

LA RADIACIÓN AL SERVICIO DE LA VIDA

Autor: MARÍA ESTER BRANDAN. RODOLFO DÍAZ PERCHES. PATRICIA OSTROSKY

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [AGRADECIMIENTOS](#)
- [PRÓLOGO](#)
- [I. LOS DESCUBRIDORES](#)
- [II. RADIATIVIDAD, ACCELERADORES Y OTROS CONCEPTOS DE LA FÍSICA](#)
- [III. LA RADIACIÓN NOS RODEA](#)
- [IV. UN VIAJE POR LA CÉLULA](#)
- [V. EFECTOS INMEDIATOS DE UNA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN](#)
- [VI. EFECTOS TARDÍOS DE UNA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN](#)
- [VII. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA](#)
- [VIII. LOS BENEFICIOS DE LA RADIACIÓN EN LA MEDICINA](#)
- [IX. EL CASO DE LA SEÑORA GARCÍA](#)
- [X. OTROS USOS DE LOS RADIOISÓTOPOS Y DE LA RADIACIÓN](#)
- [XI. ¿ES NECESARIA LA RADIACIÓN PARA LA VIDA?](#)
- [GLOSARIO](#)
- [BIBLIOGRAFÍA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



Primera edición, 1991

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1990, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D. F.

ISBN 968-16-3452-7

Impreso en México



DEDICATORIA

Para ALEJANDRA JAIDAR



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al doctor Alberto Zimbrón Levi la información que nos proporcionó sobre el tema de la medicina nuclear, y al doctor Sergio Fernández Tapia su asesoría en cuanto a los desarrollos recientes en el campo del radiodiagnóstico. Los doctores Romeo González y Arturo Menchaca leyeron el manuscrito cuidadosamente y lo enriquecieron con sus comentarios y sugerencias, lo que agradecemos sinceramente.

Nuestros cónyuges, hijos y nietos, supieron comprender el valor de las horas que dedicamos a la escritura de este libro. En particular, a Arturo, Carmen, Daniel, Jorge, María Alejandra, Nuria, Ronen y Talia, nuestro reconocimiento por su paciencia.



PRÓLOGO

La palabra radiación es capaz de despertar las reacciones más variadas: interés, al anunciarse como título de una conferencia o discusión pública; temor, ante el anuncio de la puesta en marcha de una planta nucleoelectrica; admiración, al observarse una radiografía que muestra la fractura del dedo pulgar del pie de nuestra hija; esperanza, ante un tratamiento de radioterapia que puede salvar la vida de nuestro mejor amigo. Más aun, aparte de estas reacciones el público considera que es mucho lo que desconoce sobre la radiación y, por tanto, no entiende cómo en ocasiones puede resultar tan benéfica y en otras causar daño. La necesidad de conocimientos respecto a la radiación y sus efectos no es satisfecha por los medios de comunicación que, la mayor parte de las veces, divulgan noticias y reportajes incompletos y superficiales. Esta situación origina que el ciudadano común tome posiciones subjetivas, basadas en la mala información y, más que nada, en el temor ante algo que no entiende y que le parece imposible llegar a comprender.

Con la intención de lograr una visión interdisciplinaria del tema nos reunimos para escribir este libro un médico radioterapeuta, una genetista toxicóloga y una física nuclear, cada uno familiarizado con aspectos diferentes del uso de las radiaciones a través de nuestra formación profesional. Nuestro interés principal es ofrecer al lector interesado información al día sobre la radiación, sus efectos y sus usos al servicio de la vida. La información contenida en este libro ilustra el conocimiento científico actual sobre la interacción de la radiación con la materia viva y en particular con el ser humano, la utilización de la radiación en la medicina, algunas de sus aplicaciones en otras áreas, los riesgos asociados a su uso y las medidas de protección vigentes destinadas a regular el uso de la radiación.

El libro se inicia con el reconocimiento a los descubridores de la radiación a fines del siglo pasado y comienzos de éste. Después se hace una presentación de los conceptos físicos necesarios para comprender los fenómenos que trataremos y se explica el origen de la radiación en nuestro mundo. Luego, para poder entender los efectos biológicos realizamos un viaje por la célula y describimos las consecuencias biológicas inmediatas y a largo plazo, de la exposición del ser humano a la radiación. El uso de los rayos X en medicina y de los radioisótopos en radioterapia y medicina nuclear es explicado y ejemplificado en el caso de una mujer con cáncer cérvico-uterino. Seguidamente se describen las normas de seguridad radiológica y se concluye con una revisión de las aplicaciones más comunes de la radiación, incluyendo la producción de energía.

Nuestra opinión es que no se puede hablar responsablemente de la radiación y sus efectos sin una base científica rigurosa. Una mejor comprensión de los efectos de la radiación y de las medidas de seguridad apropiadas podría ayudar a tomar decisiones que consideren de manera objetiva tanto los riesgos como los beneficios. Por ejemplo, el caso de una persona que debe decidir si someterse o no a un estudio médico con radioisótopos o el de aquel que tiene que asesorar, instruir o decidir sobre un uso específico de radiación que tenga repercusión pública.

Cada nuevo paso en el conocimiento científico genera más interés por dar el siguiente. Esperamos que la lectura de este libro despierte en el lector la curiosidad por aprender más e informarse adecuadamente. De esta manera podrá tener opiniones libres y enteradas sobre asuntos en que la ciencia actual desempeña un papel importante.

La experiencia vivida por nosotros los autores, al escribir este libro, ha sido enriquecedora y ha ayudado a disminuir nuestra propia ignorancia. Ojalá logremos aumentar el conocimiento del lector.

MARÍA ESTER BRANDAN. RODOLFO DÍAZ PERCHES. PATRICIA OSTROSKY.

Ciudad Universitaria, enero de 1990



I. LOS DESCUBRIDORES

Creced y multiplicaos y dominad la Tierra Génesis 1:28

EL SER humano ha estado expuesto a las radiaciones ionizantes desde su aparición sobre la Tierra, pero sólo fue capaz de identificarlas y usarlas desde el momento, en 1895, en que Wilhelm Konrad Roentgen descubrió los rayos X. Durante casi un siglo se ha trabajado para profundizar el conocimiento y ampliar las aplicaciones de la radiación y otras nuevas formas de la energía, y aumentar así nuestro dominio sobre las fuerzas de la naturaleza.

El control de la energía de las radiaciones ha permitido el progreso en diversas áreas del saber y, específicamente en medicina, ha abierto nuevas posibilidades de diagnóstico y terapéuticas. Ha contribuido a un mejor conocimiento de la fisiología humana, así como a identificar la causa de algunas enfermedades y, por ende, a adecuar el tratamiento. Esto ha hecho que se prolongue y mejore la calidad de vida del ser humano.

La dualidad en los usos de la radiación, para fines benéficos o destructivos, fue imaginada desde el principio por sus descubridores. Cuando Pierre Curie en Estocolmo recibió con su esposa Marie el premio Nobel en 1903 señaló: "Soy de aquellos que piensan que la humanidad obtendrá más beneficio que daño con estos nuevos descubrimientos." En esta frase queda implícito que estaba consciente de que sus descubrimientos podrían dañar a la humanidad pero confiaba en que los beneficios serían mucho mayores. Casi noventa años después debemos aceptar que así ha sido.

Al considerar la historia de la radiología y la radiobiología resaltan cuatro personajes cuyo trabajo, a fines del siglo pasado y comienzos de éste, constituye la base del conocimiento actual en el área: Wilhelm Konrad Roentgen, Antoine Henri Becquerel, Pierre y Marie Curie. En las páginas siguientes se relatan algunas de las circunstancias que los llevaron a dejar una huella profunda en la historia de la ciencia.

WILHELM KONRAD ROENTGEN

Nació el 27 de marzo de 1845. Igual que muchos científicos de su época, Roentgen efectuaba experimentos con tubos de vidrio llenos de gas a baja presión y en su interior aplicaba campos eléctricos intensos. Era sabido que el tubo se iluminaba tan pronto como se aplicaban voltajes muy diferentes en sus dos electrodos. La luz parecía ser producida por rayos originados en el electrodo negativo (cátodo). El interés de Roentgen se centraba en el estudio de las propiedades de fluorescencia de ciertas sales y el oscurecimiento del papel fotográfico sobre el que incidían estos rayos originados en el cátodo. El viernes 8 de noviembre de 1895, cuando intentaba asegurarse de que la luz emitida por uno de sus tubos no atravesaba una camisa de cartón y estaño, apagó la luz de su laboratorio y observó con sorpresa que en su mesa de trabajo, lejos del tubo, un punto emitía luz. Al prender la luz, identificó el objeto brillante: un pedazo de papel pintado con sales fluorescentes. El fenómeno que observó era la luz fluorescente producida en el papel por rayos invisibles al ojo humano, que eran emitidos desde el tubo y atravesaban el vidrio, el cartón, el estaño y el aire hasta llegar a las sales del papel.

Posteriormente, Roentgen observó la sombra de un alambre que se interponía entre el tubo y el papel fluorescente. Sin embargo, ni un libro de mil páginas, ni la madera, ni el hule producían sombra. Comparó la transparencia relativa de varios espesores de aluminio, plata, cobre, plomo y zinc a la radiación invisible y encontró que 1.5 centímetros de plomo impedían la fluorescencia del papel. Durante sus estudios descubrió que podía verse la sombra de sus dedos y la imagen más oscura de sus huesos. Esta fue la primera fluoroscopia en el mundo. Se le ocurrió que estos fenómenos podrían ser registrados en placas fotográficas, y se dedicó a radiografiar varios objetos. Y así, el 22 de diciembre tomó la primera radiografía hecha a un ser humano: la mano de su esposa.

El 28 de diciembre de 1895 entregó para publicación científica sus observaciones detalladas, y el 5 de enero siguiente la prensa ya informaba de este descubrimiento. Los rayos invisibles, emitidos por el tubo, fueron llamados por el propio Roentgen rayos X, para distinguirlos de otras radiaciones. La divulgación mundial de estos hechos fue explosiva y los rayos X pasaron a ser un elemento indispensable, tanto en hospitales como en centros de investigación. Roentgen recibió el primer premio Nobel de Física en el año 1901.

