to Low Doses of Radiation", en *Am. J. Epidemiol.*, núm. 153, 2001, pp. 319-322.
153. Vrijheid, M. *et al.* "The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Design, Epidemiological Methods and Descriptive Results", en *Radiat. Res.*, núm. 167, 2007, pp. 361-379.
154. Thierry-Chef, I. *et al.* "The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Study of Errors in Dosimetry", en *Radiat. Res.*, núm. 167, 2007, pp. 380-395.
155. Cardis E. *et al.* "The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks", en *Radiat. Res.*, núm. 167, 2007, pp. 396-416.

156. Hall P. *et al.* “Effect of low doses of ionising radiation in infancy on cognitive function in adulthood: Swedish population based cohort study”, en *Br. Med. J.*, núm. 328, 2004, pp. 1-5.
157. Akiba, S. y S. Mizuno “The third analysis of cancer mortality among Japanese nuclear workers, 1991-2002: estimation of excess relative risks per radiation dose”, en *J. Radiol. Prot.*, núm. 32, 2012, pp. 73-83.
158. Dropkin, G. “Low dose radiation and cancer in A-bomb survivors: latency and non-linear dose-response in the 1950-90 mortality cohort”, en *Environ Health*, vol. 6, 2007, pp. 1-25.
159. Preston, D. L. *et al.* “Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998”, en *Radiat. Res.*, núm. 168, 2007, pp. 1-64.
160. Brenner, D. J. “Extrapolating Radiation-induced Cancer Risks from Low Doses to Very Low Doses”, en *Health Phys*, núm. 97, 2009, pp. 505-509.
161. Myrden, J. A., J. E. Hiltz, “Breast Cancer Following Multiple Fluoroscopies during Artificial Pneumothorax Treatment of Pulmonary Tuberculosis”, en *Can. Med. Assoc. J.*, núm. 100, 1969, pp. 1032-1034.
162. Howe, G. R., “Epidemiology of Radiogenic Breast Cancer, in Progress”, en *Cancer Research and Therapy*, vol. 26. Nueva York, Raven, 1984, pp. 119-129.
163. Stewart, A. M., J. W. Webb, B. D. Giles, D. Hewitt. “Malignant Disease in Childhood and Diagnostic Irradiation In-Utero”, en *The Lancet*, núm. 268, 1956, p. 447.
164. Knox, E. G., A. M. Stewart, G. W. Kneale, E. A. Gilman. “Prenatal Radiation and Childhood Cancer”, en *J. Soc. Radiol. Prot.*, núm. 8, 1987, pp. 3-8.
165. Gilman, E. A., G. W. Kneale, E. G. Knox, A. M. Stewart. “Pregnancy X-Rays and Childhood Cancers: Effects of Exposure Age and Radiation Dose”, en *J. Radiol. Protect.*, núm. 8, 1988, pp. 3-8.
166. Baverstock, K. F., D. G. Papworth “The UK Radium Luminizer Survey”, en *Brit. J. Radiol., Supplemental BIR*, Report 21, 1987, 71-76.

167. BEIR. *Health risks from exposures to low levels of ionizing radiations: beir vii – Phase 2* [en línea]. Washington, National Academies Press, 2006. <<http://www.nap.edu/catalog/11340.html>>.
168. Beyea, J. “The scientific jigsaw puzzle: Fitting the pieces of the low-level radiation debate”, en *Bull. Atom. Sci.*, núm. 68, 2012, pp. 13-28.
169. Fabrikant, J. I. “The BEIR III Controversy”, *Rad. Res.* 84, 361-368 (1980).
170. Radford E. P. Human Health Effects of Low Doses of Ionizing Radiation: The BEIR III Controversy”, en *Rad. Res.*, núm. 84, 1980, pp. 369-394.
171. Cardis E. *et al.* “Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries”, *Br. Med. J.*, núm. 331, 2005, pp. 77-82.
172. Kossenko, M. M. y M. O. Degteva “Cancer mortality and radiation risk evaluation for the Techa river population”, en *Sci. Tot. Environ.*, núm. 142, 1994, pp. 73-89.
173. Kossenko, M. M. *et al.* “The Techa river cohort: Study design and follow-up methods”, en *Radiat. Res.*, núm. 164, 2005, pp. 591-601.
174. Krestinina, L. Y. *et al.* “Protracted radiation exposures and cancer mortality in the Techa river cohort”, en *Radiat. Res.*, núm. 164, 2005, pp. 602-611
175. Krestinina, L. Y. *et al.* “Solid cancer incidence and low-dose-rate radiation exposures in the Techa river cohort: 1956-2002”, en *Int. J. Epidemiol.*, núm. 36, 2007, pp. 1038-1046.
176. Cardis, E. “Low-dose rate exposures to ionizing radiation”, en *Int. J. Epidemiol.*, núm. 36, 2007, pp. 1046-1047.
177. Jacob, P. *et al.* “Is cancer risk of radiation workers larger than expected?”, en *Occup. Environ. Med.*, núm. 66, 2009, pp. 789-796.
178. IARC. “Les faibles doses de rayonnements associées à une légère augmentation du risque de cancer”, en *Communiqué de Presse* [en línea], núm. 166, 2005. <www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2005/pr166.html>.

179. Sugier, A. “Bases scientifiques des recommandations 2007. Conséquences pratiques”, en *Lettre de la cigr* [en línea], núm. 14, 2007. < <http://www.irsn.fr>>.
180. Goodhead, D. *et al. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (cerrie) London* [en línea], octubre, 2004. < <http://www.cerrie.org>>.
181. Rostand, J. “La défense de l’espèce, Conférence prononcée à l’Institut de la Vie le 03/02/1962”, en A. Dubois, *Un biologiste contre le nucléaire, textes choisis et commentés*. Paris, Berg International, 2012, pp. 25-41.
182. Demerec, M. y J. Sams *Induction of mutations in individual genes of Escherichia coli by low X radiation. In: Immediate and low level effects of ionizing radiations, Proceedings of the Symposium on Immediate and Low-Level Effects of Ionizing Radiations, Venice, 1959*, A. A. Buzzati-Traverso ed. Londres, Taylor and Francis, 1960.

Capítulo III

LA CONTAMINACIÓN RADIATIVA

En el presente capítulo se abordará el tema de los accidentes nucleares y las diferentes causas de contaminación. Se analizarán los principales accidentes nucleares que se han presentado desde que se instalaron los primeros reactores nucleares; a saber, Windscale, Reino Unido, (1957); Chelyabinsk-40, Rusia, (1957/8); Brown's Ferry, Alabama (1975); Three Mile Island, Pennsylvania (1979); Chernóbil, Ucrania (1986) y Fukushima, Japón (2011). Al final del capítulo se abordará el tema de los desechos nucleares.

A lo largo del capítulo se utiliza el término de contaminación radiactiva, es decir, toda la radiactividad presente en el ambiente, adicional a la radiactividad natural; y aquella, producto de las actividades humanas, tanto civiles como militares. Bajo esta consideración, el inicio de la contaminación radiactiva puede fijarse en 1945 con el estallamiento de las bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki. Posteriormente vinieron los ensayos nucleares de los años cincuenta y sesenta; actualmente se sigue produciendo contaminación radiactiva del ambiente a partir de las emisiones, emanaciones y desechos de las plantas nucleares que se encuentran en operación normal y, por supuesto, la contaminación producida por los accidentes sucedidos en las centrales nucleares.

Pruebas nucleares de los años cincuenta y sesenta

En 1956, la Comisión Federal Suiza de Vigilancia de la Radiactividad (CFCR por sus siglas en francés)²⁵ inició en Suiza un programa de monitoreo de la radiactividad. Uno de sus objetivos fue la medición de la radiactividad en el ambiente provocada por los ensayos nucleares de bombas atómicas realizados antes de 1962 por los Estados Unidos de América, la Unión Soviética, Francia y Gran Bretaña, en su mayoría ensayos a nivel atmosférico. Las lluvias radiactivas alcanzaron valores máximos a principio de los años sesenta [1]. A final de los años ochenta se podía detectar la presencia de núcleos radiactivos como el Cesio-137, el Estroncio-90, el Carbono-14 y el tritio, los cuales tienen una vida media del orden de 30, 28, 5730 y 12 años, respectivamente. Mediciones, realizadas en 1964, mostraron un aumento de 90% en la concentración de Carbono-14 en la biosfera con respecto a los años cincuenta [2]. Se podría pensar, por ejemplo, que como la semivida del Cesio-137 es de 30 años, entonces después de 30 años ya no se detectaría su presencia; sin embargo, no hay que olvidar que dada la magnitud de esta concentración en el entorno, para que la cantidad de Cesio-137 presente en la biosfera sea insignificante se necesitará del orden de diez semividas; esto significa que será necesario que transcurran 300 años aproximadamente para que podamos considerar que la presencia del Cesio-137 en el ambiente ya no representa peligro alguno para la salud.

Entre 1945 y 1998, hubo exactamente 2053 ensayos nucleares,²⁶ de los cuales 543 fueron realizados a nivel atmosférico y los otros fueron subterráneos. Cabe mencionar la ilustrativa película realizada por Isao Hashimoto en la que se muestran estos ensayos en un mapa terrestre sobre una línea de tiempo.²⁷ La lista de los ensayos la encabeza Estados Unidos de América con 1 032, seguidos por la ex-Unión Soviética con 715, Francia con 210, Gran Bretaña y China con 45 ensayos cada uno, 4 para India y 2 para Pakistán. En 1991, las organizaciones Médicos Internacionales para la Prevención de la Guerra Nuclear (IPPNW por sus siglas en inglés) y el Instituto para la Investigación sobre la Energía y el Entorno (IEER por sus siglas en inglés) publicaron el estudio “Ra-

²⁵ En el 2001, se transformó en Comisión Federal de Protección contra las Radiaciones y de Vigilancia de la Radiactividad (CPR por sus siglas en francés) <http://www.bag.admin.ch/ksr-cpr/index.html?lang=fr>

²⁶ En el caso de que se cuente con la información correspondiente, habría que añadir dos ensayos nucleares de Corea del Norte y uno israelí.

²⁷ Se puede ver en www.youtube.com/watch?v=gyGnq7d4MLg.

diactive Heaven and Earth: The health and environmental effects of nuclear weapons testing in, on and above the earth” [3], en este estudio se señala una estimación de 2.4 millones de muertes por cánceres en el mundo entero debido a la exposición al ^{14}C .

En 1997, el Instituto Nacional del Cáncer (NCI por sus siglas en inglés) publicó una estimación sobre dosis absorbidas en la glándula tiroides por habitantes de Estados Unidos de América a partir de lluvia radiactiva provocada por los ensayos nucleares [4]. En 1998, se publicó un estudio adicional sobre esta misma problemática [5]. Varios años más tarde se reveló que todas las pruebas de bombas atómicas habían provocado un promedio de 54 000 pacientes con cáncer de tiroides en Estados Unidos de América, debido a la contaminación por el ^{131}I [6]; es decir, un aumento de más de 10% con respecto al número de cáncer de tiroides en ausencia de lluvias radiactivas. Se estima que el número de muertes por cáncer en Estados Unidos de América ascendió en total a 15 000 por esta causa.

El accidente de Windscale (Sellafield)

El jueves 10 de octubre de 1957 ocurrió el incendio de la central nuclear militar británica Windscale, la cual empezaba su funcionamiento; esta planta estaba ubicada en el condado de Cumberland, uno de los lugares más bonitos de Inglaterra, en la famosa región del “Lake District”, en el borde del mar de Irlanda. Esta central fue construida entre 1946 y 1951, lo cual, para su época, fue un tiempo récord. Aquí se producía el plutonio que alimentaba a las bombas atómicas de Reino Unido. La producción era de ochenta kilogramos de plutonio al año, suficiente para fabricar una decena de bombas atómicas. La primera bomba atómica británica explotó accidentalmente el 3 de octubre 1952 en los islotes de Montebello, al noroeste de Australia. El accidente fue clasificado de categoría 5 en la escala de gravedad²⁸ [7].

En la planta de Windscale estaban instalados dos reactores que utilizaban al uranio natural en forma metálica²⁹ como combustible, con moderador

²⁸ La escala INES (International Nuclear Event Scale) de gravedad corre desde cero hasta 7. El valor máximo corresponde a un accidente mayor y en orden decreciente a un accidente serio (6), accidente con consecuencias amplias (5), accidente con consecuencias locales (4), incidente grave (3), incidente (2), anomalía (1) y desviación (0).

²⁹ El uranio metálico caliente se inflama espontáneamente al contacto con el aire.

de grafito y enfriados con aire. El moderador de grafito y el sistema de enfriamiento utilizado fueron los factores que provocaron el incendio en el reactor 1, produciéndose liberación de radiactividad en el entorno. En esa época se desconocía el comportamiento del grafito irradiado a bajas temperaturas, en el rango de 200 °C. El grafito, a partir del bombardeo con neutrones, puede cambiar su estructura cristalina adquiriendo una nueva configuración que le permite almacenar más energía, la cual puede escapar espontáneamente en forma de calor; este fenómeno se conoce como efecto Wigner, el cual fue descubierto precisamente unos años antes del accidente de Windscale [8]. Para evitar este proceso se tiene que recalentar regularmente al grafito (más o menos dos veces al año) para que sus átomos recuperen los sitios originales, antes de que una cantidad grande de energía sea acumulada.

El accidente se produjo debido a que el equipo de vigilancia en turno observó un enfriamiento del grafito y supuso, por tanto, que la operación de recalentamiento no se había completado. Frente a esta situación, el personal responsable decidió iniciar un nuevo calentamiento, lo cual produjo la elevación de la temperatura del uranio, con la consecuente ruptura de algunos cartuchos que lo contenían. Para enfriar al uranio se decidió dejar pasar el aire, y con ello empezó el incendio.

Una vez sucedido el accidente se decidió no dar información alguna al público, lo único que salió de la central fue radiactividad, como se pudo constatar a partir de mediciones en los alrededores. La policía local se enteró del problema un día después de ocurrido el accidente, después de las primeras mediciones de radiactividad [9].

A fin de apagar el incendio, ese mismo día se decidió inundar la central; el incendio quedó sofocado, pero se produjo vapor de agua cargado con productos radiactivos que se escaparon a la atmósfera, fundamentalmente Yodo-131. El tiempo de vida media del Yodo-131 es bastante corto, ocho días aproximadamente; a pesar de ello, de manera inmediata se detectó contaminación del suelo por depósito y también se detectó contaminación en la leche que se suministraba a la población. En algunos lugares la contaminación del suelo llegó a un millón de bequerels por metro cuadrado. La contaminación de la leche medida en Bq/L fue un orden de magnitud menor que la del suelo. Cerca de Windscale, la contaminación de la leche ascendió a 30 000 Bq/L; esto es, 400 veces más que el máximo observado a Salt Lake City, ciudad frecuentemente contaminada por los ensayos nucleares norteamericanos [9]. Ante la gravedad de la contaminación, durante un mes, se prohibió el consumo de la leche así como su venta en una región de aproximadamente 500 km cuadrados alrede-

dor de la central. El agua utilizada para el enfriamiento de la central, contaminada, y los dos millones de litros de leche contaminados fueron tirados al mar.

A la fecha existe controversia sobre la cantidad de radiactividad liberada en el accidente de Windscale, así como sobre sus efectos [10]; a pesar de ello, las estimaciones más optimistas aceptan la existencia de un número de muertes que es difícil de explicar por causas diferentes a la contaminación radiactiva. En 1958, en relación con este accidente, la UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) publicó un informe en el que afirmaba que era “altamente improbable que el accidente haya tenido efectos nocivos para la salud, tanto en los trabajadores de Windscale como en la población de los alrededores”. Ese mismo año se tomó la decisión de cerrar, de manera definitiva, la central nuclear de Windscale.

Esta versión de los hechos es la que se estableció por aproximadamente un cuarto de siglo. Todavía en 1975, el director de las investigaciones de Electricité de France (EdF),³⁰ C. Bienvenu, en relación con este accidente afirmó que como “resultado de esta monumental catástrofe: ni un muerto, ni un herido, ocho días (en realidad un mes) de prohibición del consumo de leche” [9].

Pero, después del accidente de Three Mile Island en 1979, las cosas empezaron a cambiar.

Un grupo de científicos norteamericanos pidió a sus colegas británicos estudiar realmente las consecuencias del accidente de Windscale; en 1983, se publicó un informe del Órgano de Protección Radiológica de Gran Bretaña (NRPB: National Radiological Protection Board) mencionando la posibilidad de veinte casos de muerte a causa de algún tipo de cáncer o presencia de alguna anomalía genética, entre ellos, cáncer de tiroides [1]. Pero la historia no acabó aquí [9, 12]. Poco tiempo después, en 1983, J. Urquhart publicó un artículo en el *New Scientist* [13] señalando que importantes cantidades de polonio-210 habían sido liberadas en el accidente de Windscale; la radiactividad producida fue detectada en los Países Bajos [14] y también en Noruega [15].

El polonio no es un producto de fisión, ni un elemento fisil, se fabrica por irradiación específica del bismuto-209 para transformarlo en bismuto-210; este último, por emisión beta, logra transformarse en polonio-210. Al inicio, este elemento sirvió para la construcción de las bombas atómicas británicas. El polonio es un material extremadamente radiactivo (emisor alfa, con un tiempo de vida de 138 días) y radiotóxico. La dosis máxima en caso de ingestión es de

³⁰ Empresa pública francesa encargada de la producción y distribución de electricidad.

7×10^{-6} μg , con esto se llega a una centena de muertes por cáncer adicionales, oficialmente reconocido por el NRPB.

Siete meses después del artículo de Urquhart, la cadena de televisión de Yorkshire difundió un documental sobre los peligros a la salud que involucraba la contaminación en la región donde está ubicada la central de Windscale [16]; este documental provocó una fuerte conmoción en el país, lo cual obligó a que el gobierno de Margaret Thatcher nombrara una comisión, dirigida por el médico Douglas Black, para investigar sobre la incidencia de enfermedades en la región [12]. Existen diversas investigaciones epidemiológicas que han abordado específicamente el efecto que tuvo el accidente de Windscale en la aparición de casos de cáncer; los resultados obtenidos son contradictorios [17-20]. Bowlt *et al.* [17], en particular, después de dividir la región en cinco zonas según su distancia a la central nuclear, no encontró exceso de casos de cáncer de tiroides. Por su parte, Draper *et al.* [18] confirmaron la existencia de un exceso de casos de leucemias y linfomas en jóvenes de 0 a 24 años nacidos en la ciudad de Seascale, la más cercana a la central; por otra parte, Gardner *et al.* [19,20], adicionalmente, encontraron hallazgos similares en niños que a la fecha en que fueron concebidos su padre ya había sido contaminado por la radiación. En un informe de 1995 de la NRPB, con base en una población de 1348 niños nacidos entre 1945 y 1992, y seguidos hasta la edad de 24 años o hasta 1992, según fuera el caso, se plantean modelos de riesgos para leucemias y linfomas [21]. Popplewell *et al.* [22], por medio de autopsias, encontraron cantidades elevadas de plutonio y Cs-137 en tejido de hígado de trabajadores de la central.

Douglas *et al.* [23] y Omar *et al.* [24] realizaron investigaciones epidemiológicas de seguimiento en más de 14 000 trabajadores de la planta nuclear de Sellafield, empleados de 1947 a 1975, unos seguidos hasta 1988 y otros hasta 1992. En estos estudios se observó un exceso de muertes por cáncer de pleura y de tiroides, sin que se encontrara una asociación significativa entre el riesgo de cáncer y dosis de radiación acumulada. En el caso particular de leucemia y mieloma múltiple, los autores sí lograron encontrar asociación con la dosis de radiación acumulada.

El accidente de Chelyabinsk-40

Chelyabinsk-40 es parte del complejo Mayak colocado en el sur de la parte oriental de los Montes Urales. Se trata de un complejo militar para la producción de plutonio y tritio para las bombas atómicas soviéticas. De hecho, en

este complejo fue colocado el primer reactor para la producción de ^{239}Pu de uso militar de la antigua Unión Soviética [25, 26]. En esta región se encuentra una ciudad de trabajadores que no aparece en el mapa, y sólo a partir de 1992 se inició el permiso parcial a visitantes extranjeros. Chelyabinsk-40 está a 15 km de la ciudad de Kyshtym, cerca del lago Kyzyltash, sobre el río Techa que desemboca en el río Ob.

Este complejo se caracteriza por haber sido una fuente permanente de contaminación radiactiva del ambiente [26]. La población de la región de Chelyabinsk ha sufrido al menos tres desastres nucleares [25]. En 1957 hubo una explosión de un contenedor de desechos radiactivos, que arrojó a la atmósfera 740 PBq ($1 \text{ PBq} = 10^{15} \text{ Bq}$) ó $20 \times 10^6 \text{ Ci}$. La explosión formó una pluma que alcanzó una altitud de 1 km; el viento dispersó la radiactividad, formándose una traza, cuya longitud fue del orden de 300 km y 30-50 km de ancho, conocida con el nombre de Traza Radiactiva de los Urales del Oriente. Se estima que cerca de 250 000 personas fueron contaminadas.

Previo al accidente de 1957, se estima que entre 1949 y 1956 fueron liberados en el río Techa más de 100 PBq, incluyendo isótopos de rutenio (^{103}Ru , ^{106}Ru), así como ^{90}Sr y ^{137}Cs [25,26].

El tercer desastre ocurrido en 1967 se debió a una sequía parcial del lago Karachay, que servía como depósito de desechos radiactivos desde 1951; los fuertes vientos dispersaron sedimentos contaminados hasta una distancia de 50-75 km. Se estima que la contaminación fue del orden de 22 TBq, depositada en un área de 1 800 km², afectando a 500 000 personas.

Durante más de seis años, sistemáticamente el complejo Mayak tiró desechos radiactivos en el río Techa, única fuente de agua para 24 pueblos que están a su alrededor.

En 1976, Medvedev dio a conocer el accidente de 1957 ocurrido en Mayak [27], sin embargo, las autoridades soviéticas de la época guardaron el secreto sobre los accidentes. Fue hasta la década de los noventa, bajo el gobierno de M. Gorbachev, que se reconocieron los hechos [28]; hasta ese momento fue que las autoridades soviéticas reconocieron que los desechos radiactivos en esa región podrían producir una contaminación mucho mayor a la producida por el accidente de Chernóbil. A la fecha, todavía no se tiene una estimación exacta sobre la contaminación producida por liberación de Sr-90, las estimaciones existentes son variables [29].

Recientemente se publicaron algunos trabajos sobre esta contaminación y sus efectos en la región de Chelyabinsk. En particular el trabajo de Shagina *et al.*, intenta reconstruir la contaminación del río Techa después de las descar-

gas de los años 1949-1951 [30]. Otros trabajos han investigado sobre la ocurrencia de enfermedades cerebro vasculares [31] y de cáncer de pulmón [32] en los obreros que trabajaban en el complejo.