ANTOINE HENRI BECQUEREL

Nació en París el 15 de diciembre de 1852. Fue, como su abuelo, su padre, y su hijo Jean Becquerel, profesor de física aplicada en el Museo Nacional de Historia Natural. Sus principales intereses dentro de la física fueron la electricidad, el magnetismo, los fenómenos ópticos y la energía. Interesado en los rayos infrarrojos examinó, entre otras cosas, el espectro de diferentes cristales fluorescentes estimulados por estos rayos. Continuó los experimentos iniciados por su padre y estudió la relación entre la absorción de la luz y la emisión de luz fluorescente en algunos compuestos de uranio.

Después del descubrimiento de Roentgen, Becquerel se puso a investigar la posible conexión entre la radiación invisible y la luz visible, pues pensaba que tal vez todos los materiales luminiscentes, estimulados de cualquier forma, también pudieran producir rayos X. Para probar esta hipótesis colocaba cristales fluorescentes sobre una placa fotográfica que estaba envuelta en papel opaco, de tal manera que sólo una radiación penetrante podría alcanzar la emulsión. Este arreglo experimental lo exponía a la luz del Sol por varias horas, con lo cual se excitaban los cristales y se obtenía una imagen de las sales al revelar la placa. Becquerel trabajaba con sales de uranio y durante febrero de 1896, debido al clima invernal de París, no le fue posible realizar sus experimentos con la luz solar, por lo que guardó las placas con las sales en un cajón oscuro. Al revelar estas placas días más tarde, pudo observar la silueta de las sales, a pesar de no haber sido excitadas por la luz solar. Becquerel interpretó el fenómeno como un caso único de "fluorescencia metálica". Al continuar sus estudios sobre el nuevo fenómeno descubrió que cualquier sal de uranio, fluorescente o no, producía estas radiaciones penetrantes. En 1898 se encontró que otro elemento, además del uranio, producía este efecto, el torio. La emisión de estas radiaciones es lo que hoy se conoce como radiactividad.

Henri Becquerel es considerado el padre de la radiobiología, ya que, al producirse una lesión en la piel con una fuente radiactiva que descuidadamente traía en la bolsa de su chaleco, hizo que los médicos por primera vez se interesaran en investigar los efectos biológicos de estas nuevas radiaciones.

PIERRE Y MARIE SKLODOWSKA CURIE

Pierre Curie nació en París el 15 de mayo de 1859. Su primer trabajo científico, un cálculo de la longitud de onda de las ondas calóricas, lo realizó en 1878. En su tesis doctoral estudió el magnetismo y sus resultados se conocen como la ley de Curie, que relaciona la respuesta magnética de algunos cuerpos con la temperatura.

Marie Sklodowska nace en Varsovia el 7 de noviembre de 1867. En su época no se acostumbraba que las mujeres recibieran educación superior, pero tanto ella como su hermana Bronia luchan por obtenerla. Una vez concluidos sus estudios secundarios, las dos hermanas hacen un pacto y la joven Marie se queda trabajando en Varsovia como institutriz mientras que Bronia se va a estudiar a París. Al completar Bronia sus estudios de medicina, se lleva a Marie a París, en el otoño de 1891. En dos años Marie obtiene el primer lugar en su carrera de licenciatura en ciencias físicas y en 1894 concluye su maestría en ciencias matemáticas.

Ese mismo año, un científico polaco visita París y la señorita Sklodowska le comenta acerca de sus trabajos sobre las propiedades magnéticas de diversos aceros. El visitante le recomienda asesorarse por Pierre Curie, experto en magnetismo e invita a ambos a tomar el té en su casa. En esta primera reunión, Pierre se queda admirado de que exista una joven atractiva, inteligente y con quien se pueda hablar de ciencia. A partir de ese momento se siguen frecuentando para discutir sus estudios y, finalmente, Pierre le pide permiso para visitarla. Ella le proporciona su dirección, 11 rue des Feuillantines, una verdadera buhardilla del barrio latino, en donde Marie sobrevivía con té, pan y mantequilla. Al visitarla, Pierre se estremeció por la sobriedad de su vida. La relación se va acentuando hasta que -el 25 de julio de 1895 se casan en París, convirtiéndose Marie en Madame Curie, nombre bajo el cual el mundo la conoce. Su primera hija, Irene, nace en 1897.

Como a Madame Curie le llaman la atención los informes de Roentgen acerca de los rayos X y los de Becquerel acerca de la radiactividad natural, escoge como tema de tesis para su maestría en física, "La conductividad del aire a través de pruebas cuantitativas de la actividad radiante". Encuentra que el torio es más radiactivo que el uranio, lo cual reporta a la Academia de Ciencias de París el 12 de abril de 1898. En esa presentación sugiere que la radiactividad es una propiedad atómica, pues es independiente del estado físico o químico del material radiactivo y también predice que se podrían encontrar elementos más activos que los conocidos.

Los esposos Curie desarrollan métodos para investigar nuevos elementos, y en julio de 1898 separan por dilución de la pechblenda (mineral de uranio), el uranio y el torio. Reportan el descubrimiento de un nuevo elemento que

llaman polonio, en honor al país de origen de Madame Curie. En diciembre del mismo año precipitan el polonio y obtienen un nuevo elemento muy radiactivo, al cual denominan radio. Para producir una muestra de este elemento reciben una tonelada de mineral de uranio donada por el gobierno austriaco. Durante cuatro años el matrimonio trabajó arduamente, haciendo un gran esfuerzo físico, para llegar a obtener finalmente ¡la décima parte de un gramo de radio puro!

En el desarrollo de sus investigaciones, tanto Becquerel como Madame Curie notaron ciertos efectos en su piel, posiblemente causados por el manejo de materiales radiactivos. Pierre Curie hace un experimento, aplica una cantidad de radio en su antebrazo y observa las diferentes etapas de la reacción que se produce en la piel. En la primera fase detecta enrojecimiento, seguido por formación de vesículas que se rompen dejando la piel sin su capa protectora (este efecto se conoce como radio-dermitis húmeda). La curación se inicia de la periferia hacia el centro, quedando la piel más delgada y con una aureola oscura, más expuesta a cualquier daño posterior. Es Pierre Curie quien inicia los estudios de radiobiología en animales y facilita a los médicos tubos de vidrio que contienen el gas radiactivo radón, para que realicen sus primeros experimentos clínicos en el tratamiento de tumores por medio de la radiación.

Mientras tanto, Marie continuaba sus estudios, y en junio de 1903 presenta en La Sorbona su tesis de doctorado en ciencias físicas, "Investigaciones acerca de las sustancias radiactivas". Ese mismo año, Henri Becquerel y los esposos Pierre y Marie Curie fueron galardonados con el premio Nobel de Física.



Pierre y Marie Curie frente a su casa cerca de París. (Foto del Instituto Curie, Paris. Uso autorizado.)

El 19 de abril de 1906, Pierre Curie fallece trágicamente arrollado por un coche tirado por caballos en una calle de París. Marie pasa a ocupar su cátedra en La Sorbona, convirtiéndose en la primera mujer que recibe tal honor. En 1910, Madame Curie recibe el premio Nobel de Química y, en 1911, con el apoyo del Instituto Pasteur y de la Universidad de París, logra fundar el Instituto del Radio instalado en dos edificios gemelos, uno para estudios en física y matemáticas, dirigido por Marie Curie y, otro, para los estudios médicos bajo la dirección de Paul Regaud. De esta nueva institución surgen las primeras contribuciones radiobiológicas y se establecen las bases de la radioterapia moderna.

Irene Curie, hija del matrimonio, siguió los pasos de sus padres en el campo de la física y se dedicó a la investigación de las sustancias radiactivas. Contrae nupcias en 1926 con Frederic Joliot, alumno del laboratorio de Marie Curie. El nuevo matrimonio es responsable del descubrimiento de la radiactividad artificial, lo que abre las puertas a la medicina nuclear, y con ello a la posibilidad de diagnóstico y tratamiento de un gran número de enfermedades.

Otro de los logros que alcanzaron los Joliot-Curie fue conseguir la primera reacción en cadena. La publicación de este resultado violó el acuerdo entre los físicos nucleares de no mencionar el tema y desafortunadamente propició acciones que culminaron con la construcción de la primera bomba atómica.

Marie Curie murió en París el 6 de julio de 1934, víctima de una anemia aplásica, es decir, la destrucción del tejido formador de la sangre. Es muy probable que la radiación que recibió durante una vida de trabajo con los nuevos elementos radiactivos fuera la causa de esta enfermedad. Pensando en la lucha que esta mujer tuvo que sostener para lograr su educación profesional y en toda la contribución que brindó a la comunidad científica y a la humanidad, viene a la memoria aquella frase pronunciada por su esposo Pierre Curie: "se debe hacer de la vida un sueño, y del sueño una realidad".



II. RADIOACTIVIDAD, ACELERADORES Y OTROS CONCEPTOS DE LA FÍSICA

ESTE capítulo explica algunos de los conceptos usados a lo largo del libro, tales como radiación, radiactividad, dosis y aceleradores. También definimos y explicamos el uso y significado de las múltiples unidades utilizadas hoy en día para medir la radiación, como son el Curie, el rad y el rem. Si el lector está familiarizado con esta información puede saltar este capítulo y continuar directamente con el siguiente.

RADIACIÓN

El tema central de este libro es la *radiación*. En física se entiende que la radiación es energía en movimiento. Debido a que cualquier partícula que se mueva posee energía, tanto los átomos, los núcleos de los átomos, los electrones, los protones o los neutrones, cuando se trasladan de un lugar a otro en el espacio, son radiación. Ya hemos encontrado este tipo de radiación en el primer capítulo, en algunos de los fenómenos estudiados por Henri Becquerel y los esposos Curie, ya que, aunque ellos no lo sabían, intervenían partículas nucleares en movimiento provenientes de los elementos uranio y polonio. A estos tipos de radiaciones hoy se les llama *partículas alfa* (dos protones y dos neutrones juntos) y *partículas beta* (electrones); son emitidos de modo espontáneo por algunos núcleos atómicos, a velocidades cercanas a la de la luz.

La energía de la radiación no debe ser transportada necesariamente por una partícula. Es posible que sea una onda la que lleve energía de un lugar a otro. Las ondas de radio y de televisión, por ejemplo, son energía emitida desde la planta transmisora que viaja por el espacio hasta llegar a nuestro aparato receptor de radio o televisión. Estas ondas forman parte de la llamada radiación electromagnética, que también incluye la luz visible y la luz ultravioleta. Los rayos X descubiertos por Roentgen y los llamados *rayos gamma* que eran parte de la radiación emitida por las sales de uranio estudiadas por Becquerel, también son parte de la radiación electromagnética y siempre se desplaza por el espacio a la velocidad de la luz. La única diferencia entre estos diversos tipos de radiación electromagnética es la energía transportada por cada rayo.