Hay evidencia de que los organismos de inteligencia norteamericanos tuvieron información sobre la explosión de Mayak en 1957; sin embargo, ni el gobierno norteamericano, ni el gobierno soviético, ni ningún otro país dio a conocer los hechos. Tal vez lo que estuvo en ese momento en primer plano fue la defensa, en cada uno de los países informados, del avance en la producción de energía nuclear a costa de los daños del entorno. En palabras de Hertsgaard: “prevenir que la población desarrollara temor ante los programas de energía nuclear” [33]. Cuando la Unión Soviética decidió informar sobre el accidente de Mayak de 1957 ya había sucedido el accidente de Chernóbil. ¿Cuántos accidentes en centrales nucleares militares de diferentes países se han quedado en secreto?

El incendio de Brown's Ferry

La central nuclear de Brown's Ferry, Alabama (EUA), compuesta de tres reactores BWR fue terminada de construir en 1974. La capacidad máxima de la planta era de 3 440 MW. El 22 de marzo del 1975 se declaró un incendio en el reactor número 1, como consecuencia de un error humano y de consignas de seguridad insuficientes. El incendio se produjo cuando dos electricistas buscaban fugas de aire en una pared donde pasaban cables eléctricos, cerca de la sala de control. Para encontrar las fugas, los trabajadores usaban velas y observaban el movimiento de la llama; una de ellas prendió fuego al material utilizado para sellar las fugas, el cual era combustible.

A pesar de la utilización de extinguidores de CO_2 , no pudieron apagar las llamas. Al contrario, el sello incendiado, bajo la presión del extinguidor, se escapó hacia el otro lado de la pared. Después se intentó reemplazar el oxígeno de la sala de control por dióxido de carbono, a través de los hoyos en la pared. El jefe de los bomberos propuso usar agua para apagar el fuego, pero el director de la central quería seguir con el CO_2 . Finalmente, el reactor fue parado y seis horas después el fuego fue apagado con agua. El reactor quedó inactivo durante un año [34]. Esta central fue objeto de varios incidentes ulteriores [35].

El accidente de Three Mile Island

El 28 de marzo de 1979, en la central nuclear de Three Mile Island en Middletown, Pensilvania, ocurrió el peor accidente nuclear que a la fecha ha sucedido en Estados Unidos de América. A causa de fallas mecánicas y eléctricas del sistema, y errores humanos cometidos por el personal de la planta, uno de los reactores de la central nuclear, el TMI-2 se sobrecalentó y parte del corazón del mismo se fundió. Al interior del reactor se creó una burbuja de hidrógeno, amenazando con hacer estallar al reactor. A fin de evitar el estallamiento, como medida preventiva, se tomó la decisión de liberar gas contaminado a la atmósfera. Durante una semana de tensión, en medio de informaciones contradictorias, más de cien mil personas, en su mayoría niños y mujeres embarazadas evacuaron la región. En esta ocasión las paredes del reactor resistieron; según informaron los directivos, la liberación de elementos radiactivos fue mínima. Debido al accidente, la planta quedó fuertemente contaminada y estuvo cerrada durante dos años. A partir de esa fecha no ha habido ninguna construcción de nuevas centrales nucleares en Estados Unidos de América.

De manera inmediata, las autoridades correspondientes informaron que las fugas radiactivas fueron bajas y sin peligro para la salud. De hecho, a la fecha, son pocos los estudios epidemiológicos realizados en la región para evaluar los efectos que tuvo el accidente de la central de Three Mile Island en la salud de los pobladores.

En particular, estudios realizados por Hatch *et al.*, de la Universidad de Columbia [36, 37], muestran que la tasa de cánceres diagnosticados en personas menores de 25 años aumentó en 64 % del periodo 1975-1979 al periodo 1981-1985; sin embargo, informan que no se encontró asociación entre la dosis de radiación recibida y el riesgo de cáncer. Posteriormente, en 1997, Wing *et al.* [38], después de reexaminar los datos de Hatch y hacer algunas correcciones metodológicas, con la misma muestra llegaron a una conclusión diferente; encontraron que sí hay asociación entre la radiación y el riesgo de cáncer. Por su parte, Talbot *et al.*, en un estudio de la Universidad de Pittsburgh publicado en 2003, informaron sobre un aumento de la mortalidad por cáncer, sin encontrar asociación entre este aumento y la distancia del área geográfica a la central [39]. Como lo menciona Joseph Mangano, son muy pocas las preguntas sobre los efectos en la salud debidos al accidente de Three Mile Island, y son mucho menos las respuestas [40]. Recientemente se han dado a conocer dos trabajos que informan sobre un incremento en la incidencia de cáncer de tiroides, de 1993 a 2006, en el área de Three Mile Island [41, 42].

El desastre de Chernóbil

En palabras de Nesterenko *et al.* [43], para millones de personas en el planeta la explosión del cuarto reactor de Chernóbil cortó la vida en dos partes: el antes y el después. El sábado 26 de abril 1986 a la 1:26 de la mañana ocurrió uno de los accidentes más graves de la industria nuclear: se produjeron dos explosiones en el reactor 4 de la planta nuclear de Chernóbil en Ucrania. La Organización Mundial de la Salud informó que la radiactividad total liberada en el accidente de Chernóbil fue 200 veces más que la de las bombas de Hiroshima y Nagasaki [44]. En opinión de la propia Agencia Internacional de la Energía Atómica, con base en la magnitud y alcance del desastre, la cantidad de población afectada y las consecuencias a largo plazo, el accidente de Chernóbil ha sido “el peor desastre industrial registrado” [45].

Las dos explosiones ocurridas destruyeron completamente el reactor y produjeron una nube de productos de fisión radiactivos, gases y desechos que alcanzó una altura de 7 a 9 kilómetros en la atmósfera. Al día siguiente, la quema de los gases combustibles procedentes del núcleo del reactor, produjeron una llama de 50 metros por encima del reactor [46]. Lo más grave de la catástrofe, 1 700 toneladas de barras moderadoras de grafito estuvieron en combustión durante ocho días [47]. La temperatura alcanzó los 2 500 °C, lo cual produjo la fusión del uranio metálico del núcleo del reactor [48] y la vaporización de diversos núcleos radiactivos.

Actualmente todavía se encuentra en debate la estimación de la cantidad de radiactividad que fue liberada durante la catástrofe. En el 2000, la UNSCEAR estimó que la liberación total de material radiactivo ascendía a 12×10^{18} Bq. Estas cifras han sido retomadas por la OMS y la AIEA [44]. Pero a ciencia cierta no se sabe cuántos núcleos radiactivos a la fecha han sido liberados; tampoco se sabe cuanta radiación existe debajo del sarcófago de cemento con el que se cubrió el reactor. Así mismo se debate sobre la cantidad de núcleos radiactivos liberados, en particular Cs-137 y I-131 [49], sin hablar del número de víctimas. A fin de formarnos una idea del efecto de la catástrofe sobre la salud humana, recordemos las palabras de Kofi Annan, ex-Secretario General de la ONU al respecto: “Chernóbil es una palabra que quisiéramos borrar de nuestra memoria. Pero más de siete millones de seres humanos no tienen el lujo de olvidar. Ellos siguen sufriendo, todos los días, lo ocurrido... El número exacto de víctimas nunca será conocido. Pero los tres millones de niños que necesitan un tratamiento antes del 2016 nos dan una idea del número de los que pueden

estar fuertemente enfermos... Su vida futura estará deformada como su juventud. Muchos morirán de manera prematura” [50].

El escape de los núcleos radiactivos a la atmósfera alcanzó su valor máximo en los primeros diez días del accidente. En este periodo, los vientos cambiaron de dirección frecuentemente, provocando la dispersión de la nube radiactiva sobre varios países de Europa [51] y posteriormente sobre todo el hemisferio norte, llegando hasta Japón [52], Alaska [53, 54] y Estados Unidos de América [55]. En la figura 1 se ilustra la dispersión de la nube radiactiva sobre el globo terráqueo unos días después de la explosión. El video realizado por el ISRN permite observar los desplazamientos de la nube radiactiva [56]. Dada la magnitud de las explosiones nucleares, es claro que ningún ciudadano de ningún país está protegido contra la contaminación nuclear. Un reactor nuclear puede contaminar, en poco tiempo, a la mitad del globo terráqueo. En la actualidad, más de tres billones de personas habitan las áreas contaminadas. Más de 50% de la superficie de 13 países europeos y 30% de la superficie de otros ocho países ha sido contaminada por las lluvias radiactivas en algún momento. Antes del accidente de Chernóbil, 80% de los niños de los territorios de Belarus, Ucrania y Rusia cercanos a Chernóbil eran sanos, ahora ese valor no llega a 20% [43].

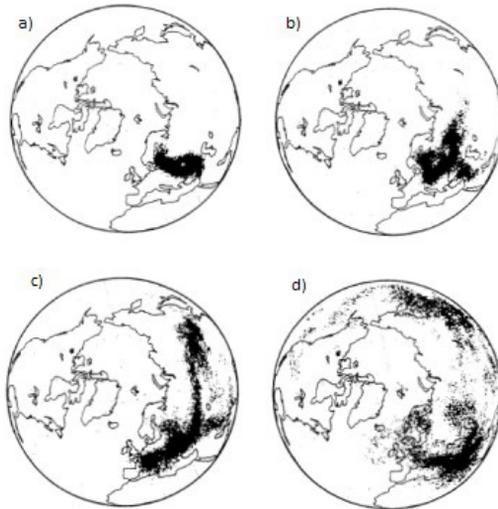


Figura 1. Desplazamiento de la nube radiactiva después de la explosión inicial en Chernóbil: a) día 2, b) día 4, c) día 6 y d) día 10 [57].

Las lluvias provocaron que los depósitos radiactivos fueran geográficamente heterogéneos, con variaciones importantes en la densidad de los depósitos. La mayor concentración de núcleos radiactivos y partículas del combustible se depositaron en Belarus, Rusia y Ucrania. Más de la mitad del Cs-137 se depositó en otros países [49] (ver tabla 1). Según el informe TORCH [49], los valores dados a conocer por las agencias oficiales UNSCEAR y AIEA sobre la liberación de Cs-137 e I-131 subestiman en 30% y 15%, respectivamente, los valores reales. Esto significa que los cálculos que estas organizaciones realizaron sobre la dosis recibida por los individuos, ya sea para la exposición de cuerpo entero o de tiroides se encuentran por debajo de los valores reales.

La estimación sobre la fuerza de asociación existente entre los niveles de radiación y sus efectos sobre la salud es una tarea compleja, pues exige considerar múltiples factores que intervienen en esta relación. Entre otros tantos factores, es necesario contar con una adecuada estimación de las concentraciones de las lluvias atómicas, según área geográfica; es necesario establecer la dosis de exposición causada por los núcleos radiactivos de corta vida media (I-133, I-135 y Te-132, entre otros) durante las primeras horas, días y semanas después de la catástrofe; tiene que considerarse el efecto biológico específico de cada núcleo radiactivo, tomando en cuenta tanto los efectos de la radiación interna como externa. Estos problemas hacen que la reconstrucción de las dosis recibidas por los individuos sea una labor difícil y, con ello, el cálculo de tasas y riesgos. Dada esta dificultad, no es extraño encontrar estimaciones realizadas por organismos oficiales y no oficiales que minimizan las consecuencias que la catástrofe de Chernóbil tuvo sobre la salud humana.

Tabla 1. Valores estimados sobre el depósito de Cs-137 (PBq) en diversas regiones del mundo, por causa del accidente de Chernóbil [49]

Informe	Belarus, Rusia y Ucrania (PBq)	Resto de Europa (PBq)	Resto del mundo (PBq)	Total (PBq)	Belarus, Rusia y Ucrania (%)
US DOE [58]	~33	~33	~32	~98	~33
UNSCEAR, 1988 [59]	29	26	15	70	42
CE, 1998 [60]	57	37	–	–	–
UNSCEAR, 2000 [46]	40	–	–	85	47

Una vez que sucede un accidente nuclear, los individuos que son alcanzados por la radiación son expuestos, de manera inmediata, a una radiación externa al momento del paso de la nube radiactiva y a una radiación interna debido a la inhalación de los núcleos radiactivos de dicha nube. Posteriormente, los individuos siguen estando expuestos a una radiación externa debido a los núcleos radiactivos depositados en el suelo y a una radiación interna causada por la ingestión de alimentos contaminados [61]. En los primeros momentos del accidente, las formas de exposición importantes se deben a la nube radiactiva y a la inhalación; años después del accidente, las dos últimas pasan a primer plano. Desafortunadamente, una vez ocurrido el accidente de Chernóbil, varios gobiernos, incluidos el inglés y el francés, no sólo el de la Unión Soviética, intentaron minimizar los efectos del accidente [62, 63]. Sin embargo, la realidad termina imponiéndose. Para 2007, en el Reino Unido, todavía existían más de 360 granjas agrícolas que aún estaban sometidas a restricciones debido a la contaminación de Chernóbil [61]; por otro lado, en Francia, pareciera que la nube nunca pasó.

Entre 1995 y 1998, la Comisión Europea y los Estados miembros hicieron mediciones de la contaminación por Cs-137 a través de toda Europa con vuelos bajos de aviones y muestras de suelos [64]. La tabla 2 muestra la extensión del área, en cada uno de los países, que fue comprometida con una contaminación mayor a 40 kBq/m^2 (1.08 Ci/km^2). Más de 2% de la superficie europea fue contaminada con niveles superiores a 40 kBq/m^2 ; en Belarus, 22% de su superficie presentó estos niveles de contaminación. Si se toma como punto de corte 4 kBq/m^2 , 40% de la superficie europea resultó comprometida [58]; esta última cifra considera los depósitos de Cs-137 residuales de los ensayos nucleares realizados en los años 1950-1960. Desafortunadamente los organismos oficiales, por lo general, solamente informan sobre los lugares con mayor contaminación y no informan ni dan a conocer los datos de la contaminación global que afecta a Europa [65].

Tabla 2. Superficie contaminada por Cs-137 con niveles superiores a 40 kBq/m² para diversos países europeos [adaptada de 61]

País	Área territorial (10³ km²)	Área contaminada (> 40 kBq/m² Cs-137) (10³ km²)	Área contaminada (%)
Belarus	210	46.1	22
Austria	84	11.1	13.2
Ucrania	600	38.2	6.4
Finlandia	340	19	5.6
Suecia	450	23.5	52
Italia	280	8.35	3
Eslovenia	20	0.61	3
Noruega	320	7.2	2.3
Suiza	41	0.73	1.8
Rusia (parte europea)	3800	59.8	1.6
Grecia	130	1.24	1
Rumania	240	1.2	0.5
República Checa	79	0.22	0.28
Polonia	310	0.52	0.16
Alemania	350	0.32	0.09
Reino Unido	240	0.16	0.06
Eslovaquia	49	0.02	0.04
Total	9700	218.27	2.25

En relación a los valores de referencia para la contaminación, 1 Ci (37 GBq) frecuentemente es considerado como un valor que no tiene peligro. Sin embargo, para poder decidir con mayor certidumbre si un valor es aceptable o no según estándares de seguridad, es necesario determinar la dosis de radiación que involucra una contaminación de esta magnitud. Fairlie [61] considera que una exposición externa a 40 kBq/m² equivale a una dosis aproximada de 0.4 mSv por año; a este valor hay que añadirle aproximadamente 50% por causa de ingestión de alimentos y agua contaminados. Así, se obtiene como resultado una dosis total aproximada de 0.6 mSv por año.

La tabla 2 clasifica los países por el tamaño de las áreas contaminadas, pero esta clasificación esconde grandes variaciones en las cantidades de Cs-137 depositadas en cada país. En la tabla 3 se indica el nivel de contaminación por Cs-137 encontrado en diversos países de Europa. Cabe mencionar que estas tablas fueron elaboradas a partir de cifras oficiales tanto del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América [58] como de la Comisión Europea [60].

Tabla 3. Nivel de contaminación total por Cs-137 encontrado en diversos países de Europa [adaptada de 49]

País	PBq	País	PBq	País	PBq
Rusia (parte eur.)	29	Grecia	0.95	Suiza	0.36
Belarus	15	Italia	0.93	Irlanda	0.35
Ucrania	13	Francia	0.93	Eslovaquia	0.32
Serbia, Bosnia	4.64	Reino Unido	0.88	Letonia	0.25
Finlandia	3.8	Rep. Checa	0.6	Estonia	0.18
Suecia	3.5	Lituania	0.44	Turquía (parte eur.)	0.16
Bulgaria	2.7	Moldavia	0.4	Dinamarca	0.062
Noruega	2.5	Albania	0.4	Holanda	0.053
Rumania	2.1	Eslovenia	0.39	Bélgica	0.008
Alemania	1.9	España	0.38	Luxemburgo	90.01
Austria	1.8	Croacia	0.37	Total	
Polonia	1.2	Hungría	0.37		

El primer lugar en contaminación por Cs-137 lo ocupan las repúblicas de la ex-Unión Soviética: Rusia, Belarus y Ucrania. En los países de la ex-Yugoslavia (Serbia, Bosnia, Croacia y Eslovenia), Finlandia, Suecia, Bulgaria, Noruega, Rumania, Alemania, Austria y Polonia se registraron valores por arriba de 1 PBq de Cs-137. A fin de contar con una estimación sobre la contaminación causada en Europa por la catástrofe de Chernóbil es necesario restar la radiactividad proveniente de los ensayos nucleares realizados en los años cincuenta y sesenta; se estima que esta última es del orden de 20 PBq. Los cálculos realizados por la Comisión Europea sobre la contaminación causada en Europa por la catástrofe de Chernóbil consideran que, para los casos en que se midió un nivel de contaminación por debajo del valor estimado esperado, a partir de los ensayos nucleares, la contribución de Chernóbil fue nula; lo anterior obli-

ga a tomar con cautela los valores reportados por la Comisión Europea, pues algunas estimaciones pueden tener un alto nivel de incertidumbre [49, 65]. Se acepta que, para que un valor de contaminación sea insignificante respecto a un valor inicial encontrado es necesario que transcurran 10 semividas; si tomamos en cuenta este señalamiento, para el Cs-137 que tiene una semivida de 30 años, es necesario esperar 300 años para considerar que el valor será insignificante respecto al encontrado actualmente. Lo anterior, por supuesto, no asegura que dicho nivel ya no será peligroso para la salud, eso depende del valor inicial encontrado.

Según el informe de 2002 de la UNDP, UNICEF, UN-OCHA y OMS respecto a las consecuencias del accidente de Chernóbil [63], cerca de 200 000 personas viven en zonas altamente contaminadas (15-40 Ci/km²); se desconoce el número de individuos, supuestamente bajo, que habita en zonas con más de 40 Ci/km². Según el informe de la Oficina para la Coordinación de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas (2004) [67]:

Hoy, dieciocho años después (del accidente de Chernóbil), casi 8,4 millones de personas en Belarus, Ucrania y Rusia están expuestas a radiaciones. Aproximadamente 150 000 kilómetros cuadrados, una superficie del tamaño de la mitad de Italia, están contaminadas. Superficies agrícolas que cubren casi 52 000 kilómetros cuadrados, lo que es más que el tamaño de Dinamarca, están arruinadas. Casi 400 000 personas fueron desplazadas, pero millones siguen viviendo en un entorno donde la exposición residual permanente crea varios efectos adversos.

Según el mismo informe [67]:

Actualmente, más o menos 6 millones de personas viven en zonas afectadas. Las economías en la región se encuentran estancadas, con los tres países directamente afectados, gastando billones de dólares para enfrentar los efectos prolongados del desastre de Chernóbil. Los problemas de salud crónicos, especialmente en niños, son endémicos.

Sobre este problema, recomendamos leer el libro *Voces de Chernóbil* de Svetlana Alexievitch, Premio Nobel de Literatura 2015 [68].

El accidente de Chernóbil dejó consternados a los promotores de la energía nuclear en todo el mundo. Después del accidente, tanto gobiernos como grupos privados de la industria nuclear llevaron a cabo varios intentos para ocultar la verdadera magnitud de la catástrofe. En 1987, la Unión Soviética pu-

blicó sus estimaciones sobre la catástrofe [69]; los analistas del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América aceptaron estas cifras y las utilizaron en diversas publicaciones, oficiales y no oficiales [58, 70]. Sin embargo, en la prensa de la época, el 6 de marzo 1989, se publicó un artículo en el *Wall Street Journal* informando [71]: “los registros de los niveles de radiación de Ucrania son tan secretos que los investigadores soviéticos no tienen acceso a ellos”. Al siguiente mes, el *New York Times* [72] informó que, según las *Izvestias*, el ministro soviético de energía, Anatoly Mayorets, había firmado un decreto para limitar la cobertura de los accidentes nucleares por parte de la prensa, señalando que todas las informaciones al respecto serían consideradas como clasificadas. En julio y agosto del mismo año, varios comunicados de la *Associated Press* [73] informaron sobre el conflicto entre el gobierno del Belarus y los científicos de ese país; según el gobierno la necesaria evacuación adicional involucraba sólo 11 000 personas, en tanto que los científicos consideraban que el número ascendía a 106 000 personas. El semanal *Time* del 13 de noviembre 1989 [74] señaló que las leucemias y otras consecuencias de las radiaciones estaban siendo consideradas como enfermedades menores y no habían sido bien reportadas. Ni la administración norteamericana, ni la de la Unión Soviética mostraron interés en proporcionar los datos correctos.

La investigación epidemiológica sobre el efecto de las radiaciones ionizantes en la salud humana, actualmente ya no se restringe a estudiar el potencial carcinógeno de las radiaciones; se busca lograr mejores estimaciones de los riesgos y entender de manera más profunda sus efectos cancerígenos [75]. En relación con el accidente de Chernóbil, se estima que la liberación de I-131, elemento de semivida corta, fue del orden de 1.2 a 1.8×10^{18} Bq; para el Cs-134 y el Cs-137, elementos de semivida larga, se estima que la liberación fue del orden de 1.4×10^7 Bq [75]. Gran número de personas, particularmente niños, recibieron dosis importantes de radiación en la tiroides debido a la ingestión e inhalación de I-131 e ingestión de los isótopos del cesio, además de los núcleos radiactivos depositados en el entorno.

Según el informe de la UNDP, UNICEF, UN-OCHA y OMS anteriormente mencionado [63], el número de casos de cáncer de tiroides en menores de 15 años, en Belarus, Rusia y Ucrania, subió drásticamente a partir de 1990; la figura 2 ilustra dicho crecimiento. Diversos estudios epidemiológicos realizados con niños de los tres países han encontrado hallazgos similares [76-89]. A la fecha, no hay duda en torno a la existencia de una relación causal entre exposición a los isótopos radiactivos del yodo liberados en el accidente de Chernóbil y el aumento en la incidencia de casos de cáncer de tiroides en niños y adolescentes

de las regiones contaminadas de Belarus, Rusia y Ucrania [75]. La experiencia de la cohorte LSS (Life Span Study) muestra que el riesgo de cáncer de tiroides perdura durante varios decenios. De acuerdo con las proyecciones realizadas por E. Cardis *et al.* [90], para 2065 se estiman 16 000 casos de cáncer de tiroides y 25 000 casos de otros cánceres en Europa como consecuencia del accidente de Chernóbil. A este respecto, Baverstock [89] hace un estudio detallado. Diversos trabajos han mostrado también un aumento en la incidencia de cáncer tiroideo y otras afecciones en los liquidadores (trabajadores encargados del control del accidente) de la planta de Chernóbil [91-96].

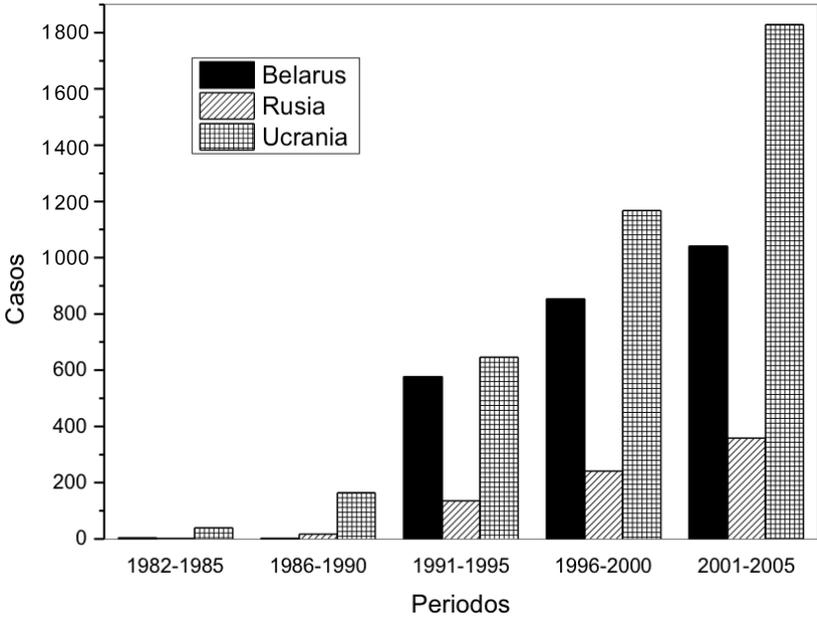


Figura 2. Casos de cáncer de tiroides en niños y jóvenes que fueron expuestos a la radiación debido al accidente de Chernóbil antes de los 18 años de edad, de 1982 a 2005 [66].

De 1970 a 2001, en Belarus, la tasa de incidencia de cáncer de tiroides se incrementó por un factor de nueve en hombres y por un factor de veinte en mujeres. En las zonas más contaminadas estos factores alcanzaron los valores de nueve y de treinta y cuatro, respectivamente [83, 97].

En un trabajo reciente, Leenhardt *et al.* [98] informan sobre un aumento importante en el número de casos de cáncer de tiroides para el periodo 1980-

2000, señalan que este efecto es mayor en mujeres que en hombres, pero sin aparente relación con el accidente de Chernóbil. En Inglaterra también se ha registrado un incremento en la incidencia de cáncer de tiroides en niños; este incremento se relaciona directamente con las lluvias de Chernóbil, pero es posible que también esté relacionado con una mayor capacidad de detección de los casos [99].

La contaminación de Chernóbil alcanzó a varios países europeos, con sus correspondientes consecuencias. En una investigación realizada en la República Checa, Mürber encontró que entre 1976 y 1999 la tasa de cáncer de tiroides presentó un aumento de 2% anual [100]. A partir 1990, la tasa de crecimiento anual de esta enfermedad, que es característica de irradiación, ha sido de 2.6%, con una incidencia mayor en mujeres que en hombres.

Un estudio en Finlandia mostró la presencia de un aumento de 20% de leucemia en niños en la región que recibió más lluvias radiactivas por accidente de Chernóbil; sin embargo, no se encontró una asociación estadísticamente significativa entre estos eventos [101]. Hallazgos análogos se encontraron en estudios realizados en Suecia [102, 103]. Cabe mencionar que, en los dos casos anteriores, se estima que las dosis fueron inferiores a 1 mSv.

Después del accidente, durante tres años, las autoridades soviéticas falsificaron intencionalmente y de manera irreversible los registros médicos y hospitalarios [43], presionando a los médicos para no reportar las enfermedades de los liquidadores relacionadas con las radiaciones. Dada esta situación, cualquier intento de llevar a cabo algún tipo de estudio epidemiológico que considere esta información se vuelve prácticamente imposible; sin embargo, las consecuencias están a la vista.³¹ Ésta no es la primera ocasión que sucede el ocultamiento de datos, pues ya en el accidente de Chelyabinsk sucedió lo mismo (ver capítulo 2).

En la tabla 4 se muestran las cifras estimadas por diversos organismos sobre las muertes causadas por el accidente de Chernóbil; la disparidad entre estos valores no deja de sorprender. Omitimos en esta tabla la cifra ridícula dada a conocer por la Asociación Nuclear Mundial³² (WNA por sus siglas en inglés), con un total de 30 muertes.

³¹ Ver por ejemplo el sitio <<http://www.chernobyl-children.org.uk>>.

³² <<http://www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.html>>.

Tabla 4. Estimación de las muertes por cáncer causadas por el accidente de Chernóbil por diferentes organismos e investigadores

	Año	Muertes
Gofman	1990	475 500
AIEA/OMS	2005	9 000
Verdes europeos	2006	30 000-60 000
Cardis <i>et al.</i>	2006	16 000
Greenpeace	2006	93 000
Yablokov <i>et al.</i>	2010	900 000
UNSCEAR	2011	~ 19 000

Efectos a nivel genético

Desde la década de los noventa a la fecha, un grupo de investigadores alemanes han publicado una serie de trabajos sobre los hijos de personas irradiadas, no sólo de la región cercana a Chernóbil sino también en toda Europa [104-111]. Estos trabajos, utilizando modelos estadísticos para analizar los datos, aportan elementos sobre el impacto que tuvo la nube de Chernóbil en la muerte del producto durante la gestación y la aparición de anomalías genéticas; estas investigaciones aportan información sobre la presencia de labio leporino, paladar hendido, malformaciones cardiacas, anomalías del esqueleto, trisomía 21 (síndrome de Down) e impacto sobre la tasa de sexo niños/niñas en las poblaciones humanas de Europa central y oriental. En particular, estos estudios señalan la presencia de una tasa de mutación anormalmente elevada en un grupo de individuos, con su correspondiente impacto en una mortalidad más elevada que lo normal, observada en embriones de mujeres irradiadas.

¿Qué pasa cuando un adulto ha sido irradiado? Sus cromosomas pueden ser objeto de mutaciones, unas recesivas otras dominantes. Actualmente, no se pueden predecir los porcentajes de estos tipos de mutaciones en los gametos de individuos irradiados [112].

Veamos, en particular, el efecto hereditario, de una mutación letal en el cromosoma X.

Para el caso de las mujeres:

1. Una mutación letal recesiva sobre uno de los genes de alguno de sus cromosomas X no tendrá ningún efecto en las hijas que la reciban, pues serán heterocigotas para la mutación; sin embargo, será letal en los niños que la reciban. Como consecuencia se presentará una desviación en la proporción de los sexos, con un exceso de mujeres.
2. Una mutación letal dominante sobre uno de los genes de alguno de sus cromosomas X conducirá a la muerte de todos los productos que la reciban.

Para el caso de los hombres:

3. Una mutación letal dominante sobre uno de los genes del sector heterólogo de su cromosoma X de una célula germinal, afectará a todas sus hijas, mismas que no llegarán a término. En este caso se presentará un exceso de hombres.
4. Una mutación letal recesiva sobre uno de los genes del sector heterólogo de su cromosoma X de un gameto se transmitirá a todas las niñas, pero al ser heterocigotas ante la mutación serán viables. En este caso no habrá efecto sobre la relación de sexos.

Únicamente las situaciones 1 y 3 llevan a una alteración de la razón de sexo, ya sea un exceso de niñas o un exceso de niños; sin embargo, *a priori*, se desconocen las proporciones en que la irradiación de los adultos produce estas alteraciones. En el caso particular en que el porcentaje de mutaciones letales recesivas en los genes de un cromosoma X de los óvulos y el de mutaciones letales dominantes en los genes del cromosoma X de los espermatozoides fueran equivalentes, los dos efectos se cancelarían y la proporción de sexos no se alteraría. La observación empírica muestra la presencia de un exceso de nacimientos de niños con respecto a las niñas; esto es, el exceso de hijos de sexo masculino de hombres irradiados, es mayor que el exceso de hijas de mujeres irradiadas. Esta situación no sólo se ha observado en Chernóbil y sus alrededores, sino también en los descendientes de trabajadores de la industria nuclear, en las poblaciones que viven cerca de reactores nucleares en Alemania y Suiza

y en la población del estado de Kerala en la India, que recibe tasas elevadas de radiación natural.

Al estar presentes las dos situaciones, sus respectivos efectos sobre la razón de sexo tienden a cancelarse, y no está negada la posibilidad de que el efecto mutagénico esté siendo subestimado.

Estudios, realizados por Lazjuk *et al.*, muestran que a partir de 1983 en Belarús se han incrementado los casos de malformaciones congénitas [113, 114], con variaciones según la zona geográfica considerada; aunque según los propios autores las causas del incremento son diversas. En el estudio, realizado por Dolk *et al.*, no se encontró un aumento en la tasa de incidencia de cáncer de tiroides en Europa, pero sí se observó un incremento del síndrome de Down [115].

La flora y la fauna no quedan exentas de la contaminación. A partir de los ensayos nucleares de los años cincuenta y sesenta, y después del accidente de Chernóbil, una parte de la radiactividad se ha liberado en forma de aglomerados, denominados partículas calientes (*hot particles*), cuyo comportamiento en el entorno difiere al de la radiactividad liberada en forma de gas o de aerosol [116]. Estos conglomerados están presentes en los sitios donde sucedieron las explosiones y en la zona de exclusión de 30 km alrededor de Chernóbil; por las características de su dispersión en el entorno, estas partículas tienen una participación importante en los efectos a largo plazo [117].

La solubilidad de estas partículas calientes generalmente es baja y su disolución en el micelio de los micromicetos es una de las formas que toman los cambios a largo plazo. Zhdanova *et al.* [118] han estudiado la adsorción y absorción de estas partículas por los micromicetos, particularmente de Eu-152 y Cs-137, así como su almacenamiento en los champiñones y posible transferencia a la cadena alimenticia.

También se han realizado estudios sobre posibles mutaciones en células germinales y aberraciones cromosómicas en humanos y otras especies [118-127]; en particular, se ha observado un aumento significativo de este tipo de alteraciones en áreas ubicadas alrededor de Chernóbil, aunque todavía no se ha podido establecer asociación con la dosis de radiación recibida. Desafortunadamente, en su informe de 1995 sobre las consecuencias del accidente de Chernóbil en la salud, la Organización Mundial de la Salud [44] concluyó que los efectos de mutación eran débiles y no detectables.

En la actualidad aún no se tiene un conocimiento exacto de las consecuencias que puedan tener estas mutaciones y aberraciones cromosómicas [128]. A la fecha, algunas consecuencias observadas incluyen el albinismo parcial, la reducción del tiempo de vida en algunas poblaciones de pájaros [131], algu-

nas mutaciones en el ADN satélite³³ [120, 129] y translocaciones en espermatozoides de ratones [130].

Un estudio realizado de 1986 a 1996 por investigadores de Rusia y Belarus en 22 generaciones de camañoles (roedores) de la región de Chernóbil encontró una agravación del daño genético; dicho hallazgo fue descubierto en zonas con una enorme radiactividad en los suelos, del orden de 2.5×10^6 Bq m⁻². Este hallazgo también se encontró a 300 km de ahí, cerca de Minsk, en una zona con sólo 12 000 Bq m⁻² de contaminación radiactiva [132].

En los primeros días después de la explosión, una parte de los roedores murió por las secuelas del choque radiológico inicial. El efecto inmediato en la muerte de los roedores se le asignó al yodo, debido a la alta proporción de yodo-132 en el ambiente en los primeros días, seguido por el yodo-131 que de manera importante quedó durante varias semanas, junto con otros núcleos radiactivos. Pelevina y Titov [133] señalan que los roedores sobrevivientes se volvieron altamente sensibles a las radiaciones, aún a dosis muy bajas; lo cual fue también el caso de los niños [134]. Los investigadores encontraron tanto en los roedores como en los niños un pequeño porcentaje de casos resistentes.

Los investigadores del laboratorio de genética, que han estudiado a los roedores de Chernóbil durante 22 generaciones, evidenciaron un aumento en la presencia de mutaciones en los fetos, observándose un debilitamiento creciente del genoma de generación en generación. Estas anomalías se relacionan principalmente con la inestabilidad genómica producida por las radiaciones; los animales y sus descendientes se encuentran genéticamente fragilizados [133].

Los genetistas han logrado constatar que después de 10 a 15 generaciones todavía se presenta un número mayor, estadísticamente significativo, de muertes fetales en esta población de roedores. Se sabe que sólo después de 20 generaciones la selección natural de los linajes más resistentes al estrés oxidativo inducido por las radiaciones conduce a un cierto equilibrio en la población de roedores [135-137]. Si trasponemos este problema a una población humana, suponiendo, como mero ejercicio, que la escala es también de 20 generaciones, entonces serán necesarios tres o cuatro siglos para regresar a un equilibrio.

En las plantas de la zona cercana a la planta nuclear también se observaron efectos de la radiación [137-141]; el accidente ocurrió a finales de abril, en

³³ El ADN satélite son secuencias cortas repetidas en el ADN cromosómico, formadas por la repetición de un motivo constituido de bases de nucleótidos. Estas secuencias son consideradas marcadores genéticos.

ese periodo se presenta un crecimiento acelerado y formación de los órganos reproductores de diversos organismos, lo cual incrementa la radio-sensibilidad de las plantas y la fauna de los suelos.

Debido a los núcleos radiactivos de vida media corta, la exposición máxima a causa del accidente de Chernóbil tuvo lugar durante la segunda y tercera semanas después del accidente. Los pinos (*Pinus sylvestris* L.) que rodeaban la planta nuclear recibieron altas dosis de radiación. Se estima que de 60% a 90% de los núcleos radiactivos liberados cayeron sobre los coníferos de Chernóbil [139]. Tres años después del accidente, a 10 km de la central, la contaminación en la zona forestal es del orden de 1.45×10^5 a 4.1×10^5 kBq/m² [142]. En varias especies de plantas de la zona de exclusión de Chernóbil se han observado cambios morfológicos; en las coníferas se ha observado inhibición de la función reproductora, aún en situaciones en que la dosis fue por debajo de los valores señalados por la AIEA [143]. Adicionalmente, también a dosis bajas, se han observado cambios morfológicos y efectos genéticos persistentes en las especies más radio-sensitivas. En cuanto a la linealidad de la relación dosis-efecto, se ha señalado que para dosis bajas se ha encontrado un efecto mayor que el lineal, denominado efecto supra-lineal.

En Francia, como consecuencia de la falta de información sobre la contaminación radiactiva producida por el accidente de Chernóbil en Europa, se creó la Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radiativité (CRIIRAD por sus siglas en francés). Actualmente la CRIIRAD constituye un laboratorio independiente de medición de la radiactividad ambiental y cuenta ya con un reconocido prestigio a nivel internacional. La creación de esta comisión fue la reacción inmediata, por parte de la sociedad civil, ante la falta de credibilidad en las cifras sobre contaminación en territorio francés después del accidente de Chernóbil dadas a conocer por el gobierno francés; episodios de esta historia pueden consultarse en “Les preuves du mensonge”³⁴ [144].

En cuanto a malformaciones congénitas y aberraciones cromosómicas, Hoffmann considera que todavía es demasiado temprano para concluir con certeza que el accidente de Chernóbil fue la causa del aumento de estos padecimientos en Europa [145]. Por su parte, Sperling *et al.* muestran que unos meses después del accidente se presentó un incremento significativo en el número de casos de síndrome de Down en Berlín [146].

³⁴ Literalmente, “Las pruebas de la mentira”.

A pesar de todo lo que no se ha informado, es evidente que la emisión radiactiva de un solo reactor provocó una contaminación mucho mayor que la contaminación producida por las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki; la explosión de un reactor puede contaminar sencillamente la mitad del globo terrestre, como se mencionó anteriormente y poner en peligro toda forma de vida que alcance. Ante estos peligros, ningún gobierno de ningún país del planeta es capaz de proteger a sus habitantes de la contaminación radiológica llevada por el viento y la lluvia. En cuanto a la radiactividad que queda dentro del sarcófago que cubre el reactor, algunos afirman que sólo queda entre el cuatro o cinco por ciento de los núcleos radiactivos, de una actividad total de 50×10^6 Ci que han sido liberados; otros afirman que el pozo del reactor está casi vacío y que la actividad total liberada en la atmósfera se eleva a 10×10^9 Ci [43, 147].

La evaluación del impacto que sobre la salud tuvo el accidente de Chernóbil, casi 30 años después, todavía sigue siendo un problema. Entre los más de 7 millones de víctimas que anunció Kofi Annan en el 2000 y los 40 muertos de la AIEA y UNSCEAR, todo es posible. Según lo señala Michel Fernex, algunos epidemiólogos estiman que ya hubo un millón de víctimas fallecidas por la contaminación radiactiva [134]. Estas dos instituciones de las Naciones Unidas, proclaman que el mayor problema de salud que existe desde el 26 de abril de 1986 es la “radiofobia”; esta palabra fue inventada para exonerar, por un lado, a la industria nuclear y, por otro, responsabilizar a los pueblos víctimas. Según este discurso, son los propios pueblos quienes tienen la culpa, por su temor injustificado a las radiaciones, de las consecuencias patológicas para ellos y sus familias. La “radiofobia”, según parece, es la causa de todo.

Varios científicos y genetistas, considerando que esta supuesta “radiofobia” no tiene ninguna razón para afectar a la flora y a la fauna, empezaron a estudiar los 2 044 km² de la zona de exclusión alrededor del reactor; con los resultados que hemos mencionado anteriormente. Desde hace 27 años, el mayor depredador de esta zona, el hombre, ha desaparecido; la fauna está tranquila, pero contaminada. Ya se han escuchado voces que sugieren que este “paraíso zoológico” se transforme en un Parque Nacional de diversión [148]. ¡La locura humana no tiene límite!

Primeros trabajos sobre Fukushima

Son pocos, todavía, los trabajos publicados sobre la catástrofe de Fukushima, así como sobre sus efectos en la salud humana y otras formas de vida. Un pri-

mer problema que enfrentan los investigadores, análogo a lo sucedido en Chernóbil, es la gran dificultad que existe para lograr el establecimiento de las dosis recibidas por la población; la estimación de estas dosis es un paso importante para cualquier seguimiento del problema [149].

A pesar de los pocos artículos científicos sobre las consecuencias de la catástrofe de la planta de Fukushima, ya se ha dado a conocer bastante información al respecto. Este accidente ocurrió el 11 de marzo del 2011, como consecuencia de un terremoto de magnitud 9 y de un tsunami media hora más tarde. Más de 20 000 personas murieron, hubo alrededor de 7 000 desaparecidos y centenas de miles de personas tuvieron que ser evacuadas. El 18 de marzo, una semana después de ocurrido el evento, el accidente fue catalogado en el nivel 5 por la Agencia Japonesa de Seguridad Nuclear. Por su parte, algunos expertos rusos, finlandeses y franceses lo consideraron de nivel 6. El 11 de abril, la misma agencia japonesa modificó su calificación, clasificándolo en el nivel 7; esto es, un nivel comparable al de Chernóbil; comparable no por el número de víctimas que murieron por el terremoto o el tsunami, sino por los futuros decesos que van a ocurrir debido a los niveles de contaminación radiactiva. Si Chernóbil fue consecuencia de un error humano ligado a la vetustez de la central, aquí fue consecuencia de la debilidad en la construcción de la planta y, una vez más, por considerar a lo poco probable como sinónimo de inexistente [150].

Recientemente, la revista *Nature* publicó en su sección de informes científicos, un estudio de un grupo de investigadores japoneses sobre una variedad de mariposas azules de la región de Fukushima [151]. Un par de meses posterior al accidente, en mayo del 2011, los investigadores tomaron una muestra de estas mariposas adultas en la región de Fukushima. En siete sitios cercanos a la central, se encontró una tasa de malformaciones de 12.4%; a saber, presencia de mariposas con alas más pequeñas. A 1 700 km de distancia de la zona en donde se realizó la toma de las muestras, se cruzaron estas mariposas con mariposas sanas. La mortalidad de las larvas fue elevada y la tasa de anormalidad alcanzó 18.3% en los descendientes de las mariposas de las regiones cercanas a la central nuclear (ojos y alas deformes, colores anormales). Las hembras anormales de esta generación fueron nuevamente cruzadas con machos “sanos” y han producido descendientes que presentan una tasa de anormalidad de 33.5 por ciento.

Seis meses después, una nueva muestra fue colectada en las mismas regiones, encontrándose ahora una tasa de anormalidad de 28%, más del doble que en mayo. Para esta fecha la radiactividad en el aire ya había bajado, pero las mariposas se nutrían de plantas contaminadas.

Como en Chernóbil, Pape Moller y Mousseau, ahora con la participación de investigadores japoneses, estudiaron poblaciones similares de pájaros en Fukushima [152] y el efecto de las radiaciones sobre ellas [152, 153]. Cuatro meses después del terremoto y tsunami, el equipo de investigadores fue a identificar y contar pájaros en 300 lugares situados entre 25 y 48 km de distancia de la planta nuclear. La mayoría de estas áreas continuaban abiertas a las actividades humanas y experimentaban niveles de radiaciones entre 0.6 y 30.8 mSv/hora. En las áreas más contaminadas, las comunidades de pájaros en su conjunto declinaron de manera significativa. Particularmente, para 14 especies de pájaros comunes en Fukushima y Chernóbil, la disminución de la población fue más pronunciada en Fukushima que en Chernóbil. Cabe recordar que el estudio en Chernóbil se llevó a cabo 20 y 23 años después de la catástrofe, momento en que en las regiones más contaminadas varias de las especies de pájaros ya habían desaparecido totalmente y otras ya habían acumulado mutaciones generación tras generación.

En 2013 la OMS publicó un informe en el que señala que el riesgo de cáncer después de la catástrofe en la central de Fukushima se incrementó. La tasa de cáncer de tiroides en mujeres pasó de 0.75% a 1.25%, para aquellas mujeres que fueron irradiadas siendo niñas. En cuanto a los trabajadores que intervinieron de emergencia durante el accidente, se estima que un tercio de ellos tendrá un riesgo mayor de presentar cáncer [154]. De inmediato, el gobierno japonés criticó este informe, señalando que sólo contribuye a “desarrollar el miedo en la población japonesa” y que no representa la “realidad”.

En un trabajo recientemente publicado se dan a conocer datos sobre las muertes ocurridas en Estados Unidos de América, correspondientes a los cuatro meses después del accidente de Fukushima, mostrándose que subieron 2.3% con respecto al mismo periodo del año anterior, mientras que en los meses anteriores al accidente se tenía un decrecimiento de la mortalidad de 0.2% [155].