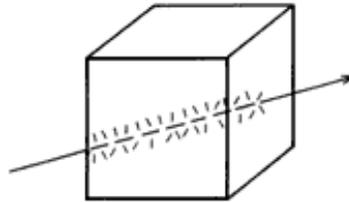
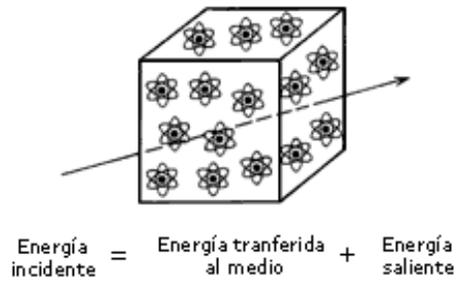
Cuando la radiación penetra a través de un trozo de cualquier material, por ejemplo un ladrillo o una mano, "choca" con los átomos del material y en cada una de las colisiones les transfiere parte de su energía. Las partículas alfa transfieren mucha energía en cada choque y son detenidas (es decir, se les acaba su energía) en unos cuantos centímetros de aire o incluso en el grosor de una hoja de papel. Toda la energía que transportaba la partícula alfa queda depositada en un volumen pequeño del material irradiado.

Las partículas beta transfieren poca energía en cada choque y por esto se necesitan muchos choques para detenerlas. Se requiere al menos un metro de aire o algunos milímetros de aluminio para que se detengan y la energía que depositan en el material, queda menos concentrada que en el caso de irradiación con partículas alfa.

Los rayos gamma logran penetrar materiales mucho más gruesos que las partículas alfa y beta y se necesitan varios centímetros de plomo o de concreto para atenuarlos.

RADIOACTIVIDAD

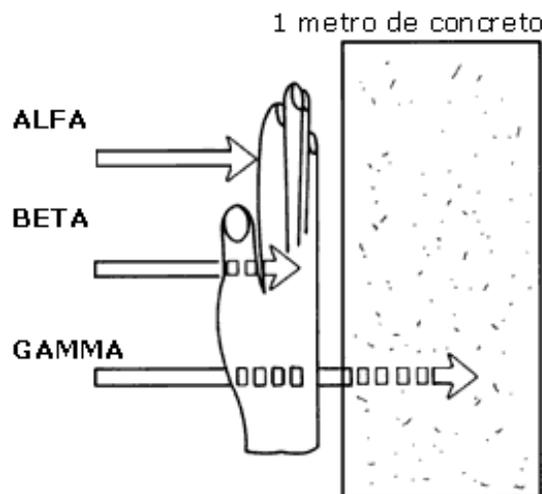
Este fenómeno, descubierto por Henri Becquerel y estudiado por Pierre y Marie Curie, es uno de los mecanismos con que cuenta la naturaleza para producir radiación. La *radiactividad* es la emisión espontánea de energía que producen algunos núcleos atómicos. Los núcleos que pueden emitir radiación de manera espontánea se llaman radiactivos o inestables. Debido a que la energía se conserva, un núcleo debe tener un exceso de energía en su interior antes de poder emitirla. Es esta energía "sobrante" la que el núcleo comunica a partículas energéticas en el caso de emisión de partículas alfa y beta, o a radiación electromagnética, si se emiten rayos gamma. Cuando un núcleo radiactivo emite radiación se dice que ocurrió un decaimiento radiactivo o que el núcleo "decaió". Después del decaimiento, el núcleo inicial se ha transformado en otro diferente.



Energía incidente = Energía transferida al medio + Energía saliente.

Interacción de la radiación ionizante con la materia. Los átomos del medio irradiado reciben parte de la energía transportada por la radiación.

Cada núcleo radiactivo se tarda un tiempo característico en decaer. Este tiempo se llama *vida media*. Si en un instante se tiene una cantidad N de núcleos radiactivos, después de transcurrido un tiempo igual a la vida media solamente quedará la mitad de los núcleos originales, es decir $N/2$. La otra mitad decayó emitiendo radiación. Los $N/2$ núcleos que quedan se tardarán otra vida media en reducirse a la mitad, es decir que después de dos vidas medias queda la cuarta parte de la cantidad original y así sucesivamente, hasta que todos los núcleos hayan decaído. Hay núcleos como el uranio que tienen vidas medias del orden de miles de millones de años (comparables con la edad de nuestro Sistema Solar) y, por otro lado, existen núcleos como el berilio-8 que tienen vidas medias menores que una millonésima de millonésima de millonésima de segundo.



Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación.

Debido a su tamaño tan minúsculo (una fila de doscientos mil millones de núcleos de oxígeno mediría apenas un milímetro) no es posible observar al núcleo mientras decae, ni menos aún contar cuántos núcleos radiactivos quedan en una muestra. En cambio, es relativamente fácil contar cuántas partículas alfa, beta, o rayos gamma se emiten. El número de partículas o rayos emitidos en cada segundo por una cantidad de material radiactivo se llama *actividad* de la muestra y depende tanto del número de núcleos radiactivos que quedan como de la vida

media. La unidad para medir actividad ha sido tradicionalmente el Curie. Un *Curie* es igual a 37 mil millones de decaimientos por segundo, una cantidad bastante alta comparada con cualquier situación normal. Por lo general en un laboratorio se trabaja con muestras cuya actividad es de micro o milicuries, es decir millonésimas o milésimas de Curie.

A medida que pasa el tiempo van quedando menos núcleos radiactivos en una muestra, de modo que la actividad disminuye. La figura 1 muestra una gráfica de la variación de la cantidad de núcleos radiactivos cobalto-60 y de su actividad a medida que transcurre el tiempo desde su formación (este núcleo radiactivo se produce rutinariamente en un reactor). Hemos supuesto que al inicio había un gramo de cobalto-60 que, aunque pudiera pensarse que es una masa pequeña, posee una actividad muy elevada (más de 1 000 Curies), tal como se aprecia en la figura. La vida media del cobalto-60 es aproximadamente de 5 años, y al decaer se transforma en el núcleo níquel-60.

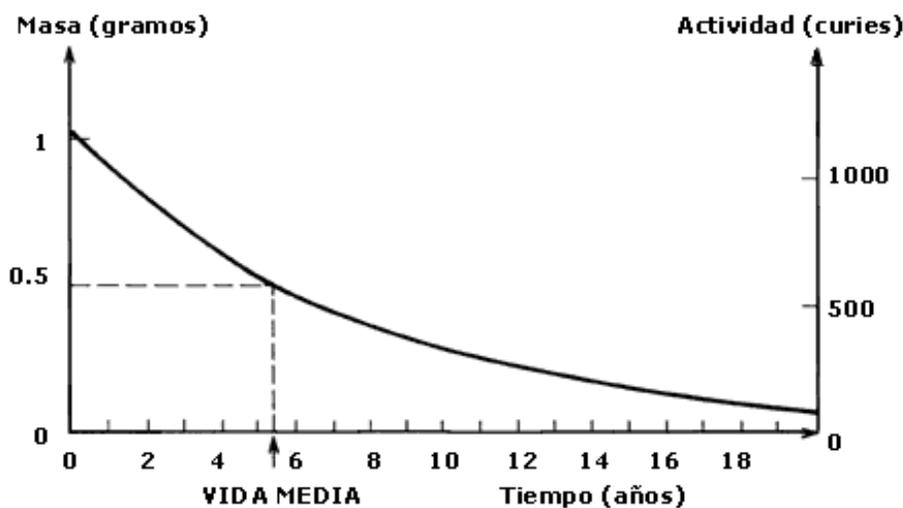


Figura 1. Disminución de la masa de un gramo de cobalto-60 a medida que transcurre el tiempo. En la escala del lado derecho se puede leer la variación de la actividad de la muestra.

ACELERADORES Y TUBOS DE RAYOS X

A menudo sucede que la energía de la radiación emitida por los núcleos radiactivos no es suficientemente alta para algún uso particular, por lo cual es necesario acelerarlos. Las máquinas que, usando combinaciones de campos eléctricos y magnéticos, aumentan la velocidad de las partículas para así incrementar su energía cinética se llaman *aceleradores* y fueron originalmente diseñados y construidos (desde los años 30) para realizar experimentos de física nuclear básica. Hoy en día los aceleradores de vanguardia en la investigación miden varios kilómetros de largo y entregan a los núcleos energías que son un millón de veces mayores que aquéllas de los decaimientos radiactivos.

Existe un tipo de acelerador muy sencillo y relativamente poco costoso que es el más usado en el mundo. Cualquier hospital o clínica tiene al menos uno: el *tubo de rayos X*. Este equipo acelera electrones dentro de un tubo de vidrio al vacío, usando una diferencia de voltaje de cientos de miles de volts para hacerlos chocar contra un trozo de material pesado (tungsteno o cobre montado sobre tungsteno) en su interior. Como consecuencia de la colisión la energía de los electrones se transforma en radiación electromagnética que sale del tubo. Esta radiación son los rayos X descubiertos por Roentgen. Después de salir del tubo los rayos X continúan viajando en línea recta por el aire hasta encontrar algún obstáculo ante el cual los rayos X pueden resultar desviados, reflejados o absorbidos. Tal como se explica en un capítulo posterior, las imágenes radiográficas (radiografías) conocidas por todos se producen aprovechando las propiedades de absorción que presentan diferentes componentes de nuestro cuerpo ante los rayos X.

El *linac* es un tipo de acelerador construido originalmente para estudiar problemas de física nuclear y que en la actualidad se usa en hospitales. Acelera electrones a altas energías (los electrones viajan prácticamente a la velocidad de la luz en su interior) y se utilizan, ya sea directamente en el exterior del linac para irradiar al paciente con electrones o bien, después de chocar contra un blanco interior y producir radiación electromagnética de alta energía. Ambas modalidades constituyen hoy técnicas de radioterapia de uso cada vez más extendido.