A partir del accidente en Fukushima, la Prefectura de Fukushima inició un programa denominado Encuesta Ultrasonográfica y Cáncer de Tiroides (Thyroid Ultrasound Examination. Thyroid Screening), con apoyo del personal de la Universidad Médica de Fukushima, a fin de monitorear el estado de salud en cuanto a presencia de cáncer de tiroides en todos los jóvenes que al momento del accidente nuclear tuvieran 18 años o menos. Esta encuesta quedó diseñada de forma tal que abarca tres etapas iniciales de monitoreo, a realizarse en las diferentes municipalidades que fueron afectadas por la catástrofe nuclear. La primera etapa se realizó de abril de 2011 a marzo de 2012; la se-

gunda se realizó de abril de 2012 a marzo de 2013; la tercera fue considerada para ser realizada de abril de 2013 a marzo de 2014 [156, 157].

En junio de 2014, la Prefectura de Fukushima informó que el número de casos nuevos diagnosticados con cáncer de tiroides, como casos definitivos o sospechosos, ascendía a 104 casos, con una edad promedio de 14.8 años al momento de la catástrofe. Sin embargo, las autoridades mismas han declarado que consideran que no puede asegurarse que estos casos estén vinculados al accidente nuclear [158]; han señalado que se requiere de mayor análisis de los datos antes de llegar a una conclusión. Parte de la argumentación que fundamenta este punto de vista se basa en que, comparando con el caso Chernóbyl, fue necesario que transcurrieran de 4 a 6 años para que se notara un incremento en los casos nuevos de cáncer de tiroides [159]. Existe la opinión de que una de las causas del crecimiento en el registro de casos de tiroides (prevalencia) se debe al tamaño de la población que está siendo monitoreada, lo cual señalan no tiene precedente. Otro aspecto, también señalado, es que la causa del incremento se debe a la alta sensibilidad que presenta la nueva tecnología que está siendo utilizada para detectar nódulos y quistes en la tiroides; lo cual significa mayor capacidad para la detección de estas alteraciones, pero se señala que el porcentaje de casos atribuibles a la radiación es pequeño y que los casos que serán detectados mediante la encuesta ultrasonográfica no serán clínicamente relevantes [159, 160].

Sin embargo, otras voces mencionan que los más de 13 600 jóvenes que han sido detectados con presencia de nódulos o quistes es un indicador del daño causado por la catástrofe nuclear de Fukushima, y señalan que lo que puede estar sucediendo es que las dosis en tiroides que recibieron realmente los habitantes de las zonas afectadas fue mayor que las cifras que han sido declaradas oficialmente [161].

De este debate se desprenden inmediatamente dos cuestiones. La primera, tomando como base que en primer plano está la salud y vida de los individuos que fueron víctimas de la radiación provocada por el accidente nuclear de Fukushima, la necesidad de proceder a realizar los estudios correspondientes (biopsias, etc.) que permitan diferenciar los casos malignos de los benignos que han sido detectados a partir de la encuesta ultrasonográfica, y dar la atención médica correspondiente. La segunda, basados en la misma tecnología, contar con datos sobre cáncer de tiroides de poblaciones de jóvenes de Japón de zonas que no fueron alcanzadas por el accidente nuclear, a fin de que puedan llevarse a cabo las comparaciones pertinentes, realizando por supuesto, los ajustes por edad y género que correspondan.

Uno podría pensar que a más de cuatro años del accidente, lo que corresponde es poner atención especial en el cuidado de la salud de los individuos que fueron contaminados, pero no es así. En un comunicado publicado en septiembre 2012, la propia empresa Tokio Electric Power (TEPCO), encargada de operar la planta nuclear, informó sobre un aumento en la radiactividad debida al kriptón-85. Este producto radiactivo únicamente se genera en el curso del proceso de fisión nuclear, por lo cual, se muestra que el corazón de la central sigue activo [156]. Por lo demás, el agua contaminada que se encuentra en los depósitos regularmente es tirada en los suelos o en el mar, con consecuencias inconmensurables para el ambiente [157].

Desde el inicio del accidente de Fukushima, millones de litros de agua fueron utilizados para enfriar los reactores en fusión. Parte del agua utilizada se filtró en el subsuelo de la central accidentada y parte fue almacenada, en condiciones cuestionables, en miles de reservorios instalados en el sitio; el manejo de este líquido contaminado es, sin lugar a duda, una tarea difícil de llevar a cabo. El 20 de agosto de 2013, se anunció que un reservorio cilíndrico había dejado escapar lentamente 300 toneladas de agua altamente radiactiva. Este incidente fue clasificado en el nivel 3 (incidente grave) de la escala INES. En acuerdo con el gobierno japonés, la empresa TEPCO prometió tomar “medidas radicales de emergencia” para resolver el problema del agua contaminada. A la fecha, no se sabe qué sucedió con estas 300 toneladas de agua contaminada. Es probable que una parte se haya filtrado en el subsuelo y haya llegado al manto freático y al océano. Para Sunichi Tanaka, director de la Autoridad de Seguridad Nuclear Japonesa la opción es clara: “Tememos una situación en la cual no tendremos más control sobre el agua contaminada, si no la dejamos escapar en el océano” [158].

En el océano, estas partículas radiactivas no se disuelven, sino son absorbidas por microorganismos marinos, contaminando poco a poco la cadena alimentaria. En julio del 2013, a diez kilómetros de la central, fue pescado un robalo, con más de 1000 becquerels de Cs-137. En agosto de 2013, la propia compañía TEPCO evaluó la contaminación del Pacífico entre 20 000 y 40 000×10⁹ bq. La mayor contaminación en el mar registrada en la historia [158, 159].

Por la primera vez, el 20 de octubre 2015, el ministerio de salud japonés, reconoció que la leucemia de uno de los trabajadores de la central nuclear de Fukushima había sido consecuencia de las radiaciones recibidas en el sitio de la central. Este obrero, de unos treinta años, había sido también empleado en otro sitio nuclear antes del accidente. Un funcionario del ministerio de salud

dijo que “este caso llena las condiciones”. Otros tres casos de empleados de la central de Fukushima están en curso de estudio [160].

Desafortunadamente, esta historia no ha terminado.

Los desechos nucleares

En cada etapa de la producción nuclear se producen permanentemente desechos nucleares, desde la extracción del material en las minas de uranio, el transporte de dicho material, su enriquecimiento, el funcionamiento del reactor, el retratamiento del combustible, hasta el almacenamiento y el desecho de los productos del proceso, etc., todo lo anterior, se trate tanto de los reactores militares como los de uso civil. A lo anterior hay que añadir los desechos que proceden del desmantelamiento de las viejas centrales; estos desechos son radiactivos y peligrosos. En la tabla 5 se presenta una lista de los principales productos de desecho de las centrales nucleares, indicando, a manera de ejemplo, la cantidad de desecho radiactivo producido por una planta PWR de 900 MW [161, 162].

Tabla 5. Desechos producidos anualmente en una central PWR de 900 MW. [Adaptado de 161]

Núcleos radiactivos	Vida Media (años)	Cantidad (kg/año)
Uranio		
²³⁵ U	7.08×10^8	221
²³⁶ U	2.34×10^7	88
²³⁸ U	4.47×10^9	20 204
Plutonio		
²³⁹ Pu	24 119	123.1
²⁴⁰ Pu	6 569	47.5
Actinidos		
²³⁷ Np	2.14×10^6	8.8
²⁴¹ Am	432.2	4.4
²⁴³ Am	7 380	2.2
²⁴⁵ Cm	8 500	0.06

Núcleos radiactivos	Vida Media (años)	Cantidad (kg/año)
Productos de fisión		
⁹⁰ Sr	28	10.5
¹³⁷ Cs	30	24.3
⁷⁹ Se	70 000	0.11
⁹³ Zr	1.5×10^6	15.5
⁹⁹ Tc	2×10^5	17.7
¹⁰⁷ Pd	6.5×10^6	4.4
¹²⁶ Sn	10^5	0.44
¹²⁹ I	1.57×10^7	3.9
¹³⁵ Cs	2×10^6	7.7

En promedio, a nivel mundial, el combustible utilizado durante un año por un reactor de 1000 MW es del orden de 27 toneladas. Estados Unidos de América y Canadá representan 40% del consumo mundial; en estos dos países, una vez que el combustible es utilizado se le considera totalmente desecho; en tanto que en Europa y Japón, dicho combustible recibe un retratamiento. En ambos casos el combustible que ha sido usado se conserva durante varios años en depósitos de agua, cerca de la planta. En caso de retratamiento, las 27 toneladas permiten producir del orden de 230 kilogramos de plutonio (aproximadamente 1% del combustible originalmente utilizado), mismo que después se puede utilizar en el combustible MOX. Este retratamiento produce, por año, 700 kg de desechos altamente radiactivos, los cuales tienen que ser aislados del entorno por un periodo de 40 a 50 años. La capacidad de las plantas de Francia y el Reino Unido para el retratamiento del material que ya ha sido utilizado es del orden de 5 000 toneladas al año; lo cual corresponde sólo a un tercio del consumo mundial. Pero cómo aislar estos desechos, tanto los que han sido reprocesados como los que no. Francia y Suecia tienen su “solución”: enterrarlos en el suelo a 500 m de profundidad en granito viejo; mil años después su radiactividad habrá decaído al nivel de la radiactividad del uranio natural.

Tanto en Europa como en Estados Unidos de América esta “solución” continúa en estudio. Desde finales del siglo pasado y principios de este, en Estados Unidos de América se tomaron un conjunto de medidas para proceder a enterrar sus desechos nucleares en un sitio ubicado en la cadena montañosa Yucca Mountain del estado de Nevada; lugar sagrado para los indios Shoshone y parte de su territorio antes de 1951; por fortuna, en 2010 este proyecto fue suspendido [163,

164]. ¿Qué hacer entonces con las aproximadamente 65 000 toneladas de desechos nucleares de Estados Unidos de América? La pregunta sigue sin respuesta.

El problema está lejos de ser resuelto. En fecha reciente, diciembre de 2013, un vagón de tren que transportaba desechos radiactivos descarriló en las cercanías de París, Francia, afortunadamente sin mayores consecuencias [165]. Pero este hecho muestra una vez más, que siempre es posible que un accidente ocurra.

Y de lo que no hemos hablado

La radiación natural, las lluvias de los ensayos nucleares, los accidentes nucleares sucedidos, la liberación accidental o “permitida” de material radiactivo de las centrales nucleares, etc., son parte integrante del actual aumento de la contaminación nuclear del ambiente. De ello ya hemos hablado; para concluir este capítulo, queremos mencionar por último dos aspectos adicionales que no han sido abordados: la utilización de uranio empobrecido en armamento y el trabajo en las minas de uranio.

Uso de uranio empobrecido con fines militares

El uranio empobrecido tiene uso militar, por ejemplo, algunas de las armas utilizadas por el ejército norteamericano en la Guerra del Golfo requieren de este material. El uranio natural (ver capítulo 1) contiene tres isótopos U-234, U-235 y U-238, en las respectivas siguientes proporciones: 0.0085%, 0.71% y 99.28%, aproximadamente. La media vida de estos isótopos es aproximadamente de 245 500 años, 703 800 000 y 4 468 000 000 años, respectivamente. La actividad promedio del uranio natural es de 25.4 Bq/mg. Para la fabricación del uranio enriquecido, utilizado en el proceso de fisión nuclear, se tiene que aumentar la concentración de U-235 a valores que oscilan entre 3 y 94% en masa, según sea su uso. El material natural residual, resultante después de este enriquecimiento, se denomina uranio empobrecido, cuya fracción de U-235 es menor a 0.7% en masa, según lo establece la NRC norteamericana (US Nuclear Regulatory Commission).³⁵ Este material residual es menos radiactivo que su

³⁵ <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/depleted-uranium.html>>.

antecesor, con una actividad de 14.8 Bq/mg. Últimamente, este material ha sido utilizado por el ejército norteamericano para la fabricación de proyectiles que logran mayor penetración; después de su uso, quedan partículas radiactivas en el aire.

Según C. Busby, la cantidad de uranio empobrecido utilizado durante la Primera Guerra del Golfo fue de 35 toneladas, equivalente a una actividad aproximada de 13×10^{12} Bq (partículas *a* y emisiones *b* de los átomos hijos) [166]. Repartida esta contaminación en una zona de 100 km², representa un depósito de 130 GBq/km², lo cual es mucho mayor que el depósito radiactivo en la zona cercana a la central de Chernóbil, la cual alcanzó un valor aproximado de 37 GBq/km².

A pesar de que la AIEA no encontró efectos adversos de estas partículas en soldados que participaron en la Guerra del Golfo o en el conflicto de los Balcanes [167], algunos estudios muestran efectos de este material radiactivo en recién nacidos en las zonas de conflicto.

La cadena de televisión BBC recientemente informó que, de acuerdo con un estudio realizado conjuntamente entre la OMS y el Ministerio de Salud de Irak, la presencia de malformaciones al nacer en los niños es mayor en las zonas de combate intenso del 2003 [168-171]. A lo anterior, hay que añadir el efecto que se ha observado sobre el número de casos de cánceres, la mortalidad infantil y la relación de sexos en niños nacidos en Fallujah en el periodo 2005-2009 [172].

Trabajo en las minas de uranio

En relación con la explotación del uranio, ya mencionamos que todas las minas de uranio que estaban en Francia recientemente cerraron y, por tanto, el país más nuclearizado del planeta ahora tiene que importar el uranio que utiliza en sus plantas. Una de sus fuentes es la República de Níger, antigua colonia francesa que en 1960 se independizó. De acuerdo con el indicador de desarrollo humano, este país se encuentra entre los más pobres del mundo, ocupando el lugar 186 de la lista [173]; sin embargo, en términos de producción de uranio, Níger ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, y es posible que suba en la clasificación [174]. A la fecha, desde hace más de 40 años, a través de dos empresas hijas locales (la Somair y la Cominak), la sociedad multinacional Areva controla la extracción del mineral en este país, despojando de sus recursos a uno de los países más pobres del planeta.

En palabras de E. Haddad, miembro de la Red “Sortir du nucléaire”, uno de los aspectos más preocupantes de esta situación es la completa falta de reconocimiento de enfermedades profesionales en los obreros nigerios por parte de los responsables de Areva [175]. En más de cuarenta años de explotación minera y con actualmente 2 600 empleados, únicamente han sido validados por el seguro social de Níger siete expedientes de enfermedades profesionales. Y de los siete casos, cinco corresponden a expatriados franceses; el 98% del personal que trabaja en estas empresas es de Níger. La sociedad Areva recientemente fue condenada por la justicia francesa por “falta inexcusable” después de la muerte por cáncer de un antiguo ejecutivo de la Cominak de 1978 a 1985. Después de la apelación que planteó la sociedad Areva, se espera la respuesta del tribunal, con la esperanza de los antiguos trabajadores de Níger de que le sean imputadas responsabilidades a dicha asociación [175]. Desafortunadamente, Areva no bajó los brazos y después de Níger, quiere ahora abrir otras minas en Mongolia, en Australia y en el Nunavut, en el gran norte canadiense [176].

Recientemente, la Commission de Recherche et d’Information Indépendante sur la Radiativité (CRIIRAD) [177] y la ONG de Níger “Les Amis d’Aghirin’Man” [178] realizaron mediciones de radiactividad en material de hierro (1 600 toneladas) que salió de los sitios de extracción de las empresas Somair y Cominak, el cual fue vendido al dueño de una chatarrería. Las mediciones de radiactividad mostraron valores 9 veces superiores a lo normal. A pesar de varias cartas que han denunciado esta situación, la sociedad Areva no ha hecho nada al respecto para resolver el problema [178].

Referencias

1. Völkle, H., C. Murith y H. Surbeck “Fallout from atmospheric bomb tests and releases from nuclear installations”, en *Radiat. Phys. Chem.*, núm. 34, 1989, pp. 261-277.
2. Levin I., K. O. Münnich and W. Weiss .The effect of anthropogenic CO₂ and ¹⁴C sources on the distribution of ¹⁴C in the atmosphere, *Radiocarbon* 22, 379-391 (1980).

3. IPPNW, IEER. *Radioactive Heaven and Earth: The health and environmental effects of nuclear weapons testing in, on and above the earth*. Nueva York, Apex Press, 1991.
4. NCI. *Estimated exposures and thyroid doses received by the American people from iodine-131 in fallout following Nevada atmospheric nuclear bomb tests*[en línea]. Washington, US Department of Health and Human Services, 1997. <<http://www.cancer.gov/i131/fallout/contents.html>>.
5. Gilbert, E. S., R. Tarone, A. Bouville, E. Ron. “Thyroid cancer rates and ¹³¹I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests”, en *J. Natl. Cancer Inst.*, núm. 90, 1998, pp. 1654-1660.
6. Simon, S. L., A. Bouville y C. E. Land “Fallout from nuclear weapons tests and cancer risks”, en *Am. Sci.*, núm. 94, 2006, 48-57.
7. Wakeford, R. “The Windscale reactor accident – 50 years on”, en *J. Radiol. Prot.*, en núm. 27, 2007, pp. 211-215.
8. Wigner, E. P. “Theoretical Physics in the Metallurgical Laboratory of Chicago”, en *J. Appl. Phys.*, en núm. 17, 1946, 857-863.
9. Pharabod, J. P., J. P. Schapira. *Les jeux de l'atome et du hasard* París, Calmann-Lévy, 1988.
10. Chamberlain, A. C. “Emissions from Sellafield and activities in soil”, en *Sci. Total. Environ.*, núm. 177, 1996, pp. 259-280.
11. Crick, M. J. y G. S. Linsley “An assessment of the radiological impact of the Windscale reactor fire, October 1957”, en *Int. J. Radiat. Biol.*, num. 46, 1984, pp. 479-506.
12. Harrois-Monin, F. “Windscale: le sale air de la peur”, en *Science & Vie*, núm. 797, 1984, pp. 94-102.
13. Urquhart, J. “Polonium: Windscale’s Most Lethal Legacy”, en *New Scientist*, marzo 31, 1983, pp. 873–875.
14. Blok, J., R. H. Dekker, C. J. H. Lock “Increased atmospheric radioactivity in the Netherlands after the Windscale accident”, en *Appl. Sci. Res.*, núm. 7, 1958, pp. 150-152.

15. Bergan, T., M. Dowdall, O. G. Selnæs “On the occurrence of radioactive fallout over Norway as a result of the Windscale accident, October 1957”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 99, 2008, pp. 50-61.
16. Gardner, M. J. “Investigating childhood leukaemia rates around the Sellafield nuclear plant”, en *Int. Stat. Rev.*, núm. 61, 1993, pp. 231-244.
17. Bowlt, C., P. Tiplady “Radioiodine in human thyroid glands and incidence of thyroid cancer in Cumbria”, en *Br. Med. J.*, núm. 299, 1989, pp.301-302.
18. Draper, G. J. *et al.* “Cancer in Cumbria and in the vicinity of the Sellafield nuclear installation, 1963-90”, en *Br. Med. J.*, núm. 306, 1993, 89-94.
19. Gardner, M. J. *et al.* “Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria”, en *Br. Med. J.*, núm. 300, 1990, pp. 423-429.
20. Gardner, M. J. *et al.* “Methods and basic data of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria”, en *Br. Med. J.*, núm. 300, 1990, pp. 429-434.
21. Simmonds, J. R. *et al.* “Risks of leukaemia and other cancers in Seascale from all sources of ionising radiation exposure”, núm. *NRPB-R276, Chilton*, 1995.
22. Popplewell, D. S., G. J. Ham, N. J. Dodd y S. D. Shuttler “Plutonium and Cs-137 in autopsy tissues in Great Britain”, en *Sci. Total Environ.*, núm. 70, 1988, pp. 321-334.
23. Douglas, A. J., R. Z. Omar y P. G. Smith “Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels”, *Br. J. Cancer*, núm. 70, 1994, pp. 1232-1243.
24. Omar, R. Z., J. A. Barber y P. G. Smith “Cancer mortality and morbidity among plutonium workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels”, en *Br. J. Cancer*, núm. 79, 1999, pp. 1288-1301.
25. Cochran, T. B. y R. S. Norris “A first look at the Soviet bomb complex”, en *Bull. Atom. Sci.*”, núm. 47, 1991, pp. 25-31.

26. Goulet, M. *Ural Mountains Nuclear Waste* [en línea], 1996.<www1.american.edu/ted/ural.htm>.
27. Medvedev, Z. A. *Nuclear disaster in the Urals*. Nueva York, Norton, 1979.
28. Boudreaux, R. “Urals nuclear disasters contaminated 450 000: Russia: Figure is given by officials in account of events at the Mayak atomic plant from 1948 to 1967. They say site could still pose hazards”, en *Los Angeles Times*, enero, 1993.
29. Trabalka, J. R., L. D. Eyman, S. I. Auerbach “Analysis of the 1957-1958 Soviet nuclear accident”, en *Science*, núm. 209, 1980, pp. 345-353.
30. Shagina, N. B. *et al.* “Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949-1951 as a result of releases from the “MAYAK” Production Association”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 51, 2012, pp. 349-366.
31. Azizova, T. V. *et al.* “Cerebrovascular diseases in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 50, 2011, pp. 539-552.
32. Jacob, P. *et al.* “Lung cancers risk of Mayak workers: modelling of carcinogenesis and bystander effect”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 46, 2007, pp. 383-394.
33. Hertsgaard, M. “From Here to Chelyabinsk”, en *Mother Jones*, enero/febrero, 1992, pp. 51-55.
34. Comey, D. C. “The fire at the Brown’s Ferry nuclear power station”, en *The Canadian coalition for nuclear responsibility* [en línea], marzo, 1996. <http://www.ccnr.org/browns_ferry.html>.
35. NIRC. “Safety deficiencies at the Brown’s Ferry nuclear power complex”, en *Nuclear Information and Resource Center* [en línea], diciembre 2010. <<http://www.nirs.org/factsheets/brownsferryfacsheet.pdf>>.
36. Hatch, M. C., J. Beyea, J. W. Nieves, M. Susser “Cancer near the Three Mile Island Nuclear Plant: Radiation Emissions”, en *Am. J. Epidemiol.*, núm. 132, 1990, pp. 397-412.

37. Hatch, M. C. *et al.* “Cancer rates after the Three Mile Island Nuclear accident and proximity of residence of the plant”, en *Am. J. Public Health*, núm. 8, 1991, pp. 719-724.
38. Wing, S., D. Richardson, D. Armstrong, D. Crawford-Brown “A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant: the collision of evidence and assumptions”, en *Environ. Health Perspect.*, núm. 105, 1997, pp. 52-57.
39. Talbott, E. O., A. O. Youk, K. P. McPugh-Pemu y J. V. Zborowski “Long-term follow-up of the residents of the Three Mile Island accident area: 1979-1998”, en *Environ. Health Perspect.*, núm. 111, 2003, pp. 341-348.
40. Mangano, J. “Three Mile Island: Health Study Meltdown”, en *Bull. Atom. Scient.*, septiembre/octubre, 2004, pp. 31-35.
41. Levin, R. J. “Incidence of the thyroid cancer in residents surrounding the Three Mile Island nuclear facility”, en *Laryngoscope*, núm. 118, 2008, pp. 618-628.
42. Goyal, N., F. Camacho, J. Mangano, D. Goldenberg “Thyroid cancer characteristics in the population surrounding Three Mile Island”, en *Laryngoscope*, 2012.
43. Yablokov, A. V., V. B. Nesterenko, A. V. Nesterenko “Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment”, en *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 1181, Nueva York, 2010.
44. International Programme on the Health Effects of the Chernobyl Accident (IPHECA). *Health consequences of the Chernobyl accident. Summary Report*. Genova, WHO, 1995.
45. IAEA/WHO. *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Report of the un Chernobyl Forum Expert Group “Health” (egh) Working draft*, iaea. Vienna, julio, 2005.
46. UNSCEAR 2000. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, Annex J*. Nueva York, Naciones Unidas, 2000.

47. OCDE/AEN 1995. *Chernobyl Ten Years On: Radiological and Health Impact. An Assessment by the new Committee On Radiation protection and Public Health*. París, AEN, noviembre, 1995.
48. Devell L. *et al.* “Initial observations of fallout from the reactor accident of Chernobyl”, en *Nature*, núm. 321, 1986, pp. 192-193.
49. Fairlie, I., D. Sumner *The Other Report on Chernobyl (torch). An independent scientific evaluation of the health-related effects of the Chernobyl disaster with critical analyses of recent iaea/who reports*, abril 2006.
50. Kapp, C. “Chernobyl effects worsening, says UN report”, en *The Lancet*, núm. 355, 2000, p. 1625.
51. OCDE, <www.oecd-nea/rp/chernobyl/c02.html>, marzo, 2012.
52. Shizuma, K. *et al.* “Observation of fallout in Hiroshima caused by the reactor accident at Chernobyl”, en *Int. J. Rad. Biol.*, núm. 51, 1987, pp. 201-207.
53. Roy, J. C. *et al.* “On the transport of Chernobyl radioactivity to eastern Canada”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 6, 1988, pp. 121-130.
54. Smith, J. N., K. M. Ellis. “Time dependent transport of Chernobyl radioactivity between atmospheric and lichen phases in eastern Canada”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 11, 1990, pp. 151-168.
55. Larsen, R. J., P. L. Haagerson, N. M. Reiss “Transport processes associated with the initial elevated concentration of Chernobyl radioactivity in surface air in the United States”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 10, 1989, pp. 1-18.
56. IRSN [en línea]. <http://www.irsn.fr/EN/Library/in-depth/Pages/in-depth_The-Chernobyl-Plume.aspx>. 19de marzo de 2012.
57. Dickerson, M. H., R. Lange *Evaluation of a Long Range Particle-In-Cell Transport and Diffusion Model Based on an Analysis of the Chernobyl Reactor Accident, Conference on Evaluation of Atmospheric Dispersion Models Applied to the Release from Chernobyl*. Vienna, Austria, noviembre 14-16, 1988.

58. Goldman, M. *et al.* *Health and Environmental Consequences of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident*, DOE/ER-0332 U.S. Washington, Department of Energy, 1987.
59. UNSCEAR. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with scientific annexes*. Nueva York, United Nations, 1988.
60. European Commission. *Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident*. RU, Bruselas, European Commission. EUR 19810, 1998.
61. Fairlie, I. “Dispersal, deposition and collective doses after the Chernobyl disaster, Medicine”, en *Conflict and Survival*, núm. 23, 2007, pp. 10-30.
62. Weaver, D. “How ministers misled Britain about Chernobyl”, en *New Scientist*, octubre 9, 1986.
63. Edwards, R. “How many more lives will Chernobyl claim?”, en *New Scientist*, núm. 2546, abril 6, 2006.
64. DeCort, M. *et al.* *Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident*. Bruselas, European Commission, EUR 16733, Official Publications of the European Communities, 1998.
65. Morin, H. “L’effet de Tchernobyl en France a été jusqu’à mille fois sous-évalué”, en *Le Monde*, 25 abril, 2006.
66. UNDP, UNICEF, UN-OCHA, WHO. “The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident”, en *A Strategy for Recovery*, 2002.
67. UN-OCHA. *Chernobyl: needs great 18 years after nuclear accident*. Nueva York, 2004.
68. Alexievitch, S., *Voces de Chernóbil. Crónica del futuro*[en línea]. España, Siglo XXI, 2006.<<http://www.fiuxy.com/ebooks-gratis/4198195-libro-vo-ces-de-chernobyl.html>>.
69. Ilyin, L. A., O. A. Pavlovski “Radiological Consequences of the Chernobyl Accident in the Soviet Union and Measures Taken to Mitigate Their Impact”, en *Proceedings of the International Conference on Nuclear Power*

- Performance and Safety*, vol. 3, septiembre 2-octubre 2, Vienna, IAEA-CN-48/33, 1987, pp. 149-166.
70. Anspaugh, L.R., R. J. Catlin, M. Goldman “The Global Impact of the Chernobyl Reactor Accident”, en *Science*, núm. 242, 1988, 1513-1519.
 71. Gumbel, P. “Villagers Suffering Chernobyl’s Fallout Face Soviet Silence”, en *Wall Street Journal*, marzo 6, 1989.
 72. Fein, E. B. “Soviets Curb News about Disasters: Reporting Nuclear Accidents To Be Restricted by Ruling Given by Energy Chief”, en *New York Times*, abril 27, 1989.
 73. Associated Press. Reports from Moscow: Larger Chernobyl-Area Evacuation Urged, julio 30, 1989; 3 000 Told to Flee Chernobyl Area, agosto 9, 1989; Radiation Study Based in Chernobyl Area, agosto 15, 1989.
 74. Lemonick, M. “The Chernobyl Cover-Up: Are Soviet Officials Still Concealing the Truth about the Disaster?”, en *Time Magazine*, noviembre 13, 1989, p. 73
 75. Kesminiene, A., E. Cardis “Epidémiologie de l’après-Tchernobyl, Bull”, en *Cancer*, núm. 94, 2007, pp. 423-430.
 76. Nikiforov, Y. y D. R. Gnepp “Pediatric thyroid cancer after the Chernobyl disaster”, en *Cancer*, núm. 74, 1994, pp. 758-766.
 77. Becker, D. V. *et al.* “Childhood thyroid cancer following the Chernobyl accident. A status report”, en *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, núm. 25, 1996, pp. 197-211.
 78. Lomat, L. *et al.* “Incidence of childhood disease in Belarus associated with the Chernobyl accident”, en *Environ. Health Perspect.*, núm. 105, 1997, pp. 1529-1532.
 79. Jacob, P. *et al.* “Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia”, en *Br. J. Cancer*, núm. 80, 1999, pp. 1461-1469.

80. Jacob, P. *et al.* “Thyroid cancer risk in Belarus after the Chernobyl accident: Comparison with external exposures”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 39, 2000, pp. 25–31.
81. Shibata, Y. *et al.* “15 years after Chernobyl: new evidence of thyroid cancer”, en *Lancet*, núm. 358, 2001, pp. 1965-1966.
82. Kenigsberg, J. E., E. E. Bulgova, J. E. Kruk, A. L. Golovneva “Thyroid cancer among children and adolescents of Belarus exposed due to the Chernobyl accident: dose and risk assessment”, en *Int. Congress Series*, núm. 1234, 2002, pp. 293-300.
83. Bandashevsky, Y. I. “Chronic Cs-137 incorporation in children’s organs”, en *Swiss Med. Wkly.*, núm. 133, 2003, pp. 488-490.
84. Mahoney, M. C. *et al.* *Int. J. Epidemiol.*, núm. 33, 2004, pp. 1025-1033.
85. Cardis, E. *et al.* “Risk of Thyroid Cancer After Exposure to 131 I in Childhood”, en *J. Natl. Cancer Inst.*, núm. 97, 2005, pp. 724 – 732.
86. Nikiforov, Y. “Radiation induced thyroid cancer: what we have learned from Chernobyl”, en *Endocrine Pathology*, núm. 17, 2006, pp. 307-317.
87. Ivanov, V. K. *et al.* “Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence among children and adolescents in the Bryansk oblast of Russia after the Chernobyl accident (1991-2001 follow-up period)”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 45, 2006, pp. 9-16.
88. Fuzik, M. *et al.* “Thyroid cancer incidence in Ukraine: trends with reference to the Chernobyl accident”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 50, 2011, pp. 47-55.
89. Demidchik, Y. E., V. A. Saenko, S. Yamashita “Childhood thyroid cancer in Belarus, Russia and Ukraine after Chernobyl and at present”, en *Arg. Bras. Endocrinol. Metab.*, núm. 51, 2007, pp. 748-762.
90. Cardis, E. *et al.* “Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident”, en *Int. J. Cancer*, núm. 119, 2006, pp. 1224–1235.

91. Baverstock, K. *et al.* “Thyroid cancer after Chernobyl”, en *Nature*, núm. 359, 1992, pp. 21-22.
92. Baverstock, K., D. Williams “The Chernobyl accident 20 years on: an assessment of the health consequences and the international response”, en *Environ. Health Perspec.*, núm. 114, 2006, pp. 1312-1317.
93. Ivanov, V. K. *et al.* “Thyroid cancer among “liquidators” of the Chernobyl accident”, en *Br. J. Radiol.*, núm. 70, 1997, pp. 937-941.
94. Ivanov, V. K. *et al.* “Radiation-epidemiology analysis of incidence of non-cancer diseases among the Chernobyl liquidators”, en *Health Physics*, núm. 78, 2000, pp. 495-501.
95. Day, R., M. B. Gorin y A. W. Eller “Prevalence of lens changes in Ukrainian children residing around Chernobyl”, en *Health Physics*, núm. 68, 1995, pp. 632-642.
96. Pukkala, E. *et al.* “Breast cancer in Belarus and Ukraine after the Chernobyl Accident”, en *Int. J. Cancer*, núm. 119, 2006, pp. 651-658.
97. Prisyazhnyuk, A. *et al.* “Twenty years after the Chernobyl accident: solid cancer incidence in various groups of the Ukrainian population”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 46, 2007, pp. 43-51.
98. Leenhardt, L., P. Grosclaude y L. Chérié-Challine “Increased incidence of thyroid carcinoma in France: a true epidemic of thyroid nodule management effects? Report from the French thyroid cancer committee”, en *Thyroid*, núm. 14, 2004, pp. 1056-1060.
99. Cotterill, S. J., M. S. Pearce, L. Parker “Thyroid cancer in children and young adults in the North of England. Is increasing incidence related to the Chernobyl accident?”, en *Eur. J. Cancer*, núm. 37, 2001, pp. 1020-1026.
100. Mürbeth, S., M. Rousarova, H. Scherb, E. “Lengfelder Thyroid cancer has increased in the adult populations of countries moderately affected by Chernobyl fallout”, en *Med. Sci. Monit.*, núm. 10, 2004, CR300-306.

101. Auvinen, A. *et al.* “Fallout from Chernobyl and incidence of childhood leukaemia in Finland, 1976-92”, en *Br. Med. J.*, núm. 309, 1994, pp. 151-153.
102. Hjalmar, U., M. Kulldorff, G. Gustafsson “Risk of acute childhood leukaemia in Sweden after the Chernobyl reactor accident”, en *Br. Med. J.*, núm. 309, 1994, pp. 154-157.
103. Tondel, M. *et al.* “Increased incidence of malignancies in Sweden after the Chernobyl accident – A promoting effect?”, en *Am. J. Ind. Med.*, núm. 49, 2006, pp. 159-168.
104. Ron, E. *et al.* “Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies”, en *Radiat. Res.*, núm. 141, 1995, pp. 259-277.
105. Scherb, H., E. Weigelt y I. Brüske-Hohlfeld “European stillbirth proportions before and after the Chernobyl accident”, en *Int. J. Epidemiol.*, núm. 28, 1999, pp. 932-940.
106. Scherb, H., E. Weigelt y I. Brüske-Hohlfeld “Regression analysis of time trends in perinatal mortality in Germany, 1980-1993”, en *Environ. Health Perspect.*, núm. 108, 2000, pp. 159-165.
107. Scherb, H. y E. Weigelt “Congenital malformation and stillbirth in Germany and Europe before and after the Chernobyl nuclear power plant accident”, en *Environ. Sci. Pollut. Res.* Special issue 1, 2003, pp. 117-125.
108. Scherb, H., K. Voigt “The human sex odds at birth after the atmospheric bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities”, en *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 18, 2011, pp. 697-707.
109. Scherb, H., K. Voigt “Response to W. Krämer: The human sex odds at birth after the atmospheric bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities: comment”, en *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 19, 2012, pp. 1335-1340.
110. Scherb, H., K. Voigt “Response to F. Bochud and T. Jung: Comment in the human sex odds at birth after the atmospheric bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities, Hagen Scherb & Kristina

- Voigt”, en *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 18, 2011, pp. 697-707; *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 19, 2012, pp. 4234-4241.
111. Krämer, W. “The human sex odds at birth after the atmospheric bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities: comment”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 19, 2012, pp. 1332-1334.
112. Bochud, F., T. Jung “Comment in the human sex odds at birth after the atmospheric bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities, Hagen Scherb & Kristina Voigt”, en *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 18, 2011, pp. 697-707; núm. 19, 2012, pp. 2456-2459.
113. Dubois, A. *Quarante après in Jean Rostand. Un biologiste contre le nucléaire*. París, Berg International, 2012, pp. 107-188.
114. UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*, vol. II. Nueva York, United Nations, 2011.
115. Lazjuk, G. I., D. L. Nikolaev, I. V. Novikova “Changes in registered congenital anomalies in the Republic of Belarus after the Chernobyl accident”, en *Stem Cells*, núm. 15, 1997, pp. 255-260.
116. Lazjuk, G. *et al.* “The congenital anomalies registry in Belarus: a tool for assessing the public health impact of the Chernobyl accident”, en *Reproductive Toxicol.*, núm. 17, 2003, pp. 659-666.
117. Beresford, N. A. *et al.* “Predicting radionuclide transfer to wild animals: an application of a proposed environmental impact assessment framework to the Chernobyl exclusion zone”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 44, 2005, pp. 161-168.
118. Dolk, H., R. Nichols y Eurocat Working Group. “Evaluation of the impact of Chernobyl on the prevalence of congenital anomalies in 16 regions of Europe”, en *Int. J. Epidemiol.*, núm. 28, 1999, pp. 941-948.
119. Zheltonozhsky, V., K. Mück, M. Bondarkov. “Classification of hot particles from the Chernobyl accident and nuclear weapons’ detonation by non-destructive methods”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 57, 2001, pp. 151-166.

120. Zhdanova, N. N. *et al.* “Accumulation of radionuclides from radioactive substrata by some micromycetes”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 67, 2003, pp. 119-130.
121. Dubrova, Y. E. *et al.* “Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident”, en *Nature*, núm. 380, 1996, pp. 683-686.
122. Ellegren, H., G. Lindgren, C. R. Primmer y A. P. Moller “Fitness loss and germinal mutations in bran swallows breeding in Chernobyl”, en *Nature*, núm. 389, 1997, pp. 593-596.
123. Dubrova, Y. E. *et al.* “Further evidence for elevated human minisatellite mutation rate in Belarus eight years after the Chernobyl accident”, en *Mutat. Res.*, núm. 381, 1997, pp. 267-278.
124. Dubrova, Y. E. *et al.* “Stage specificity, dose-response and doubling dose for mouse minisatellite germline mutation induced by acute radiation”, en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 95, 1998, pp. 6251-6255.
125. Dubrova, Y. E., “Radiation-induced germline instability at minisatellites loci”, en *Int. J. Radiat. Biol.*, núm. 74, 1998, pp. 689-696.
126. Dubrova, Y. E. *et al.* “Induction of minisatellite mutations in the mouse germline by low-dose chronic exposure to γ -radiation and fission neutrons”, en *Mutat. Res.*, núm. 453, 2000, pp. 17-24.
127. Dubrova, Y. E. *et al.* “Nuclear weapons tests and human germline mutation rate”, en *Science*, núm. 295, 2002, p. 1037.
128. Weinberg, H. S. *et al.* “Very high mutation rate in offspring of Chernobyl accident liquidators”, *Proc. Roy. Soc.*, núm. B 268, 2001, pp. 1001-1005.
129. Dubrova, Y. E. *et al.* “Elevated minisatellite mutation rate in the post-Chernobyl families from Ukraine”, en *Int. J. Hum. Genet.*, núm. 71, 2002, pp. 801-809.
130. Moller, A. P. y T. A. Mousseau “Biological consequences of Chernobyl. 20 years on”, en *Trends Ecol. Evol.*, núm. 21, 2006, pp. 200-207.

131. Galvan, I., T. A. Mousseau, A. P. Moller. “Bird population declines due to radiation exposure at Chernobyl are stronger in species with pheomelanin-based coloration”, en *Oecologia*, núm. 165, 2011, pp. 827-835.
132. Ryabokon, N. I., I. I. Smolich, V. P. Kudryashov, R. I. Goncharova “Long-term development of the radionuclide exposure of murine rodent populations in Belarus after the Chernobyl accident”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 44, 2005, pp. 169-181.
133. Pelevina, I., L. Titov. “Testimonio e informe ilustrado”, en *Chernobyl Environmental, Health and Human Rights Implications, witness for prosecution, Permanent Peoples’ Tribunal*, núm. 12-15, abril 1996, Viena, Austria, Paris, Ecodif, 1996.
134. Fernex, M. *Accidents in atomic industries and its consequences, SolarSuperState Conference* [en línea], Zúrich, agosto 14, 2012. < [http://www.solarsupers-tate.com/1/index.php/conference/conference 2012](http://www.solarsupers-tate.com/1/index.php/conference/conference%2012)>.
135. Ryabokon, N. I., I. I. Smolich y R. I. Goncharova. “Genetic processes in chronically irradiated populations of small mammals”, en *Environ. Management Health*, núm. 11, 2000, pp. 433-446.
136. Ryabokon, N. I., R. Goncharova “Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout”, en *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 45, 2006, pp. 167-177.
137. Shevchenko, V. A. *et al.* “Genetic disorders in mice exposed to radiation in the vicinity of the Chernobyl nuclear power station”, en *Sci. Total Environ.*, núm. 112, 1992, pp. 45-56.
138. Geraskin, S. A. *et al.* “Genetic consequences of radioactive contamination by the Chernobyl fallout to agricultural crops”, en *J. Environ. Radioact.*, núm. 66, 2003, pp. 155–169.
139. Kovalchuk O. *et al.* “Genome hypermethylation in *Pinus silvestris* of Chernobyl – a mechanism for radiation adaptation?”, en *Mutat. Res.*, núm. 529, 2003, pp. 13–20.

140. Geras'kin, S. A., S. V. Fesenko, R. M. Alexakhin. "Effects on non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident", en *Environ. Int.*, núm. 34, 2008, pp. 880-897.
141. Niedrée, B., H. Vereecken, P. Burael "Effects of low-level radioactive soil contamination and sterilization on the degradation of radiolabeled wheat straw", en *J. Environ. Radioact.*, núm. 109, 2012, pp. 29-35.
142. Tichomirov, F. A., A. I. Shcheglov, V. P. Sidorov "Forests and forestry: radiation protection measures with special reference to the Chernobyl accident zone", en *Sci. Total Environ.*, núm. 137, 1993, pp. 289-305.
143. IAEA. "Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards", en *Technical Reports Series*, núm. 332. Vienna, IAEA, 1992.
144. Castanier, C. *Les preuves du mensonge. Contamination des sols français par les retombées de l'accident de Tchernobyl* [en línea], CRIIRAD, 2005). <<http://www.criirad.org>>.
145. Hoffmann, W. "Fallout from the Chernobyl nuclear disaster and congenital malformations in Europe", en *Arch. Environ. Health*, núm. 56, 2001, pp. 478-484.
146. Sperling, K. *et al.* "Significant increase en trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal correlation", en *Br. Med. J.*, núm. 309, 1994, 158-161.
147. Starr, S. *Nuclear reactor accidents, in Lessons from Fukushima and Chernobyl for US public health*. Washington, PSR, 2011, pp. 8-12.
148. Seneviratne, G. "Chernobyl Forum reports 20-year findings, offers recommendations", en *Nuclear News*, vol. 48, núm. 11, 2005, pp. 46-52.
149. Katata G. *eta al.* "Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident", Part I: "Source term estimation and local-atmospheric dispersion in early phase of the accident", en *J. Environ. Radioact.*, núm. 109, 2012, pp. 103-113.
150. IPPNW. *The Fukushima nuclear disaster, Special edition, Medicine & Global Survival* [en línea], junio 2011. <<http://www.ippnw.org>>.

151. Hiyama, A. *et al.* “The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly”, en *Sci. Rep.* [en línea], núm. 2, 2012, p. 570. < <http://www.nature.com/srep/2012/120809/srep00570/full/srep00570.html>>.
152. Møller, A. P. *et al.* “Abundance of birds in Fukushima as judged from Chernobyl”, en *Env. Poll.*, núm. 164, 2012, pp. 36-39.
153. Møller, A. P. *et al.* “Differences in effects of radiation on abundance of animals in Fukushima and Chernobyl”, en *Ecol. Ind.*, núm. 24, 2013, pp. 75-81.
154. WHO, *Health Risk Assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on preliminary dose estimation* [en línea], Genova, 28de febrero, 2013. < http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/fukushima_report_20130228/en/>.
155. Mangano, J. J. y J. D. Sherman “An unexpected mortality increase in the United States follows arrival of the radioactive plume from Fukushima: is there a correlation?”, en *Int. J. Health Serv.*, núm. 42, 2012, pp. 47-64.
156. Fukushima Medical University. *Fukushima Health Management Survey* [en línea]. < <http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/survey>>.
157. Fukushima Medical University. *Fukushima Health Management Results* [en línea]. < <http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results>>.
158. Oiwa, Y. *Thyroid cancer diagnosed in 104 young people in Fukushima, The Asahi Shimbun* [en línea], agosto 24, 2014. < <http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ201408240011>>.
159. McCurry, J. “Fukushima’s children at centre of debate over rates of thyroid cancer”, en *theguardian.com*, 9 de marzo, 2014.
160. Mesmer, P. “ Fukushima : première reconnaissance d’un cancer ”, en *Le Monde* [en línea], 21 de octubre, 2015. < http://www.lemonde.fr/asie-pacifique/article/2015/10/21/premiere-reconnaissance-d-un-lien-entre-le-travail-a-fukushima-et-uncancer_4793534_3216.html?xtmc=fukushima&xtr=7 y <http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/10/20/le-japon-reconnait-le-premier-travailleur-victi>

me-des-travaux-de-fukushima_4793119_3244.html?xtmc=fukushima&xtcr=8>.