Fuentes radiactivas y aceleradores (incluidos los tubos de rayos X) son las herramientas de que disponemos para obtener radiación para usos en medicina. No es posible utilizar las fuentes naturales (que serán descritas en el próximo capítulo) pues, por un lado, son demasiado débiles, y por otro, imposibles de controlar a voluntad. Es útil recordar que una fuente radiactiva siempre emite radiación (no se puede apagar), mientras que el tubo de rayos X u otro acelerador sólo la emiten mientras están conectados.

DOSIS

¿Qué ocurre cuando la radiación proveniente de una fuente radiactiva o de un acelerador encuentra en su camino un medio físico cualquiera, como es el aire, el agua, el cuerpo humano, una película fotográfica? Al comienzo de este capítulo señalamos que cada tipo de radiación tiene un comportamiento diferente, pero se puede afirmar que, en general, la radiación penetra cierta distancia del medio y le entrega parte, o incluso toda su energía inicial. Cuando el medio irradiado es un sistema vivo, el efecto que una cantidad cualquiera de radiación produzca dependerá principalmente de la cantidad de energía que la radiación deposite en el organismo irradiado.

La *dosis absorbida* mide la energía depositada en cada gramo de materia irradiada. La unidad más conocida es el *rad* y corresponde a 100 ergs depositados en un gramo de materia. La cantidad de energía contenida en 100 ergs es sumamente pequeña dentro de la escala de nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, si medimos la energía calórica que le llega del Sol a un cuadrado de un centímetro de lado sobre nuestra piel, la energía recibida cada segundo es diez mil veces mayor que la energía de 100 ergs. Esta comparación indica que la energía que se deposita en un gramo de materia al ser irradiada con una dosis de un rad es muy pequeña. Sin embargo, dentro de una escala molecular o celular, la dosis de un rad puede tener consecuencias importantes.

Para evaluar de modo intuitivo si una dosis puede causar un efecto grande o pequeño es útil saber que, en un extremo, si una persona se expone de cuerpo entero a una irradiación de 600 rads, es probable que muera, mientras que en el otro extremo, todos los seres humanos recibimos cada año unas dos décimas de rad (0.2 rad) que provienen de la radiación natural que existe en nuestro planeta. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 2.

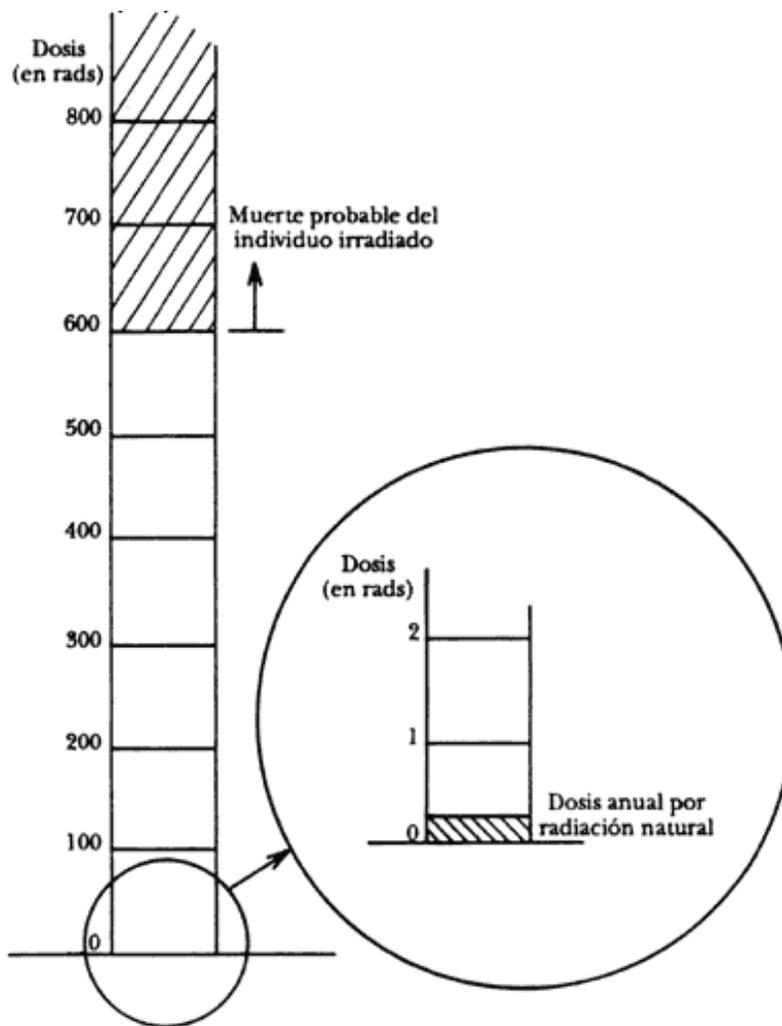


Figura 2. Escala de dosis. Valores inferiores a un rad se consideran como dosis bajas. Dosis de cientos de rads se consideran altas.

Debido precisamente a que es mucho más común recibir dosis inferiores a un rad que dosis superiores, el *milirad* (una milésima de rad) es una unidad de uso corriente. Existe una nueva unidad para medir dosis absorbida: el Gray, igual a 100 rads. Debido al uso ya tan generalizado del rad, en vez de medir en Grays se ha seguido midiendo en rads, sólo que ahora se les llama "centiGrays". En este libro usaremos rads. La dosis absorbida se mide con instrumentos llamados dosímetros.

El estudio de los efectos biológicos de la radiación se inició (y aún continúa) irradiando cultivos celulares con diferentes tipos de radiación. Al contar cuántas células del cultivo habían sido capaces de sobrevivir a la irradiación, fue evidente que iguales dosis de radiación diferente no producían los mismos efectos biológicos. Un rad de rayos X no causa el mismo efecto biológico que un rad de partículas alfa. Como las diferentes eficiencias biológicas son difíciles de determinar pues dependen del tipo de radiación, de su energía, y del efecto biológico en consideración, se han definido factores de efectividad biológica para cada tipo de partícula. El *equivalente de dosis* es la dosis absorbida por el organismo multiplicada por el factor de efectividad biológica apropiado al tipo de partícula que constituye la radiación. La unidad de uso común es el rem. Un rem de rayos X causa el mismo efecto biológico que un rem de partículas alfa o de neutrones.

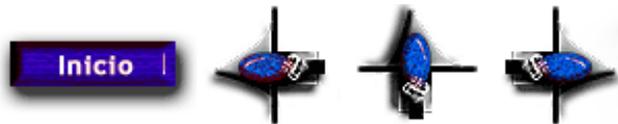
rayos-X y rayos gamma  **1 rad= 1 rem**

protones  **1 rad= 10 rem**

Partículas alfa  **1 rad= 20 rem**

Equivalencia entre el rad y el rem para diferentes tipos de radiación.

En el campo de la protección radiológica lo importante son los efectos biológicos que se desea evitar y, por eso, los valores máximos establecidos son límites para el equivalente de dosis y están dados en rems. Se usará *milirem* (una milésima de rem) en el capítulo próximo, al referirse a los niveles de radiación presentes en la Tierra hoy en día. Para los rayos X y rayos gamma el factor de efectividad biológica vale uno, por lo que para estas radiaciones electromagnéticas, un rem es igual a un rad. Para la radiación de partículas alfa o neutrones, los factores son mayores que uno, y en estos casos, el efecto biológico causado por un rem se logra con dosis absorbidas menores que un rad. (Esto indica que los neutrones y las partículas alfa son más "efectivos" que los rayos X y gamma en causar daño biológico.) Los temas que se presentarán en este libro se refieren casi en su totalidad al uso de rayos X y rayos gamma, por lo que el rad y el rem se usarán indistintamente. (Existe una nueva unidad de equivalente de dosis, el Sievert, igual a 100 rems. Es una unidad tan grande para los usos normales en protección radiológica, que se usa su submúltiplo, el microSievert, una millonésima de Sievert. En este libro no usaremos esta unidad.)



III. LA RADIACIÓN NOS RODEA

LA RADIACIÓN ha sido parte de la historia de nuestro planeta desde que se formó el Sistema Solar, hace unos cinco mil millones de años. Hoy día, igual que entonces, la Tierra es bombardeada continuamente por partículas energéticas provenientes del centro de nuestra galaxia y de otras alejadas millones de años luz. Pero no toda la radiación recibida sobre la Tierra es extraterrestre, ya que en el interior y en la superficie del planeta existen núcleos radiactivos que, desde que fueron creados al formarse el Sistema Solar, emiten espontáneamente diferentes formas de radiación. Desde comienzos del siglo xx, a esta radiación natural, o "de fondo", se le ha sumado la radiación que el ser humano aprendió a producir para satisfacer sus necesidades y sus intereses. La radiación producida por el ser humano (a veces denominada radiación "artificial") causa aproximadamente el 20% de la irradiación total promedio en el mundo actual; el resto es de origen natural.

RADIACIÓN NATURAL

La cantidad de radiación natural recibida por un ser humano es relativamente similar en todas partes del planeta y se estima que no ha variado demasiado en el transcurso del tiempo. Se pueden distinguir dos mecanismos principales de irradiación: externa, cuando la radiación proviene de fuera del cuerpo, e interna, cuando el elemento radiactivo emisor ha sido ingerido o inhalado, y por lo tanto se encuentra ubicado adentro del cuerpo del individuo.

Los responsables principales de la *irradiación externa* son los *rayos cósmicos* de origen extraterrestre que bañan la Tierra. Esta radiación llega a nuestro planeta después de viajar por miles de años desde alguna estrella lejana. Durante las diversas etapas de la evolución de una estrella, ésta emite rayos X, rayos gamma, ondas de radio, neutrones, protones o núcleos más pesados que viajan por el vacío espacio interestelar a la velocidad de la luz o cerca de ella, hasta chocar con alguna molécula o átomo. La probabilidad de chocar con la Tierra es pequeñísima, pero la cantidad de radiación es inmensa. Tan sólo recordemos que cada galaxia contiene unos cien mil millones de estrellas y se calcula que existen cientos de miles de millones de galaxias en el Universo. Grandes cantidades de radiación son producidas, por ejemplo, durante la explosión de una supernova, hecho que le ocurre a unos 100 millones de estrellas durante los 10 mil millones de años que son la vida estimada de una galaxia.