161. Jacob, P., J. C.Kaiser, A. Ulanovsky “Ultrasonography survey and thyroid cancer in the Fukushima Prefecture”, *Radiat. Environ. Biophys.*, núm. 53, 2014, pp. 391-401.
162. *Fukushima Child Thyroid Cancer Issue (2014)* [en línea]. < <http://www.hiros-himasyndrome.com/fukushima-child-thyroid-issue.html>>.
163. Mochizuki, “Intermittent increase of Krypton-85 to suggest on-going nuclear fission in reactor 1”, en *Fukushima diary* [en línea], 6de septiembre, 2012. < <http://fukushima-diary.com/2012/09/>>.
164. <<http://fukushima-diary.com/2013/04/>>.
165. <http://www.acro.eu.org/point_eau_Fukushima_2013.html>.
166. <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushimanp/handouts/2013/images/handouts_130722_07-e.pdf>.
167. *Waste management* [en línea], <<http://www.world-nuclear.org/education/wast.htm>>.
168. Schapira, J. P. “Le coeur du problème : les déchets à vie longue”, en *La Recherche*, núm. 301, 1997, pp. 65-69.
169. Hargreaves, S. “Nuclear waste: back to Yucca Mountain?”, en *cnn Money* [en línea], julio 11, 2011. < [http://money.cnn.com/2011/07/06/news/economy/nuclear_waste /index.htm](http://money.cnn.com/2011/07/06/news/economy/nuclear_waste/index.htm)>.
170. Fowler, C. S., M.Hamby, E. Rusco, M. Rusco *Native Americans and Yucca Mountain* [en línea]. Reno, Nevada, Cultural Resource Consultants Ltd., 1991. < <http://www.state.nv.us/nucwaste/library/se-039-91v1.pdf>>.
171. <<http://www.lefigaro.fr/actualite-france/2013/12/23/01016-20131223ARTFIG00687-un-wagon-de-dechets-nucleaire-a-deraille-a-drancy.php>>.
172. Busby. C. “Uranium weapons: why all the fuss?”, en *Disarmament Forum* núm. 3, 2008, pp. 25-33.

173. AIEA, *Features: Depleted Uranium* [en línea]. < http://www.iaea.org/news-center/features/du/du_qaa.shtml>.
174. ICBUW. *bbc: major Iraq birth defect study expected to show increase linked to conflict* [en línea], 22 de marzo, 2013. < <http://www.bandepleteduranium.org/en/bbc-iraq-birth-defect-study-to-show-increase>>.
175. BBC World, <<http://www.bbc.co.uk/news/world-middle-east-21873892>"target="_blank">.
176. WHO, <<http://www.emro.who.int/irq/iraq-infocus/faq-congenital-birth-defect-study.html>"target="_blank">.
177. Baietto, T. "A Fallouja, les "bébés monstres" soulèvent des questions sur les armes américaines utilisées en 2004", en *Le Monde*, 10de junio, 2011.
178. Busby, C., M. Hamdan y E. Ariabi "Cancer, infant mortality and birth sex-ratio in Fallujah, Iraq 2005-2009", en *Int. J. Environ. Res. Public Health*, núm. 7, 2010, pp. 2828-2837.
179. <<http://hdr.undp.org/es/estadisticas>>.
180. <<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/>>.
181. Haddad, E. *Comment Areva laisse mourir ses travailleurs au Niger, Sortir du nucléaire* [en línea], 14de enero, 2013. < <http://www.sortirdunucleaire.org>>.
182. <<http://www.sortirdunucleaire.org/>>.
183. <<http://www.criirad.org>>.
184. <<http://uranium-niger.jimdo.com>>.

PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores hemos abordado los fundamentos de la radiactividad y su efecto en las distintas formas de vida, en especial en la salud humana; particularmente, también hemos hablado del origen de la contaminación nuclear, desde la obtención de la materia prima nuclear en las minas de uranio, hasta la producción de energía y desechos nucleares en las plantas nucleares; también hemos hablado de algunos usos militares y otros civiles, así como de los peligros para la salud y el ambiente que conlleva el uso de la energía nuclear. Hemos expuesto los resultados de investigación de diversos expertos en el tema y mostrado elementos que apoyan la tesis de no existencia de un valor umbral de radiación por debajo del cual se pueda asegurar que no existe daño a la salud y que el efecto a la salud que tienen las dosis acumuladas se puede considerar equivalente al efecto que tiene una dosis única de radiación (consultar anexo A). Se ha hecho también un recuento de las principales catástrofes nucleares de las que hasta la fecha se tiene conocimiento.

Con toda esta información, cabe la pregunta de por qué la industria de esta fuente de energía se desarrolló tan rápido y sin gran dificultad. Indudablemente, como lo señala J. Gofman (anexo B), no se pueden descartar algunos errores de juicio, pero en nuestra opinión se conjuntaron diferentes elementos que favorecieron el desarrollo de esta industria. Primero, el uso de las primeras bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki, que si bien fueron un factor determinante para lograr la terminación de la Segunda Guerra Mundial, fueron también un considerable impulso al lobby militar-industrial estadounidense y, posteriormente, pieza clave en la locura de la carrera armamentista en el marco de la guerra fría, con varios países fabricando bombas atómicas y constru-

yendo centrales nucleares tanto militares como civiles. Segundo, la esperanza, algunas veces de buena fe y otras no tanto, de contar con una fuente de energía económica que hiciera frente, a nivel mundial, a las necesidades del desarrollo industrial de la posguerra; y con ello, el desarrollo de políticas de fortalecimiento de construcción y desarrollo de centrales nucleares para uso civil, particularmente en los países desarrollados.

Un tercer elemento que influyó en el no rechazo abierto, por parte de la población, a la industria nuclear como alternativa energética, fue la falta de información pública acerca de los daños que la radiación puede causar a la vida humana; en parte, debido a la insuficiencia de estudios sobre los efectos de la radiactividad natural en la salud humana. Recordemos que la propia Comisión de Energía Atómica estadounidense fue quien promovió el estudio de los riesgos que implican las radiaciones para la salud; sin embargo, no hizo caso de los resultados que obtuvieron los investigadores y su política se basó, a pesar de los riesgos, en las opiniones y juicios establecidos por los promotores de la energía nuclear. Indudablemente, en el mejor de los casos, fue una actitud irresponsable por desconocimiento, ignorancia o idea errónea de que debido a que la vida se desarrolló en un medio radiactivo, por lo tanto, la humanidad no tendría que temer a la radiactividad. Sin negar el hecho de que son muy pocos los estudios sobre los efectos que la radiactividad natural tiene sobre la salud humana, todos los estudios realizados en los últimos diez o quince años muestran que sus efectos son negativos (capítulo II). Permanentemente, día a día, se presentan casos nuevos producidos por la radiación natural, esto no es nuevo. Tampoco es aventurado suponer que así ha sucedido desde que la vida humana existe en la Tierra. La selección natural hace su trabajo, entre los afectados, unos pueden morir, mientras que otros con malformaciones congénitas logran sobrevivir.

Actualmente varios países intentan desarrollar la industria de energía nuclear y tal vez algunos, entre ellos, el armamento asociado a dicho desarrollo nuclear, sin tomar en cuenta los peligros que esta tecnología conlleva. Sin duda alguna éste es uno de los problemas fundamentales de nuestro tiempo, pues existe la posibilidad de poner en peligro la existencia humana; pero es parte del mismo problema el hecho de que algunos países desarrollados continúen teniendo y usando armas nucleares. La única solución es que los países que ya cuentan con armamento nuclear continúen desarmándose, eliminando todas las armas nucleares existentes y se evite que países que no tienen armamento nuclear ahora lo tengan, lo cual podría intentarse a través de la conformación de un organismo internacional tipo Tribunal Permanente de los Pueblos.

Por un porvenir energético sustentable

De la energía dependen la iluminación de interiores y exteriores, el transporte de personas y mercancías, la obtención de alimento y su preparación, el funcionamiento de las fábricas y, en general, todas las actividades humanas. Todavía hacia el siglo XVIII las principales fuentes de energía eran la fuerza animal, la de los hombres y el calor obtenido con la quema de madera. En esa época se contaba con algunas máquinas que aprovechaban la fuerza hidráulica para moler los cereales o preparar el hierro en las herrerías; también se usaba la fuerza del viento en los barcos de vela y en los molinos de viento. La gran revolución vino con la máquina de vapor; a partir de ese momento, el fuerte desarrollo de la industria y de la tecnología cambió las fuentes de energía en las que se sustenta la sociedad moderna.

En la actualidad el desarrollo económico y tecnológico de un país está vinculado a un creciente consumo de energía de combustibles fósiles como lo son el petróleo, el carbón y el gas natural. Desde la invención de la máquina de vapor hasta nuestros días, estos recursos han sido los grandes protagonistas del impulso industrial. De ellos depende, en el ámbito mundial, la mayor parte de la industria y el transporte. Estos tres combustibles abarcan aproximadamente 90% de la energía empleada en el mundo.

Estos combustibles, indudablemente, han permitido un avance sin precedentes en la historia humana; no hay que olvidar, sin embargo, que estas fuentes de energía son no renovables. Significa que estamos consumiendo recursos que tardaron millones de años en formarse. En el mundo moderno, enormes cantidades de estos recursos se consumen por minuto y las reservas están disminuyendo a un ritmo creciente. Adicionalmente, al usar estos materiales como combustible y fuente de energía, particularmente el petróleo, estamos agotando un recurso natural valioso del que se pueden obtener gran variedad de productos: plásticos, fibras sintéticas, medicinas, etcétera.

El patrón de consumo de energía en el ámbito mundial es completamente heterogéneo. Existen grandes diferencias en la cantidad de energía consumida por los países desarrollados en comparación con los países que están en vías de desarrollo. Con datos de 1991, se estimaba que 22.6% de la población mundial que vivía en los países desarrollados consumía 73% de la energía comercial utilizada en todo el mundo. Afortunadamente, el consumo de energía en estos países se ha estabilizado o, en su caso, crece poco. De manera diferente, en los países en vías de desarrollo, el consumo de energía por persona se ha incrementado. Año tras año, en estos países, se consume más y más energía; a este respecto ocupan

un lugar importante países como China e India, que presentan un desarrollo económico rápido. Para hacer frente a esta situación de consumo de los recursos no renovables, los países desarrollados han propuesto frenar el gasto mundial de petróleo y otros combustibles fósiles; sin embargo, los países en vías de desarrollo consideran que eso frena injustamente su desarrollo.

Desde su creación, en septiembre de 2001, la asociación francesa *négaWatt*, ha centrado su acción y trabajo sobre un planteamiento sencillo que ubica el problema energético en los usos y no en los recursos. La energía se necesita para calefacción, transporte y electricidad. En este sentido, es necesario determinar los medios más sostenibles para satisfacer estas necesidades, orientados por la sobriedad, la eficiencia y la renovabilidad energética [1, 2].

La sobriedad exige conocer nuestras necesidades de uso de energía y actuar de manera individual y colectiva, para privilegiar los usos más útiles, disminuir los más extravagantes y suprimir los más nocivos.

La eficiencia consiste en actuar, esencialmente, desde las elecciones técnicas de uso de energía hasta su producción, sobre la cantidad de energía necesaria para satisfacer un servicio energético dado.

La renovabilidad energética exige aumentar, para una necesidad de producción dada, la parte de los servicios energéticos sustentada por las energías menos contaminantes y más sostenibles.

Este proceso es el único que puede responder a los desafíos cada vez más apremiantes de energía. Hay urgencia tanto del lado de los impactos como del lado de los recursos. El crecimiento del consumo de energías fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural claramente no es sostenible. El modelo actual de consumo de energía está acelerando el agotamiento de las reservas, las cuales son finitas, y con ello se incrementa la posibilidad de que se presenten tensiones geoestratégicas y económicas mayores entre las diversas naciones. Adicionalmente, el consumo actual de energía tiene como consecuencia el aumento de las emisiones mundiales de gas de efecto invernadero, que nos lleva cada vez más rápidamente a un calentamiento climático con consecuencias difícilmente calculables.

La energía nuclear no constituye una alternativa aceptable, la cual por lo demás tiene un papel marginal, produciendo menos de 3% del consumo total de energía en el mundo. A diferencia de ello, el conjunto de energías renovables actualmente produce más de 13% del consumo mundial; estas fuentes de energía son las más abundantes a nuestra disposición, y constituyen la única fuente duradera: la energía solar recibida cada año en la Tierra, la cual sabemos recuperar parcialmente y directamente por medio de la biomasa, el viento

o el ciclo del agua, es varios órdenes de magnitud mayor que el consumo anual mundial de energía [3].

El petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio se están agotando a un ritmo acelerado; en términos del consumo actual, quedan sólo algunas decenas de años para el petróleo y dos o tres siglos para el carbón. Al inverso, las energías de flujo como la solar, la eólica, la hidráulica, la madera, la biomasa, el biogás o la geotermia permanentemente se renuevan.

El cambio es posible y hay que decidirlo ya. El horizonte 2050 es pasado mañana. Desdichadamente, la política y conducta actual de nuestras sociedades respecto al uso de las fuentes de energía se rige por las exigencias financieras de los mercados, por la obsesión del crecimiento del PIB o por la satisfacción inmediata de bienes de consumo, esperando que todo se arregle por sí solo.

Los servicios energéticos necesarios para la existencia humana pueden agruparse en tres grandes categorías: la calefacción (edificios, agua caliente, cocción de alimentos, y el calor necesario en los procesos industriales), la movilidad (desplazamiento de la gente, de las materias primas y de los bienes) y la electricidad (alumbramiento, electrodomésticos, informática, y los motores eléctricos industriales). Con base en un análisis de los servicios energéticos por sectores de actividad (alojamiento, terciario, transportes, industria y agricultura) y tomando en cuenta parámetros relacionados con la sobriedad y eficiencia, cada año la asociación négaWatt estima el consumo de energía. Para cada uno de los casos anteriores se calcula el “vector energético” más adecuado (combustible sólido, líquido o gaseoso, carburante, calor, electricidad...) que permita responder a las necesidades planteadas. Así, se estima el consumo total y con ello el consumo de recursos primarios (petróleo, gas, uranio, energías renovables...) en cada país. Estos consumos se colocan frente al potencial de producción de energías renovables, tomando en cuenta su grado de desarrollo y el ritmo de cierre de los reactores nucleares. En esta propuesta las energías fósiles sirven de variable de ajuste, aportando el complemento de producción, a fin de equilibrar la oferta y la demanda, hora por hora, durante todo el año.

Establecer una conclusión sobre la contaminación y en particular sobre la contaminación radiactiva, es un problema complicado; antes de hacerlo, es útil plantearnos la pregunta: ¿Energía? ¿Para quién y para qué?

En el 18^{vo} Simposio de Ciencia Nuclear, realizado en San Francisco en noviembre del 1971, uno de los oradores señaló que la gente que necesita energía eléctrica no debe creer que podrá seguir convenciendo al vecino de la necesidad de construir un reactor nuclear cerca de su casa [4]. El comentario es to-

talmente justo. ¿Acaso los defensores de la energía nuclear han construido su casa cerca de una central nuclear? Con las necesidades siempre crecientes en energía, de seguir por el camino actual, es evidente que dentro de poco tiempo ningún lugar de la Tierra estará resguardado de la contaminación radiactiva.

Cuando se toman en cuenta todas las etapas del proceso de producción de energía nuclear, se observa que en dicho proceso se producen indirectamente gases de efecto invernadero. Es cierto que la cantidad de estos gases de efecto invernadero es mucho menos de lo que se produce en una central que utiliza carbón y petróleo; sin embargo, no es mucho menos de lo que se produce en una central de gas natural y es significativamente mayor de lo que se produce en una planta de electricidad que utiliza fuentes renovables.

La energía nuclear, el átomo “pacífico” o “militar”, representa un bien-amado proyecto de los gobiernos de Estados Unidos de América, Gran Bretaña, Rusia, Francia, Alemania, Japón y también de India, China, Pakistán, Irán y algunos otros. La necesidad de energía nuclear es ferozmente defendida por los diversos gobiernos, independientemente de los partidos que gobiernan. Estos gobiernos tienen claridad de que su feroz defensa se vuelve inútil si la población logra tener conciencia del peligro que significan las radiaciones para la salud humana, así sea en dosis bajas. No es aventurado suponer que los promotores de la industria nuclear tienen una larga lista de buenos deseos sobre los resultados de la investigación, relativos a los efectos que la radiación tiene en la salud: i) el mejor de todos sus deseos es que se lograra descubrir que un poco de radiación extra, es bueno para la salud humana; ii) si ese deseo no se cumple, sería bueno encontrar que existe una dosis umbral, por debajo de la cual no existe riesgo a la salud, y iii) si los dos anteriores no tienen éxito, al menos debería descubrirse que una dosis recibida progresivamente es menos peligrosa que la misma dosis recibida en una única ocasión.

Gofman, en 1990, señaló que estos deseos deben considerarse seriamente, pues los gobiernos que apoyan a los programas de energía nuclear son los mismos que autorizan recursos económicos, a través de numerosos organismos, para la investigación sobre el riesgo de las radiaciones en la salud humana. Así mismo, indicó que esta situación puede conducir a manipulación de datos, tal como sucedió con el estudio de los sobrevivientes de las bombas de Hiroshima y Nagasaki o en la discusión sobre las consecuencias de la explosión nuclear en Chernóbil [5].

Como lo señala la red francesa “Sortir du Nucléaire”: “*Le nucléaire n’est pas soluble dans la démocratie*”.³⁶ Efectivamente, la energía nuclear es un espacio opaco y secreto en el cual la desinformación domina. La producción de energía nuclear, en todos los países donde existe, ha sido impuesta sin debate ni reflexión social alguna; su instalación, en lo fundamental, ha obedecido a meras necesidades de defensa nacional.

Un individuo puede decidir fumar y asumir el riesgo, conocido y calculado, de morir por cáncer de pulmón. De igual manera, un individuo no fumador puede alejarse del que fuma, para no recibir sus desechos. Pero algunos, algún día, sin consultar a nadie, tomaron la decisión de arriesgar la vida de los demás, con un peligro que no se ve, que no se siente y cuyos efectos pueden observarse únicamente una o varias décadas más tarde o en una siguiente generación. Ningún individuo en el planeta ha sido consultado si quiere estar expuesto a la radiación producida por la industria nuclear.

Las empresas y los gobiernos involucrados en la industria nuclear no se mantienen con los brazos cruzados, como bien lo señaló H. Caldicott: “*En la década pasada, la industria de la energía nuclear ha sido resucitada por una campaña de cabildeo que ha dejado a mucha gente con la idea de que es limpia, sin emisión y alternativa a los combustibles fósiles*” [6]. En algunos casos extremos se ha llegado a considerar también como energía renovable.

En años recientes, voces importantes se han pronunciado en contra de la energía nuclear y por el desarrollo de energías renovables. En abril de 2011 fue publicada una carta abierta que nueve Premios Nobel de la Paz enviaron a los dirigentes del mundo, la cual nos permitimos reproducir:

En este 25 aniversario de la catástrofe nuclear de Chernóbil – y más de dos meses después de los gigantescos terremoto y maremoto que han devastado Japón – nosotros, abajo firmantes y ganadores del Premio Nobel de la Paz, les pedimos invertir en un futuro más seguro y más pacífico comprometiéndose a favorecer las energías renovables. Es tiempo de reconocer que la energía nuclear no es una fuente de energía limpia, ni segura, ni económicamente accesible.

Estamos extremadamente preocupados de ver que la vida de japoneses está amenazada por la radiactividad dispersada en el aire, en el agua y los alimentos, después de la avería de la central nuclear de Fukushima. Estamos firmemente convencidos de que si el mundo deja de utilizar la energía nuclear, las generacio-

³⁶ Literalmente: “La energía nuclear no es soluble en la democracia”. Significa que energía nuclear y democracia no son compatibles.

nes futuras de los pueblos del mundo entero – y en particular los japoneses que ya han soportado demasiado – conocerán una vida más pacífica y más segura.

“Veinticinco años después de Chernóbil, hay gente que afirma que las cosas mejoran. No estoy de acuerdo”, dice Mykola Isaiev, quien fue uno de los liquidadores de Chernóbil (las personas que contribuyeron a limpiar el sitio). “Nuestros niños están enfermos porque han comido alimentos contaminados y nuestra economía está destruida”. Isaiev añade que puede colocarse en el lugar de los liquidadores que trabajan actualmente en Japón. Como él, probablemente no cuestionaban mucho la seguridad nuclear.

Escuchen lo que declara un comerciante de Kesenuma, una de las ciudades de la costa Noreste que ha sufrido en pleno el maremoto: “Estas radiaciones tienen algo de absolutamente espantoso. Es peor que un maremoto. Un maremoto se ve. Pero esto, no se puede ver”.

La triste realidad, es que la crisis radiológica que golpea actualmente a Japón puede producirse nuevamente en otros países, como ya se produjo en Chernóbil en Ucrania en la época soviética (en 1986), en Three Mile Island en los Estados Unidos (en 1979) y en Windscale/Sellafield en el Reino Unido (en 1957).³⁷ Los accidentes nucleares pueden ser provocados –y lo son efectivamente– por catástrofes naturales –como un terremoto o un maremoto– pero también por errores y negligencias humanas. En el mundo entero, la gente teme también la eventualidad de atentados terroristas dirigidos en contra de centrales nucleares.

Pero la radiactividad no debe solamente preocuparnos en caso de accidente nuclear. Cada etapa de la cadena del combustible nuclear suelta radiactividad, empezando por la extracción del uranio; después, esto continúa durante generaciones, los desechos nucleares contienen plutonio que permanecerá como material tóxico durante millones de años. A pesar de años de investigación, los países que poseen un programa nuclear, como los Estados Unidos, han fracasado en el desafío de encontrar un depósito seguro y salvaguardado del combustible nuclear “usado”. Mientras, los desechos nucleares adicionales son producidos cada día.

Los partidarios de la energía nuclear deben enfrentar el hecho de que los programas nucleares civiles producen la materia necesaria para la fabricación de armas nucleares. Ahí está la preocupación subyacente, frente al programa nuclear iraní. Mientras que, para continuar en la vía de la energía atómica, la industria nuclear prefiere ignorar esta amenaza enorme, que no desaparece por el simple hecho de minimizarla o ignorarla.

Debemos igualmente confrontarnos a la dura realidad económica de la energía nuclear. En una economía de libre mercado, la energía nuclear no compite con las otras fuentes de energía, simplemente porque no tiene la capacidad. La energía

³⁷ Ver capítulo III.

nuclear es una elección energética con costo exorbitante, que es generalmente pagado por los contribuyentes. La industria nuclear ha recibido subvenciones considerables –el dinero de los contribuyentes– por parte de los gobiernos, que han aportado la garantía para el financiamiento de la construcción de centrales, para limitar la responsabilidad de los operadores en caso de accidente y asumir los costos sanitarios y de descontaminación. Depende sólo de nosotros utilizar este dinero público de una manera más responsable, invirtiéndolo en las nuevas fuentes de energía.

Hay actualmente más de 400 reactores nucleares repartidos en el mundo –con un gran número en sitios de alto riesgo de catástrofes naturales o conmociones políticas. Estas centrales proporcionan menos del 7% del consumo mundial de energía.³⁸ Como dirigentes del mundo, ustedes pueden trabajar juntos para sustituir esta pequeña cantidad de energía de origen nuclear por otras fuentes de energía fácilmente disponible, muy seguras y económicamente accesibles, para orientarnos hacia un porvenir sin carbono ni energía nuclear.

Es imposible impedir las catástrofes naturales como la que acaba de ocurrir en Japón, pero juntos podemos hacer mejores elecciones en cuanto a nuestras fuentes de energía.

Podemos abandonar los combustibles fósiles y la energía nuclear e invertir en una revolución de energías limpias. Este cambio ya ha empezado. En estos cinco últimos años, a escala mundial, la energía eólica y la energía solar han producido más energía que las centrales nucleares. Los ingresos mundiales que provienen de la energía solar, de la energía eólica y de las otras fuentes de energía renovable subieron en 35% en el 2010. Invertir en estas energías renovables será también fuente de empleos.

Las fuentes de energía renovable son una de las llaves mayores para un porvenir pacífico. Es por esta razón que encontramos tanta gente en todo el mundo –y especialmente jóvenes– que se involucran ya de su propia iniciativa en esta transición, sin esperar que los gobiernos actúen en esa dirección.

Comprometiéndose por un porvenir sin energía nuclear y débilmente emisor de carbono, los Estados podrán asociarse y reforzar el movimiento mundial, creciente y cada vez más influyente, de ciudadanos que rechazan la proliferación nuclear y sostienen las energías renovables. Les pedimos unirse a ellos para transmitir una herencia fuerte que asegurará la vida y la protección no solamente de las generaciones futuras sino también la de nuestro planeta.

³⁸ Se trata del consumo de energía primaria. La estadística más significativa, ya que toma en cuenta las diferencias de rendimiento entre fuentes de energía y la cobertura efectiva de las necesidades energéticas reales, es el consumo de energía final, del cual la energía nuclear cubre poco más de 2% a nivel mundial [7].

Cordialmente,

Betty Williams, Irlanda (Premio Nobel 1976), Mairead Maguire, Irlanda (Premio Nobel 1976), Rigoberta Menchú Tum, Guatemala (Premio Nobel 1992), Jody Williams, Estados Unidos (Premio Nobel 1997), Shirin Ebadi, Irán (Premio Nobel 2003), Wangari Maathai, Kenia (Premio Nobel 2004), Azobispo Desmond Tutu, África del Sur (Premio Nobel 1984), Adolfo Pérez Esquivel, Argentina (Premio Nobel 1980), Presidente José Ramos Horta, Timor Oriental (Premio Nobel 1996).

Theodore B. Taylor (1925 – 2004), físico estadounidense, trabajó desde 1948 a 1956 en la elaboración de bombas nucleares de fisión en el Laboratorio Nacional de Los Álamos. Los siete años siguientes trabajó en la General Atomic Company en la fabricación de reactores nucleares para producción de isótopos de uso médico y sobre un proyecto de propulsión espacial nuclear. De 1964 a 1966 fue director adjunto de la Defense Nuclear Agency del Pentágono. A partir de 1966, se volvió un firme defensor del desarme nuclear. De 1966 a 1968 trabajó para la US Atomic Energy Commission con el fin de evaluar el desempeño de la AIEA a propósito de la lucha contra la proliferación nuclear. En 1979, el presidente J. Carter lo nombró miembro de la Comisión de Encuesta del Accidente Nuclear de Three Mile Island (ver capítulo III).

En un largo artículo publicado en 1996, Taylor señaló:

Ya que cada uno de los más de 400 reactores nucleares que funcionan actualmente en 32 países producen grandes cantidades de plutonio que, una vez químicamente separadas del combustible usado, puede ser utilizado para fabricar armas nucleares de cualquier tipo, fiables y eficaces, llegué también a estimar necesario [además del desarme nuclear] el paro total y mundial de la utilización de la energía nuclear.

Para cumplir con esto, siendo responsable con respecto al desajuste del medioambiente provocado por la utilización a gran escala de las energías fósiles, estimo también necesario llamar a una diligencia fuerte y mundial de oportunidades de ahorro de energía y producir la que necesitamos con fuentes renovables, directamente o indirectamente derivadas de la radiación solar. [8, 9]

La producción de energía nuclear ha sido impuesta con un descuido enorme, por decir lo menos, para la seguridad de la sociedad humana. A manera de conclusión, si algo puede concluirse, es que la energía nuclear, y con ello la fisión nuclear, no es un problema de especialistas o expertos, sino se trata de un problema que nos concierne a todos.

En un escrito de 1975, la asociación “Les Amis de la Terre” [10] adecuadamente señaló que:

La industria nuclear es peligrosa, no solamente porque proporciona la materia prima necesaria para las bombas atómicas, sino también porque puede ser un blanco para sabotajes. La población tiene que ser protegida del peligro radiactivo durante centenas de años alrededor de las instalaciones actualmente funcionando, de las centrales en desmantelamiento y de los depósitos de desechos radiactivos. Los transportes de materias radiactivas tienen que ser cuidadosamente vigilados. Esto obliga a un riguroso control apremiante para la población, y un poderoso aparato policiaco o militar es inevitable. En una sociedad que participa en el juego de la competencia internacional y utiliza una fuente de energía tan ligada a los problemas de “defensa”, la población en su conjunto se encontrará más y más sometida a obligaciones autoritarias bajo el pretexto del control y la seguridad – obligaciones que serán cada vez menos soportables, aumentando los riesgos de conflictos sociales. ¿Dónde está el “progreso” si la libertad de cada uno es más y más restringida?

En el sistema político actual –donde la decisión, la información y el control están entre las mismas manos– la crítica de la industria nuclear sólo puede venir de afuera. No se trata tanto de poner a los expertos oficiales contra otros expertos no conformistas, sino entender que cualquier afirmación oficial tiene sesgo por el hecho de la estrecha complicidad actual entre intereses públicos y privados. Los científicos tienen a menudo, por su función, un interés personal directo en la energía nuclear: tienen actualmente que trabajar bajo la dependencia del poder oficial y de la gran industria. El experto “no conformista” no puede hacer más que neutralizar al experto oficial. Está en las manos de los ciudadanos resolver el problema, no en la de los expertos.

Podríamos dejar aquí este trabajo pero nos parece que citar Svetlana Alexievitch sería una mejor conclusión [11] con la esperanza que todos los que deciden a un nivel u otro con respecto a la energía nuclear lean este libro:

En el territorio de Belarús no hay ni una central atómica. De entre las centrales eléctricas atómicas (CEA) en funcionamiento en el territorio de la antigua URSS, las geográficamente más cercanas a las fronteras bielorrusas son las CEA con reactores del tipo RBMK: por el Norte, la central de Ignalinsk; por el Este, la de Smolensk, y por el Sur, la de Chernóbyl.

[...] La catástrofe de Chernóbyl se convirtió en el desastre tecnológico más grave del siglo XX.

Para la pequeña Belarús (con una población de 10 millones de habitantes) representó un cataclismo nacional. Durante los años de la Gran Guerra Patria los nazis alemanes destruyeron en tierras bielorrusas 619 aldeas con sus pobladores. Después de Chernóbyl el país perdió 485 aldeas y pueblos: 70 de ellos están enterrados para siempre bajo tierra. Durante la guerra murió uno de cada cuatro bielorrusos; hoy uno de cada cinco vive en un territorio contaminado. Se trata de 2.1 millones de personas, de las que 700 000 son niños. De entre los factores del descenso demográfico, la radiación ocupa el primer lugar. En las regiones de Gómel y de Moguilióv (las más afectadas por la catástrofe de Chernóbyl), la mortalidad ha superado a la natalidad en un 20%.

[...] Debido a la acción constante de pequeñas dosis de radiación, en el país cada año crece el número de enfermos de cáncer, así como de personas con deficiencias mentales, disfunciones neuro-psicológicas y mutaciones genéticas...”

Y como la locura humana parece ser un pozo sin fondo, a modo de epílogo este anuncio que se publicó en el periódico *Nabat* en febrero de 1996: “Una agencia de viajes de Kíev propone viajes a la ciudad de Chernóbyl y una visita a las aldeas muertas... Pagando, por supuesto. Visiten la Meca nuclear...”

Sin más comentarios.

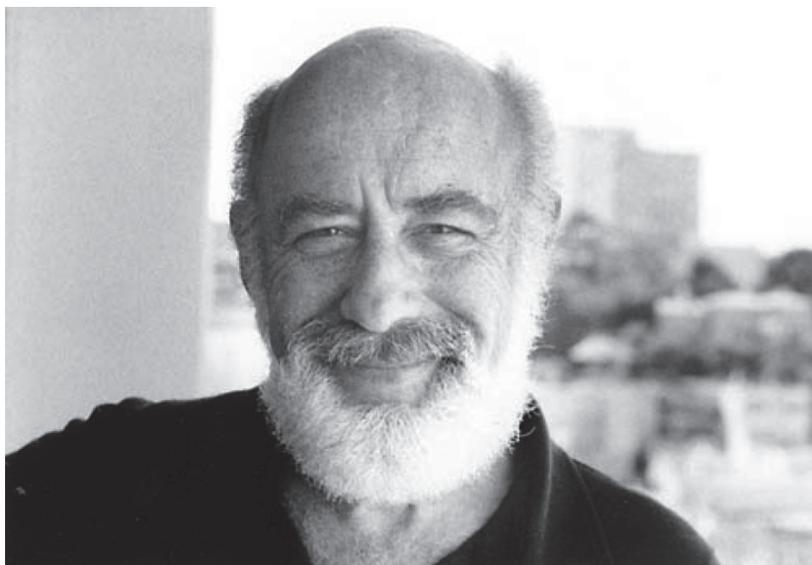
Referencias

1. <http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11//Scenario_negawatt_2011-Dossier_de_synthese-v20111017.pdf>.
2. <<http://www.solagro.org/>>.
3. Laponche, B. *World energy prospects and stakes. A new paradigm, Working paper 59* [en línea], Agence Française de Développement, 2008. <www.global-chance.org/IMG/pdf/BL-AFD-WP59.pdf>.
4. Whatley, A. T. “Environmental decisions in nuclear energy”, en *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, núm. 19, 1972, pp. 168-171.
5. Gofman, J. W. *Radiation-Induced Cancer from Low-Dose Exposure: An independent analysis*, San Francisco, California, CNR Book Division, 1990.

6. Caldicott, H. "After Fukushima: Enough is enough", en *The New York Times*, 2 de diciembre, 2011.
7. <www.global-chance.org/IMG/pdf/GCnHS1p10-11.pdf>.
8. Taylor, T. B., "A ban on nuclear technologies", en *Technology Review*, agosto, 1995, pp. 76-77.
9. Taylor, T. B. "Nuclear power and nuclear weapons" [en línea], en *Nuclear Age Peace Foundation*, 1996. <http://www.wagingpeace.org/articles/1996/07/00_taylor_nuclear-power.htm>.
10. Les Amis de la Terre, *L'escroquerie nucléaire*, Stock, Paris (1975).
11. Alexievitch S., *Voces de Chernóbil. Crónica del futuro* [en línea]. España, Siglo XXI 2006. <<http://www.fiuxy.com/ebooks-gratis/4198195-libro-vo-ces-de-chernobyl.html>>.

ANEXO A

John W. Gofman, físico médico, advirtió sobre los efectos de la radiaciones sobre la salud.³⁹



³⁹ Artículo escrito por Thomas H. Maugh II, *Los Angeles Times*, agosto 28, 2007.

El Dr. John W. Gofman, físico médico cuya lucha por lo que él consideraba honestidad científica, en la comprensión de los efectos sobre la salud de las radiaciones ionizantes, lo hizo un paria de la industria de la energía nuclear y del gobierno de Estados Unidos, murió de insuficiencia cardiaca el 15 de agosto en su casa en San Francisco. Tenía 88 años.

A menudo llamado el padre del movimiento antinuclear, Gofman y su colega del Lawrence Livermore National Laboratory, Arthur R. Tamplin, mostraron en 1969 que el riesgo de dosis bajas de radiación era 20 veces mayor que el declarado por el gobierno. La publicación de estos resultados, a pesar de fuertes esfuerzos para censurarlos, les llevó a perder casi todos sus fondos de investigación y sus posiciones en el laboratorio del gobierno.

Posteriormente se han validado la mayoría de sus conclusiones, pero los riesgos han sido ignorados por la industria de la energía eléctrica que ve la energía nuclear como una alternativa a los combustibles fósiles, libre de contaminación y una industria médica que sigue utilizando cada vez cantidades de radiaciones mayores a lo necesario, para pruebas médicas.

“Ha sido siempre un firme defensor de la integridad de la ciencia”, declaró Charles Weiner, profesor emérito de historia de la ciencia en el MIT. “Ha sido una voz original” en el debate sobre la energía nuclear, dijo Werner, “alguien quien estuvo en el interior de la producción de armas nucleares y que fue destacado por los líderes en este campo... y que llevó credenciales, credibilidad y autoridad”. Hasta su muerte, la opinión de Gofman fue que no había una dosis sin peligro, en la exposición a las radiaciones ionizantes.

“Autorizar una planta de energía nuclear, en mi opinión, es autorizar la muerte premeditada al azar”, declaró Gofman en un libro publicado en 1982 (Leslie J. Freeman, *Nuclear Witnesses: Insiders Speak Out*. Nueva York, WW Norton & Co., 1982). “Primero, cuando se autoriza una planta, se sabe lo que se hace –por lo tanto, es premeditado. No se puede decir, ‘No sabía’. Segundo, la evidencia sobre las radiaciones que producen cáncer, está fuera de duda... Ya no es una pregunta: las radiaciones producen cáncer y la evidencia va hasta las dosis más bajas”.

Los resultados de Gofman y Tamplin acerca de los efectos de las radiaciones sobre la salud –y sus revelaciones sobre la Comisión de Energía Atómica para tratar de silenciarlos– jugaron un papel importante en su renuncia a esta organización en 1974.

La Comisión de Energía Atómica estaba dividida en dos estructuras: la Administración para el Desarrollo e Investigación Energética (ERDA), cuyo objetivo era promover el desarrollo de la energía atómica y la Comisión de Regu-

lación Nuclear (NRC) que supuestamente vigilaba la seguridad de la industria nuclear. Sin embargo, según Gofman, esta separación era meramente cosmética y la NRC seguía promoviendo la energía nuclear en detrimento de toda la sociedad.

En 1971, ayudó a la creación del Comité para la Responsabilidad Nuclear (CNR), en San Francisco, un grupo que estudiaba los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud. Durante esta década, él y otros defendieron sin éxito la opinión de un moratorio de cinco años de construcción de nuevas plantas nucleares, argumentando que la generación masiva de desechos radiactivos creaba un riesgo mayor para la salud.

Sin embargo, el accidente de Three Mile Island en Pennsylvania en 1979 y el de Chernóbil en la Unión Soviética en 1986 fueron argumentos mucho más potentes en contra de la industria nuclear y frenaron fuertemente la construcción de nuevas centrales. Aunque la energía nuclear representa 20% de la energía eléctrica producida en Estados Unidos, la última planta nuclear terminada fue la de Watts Bar 1 en Tennessee, que entró en funcionamiento en 1996.

Más recientemente, Gofman insistió con fuerza que las radiaciones son demasiado utilizadas en medicina, tanto para el diagnóstico como en el tratamiento, sin tomar en consideración los riesgos. Observó que algunos hospitales utilizan hasta 100 veces la dosis necesaria para la producción de imágenes. Notó también que las tomografías computarizadas se utilizaban demasiado y que existían soluciones menos peligrosas.

Muchos de los colegas de Gofman vieron su oposición tardía a la energía nuclear como un viaje largo y extraño para un científico; que había sido asociado íntimamente a la creación de esta industria.

John William Gofman nació el 21 de septiembre de 1918, en Cleveland, hijo de inmigrantes Rusos. Después de terminar su preparatoria durante la Gran Depresión, entró a la Facultad de Medicina en la Cleveland's Western Reserve University. Sin embargo, después de un año, dejó medicina y se fue a estudiar química en la UC Berkeley. A su llegada, Dean Gilbert Newton Lewis pidió a Gofman empezar su proyecto de investigación "en una o dos semanas". Después de hablar con varios profesores, encontró al futuro premio Nobel, Glenn Seaborg, quien le sugirió investigar si el uranio 233 existía en la naturaleza.

Intrigado, Gofman aceptó y con sus colegas produjo 4×10^{-6} gramos del isótopo en el ciclotrón de Berkeley y probó que fisionaba espontáneamente. Descubrió también el pro actinio 232, el uranio 232 y el pro actinio 233 en sus años de estudiante.

Con una beca de postdoctorado en Berkeley, trabajó sobre la forma de aislar el plutonio del uranio bombardeado por neutrones. A pesar de la construcción, por el Proyecto Manhattan, de una planta en el noroeste del Pacífico, para producir plutonio, en ese momento existía solamente menos de un cuarto de miligramo. “Había tan poquito plutonio que nuestro equipo de investigación nunca observó el elemento”, decía más tarde.

Pero en 1942, el físico J. R. Oppenheimer, quien dirigía el Proyecto Manhattan, vino a ver a Gofman para decirle que necesitaba inmediatamente medio miligramo de plutonio para experimentos cruciales, para el porvenir del proyecto. Gofman y sus colegas tomaron una tonelada de nitrato de uranio en el ciclotrón y lo bombardearon día y noche durante seis semanas. Trabajando con cantidades más pequeñas que diez libras de uranio, el equipo pasó tres semanas para aislar medio centímetro cúbico de una solución que contenía 1,2 miligramos de plutonio – el doble de lo que se necesitaba.

A pesar de su posición ulterior antinuclear, Gofman decía que no se sentía culpable de su papel en el desarrollo de la bomba atómica, citando la “monstruosidad humana” del régimen nazi alemán.

Después de terminar su trabajo con el plutonio, Gofman retomó sus estudios de medicina en la UC San Francisco y obtuvo su título de médico en 1946.

Tenía algunas ideas sobre la entonces desconocida relación entre el endurecimiento de las arterias y el colesterol, en el flujo sanguíneo y decidió estudiar las lipoproteínas, macromoléculas compuestas de proteínas ligadas a ácidos grasos. “No quiero trabajar en algo menos que un gran problema médico”, señalaba. En su trabajo, utilizaba una ultracentrifugadora, que permitía a altas velocidades producir capas de componentes de diferentes masas moleculares. Pero, como otros investigadores, se dio cuenta que las lipoproteínas no podían separarse en capas diferentes –un descubrimiento que condujo a muchos investigadores a especular sobre su destrucción durante el proceso.

Gofman descubrió que añadiendo sal a la solución causaba la flotación de las lipoproteínas y permitía separarlas de otras proteínas. “Como resultado de este descubrimiento, fuimos capaces de abrir una manera nueva de ver a las moléculas y descubrir series de nuevas lipoproteínas”, decía. Demostró la existencia de las lipoproteínas de baja y alta densidad y su papel en el desarrollo de la arterioesclerosis.

Su trabajo fue considerado como “la herejía de Gofman”. Pero en mayo 2007, el *Journal of Lipidology* republicó su artículo clave (publicado anteriormente en la desconocida revista italiana Plasma) y el cual denominó “Una presentación de conceptos históricamente importante que apuntala nuestro campo”.

El enfoque ha sido ampliamente utilizado en toda la investigación de enfermedades cardíacas y en 1972 le fue otorgado el Premio Stouffer, en este entonces la mayor distinción americana en el campo.

Después de su graduación como médico, Gofman fue profesor en las universidades de Berkeley y San Francisco.

En 1957, decidió que había terminado con la investigación sobre las enfermedades del corazón. “No soy muy bueno en poner punto en las íes y cruzar las tés”, decía. “Si no es algo realmente nuevo y desconocido, no lo quiero hacer.”

Gofman dirigió entonces su investigación al estudio de trazas de elementos en bioquímica humana. Pero en 1962, recibió una llamada de John Foster, director del Lawrence Livermore National Laboratory, para desarrollar allí un laboratorio de biología de las radiaciones. Con presupuesto de tres millones de dólares al año, empezó a estudiar los riesgos de las radiaciones, pero se enfrentó inmediatamente a los burócratas de Washington.

Se opuso con vehemencia al nuevo programa denominado Proyecto Plowshare, que utilizaría armas nucleares para fines pacíficos. La Comisión de Energía Atómica (AEC) propuso, por ejemplo, construir un nuevo Canal de Panamá a través de Nicaragua, usando bombas de hidrógeno de 315 megatoneladas para desbaratar el suelo. El proyecto fue suspendido por la firma del tratado sobre los ensayos nucleares, que prohibía las explosiones nucleares no subterráneas.

Gofman provocó un gran número de enemistades en Washington, y a principio de los setentas había perdido casi todas sus subvenciones de investigación. Se retiró formalmente en 1973 y pasó el resto de su carrera escribiendo libros sobre los riesgos de las radiaciones nucleares usadas en la medicina y siguiendo su investigación sobre los riesgos nucleares.

La esposa de Gofman, la Dra. Helen Fahl Gofman, pediatra, falleció en 2004. Le sobrevive un hijo, el Dr. John D. Gofman, oftalmólogo en Bellevue, Washington.

ANEXO B

El texto que sigue es una traducción abreviada del informe por John W. Gofman, de la División Biomédica del Lawrence Radiation Laboratory, presentado ante el Congreso de los Estados Unidos de América en 1970, bajo el título “The history of erroneous handling of the radiation hazard problema in atomic energy development” (Historia del tratamiento erróneo de los problemas de peligro presentados por las radiaciones en el desarrollo de la energía atómica). El informe tomó como base siete años de trabajo que el autor realizó con Arthur R. Tamplin, de la División de Física Médica (Berkeley) de la Universidad de California, bajo los auspicios de la AEC (Atomic Energy Commission). Este texto fue publicado en francés en el número 5 de la revista *Survivre*, a la cual se rindió homenaje al principio del capítulo I [1].

Introducción

Debe ser un choque para los miembros del Congreso constatar que más o menos 25 años después del principio de la era atómica, la controversia causa estragos en lo que concierne a los efectos desastrosos que podrían tener sobre las generaciones vivientes y futuras, las normas federales actualmente vigentes sobre la radiación.

En efecto, pensamos que estamos en la víspera de un desastre, a menos que medidas radicales sean adoptadas. Nuestro objetivo es explicar por qué esta-

mos aquí y esbozar acercamientos constructivos, para salir de este mal paso. Además, pensamos que solamente una acción del Congreso puede conducir a decisiones satisfactorias.

Comencemos por algunos argumentos positivos que nos llevan al meollo del problema. Después, paso a paso, elaboraremos los detalles.