Los rayos cósmicos que se dirigen hacia la Tierra, principalmente protones y partículas alfa, encuentran primero la atmósfera e interactúan con los núcleos de átomos presentes en ella. En este sentido, la capa de aire que está encima de nosotros actúa como un techo protector. La interacción de las partículas cósmicas con los núcleos en el aire produce reacciones nucleares en que se crean nuevas partículas que continúan el viaje hacia la superficie. Las partículas con carga eléctrica van ionizando y excitando las moléculas del aire ocasionando una pérdida gradual de la energía original. Una fracción mínima de los rayos cósmicos primarios logra llegar hasta la superficie terrestre y son principalmente, las partículas llamadas muones, producidas en la alta atmósfera por los rayos primarios que constituyen el espectro de radiación cósmica en la superficie.

Una consecuencia del efecto absorbente de la atmósfera es que la intensidad de los rayos cósmicos aumenta según la altura de la superficie. Al vivir en una ciudad que, como México, se encuentra a unos 2 000 metros sobre el

nivel del mar, se recibe una dosis.¹  proveniente de los rayos cósmicos, aproximadamente del doble de aquella que se recibe al vivir en la costa. El campo magnético terrestre desvía los rayos cósmicos hacia las regiones polares, por lo que las dosis aumentan con la latitud. Se estima que el promedio de equivalente de dosis de rayos cósmicos para un ser humano es de 30 milirems cada año.

La otra fuente importante de irradiación externa la constituyen los *rayos gamma* emitidos por núcleos radiactivos presentes en el suelo o el aire. Estos núcleos inestables pudieron ser formados por la interacción de rayos cósmicos con el aire o pueden existir en la corteza terrestre, desde sus orígenes.

La contribución de los primeros a la dosis externa es insignificante. La cantidad de radiación al aire libre en un lugar está íntimamente relacionada con la presencia de núcleos radiactivos en el suelo. Las llamadas rocas ígneas presentan mayores niveles de actividad que las rocas sedimentarias, aunque entre estas últimas, las pizarras y fosforitas son sumamente radiactivas. Los núcleos que más contribuyen a la radiactividad de las rocas son el potasio-40, el uranio-238 y el torio-232, todos presentes en el suelo desde la formación de la Tierra.

Existen lugares en Italia, Brasil, Francia, la India y Nigeria, donde los niveles de radiación al aire libre debido a fuentes terrestres son mucho mayores que los promedios observados en el resto del mundo. Esto se debe a que la composición del suelo del lugar contiene una concentración "anormalmente" alta de radioisótopos. En Brasil existe una región costera en los estados de Espírito Santo y de Río de Janeiro, cuyas arenas monacíticas son fuertemente radiactivas. En poblaciones cercanas se han medido niveles al aire libre, en las calles, que son 50 veces más grandes que los considerados "normales", mientras que en las playas —a las que acuden unos 30 000 veraneantes cada año— los valores medidos llegan a ser 500 veces superiores a los promedios.

Debido a que las construcciones utilizan generalmente materiales similares en su composición a los del suelo del lugar y a que la población pasa gran parte del tiempo adentro de edificios, existe interés por conocer los niveles de dosis debidos a la radiación proveniente de los muros, suelo y techo de las construcciones. En casas de madera, que no emiten radiación y sirven de blindaje contra la que proviene del exterior, se estima que los niveles interiores de radiación gamma son un 70% de aquéllos al aire libre. En cambio, en casas de ladrillo, hormigón o piedra, la irradiación en el interior es un 30 o 40% mayor que en el exterior. Más adelante en esta sección nos referiremos a la irradiación causada por la irradiación del radón emitido por materiales de construcción, lo cual ha causado gran interés público en estos últimos tiempos.

Tomando en cuenta los factores mencionados se estima que el equivalente de dosis promedio mundial para un individuo, producto de la irradiación externa por rayos gamma, es de unos 35 milirems cada año.

La *irradiación interna* se debe a la inhalación de polvo que contenga en suspensión partículas radiactivas, así como a la ingestión de agua y alimentos que hayan incorporado algún elemento inestable a su composición. Tal como se mencionó previamente, los núcleos radiactivos responsables de la radiación natural terrestre pueden provenir de reacciones de rayos cósmicos con el aire, o haber sido formados al comienzo de nuestro sistema planetario. Entre los primeros se pueden mencionar el tritio, el carbono-14, el berilio-7 y el sodio-22. El equivalente de dosis por irradiación interna de todos juntos apenas sobrepasa 1 milirem anual. Entre los radioisótopos del segundo grupo, el potasio-40 y aquéllos de las series de desintegración del uranio y del torio (radio, radón, polonio y plomo) son responsables de una fracción importante de la irradiación interna.

El potasio es un elemento esencial para la vida, se incorpora al organismo a través de la alimentación. Un 0.02% del potasio natural es *potasio-40*, emisor de radiación beta y gamma, con una vida media de mil millones de años. El equivalente de dosis anual debido a sus radiaciones se estima en 18 milirems. Otros núcleos radiactivos que son ingeridos en los alimentos son el radio-226, el plomo-210 y el polonio-210. La carne de reno o de caribú, en las regiones árticas del hemisferio norte, contiene una concentración anormalmente elevada de polonio-210, debido a que estos animales consumen líquenes que tienden a acumular este elemento. Para decenas de miles de personas esta carne es la base de su alimentación. Medidas realizadas en su sangre, huesos y placenta, revelan aumentos de los niveles de dosis en un factor aproximado de 10 en comparación con habitantes de zonas más templadas.

Entre los elementos que ingresan al organismo por las vías respiratorias se encuentran el uranio, el torio y los isótopos polonio-210 y plomo-210. (Aprovechamos para señalar que en los pulmones de fumadores la concentración de estos dos núcleos radiactivos es 50% superior a aquella en los pulmones de los no fumadores.) Todos estos elementos son sólidos y su inhalación ocurre al respirar partículas de polvo a las cuales se han adherido. Pero la fuente principal de irradiación interna la constituye la inhalación del gas *radón*. Este elemento se produce en los decaimientos radiactivos del uranio y del torio y es a su vez inestable, transformándose en una partícula alfa y un núcleo de polonio. Si el radón es respirado y no decae, puede volver a salir junto con el aire expirado. Pero si decae mientras se encuentra en los pulmones, el núcleo de polonio, que es un elemento sólido, se puede quedar adherido al tejido pulmonar y desde ahí continuar emitiendo radiación, pues él también es radiactivo.

Grandes cantidades de radón se encuentran en el interior de las minas de uranio y en regiones con suelos que contienen uranio y torio. Las construcciones que emplean materiales particularmente radiactivos muestran niveles altos de radón en el interior. Para esta fuente de radiación natural existen grandes diferencias en las dosis, dependiendo del lugar de habitación, el material de la construcción y el clima. En zonas templadas como en México, la ventilación continua de las viviendas reduce la concentración de radón en el aire interior, mientras que lo opuesto ocurre en climas con temperaturas extremas, donde el uso de calefacción en invierno y aire acondicionado en verano tiende a disminuir la ventilación. Estimaciones de valores promedios mundiales indican

equivalentes de dosis anuales de 120 milirems por irradiación interna debida a la ingestión e inhalación del uranio, torio y sus productos de decaimiento, incluido el gas radón. Esta es la fuente principal de radiación para la población mundial actual.

En la figura 3 se representan las principales fuentes de radiación natural, como fracción del equivalente de dosis promedio. El total de la radiación natural es de 200 milirems anuales aproximadamente.

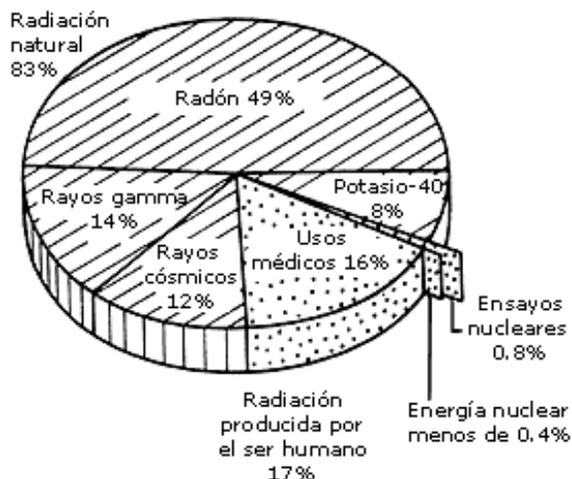


Figura 3. Principales fuentes de radiación. Se indican los porcentajes con que cada fuente contribuye a la dosis total promedio en el mundo actual.

RADIACIÓN PRODUCIDA POR EL SER HUMANO

En el primer capítulo describimos cómo a finales del siglo pasado el ser humano descubrió la manera de producir radiación. Primero fueron los rayos X y luego la radiactividad. Hoy en día son innumerables los usos de estos procesos y dedicaremos gran parte de este libro, a la descripción de algunas de sus aplicaciones más importantes. Como consecuencia del uso de la radiación, existen personas que reciben dosis de radiación adicionales a las originadas en las fuentes naturales, como sucede en los casos de los individuos que controlan el procedimiento, en los que lo aprovechan, e incluso en aquellos que no tienen relación directa con la técnica. Es el mismo tipo de radiación, no se ha inventado nada que no existiera ya en la naturaleza, pero a diferencia de la irradiación natural, las dosis recibidas a causa del uso de radiación producida ex profeso varían mucho entre un individuo y otro, dependiendo incluso de su profesión y de sus hábitos de vida.

La fuente más importante de exposición a radiación producida por el ser humano, hoy en día, son los exámenes médicos que utilizan rayos X. Al tomar una radiografía el paciente puede recibir equivalentes de dosis entre 1 y 5 000 milirems. Los valores promedio para una población dependen de la frecuencia con que los individuos se someten a un examen radiológico. En los países industrializados se estima que se toman entre 300 y 900 radiografías al año por cada 1 000 habitantes, mientras que en el llamado Tercer Mundo, la frecuencia es diez veces menor. Tomando en cuenta la distribución de población en el mundo se calcula que, en promedio, el ser humano hoy recibe unos 40 milirems anuales debido a exámenes radiológicos. Insistimos en que esta cantidad es un promedio. La dosis individual varía mucho de una persona a otra; obviamente, es nula para alguien que no se toma ninguna radiografía y mucho mayor que el promedio para quien se somete a varios exámenes. Hay una tendencia mundial a aumentar el empleo de radiografías, debido a la extensión de los servicios de salud, tanto en países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo; simultáneamente, la dosis debida a cada radiografía tiende a disminuir debido a nuevas técnicas, tanto en el diseño de los tubos de rayos X como en las películas radiográficas, al mejor entrenamiento del personal a cargo de tomar los exámenes, y a la imposición de reglas de seguridad radiológica más estrictas. Ambos factores actúan al mismo tiempo, lo que hace suponer que los valores promedio citados no variarían demasiado en los próximos años.