1. El “Atomic Energy Act” deseaba con exactitud el desarrollo benéfico de la energía atómica pacífica, al mismo tiempo que establecía normas de desarrollo que protegían la salud y la seguridad de los ciudadanos americanos.
2. Una situación inextricable resultó de la creación de un solo organismo –la “Atomic Energy Commission” (AEC) que tenía a la vez la misión de promoción y de control. No es necesario ni útil dudar de la sinceridad de los funcionarios de la AEC. Sencillamente, la AEC ha sido colocada en una situación imposible a partir del momento en el cual se le confiaba la doble responsabilidad del desarrollo pacífico de la energía atómica y de la protección del público.
3. La creación del “Federal Radiation Council” (FRC), con misión de medir los beneficios en función de los riesgos incurridos, fue un error. Como organismo encargado de medir los riesgos, el FRC hubiera podido tener un papel positivo; pero en este caso, se hubiera necesitado que el problema de los beneficios y riesgos fuese debatido públicamente, y que una decisión fuese tomada después por vía de referéndum. Nada permite decir que el FRC haya realmente sabido evaluar los beneficios y los riesgos respectivos.
4. Todo el enfoque del problema de la seguridad en el desarrollo de la energía atómica ha sido lo opuesto a un enfoque sensato. Mientras consideraciones elementales muestran que en lo que concierne a la salud pública, el que promueve una nueva tecnología debe aportar la prueba que sus actividades no son peligrosas, estamos enfrentados a la situación en la cual es el público (con los medios débiles de que dispone) quien tiene que probar que la tecnología es peligrosa, ya que la AEC tiene la prerrogativa de promover sin tener que probar que sus actividades están fuera de peligro.
5. Fundamentalmente, el problema es que los programas de la AEC condujeran a la tasa de radiactividad en el ambiente a un nivel mucho más elevado.

6. Parece natural que la promoción sea primero, y la salud y el bienestar vengan después. Cada vez que existe una duda, los promotores van adelante a pesar de la salud pública y del bienestar.

Histórico

La opinión pública conoce las dificultades de los años cincuenta, cuando la controversia sobre los programas de ensayos de armas nucleares y los peligros de las lluvias causaba estragos [2]. La emoción estaba en su cumbre, ya que la cuestión de la “Seguridad Nacional” estaba en el centro del problema. El resultado fue que ningún acercamiento sano del problema del desarrollo pacífico del átomo pudo ser adoptado. La controversia se calma durante el periodo 1958-1961, para retomar su vuelo con la reanudación de los ensayos soviéticos en 1961 y los ensayos americanos en el Pacífico y Nevada. Por culpa de las controversias de los años 1950-1960, la credibilidad de la AEC alcanzó su punto más bajo tanto con los científicos como con el gran público.

En 1962, las lluvias de yodo radiactivo después de los ensayos de armas nucleares en Nevada provocaron inquietudes serias, en particular en Utah, donde la tasa de yodo radiactivo en la leche llegó a niveles preocupantes. El público manifestó su rabia y los oficiales de la AEC fueron objeto de severas críticas. La AEC pensó que había que encontrar un medio para evitar en el futuro una situación parecida y con este propósito propuso al “Lawrence Radiation Laboratory” (LRL) en Livermore, un programa “integrado” de investigaciones biomédicas, paralelo al programa del laboratorio de desarrollo de explosivos nucleares.

El Dr. John Foster del LRL consultó al Dr. Tamplin, a mí mismo y a varios otros sobre la legitimidad de un tal programa. Era claro que un programa de investigaciones orientado hacia la medición de la elevación de la tasa de radiactividad en la biosfera, y más particularmente en el hombre, consecuencia de los programas de la AEC, era necesario. La pregunta que todos nos planteábamos era saber si un tal programa, llevado en un laboratorio de la AEC orientado al armamento nuclear, sería considerado como serio por el público, o si sería considerado como otra justificación inconfiable.

El problema del doble desarrollo de una tecnología y de los métodos de protección contra sus efectos estaba en el espíritu de todos nosotros. Tres puntos nos convencieron de que había que participar en este programa biomédico.

- a) La Dirección del LRL nos aseguró que podríamos efectuar nuestras investigaciones con toda independencia, cuáles fueran nuestros resultados y sus implicaciones para los programas del LRL y de la AEC.
- b) El Presidente de la AEC, Seaborg, y el Comisionado Haworth, en respuesta a nuestra aserción de que no toleraríamos ninguna obstrucción a la difusión pública de nuestros resultados, nos aseguraron que todo lo que deseaban era la verdad.
- c) Éramos conscientes de que el problema era de la más alta importancia para la Nación y que éramos totalmente capaces de resistir a todas las presiones por esconder la verdad.

Retrospectivamente, pensamos que no debimos haber sido tan optimistas en cuanto a la posibilidad de llevar una encuesta sin apremios sobre los peligros para la salud pública, bajo los auspicios de un organismo de desarrollo. Muy temprano el dilema se volvió evidente, las cosas se agravaron progresivamente y actualmente se volvieron más explosivas.

La lección que los científicos, el público y el Congreso tienen que sacar de esto es que, mientras todos obedecen a motivaciones sinceras, es totalmente imposible continuar el desarrollo de una nueva tecnología y asegurarse de la protección del público en el seno de la misma institución. En el futuro, una tal combinación, que sea para la energía atómica o cualquier otra tecnología, no debe de ser más tolerada. Se vuelve una situación imposible para todos los que están implicados en el asunto, y vuelve imposible la protección efectiva del público.

El programa de investigación: evaluación del impacto de las lluvias radiactivas en la biosfera y en el hombre

Nuestro programa incluía tres partes:

- a) Evaluar la elevación de la tasa de radiactividad debida a los programas de la AEC sobre ensayos de armas nucleares, del Programa “Plowshare”,⁴⁰ del arreglo de los reactores nucleares y de la utilización de los radioisótopos.

⁴⁰ Plowshare Program: nombre del programa estadounidense de utilización “pacífica” de explosiones nucleares para excavar canales, localizar depósitos de gas natural, etcétera.

- b) Seguir el itinerario de estos radioelementos a través de la geósfera, atmósfera e hidrósfera, y en las cadenas alimenticias, con el objetivo final de estimar las dosis de radiaciones soportadas por los humanos y su ecosistema.
- c) Entender, sobre todo, los efectos en el hombre de las dosis de radiaciones causadas por los programas de la AEC.

Hemos trabajado rápidamente y, pensamos con eficacia hacia la realización de estos objetivos.

Primeras causas de preocupaciones serias

Desde el principio, dos problemas empezaron a preocuparnos seriamente. Primero, varios programas de la AEC preveían que lluvias radiactivas muy importantes ocurrirían, las cuales no se podían calificar de otra manera que diseminación incontrolada. Los programas Plowshare para la formación de cráteres, excavación de canales, puertos, etc... nos parecían particularmente peligrosos, y muy temprano emitimos nuestro punto de vista. No nos asustamos cuando fuimos denunciados ulteriormente por los fanáticos del Programa Plowshare como “enemigos del interior”.

A continuación, nuestros primeros estudios acerca de los efectos de la radiación en el hombre nos condujeron a plantear crudamente la pregunta: ¿Cómo alguien pudo definir una llamada “dosis admisible” de radiación? Sin embargo, el FRC había fijado una tal dosis admisible, a la vez para el público y para los trabajadores de la energía atómica.

Hemos buscado demostrar científicamente que esta dosis admisible realmente lo era, en el sentido de que no producía perjuicio alguno para los seres humanos. No encontramos prueba alguna. Muy preocupados por este problema, informamos a los directores del LRL varias veces, inclusive al “General Advisory Committee”, al “Plowshare Advisory Committee” y a otros.

Según la formulación del FRC, la dosis “admisibles” de radiación ha sido fijada a un nivel tal que los beneficios para la sociedad por el desarrollo de la energía atómica compensan los riesgos. Desdichadamente, ninguna precisión a propósito de los beneficios y riesgos fue dada. De tal manera que tenemos una evaluación riesgos-beneficios sin datos numéricos sobre los riesgos, sin que sea establecido quién obtendría los beneficios y quién tomaría el riesgo.

Denunciamos públicamente la ausencia de justificación científica de la noción de dosis “admisible” y la vaciedad de la palabra “riesgo-beneficio” en un congreso sobre el Programa Plowshare en Davis (California) en 1964. La reacción fue inmediata. Un científico reputado de nuestros laboratorios me calificó de “Caballo de Troya” del Programa Plowshare. El descontento de los funcionarios de la AEC en Washington, aunque en forma matizada, se volvió evidente. Sobre todo, se puso en evidencia que las palabras valientes de que “todo lo que deseamos es conocer la verdad” iban a quedar con toda probabilidad en letra muerta.

¿Por qué no hemos criticado vigorosamente las normas existentes en 1964?

Uno se puede preguntar por qué no combatimos activamente todas las normas sobre la radiación en 1964, en tanto que no podíamos defenderlas. Retrospectivamente, nosotros mismos nos interrogamos. Existen varias razones específicas:

- a) En esa época los programas Plowshare y los reactores nucleares de potencia no estaban a punto de conocer un desarrollo rápido;
- b) Como muchos otros, estábamos hipnotizados por el error de juicio fantástico que caracteriza el desarrollo de la energía atómica. Este error reside en el hecho de que ya nadie es capaz de probar que una cierta dosis de radiación es peligrosa, la tecnología puede proseguir su desarrollo, aunque pueda involucrar un riesgo considerable. ¿Cómo llegamos a tal hipnosis? Nunca lo sabremos a ciencia cierta. No tenemos ninguna excusa, nos faltó sentido común. Lo que podemos decir, por lo menos, es que hemos alcanzado sobrepasar esta fase aberrante, mientras muchos de nuestros colegas de la AEC quedan todavía totalmente y beatamente hipnotizados.

Vale la pena examinar más de cerca, él por qué no hemos podido rendirnos ante la evidencia en 1964. En ese entonces dijimos que no podíamos defender las normas del FRC pero no las combatimos. Además de la actitud peligrosa consistente en ir adelante mientras no está garantizada la seguridad, creíamos en dos mitos muy difundidos en este medio. Se puede considerar a estos mitos como un invento, consciente o no, pero en todo caso sirviendo a los objetivos de los promotores.

Mito N°1. Tal vez existe una dosis de radiación que constituye un umbral de “seguridad”. Con esto se entiende que tal vez no habrá desarrollo de cáncer o leucemia o perjuicio genético, si la dosis total de radiación se queda por debajo de algún valor mágico. Sabemos ahora que es solamente una esperanza alentadora, particularmente para los promotores de la energía atómica, pero que ésta esperanza no tiene ningún fundamento científico. De hecho, las pruebas avanzadas para la existencia de un tal umbral de seguridad han sido frecuentemente retomadas por numerosos científicos reputados. Pero los promotores siguen esperando de una u otra manera, que en algún lugar, alguien, aportará la prueba de que existe un umbral de seguridad. De hecho, todavía a la fecha, la “División Biomédica” trabaja en un programa titulado “Investigación de un umbral de seguridad”. Al mismo tiempo, pruebas directas cada vez más convincentes, tanto en el hombre como en los animales, muestran perentoriamente que tal umbral no existe. Dos perjuicios –cánceres y leucemias adicionales– serán causados aun por las dosis más bajas. Inclusive, ahora sabemos, a partir del trabajo de la Dra. Alicia Stewart en Inglaterra [3], confirmado en los Estados Unidos por McMahan, que tan sólo el examen de rayos X durante los primeros meses del embarazo tiene como consecuencia un aumento de 50% en el número de cánceres y leucemias observados en la infancia. Así, como lo pueden ver, la idea de un umbral de seguridad se despedazó.

Mito N°2. Tal vez una administración progresiva de dosis de radiación, tal como existe en las aplicaciones pacíficas de la energía atómica, no producirá tantos cánceres ni leucemias, como los que produce una administración rápida; para apoyar esta idea, una supuesta prueba experimental en el ámbito animal era conocida. No sabemos por qué antes no nos dimos cuenta, de que esta prueba era falsa. Es probable que nuestra psicología fuera tal, que no queríamos cuestionar esta “última esperanza”.

Numerosos científicos ya habían tenido dudas, Lewis y Pauling en particular. De hecho, aun antes de nuestro despertar repentino, ya la “Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación” (CIPR) proclamaba que no era razonable contar con una protección contra el cáncer y la leucemia debidos a una administración progresiva. De manera extraña, el FRC estadounidense también lo afirmaba. El problema del FRC es que dicho organismo no pone en práctica sus propias recomendaciones.

Lo que nos hizo despertar en octubre de 1969

A pesar de nuestras dudas sobre las normas, todavía parcialmente creíamos en los mitos que acabo de describir. Estudiábamos cuidadosamente las pruebas que nos fueron entregadas. Numerosas, no paraban de llegar. Las personas irradiadas en Hiroshima y Nagasaki desarrollaban en el transcurso de los años no solamente leucemias, sino otras formas de cánceres: cáncer de las glándulas linfáticas, de tiroides, de pulmón y de mama. Los pacientes ingleses con artritis que habían sido tratados por radiación habían tenido primero leucemia aguda, y en el transcurso de los años cáncer de pulmón, de las glándulas linfáticas, de hueso, de faringe y de estómago. De todas partes nos llegaron pruebas adicionales de la relación que existía entre las diversas formas de cáncer y la radiación. Examinamos todas estas pruebas y buscamos una característica en común. Y lo que encontremos fue terrible, chocante y muy preocupante. Lo que ya sabíamos de los experimentos sobre animales se aplicaba evidentemente a los humanos: todas las formas principales de cánceres humanos son producidos por la radiación.

Un choque todavía mayor fue constatar que una dosis dada de radiación, aumenta en el mismo grado todas las formas de cánceres y leucemias. Lo que queremos decir es que si para un tipo particular de cáncer, que aparece espontáneamente en 100 personas, una dosis dada de radiación aumenta su proliferación en 10%, esta misma dosis aumentará en 10% todas las otras formas de cáncer. Y todavía más preocupante, se mostró claramente que los niños y los fetos eran diez veces más susceptibles de contraer cánceres y leucemias por radiación.

En esta época la mayoría de la gente estaba ya convencida de que la leucemia y el cáncer de tiroides se debían a la radiación. Las pruebas que llegaban de Japón e Inglaterra nos obligaban a incluir todas las otras formas de cáncer.

Nuestros resultados indicaban que el riesgo de cáncer y leucemia era de 10 a 20% mayor de lo que pensaba en este momento la mayoría de los científicos.

Un cálculo rápido basta para convencernos de que las normas oficiales del FRC podrían conducir a un valor entre 16 000 y 32 000 cánceres adicionales anuales en los Estados Unidos —un verdadero desastre nacional. Para ser prudente y no alarmista, escogimos minimizar el problema y publicar el valor de 16 000.

¿Cómo despertamos en octubre de 1970?

Era evidente que el momento de la acción, respecto a las normas del FRC había llegado. Los reactores nucleares y los programas Plowshare ya no eran sólo sueños, sino realidades inminentes. La diseminación de radioelementos, conforme a las normas del FRC, tenía que ser impedida. Decidimos, según las mejores tradiciones, presentar nuestros resultados en una asamblea de científicos reputados. El “Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos” organizaba una Conferencia científica importante sobre “La ciencia nuclear y el ambiente” y nos había invitado a presentar nuestro trabajo. Por lo tanto, expusimos ante esa asamblea científica las conclusiones de nuestros trabajos.

A pesar de nuestras dudas crecientes en cuanto al deseo de la AEC de conocer la verdad, creíamos que las pruebas que teníamos eran tan abrumadoras que la AEC se iba a unir a nosotros para recomendar una disminución inmediata de la dosis máxima admisible de radiación. Por tanto, en nuestra exposición pedimos a la AEC, que compartía en principio nuestra preocupación, unirse a nuestros esfuerzos.

La reacción instintiva del promotor

Lejos de apoyar nuestros esfuerzos, la AEC inició un ataque violento en nuestra contra con comunicados y falsas noticias para ridiculizarnos, con todo, menos con una prueba válida que refutara nuestros resultados. Varios colegas de nuestro laboratorio nos dijeron: “¿Se dan cuenta del efecto que tendrá sobre nuestros créditos lo que ustedes están haciendo? O: “Ustedes dicen que, si siguen las normas del FRC, habrá de 16 000 a 32 000 muertos por cáncer o leucemia, adicionales cada año. ¿Qué los hace pensar que es tanto?”

Nos preocupamos más de la salud y del bienestar de los humanos, que del presupuesto de nuestro laboratorio. Además, no hemos visto ni una pizca del beneficio en aprovechar la muerte de 16 000 a 32 000 Americanos —y por fin, la decisión de la legitimidad de tal política la tiene que tomar el pueblo americano— teníamos que publicar estos hechos.

Los votos piadosos de la AEC “todo lo que deseamos es conocer la verdad” se volatilizaron. Frente a la amenaza de sus intereses burocráticos y de capilla, la AEC probó que, cuando las cartas están tiradas, el papel promocional le gana fácilmente al de protección.

Los programas futuros de la AEC diseminaron demasiados radioelementos

Después de las reacciones de la AEC hay que memorizar otra lección importante: es evidente que los programas futuros de la AEC conducirán a un aumento demasiado importante de la tasa de radiactividad en la biosfera y el ambiente. Hay varias razones para esto.

1. Cuando propusimos la reducción por un factor de 10, el valor de la dosis admisible, la AEC contestó que los reactores de potencia diseminan mucho menos radiactividad que las normas que proponíamos. La industria nuclear hizo el mismo comentario. A esto contestamos: “Muy bien, en esas condiciones, probablemente ven sin ninguna objeción la disminución de las normas actuales”. Pero la AEC y la industria se opusieron, a pesar de todo, a esta reducción; es decir, no piensan realmente lo que dicen en cuanto a la dosis débil diseminada por sus instalaciones.
2. Además, la AEC misma tiene un gran número de programas Plowshare (explosiones nucleares pacíficas), cada uno acompañado por la liberación sin discriminación de radioelementos en el ambiente. Uno de los programas más perniciosos (todos son perniciosos) es la explotación de gas natural mediante explosiones atómicas subterráneas, lo que sin sospechas conduce a la producción y a la venta de gas radiactivo al consumidor. Para nosotros, la respuesta clásica “nunca rebasaremos las normas” tiene que ser traducida por: “No crearemos más cánceres y leucemias de lo que el FRC nos autoriza legalmente”. El pensamiento de no estar autorizado a irradiar seres humanos vuelve furiosos a los funcionarios del programa Plowshare. Consideramos esta tecnología como una respuesta a la búsqueda de una pregunta: las bombas atómicas tienen que servir para algo —es así que el programa Plowshare nos quiere someter.
3. El director ejecutivo del FRC, el doctor Tompkins, durante audiciones en el Congreso de los USA, frecuentemente ha subrayado que piensa que las normas no son demasiado elevadas. Realmente, piensa que podrían serlo tres veces más. Añade habitualmente que las “exigencias operacionales” son tan importantes como los riesgos cuando se trata de fijar normas.

Con la finalidad de que estos eufemismos estén claros, los tenemos que traducir. Si los programas de la AEC se establecen y si la radiactividad liberada puede rebasar las normas actuales, su punto de vista es que las “exigencias operacionales” tienen que conducir a exponer a la gente a una tasa de radiactividad más elevada. Un aumento por un factor 3 significaría 96 000 cánceres y leucemias adicionales cada año.

La idea razonable de que tal vez los programas escogidos son malos, porque exponen a los humanos a una dosis de radiación demasiada elevada, no parece llegarles a la cabeza.

Lo que pasó realmente

Hemos ponderado de manera más madura todos los resultados experimentales de origen humano o animal. Es cierto que el número de muertes suplementarias por cáncer o leucemia será más cercano a 32 000 que a los 16 000 primero anunciados. El mito de la existencia de un umbral de seguridad está ahora completamente desenmascarado. No existe un umbral de seguridad en lo que concierne a la dosis de radiación. El mito de menor peligro cuando la exposición es progresiva, también fue desenmascarado. La prueba proviene de experimentos llevados a cabo sobre animales de más edad, cuya sensibilidad es menor. Todo lo que prueban estos experimentos es que hay que evitar en particular la irradiación de niños.

A todo esto se añade el hecho de que no somos los únicos en estimar que la dosis admisible oficialmente definida conduce a la formación de más cánceres y leucemias. Después de nuestras primeras publicaciones, hemos recibido copia del Informe N°14 de la muy respetable CIPR. Si se toman como base las cifras más recientes de este informe y las previsiones optimistas, aplicando las normas del FRC, se encuentra que la estimación mínima se sitúa entre 11 000 y 18 000 cánceres y leucemias adicionales por año. Por lo tanto, estamos de acuerdo con la CIPR.

Pero la AEC puede contar con algunos servidores de laboratorio a quienes apoya con su dinero. No aportan ninguna prueba de la falsedad de nuestras cifras, tampoco ofrecen ninguna, y sin embargo, proclaman: “La AEC ha llegado a resultados notables. Ningún peligro es más comprendido que el debido a la radiactividad. Las normas están muy bien así. Los beneficios sobrepasan ampliamente los riesgos”. Todo esto sin ninguna prueba.

Esto nos enseña, y debería enseñarle al Congreso, una lección muy importante en lo que respecta a cuál debe ser el esfuerzo para preservar un ambiente habitable para los humanos, ya sea que se trate de la radiactividad o de otros contaminantes: esperar que los científicos prodiguen la verdad en cuanto a los peligros de una tecnología, cuando estas investigaciones y salario dependen de un promotor de dicha tecnología, es esperar que los sueños de Santa Claus se vuelvan realidad. Puede ser que Santa Claus exista, pero es mejor no contar con él.

Un desafío científico a la Dirección de la AEC

Ya que la dirección de la AEC ha criticado el lugar donde hemos presentado nuestros resultados, el momento en el cual los hemos presentado, y al público al que nos hemos dirigido, hemos intentado conocer si se interesaba en la exactitud de nuestros resultados.

En los pasillos del Congreso, el 28 de enero de 1970, hemos retado:

Sr. Presidente Holyfield, le pedimos nombrar un jurado de personas eminentes, físicos, químicos, biólogos, médicos, galardonados del Premio Nobel, o miembros de la Academia Nacional de Ciencias o de la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias (AAAS) –con ningún miembro que tenga un interés en las cuestiones de la energía atómica. Le pedimos presidir este debate. El Dr. Tamplin y yo mismo discutiremos cada uno de los aspectos de las pruebas que hemos acumulado a propósito de los peligros serios que representan las normas actuales del FRC, contra el equipo entero de la AEC y todos los que la Dirección de la AEC pueda llamar en sus 19 laboratorios, solos, con varios, o de cualquier forma. Con su experiencia de 20 años en este problema, y su gran equipo, deberían estar listos inmediatamente para este debate. Nosotros estamos listos. Si hay razones para cuestionar nuestras pruebas y nuestra buena voluntad frente a la decisión de esta asamblea, este eminente jurado lo determinará. Si este debate no ocurre, considero entonces que el país entero y el mundo sabrán la respuesta sin otra pregunta.

Estábamos a 28 de enero de 1970.

Ahora estamos a 7 de abril de 1970.

El equipo directivo de la AEC no se ha manifestado. Parece que la verdadera respuesta es ahora conocida.

J.W. Gofman, Lawrence Radiation Laboratory (Livermore)

Referencias

1. “Pollution radioactive et atomic energy commission”, en *Survivre*, vol. 5, núms. 5-9, 1970.
2. Commoner, B. *Science and survival*, Nueva York, Viking Press, 1967.
3. Stewart A. M., J. W. Webb, B. D. Giles y D. Hewitt. “Preliminary Communication: Malignant Disease in Childhood and Diagnostic Irradiation In-Utero”, en *Lancet*, vol. 2, núm. 446, 1956.

Energía nuclear, contaminación radiactiva y sus efectos en la salud
se terminó de editar en diciembre de 2016.
Diseño y formación Tinta Negra Editores.