Otras prácticas médicas de diagnóstico, como la medicina nuclear, donde se utilizan núcleos radiactivos, producen dosis mucho menores que los exámenes radiológicos y además, son empleadas en un número mucho menor de pacientes. Por el contrario, la radioterapia irradia una zona bien localizada del paciente con valores de dosis que son 10 000 o más veces los valores naturales. Debido a que esta gran cantidad de radiación es recibida por un paciente cuya vida está en peligro a causa de un tumor maligno, se considera que cualquier efecto negativo que pudiera causar la irradiación es irrelevante frente al gran beneficio de la posible curación. El cálculo de la dosis promedio recibida por una población no incluye las contribuciones de los tratamientos de radioterapia

Después de los exámenes radiológicos, el segundo lugar entre las fuentes actuales de radiación creadas por el hombre, lo ocupan los *ensayos de bombas nucleares* realizados en la atmósfera desde 1945. Más de 500 explosiones, en gran parte estadounidenses y soviéticas, pero también inglesas, francesas, hindúes y chinas, han inyectado toneladas de material radiactivo a las capas altas de la atmósfera. Estos núcleos inestables pueden permanecer durante años en suspensión, distribuyéndose sobre todo el planeta. Al fin caen al suelo en la llamada "lluvia radiactiva" e irradian a los seres vivos, externamente desde el suelo e internamente, cuando son ingeridos o inhalados. Los núcleos más importantes entre los cientos que se producen durante la detonación de un artefacto nuclear resultan ser el carbono-14, el cesio-137, el circonio-95 y el estroncio-90.

En 1963 se firmó el Tratado de Prohibición de Ensayos Atmosféricos que limita las pruebas permitidas a aquellas que ocurran en zonas subterráneas, sin escape de radiactividad al ambiente. No todos los países firmaron el tratado y en particular Francia y China han realizado ensayos atmosféricos posteriores a esa fecha. Debido a que la vida media de algunos de los radioisótopos producidos como residuos de una explosión nuclear es de varios años, hoy en día seguimos recibiendo la herencia de los ensayos ocurridos hace 30 o 40 años. Los niveles máximos de dosis debidos a estas pruebas se registraron en 1962, cuando alcanzaron casi el 10% de los valores de la radiación natural. Gracias al reducido número de ensayos atmosféricos recientes —el último ocurrió en octubre de 1980— hoy la dosis es de 2 milirems anuales aproximadamente. Esta fuente de radiación afecta a todo el planeta y *es la única que no es consecuencia de un uso benéfico de la radiación*. Por el contrario, la radiación producida por las armas nucleares es una amenaza real a la existencia de la humanidad. Los únicos beneficiados son las industrias y laboratorios dedicados al multibillonario negocio de la guerra.

La siguiente fuente de radiación que consideraremos es la producción de *energía nuclear*. En la actualidad existen más de 400 reactores de potencia en funcionamiento en 26 países, que producen aproximadamente 16% de la electricidad utilizada en el mundo. La producción de energía nuclear en un reactor presupone la elaboración previa y el tratamiento posterior del combustible nuclear. Son estos procesos los que producen la mayor parte de la dosis relacionada con la energía nuclear. Las fases principales del ciclo del combustible nuclear son la minería y elaboración de minerales de uranio, el enriquecimiento del contenido de uranio-235, la fabricación de los elementos combustibles, la operación del reactor, el reciclamiento de los núcleos combustibles recuperados y la eliminación de los desechos radiactivos. Durante todas estas etapas el material radiactivo se guarda en lugares controlados, por lo que la mayor irradiación ocurre en las cercanías de las minas, del reactor y de la planta de reciclamiento o almacenamiento de los desechos. Debido a que algunos de los núcleos radiactivos producidos durante el ciclo del combustible tienen una vida media sumamente larga y a que son fácilmente dispersados en la naturaleza, las pequeñas cantidades liberadas al ambiente pueden tener consecuencias para la población mundial durante un largo tiempo.

Hoy en día el público recibe, en promedio, debido a la producción de energía nuclear, dosis que son diez mil veces menores que los valores naturales. Dadas las tendencias actuales en la cantidad de reactores nucleares en operación, se estima que esta cifra podría aumentar diez veces para el año 2000. Hay grandes variaciones alrededor del valor promedio y la mayor es la dosis que reciben quienes viven cerca de las instalaciones nucleares. Inmediatamente junto a un reactor (en la reja) las dosis fluctúan entre uno y cinco milirems anuales (de menos de un 1%, a 2.5% de los valores debidos a fuentes naturales). A una distancia de 8 kilómetros de la planta nucleoelectrónica, la dosis disminuye a la mitad del valor anterior, y así progresivamente. En un país como la Gran Bretaña, con 38 reactores en funcionamiento, la dosis que origina la producción de energía nucleoelectrónica contribuye al promedio total de sus habitantes con menos del 0.1% de los valores naturales.

Existen varios *productos de consumo* que utilizan fuentes radiactivas en su funcionamiento, como los relojes o aparatos científicos con esferas luminosas, en que la radiación emitida por un material radiactivo es transformada en luz, dispositivos eléctricos de protección contra altos voltajes, dispositivos antiestáticos para reducir la acumulación de carga, detectores de humo, cerámicas y vidrios que usan torio o uranio como pigmentos. Todos

estos productos, durante su funcionamiento normal y sujetos a un mantenimiento adecuado, producen niveles de irradiación insignificantes, pero en caso de rotura accidental de un producto que contenga una fuente radiactiva, ésta puede causar una irradiación anormalmente alta en las personas expuestas.

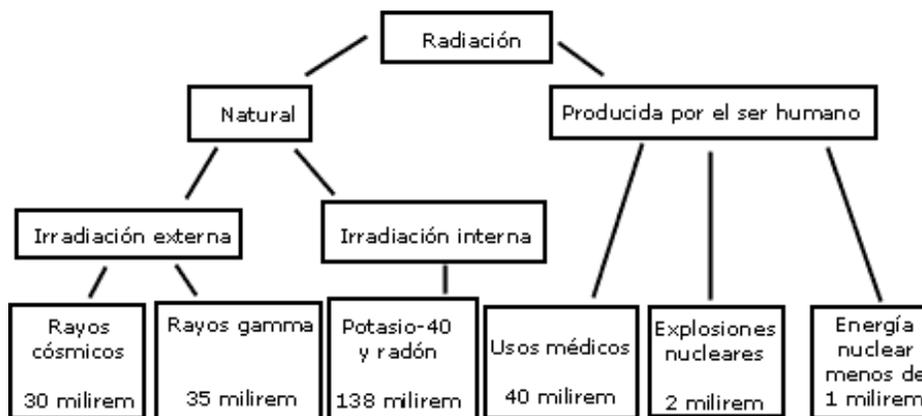


Figura 4. Principales fuentes de radiación. Se indican los valores anuales promedio recibidos por un individuo.

Hay *actividades humanas* que, sin estar relacionadas con el uso de la radiación, ocasionan dosis adicionales para los individuos que las practican. La combustión del carbón libera al ambiente los elementos radiactivos uranio y torio, que están presentes de manera natural en el mineral de carbón. La concentración de estos elementos en las cenizas producidas en una planta termoeléctrica es mayor que la concentración natural en la corteza terrestre, por lo que este mecanismo de producción de energía eléctrica hace que en sus alrededores existan niveles de contaminación radiactiva (además de otras formas más evidentes de contaminación) mayores que los valores "normales". Solamente la utilización de sistemas de retención muy avanzados (electrofiltros) conseguiría disminuir la emisión de ceniza a niveles aceptables, esto es, inferiores al 1% de la cantidad que es emitida sin filtros.

Quizás la actividad moderna que implica una mayor exposición adicional a fuentes naturales sean los *viajes en jet*. Debido a la altura a que vuela el avión (10 000 metros, aproximadamente), la capa protectora de la atmósfera se ve fuertemente disminuida y los pasajeros se exponen a niveles de radiación cósmica varias veces superiores a las normales en tierra. Un viaje de ida y vuelta de la ciudad de México a Nueva York (10 horas de vuelo a 10 000 metros de altura) ocasiona una dosis adicional de 2 milirems, comparable con la dosis máxima recibida al vivir durante un año en las cercanías de un reactor nuclear. Los viajes en jet, aunque pueden representar dosis significativas para los individuos expuestos, como son la tripulación de las aeronaves y los viajeros más frecuentes, no influyen dentro del promedio mundial debido a que son pocas las personas expuestas (comparadas con la población total).

Tomando en cuenta todas las fuentes de radiación mencionadas, el promedio mundial de equivalente de dosis hoy día se puede estimar en 240 milirems anuales, de los cuales 200 milirems (80%) se deben a fuentes naturales y los 40 milirems restantes (20%), al uso de la radiación por el ser humano. Las figuras 3, 4 y 5 resumen los resultados presentados en este capítulo.

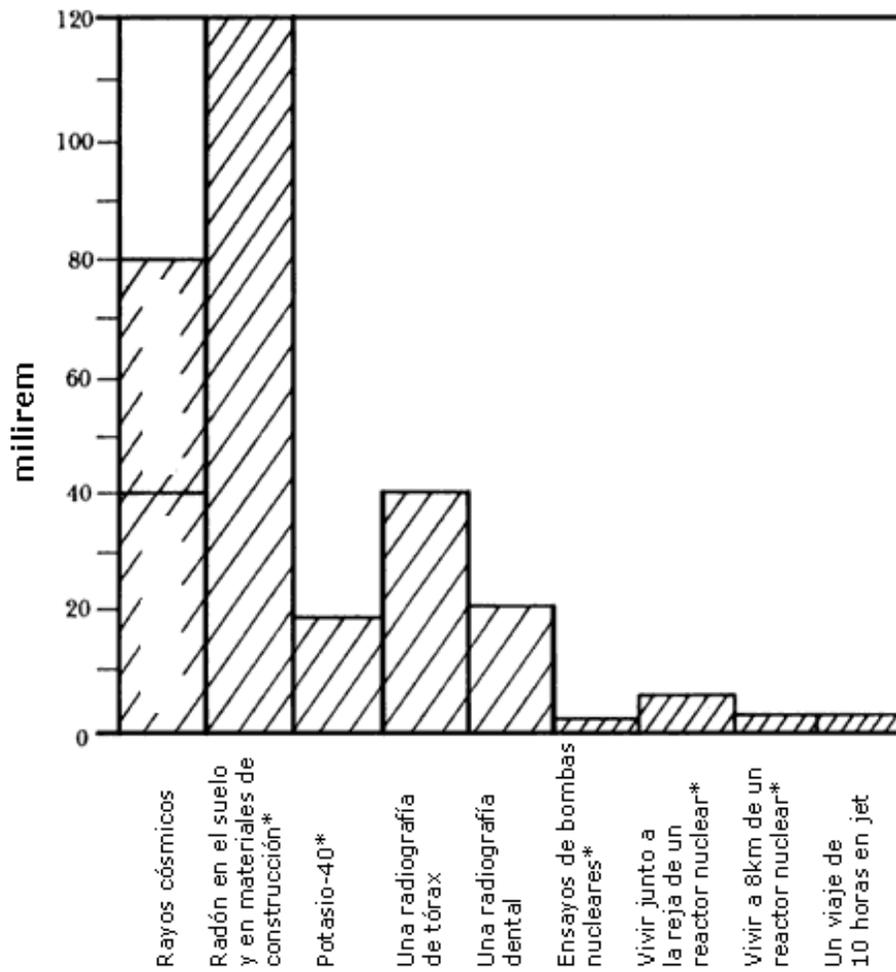


Figura 5. Valores típicos de la dosis de radiación recibida en circunstancias diversas. Los valores anuales son los promedios mundiales.



[Nota 1] [

1 Para simplificar, en este capítulo llamaremos *dosis* al equivalente de dosis definido en el capítulo anterior.

Inicio |

IV. UN VIAJE POR LA CÉLULA

TODOS los organismos vivos están constituidos por una o más células. Estas células se organizan y forman tejidos encargados de realizar las diferentes funciones necesarias para vivir. Los efectos biológicos de la radiación serán en primera instancia sobre las células, por lo que para entenderlos primero es necesario conocer la morfología y fisiología celulares. Este capítulo se propone describir los principios básicos de la biología celular y su relación con aquellos agentes externos (físicos, químicos o virales) capaces de alterar fundamentalmente la información genética contenida en la célula.

LA CÉLULA TÍPICA

Las células presentan diferentes características en su forma, tamaño, componentes, y en su velocidad de división, de acuerdo con el tejido al que pertenecen y a la función que realizan. Sin embargo, hay características comunes a todas ellas. Todas las células están compuestas de una membrana, el citoplasma y un núcleo.

La *membrana* es la estructura que limita a la célula, a través de ella entran o salen sustancias y nutrientes. La membrana celular está constituida por una capa de grasas (lípidos) dentro de la cual y a diferentes niveles, se encuentran imbricadas proteínas. Éstas actúan como receptores cuya función es mantener la comunicación intra y extracelular. Esta constitución hace que la membrana sea semipermeable, es decir, capaz de seleccionar el tipo de sustancia que puede entrar a la célula. La integridad de la membrana es muy importante y el daño a esta cubierta puede ser fatal para la célula.

El *citoplasma* se encuentra envuelto por la membrana y rodea al núcleo. Está constituido por proteínas, lo que le da un aspecto semiviscoso. En el citoplasma se encuentran localizadas las estructuras celulares llamadas organelas que realizan las diferentes actividades requeridas para el funcionamiento adecuado de la célula. Entre las organelas principales se pueden mencionar las mitocondrias, encargadas de la producción de moléculas ricas en energía (llamadas ATP), los ribosomas, donde se realiza la síntesis de proteínas, y los lisosomas, encargados de la digestión de moléculas.

El *núcleo* es la estructura más importante para la vida celular, pues ahí se encuentra la "computadora central" que dirige todo el funcionamiento celular. La figura 6 muestra un esquema de los componentes de la célula típica.

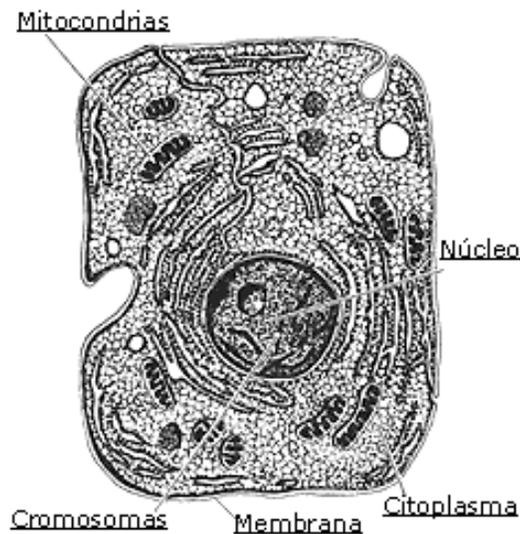
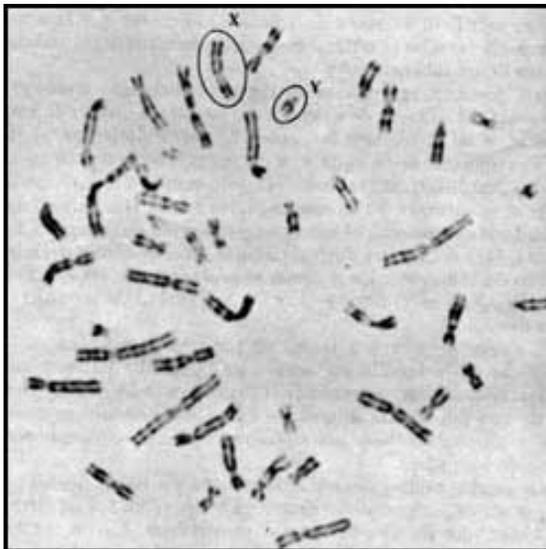


Figura 6. Una célula típica.

En el núcleo se encuentra una macromolécula llamada ADN (ácido desoxirribonucleico) que almacena toda la información necesaria para que la célula viva. El ADN se estructura en forma de doble hélice y está constituido por la unión de bases nitrogenadas con azúcar y fósforo. Las bases nitrogenadas son de cuatro tipos y la secuencia de ellas contiene el mensaje (código genético) para la síntesis de las proteínas. Estas últimas determinarán la estructura y estará a su cargo gran parte de las funciones fisiológicas del organismo.

La unidad más sencilla, completa y funcional formada por el ADN se llama *gen*. Un gen contiene la información suficiente para producir los elementos que constituyen las proteínas. Todas las características, visibles y funcionales de un organismo, dependen de la estructura y expresión precisas de los productos de los genes. En el nivel molecular el funcionamiento de todos los genes de los diferentes organismos vivos es idéntico. Aprovechando esto, la muy reciente área científica de la ingeniería genética ha logrado trasplantar un gen humano a una bacteria, consiguiendo que la bacteria lea el mensaje y sintetice una proteína humana. Así se ha logrado producir insulina humana por medio de estas técnicas biotecnológicas, disminuyendo las reacciones adversas que provoca la insulina porcina en el paciente diabético. La producción de insulina porcina ha requerido el sacrificio de miles de animales, mientras que la nueva tecnología permite su obtención a partir de cultivos bacterianos dentro de un laboratorio.

Los genes se agrupan en estructuras conocidas como *cromosomas*. El número de cromosomas es característico de cada especie y así, el ser humano posee 23 pares diferentes, es decir 46 cromosomas en cada una de sus células, excepto en las células reproductivas (tanto en el óvulo como en el espermatozoide se encuentran 23 cromosomas, los cuales al reunirse en la fecundación recuperan el número de 46 propio de la especie humana). De los 23 pares de cromosomas, uno de ellos determina el sexo del individuo. En la mujer se presentan **dos** cromosomas llamados X y, en el hombre, hay **un** X (igual al de la mujer) y **otro** llamado Y.



Cromosomas de un hombre. Se observan 46 cromosomas, se señala el par de cromosomas sexuales masculinos.

El nuevo ser recibe, a través de los cromosomas, las características de la familia materna y de la familia paterna que, combinadas al azar, determinarán sus rasgos individuales. Dentro de una familia, las diferencias entre los hermanos se deben a las múltiples combinaciones posibles de los cromosomas recibidos de los padres.

Las células se desgastan y se destruyen constantemente, por lo que un organismo debe generar nuevas células a la misma velocidad que mueren las que lo constituyen. En un ser humano cada segundo se dividen miles de células por el proceso de la *mitosis*. La célula se divide en dos hijas, cada una de las cuales recibe todas las estructuras que posee la célula progenitora. Durante la mitosis, los cromosomas se duplican y así cada célula hija recibe un juego completo de cromosomas. Un caso especial lo constituye la generación de las células reproductivas (el óvulo y el espermatozoide) que se forman a partir de células progenitoras con 46 cromosomas para la especie humana, y que por un proceso especial llamado *meiosis* reciben solamente un cromosoma de cada par, es decir 23.

MUTACIONES Y ENFERMEDADES GENÉTICAS

Es posible que la secuencia de bases en la hélice del ADN se modifique, con lo que se produce un cambio en la información que se encuentra codificada en la molécula. A este cambio se le denomina *mutación* y puede ocurrir en el ADN de cualquier célula. Los efectos son distintos si la mutación ocurre en una célula reproductiva (óvulo en la mujer, espermatozoide en el hombre), o si ocurre en una célula somática (cualquier célula que no es reproductiva). En el primer caso, los efectos se manifestarán en la descendencia que heredará la mutación y sufrirá sus consecuencias. En el segundo caso, el afectado es el propio individuo en el que ocurre la mutación quien, como última consecuencia, podría desarrollar un cáncer. Un caso especial de mutación somática es aquella que afecta al embrión, el cual discutiremos más adelante.

Las mutaciones heredadas no se hacen evidentes necesariamente desde el nacimiento. Por ejemplo, la corea de Huntington, que es una enfermedad en que todos los músculos del cuerpo degeneran hasta ocasionar la muerte del individuo, puede manifestarse incluso después de los 50 años de vida del afectado.

Si una mutación produce un cambio visible (al microscopio) en un cromosoma, se trata de una mutación cromosómica. Si el cambio afecta a un gen, se le llama mutación génica. Una posible mutación cromosómica sería la presencia de un cromosoma extra, como ocurre en el síndrome de Down, en que el individuo posee 47 cromosomas. Un ejemplo de mutación génica lo constituye la acondroplasia, que se manifiesta como un tipo de enanismo.

Las mutaciones génicas pueden ser dominantes, recesivas y multifactoriales. En la mutación dominante la persona que tiene el gen mutado en sus células sufre el padecimiento y lo transmitirá al 50% de sus hijos; un ejemplo clásico de este tipo de transmisión es la recién mencionada acondroplasia. Para que las mutaciones recesivas se manifiesten es necesario que los dos progenitores hayan tenido una mutación recesiva en el mismo gen. El padre y la madre que tienen ese gen mutado no sufrirán ninguna enfermedad; sin embargo, el hijo que reciba el gen mutado (el 25% de los hijos) sí manifestará la enfermedad. Éste es el caso del nacimiento de un niño albino en familias donde los padres no son albinos. Las mutaciones génicas multifactoriales causan enfermedades comunes como la diabetes, la epilepsia y la hipertensión arterial, que son recurrentes en una misma familia y cuyos mecanismos de herencia se conocen poco.

Se han identificado a la fecha más de 3 mil enfermedades hereditarias que pasan de generación en generación y algunas de ellas se mencionan en el cuadro 1. El 3% de todos los seres humanos nacidos vivos presenta algún tipo de mutación que se manifestará con variados grados de severidad.

CUADRO 1. Algunos ejemplos de enfermedades genéticas.

<i>Clasificación</i>	<i>Nombre</i>	<i>Característica principal</i>
Génicas	Dominante	Fracturas múltiples
		Alteraciones cardiovasculares
		Enanismo
	Recesiva	Orteogénesis imperfecta
		Síndrome de Marfan
		Acondroplasia
		Despigmentación
		Coagulación deficiente
	Albinismo	Atrofia muscular
	Hemofilia } Correa de Huntington	

			Exceso de azúcar en la sangre
		Diabetes	Ausencias mentales
	Multifactorial		Desarrollo incompleto del labio
		Epilepsia	
		Labio leporino	Retraso mental
			Desarrollo sexual incompleto
	Autosómico	Síndrome de Down	Retraso mental
Cromosómicas	Sexual	Síndrome de Turner	Desarrollo sexual incompleto

Cabe preguntarse cuál es la causa de estas enfermedades. Se sabe con certeza que parte de ellas son heredadas, sin conocerse cuándo se iniciaron. El ejemplo más conocido es la aparición de la hemofilia en la familia real inglesa en el siglo XIX, que fue transmitida a través de varias generaciones de gobernantes, influyendo incluso en la historia de Inglaterra, Rusia y España. Otras mutaciones son nuevas y se considera probable que los agentes ambientales (físicos, químicos y virales) sean factores causales de algunas patologías genéticas. Sin embargo, hasta el momento no existe evidencia epidemiológica (en seres humanos) de que la frecuencia de las enfermedades hereditarias se haya elevado como consecuencia de la exposición a agentes ambientales. Experimentos realizados con bacterias en laboratorios muestran que existen agentes capaces de inducir mutaciones. También hay datos obtenidos en pruebas con roedores que indican que agentes ambientales pueden causar alteraciones génicas y cromosómicas.

MUTACIONES Y CÁNCER

El cáncer es una enfermedad en la cual se altera la división normal de las células, por lo que se producen tumores. El crecimiento

descontrolado del tumor altera el funcionamiento normal del órgano en que se encuentra y puede causar la aparición de nuevos tumores en otros órganos. El origen del cáncer no es conocido, sin embargo la evidencia científica indica que las mutaciones en el ADN de las células (principalmente en las somáticas) desempeñan un papel importante en su inicio.

El papel que pudieran tener las mutaciones en el desarrollo del cáncer ha sido estudiado desde 1914. De acuerdo con los datos epidemiológicos y de laboratorio con que se cuenta se ha dicho que el cáncer es un proceso de múltiples causas que ocurre en varias etapas, con interacciones entre factores hereditarios y no hereditarios. El proceso de carcinogénesis implica no sólo la exposición a un agente, sino la interacción de éste con el ADN, la reparación (eficiente o ineficiente) de la lesión, la fijación del daño tras la replicación del ADN y el desarrollo de la lesión fijada para dar origen a una célula cancerosa. Esta célula se replicará sin control, lo que dará origen al tumor.

En los últimos años se ha sugerido la posibilidad de que en el cáncer intervenga la activación de ciertos genes, llamados protooncogenes, que se encuentran normalmente en todas las células cumpliendo funciones diversas. Por procesos aún no del todo conocidos, espontáneos o inducidos, estos genes pueden sufrir modificaciones en su estructura o en el sitio que ocupan dentro de los cromosomas, cambiando su actividad normal por otra que resulta dañina para la célula. Esta modificación los transforma en oncogenes, que pueden ser llevados de célula a célula como parte del material genético de un virus invasor, extendiéndose así la anomalía al tejido. Hasta la fecha se han identificado unos 40 oncogenes asociados a diversas formas de cáncer. Este tema constituye una de las áreas más activas y fascinantes de la investigación actual en genética.

MUTACIONES EN EL EMBRIÓN

La mutación en células embrionarias puede conducir a la muerte del embrión o al nacimiento de un niño anormal. Estas alteraciones pueden producirse por la acción de agentes físicos, químicos y biológicos sobre el ADN.

En cuanto a la posibilidad de inducir un cáncer en el embrión por medio de la irradiación, en teoría, cualquier sustancia capaz de inducir cáncer en un adulto y que cruza la placenta, puede ser carcinogénica para el embrión. Hasta la fecha, el único carcinógeno transplacentario para humanos, identificado de manera concluyente, es el dietilestilbestrol, una hormona sintética utilizada durante el embarazo para prevenir un aborto. Se ha descubierto que este compuesto puede inducir el cáncer de vagina en mujeres cuyas madres se expusieron a él durante la gestación. Nuevamente, es en animales de experimentación donde se ha podido identificar otros agentes de cáncer transplacentario.

Hasta ahora hemos mencionado los efectos generales causados en la célula por cualquier agente mutagénico, ya sea físico, químico o biológico. En los dos siguientes capítulos se describirá en particular la acción de la radiación sobre la materia viva.



V. EFECTOS INMEDIATOS DE UNA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN

PARA poder explicar lo que ocurre en el organismo como consecuencia de la exposición a la radiación, es necesario entender que lo observado es la consecuencia de un conjunto de efectos en el nivel celular. Estos efectos y la manera como se manifiestan, dependen de factores inherentes a la radiación y a características del individuo o del tejido irradiado.

Los principales factores que determinan el efecto biológico de una exposición son el tipo de radiación y la dosis absorbida. Sin embargo, la velocidad con que se recibe esta dosis y el número de veces que el individuo se expone a la radiación, son factores que pueden modificar los efectos producidos. No tendrá los mismos efectos la administración de una dosis única, que la misma dosis distribuida en múltiples exposiciones. En lo que se refiere al individuo, será su edad, su estado general de salud, el tamaño de la zona expuesta, así como el tipo de tejidos irradiados lo que determine la gravedad de los efectos. Es importante comprender que los efectos de una dosis serán muy diferentes si es todo el cuerpo el irradiado o si solamente parte de él resulta expuesto. Por ejemplo, las consecuencias de 400 rads. 2 [Nota 2] recibidos en el cuerpo entero no serán las mismas que cuando 400 rads sean absorbidos solamente por una mano. En el primer caso, la vida del individuo estará en peligro, mientras que en la segunda, las consecuencias son las de una quemadura severa.

En exposiciones médicas y accidentales se alcanzan valores muy superiores (miles de veces) a los ambientales. En este capítulo se describe, en primer lugar, la interacción de la radiación con las estructuras celulares. A continuación se señala cuáles son los principales efectos locales causados por una sobreexposición en los tejidos u órganos que pueden ser vitales para el individuo irradiado. Posteriormente nos referimos a las consecuencias globales para el organismo y analizamos el caso particular de una irradiación terapéutica.

EFECTOS EN LA CÉLULA

Cuando una partícula cargada que proviene de la radiación, atraviesa el medio celular es posible que su campo eléctrico consiga arrancarle electrones a las moléculas que constituyen la membrana, el citoplasma o el núcleo celular. El proceso se llama *ionización*, pues las moléculas que antes eran eléctricamente neutras, se transforman en iones (partículas cargadas) debido a la pérdida de un electrón. La radiación capaz de producir ionización se conoce como *radiación ionizante* y todos los tipos de radiación considerados en este libro (partículas alfa, beta, rayos gamma y neutrones) son de este tipo.

Una molécula ionizada tiene propiedades que pueden ser muy diferentes a aquellas de la molécula neutra. Por esto, una sola ionización puede significar que las funciones originalmente realizadas por la molécula ya no se podrán cumplir.

El efecto señalado anteriormente se considera directo, pues la molécula que sufre el daño es aquella que fue originalmente ionizada. Existen, además, efectos indirectos donde la molécula ya ionizada, puede resultar tóxica y afectar a otras moléculas o células que no fueron ionizadas directamente.

Como la ionización es un proceso que ocurre al azar, cualquier molécula puede resultar modificada al irradiarse la célula. Si la molécula ionizada es parte de la membrana celular es posible que se produzca una rotura que cause la muerte de la célula. En general, esta célula será reemplazada por otra. Si la molécula ionizada es parte de alguna organela citoplasmática, ésta puede llegar a destruirse y sus funciones serán asumidas por alguna otra estructura similar. Si la molécula dañada es el ADN del núcleo celular, parte de la información almacenada en los genes puede perderse o modificarse y dar lugar a que surjan mutaciones (capítulos IV y VI). Este daño se hará manifiesto durante la siguiente mitosis, cuando la célula intente reproducirse. Es posible que la mitosis no pueda realizarse y en este caso la célula morirá sin dejar descendencia. Pero también es posible que el gen dañado esté relacionado con la reproducción de esa célula y, en este caso, la célula y sus descendientes se dividan descontroladamente. Se piensa que esta pérdida de control en la etapa de división celular pueda ser una de las causas de la formación de un tumor.

Cuando la estructura de los cromosomas es alterada por la radiación, el daño puede ser reparado inmediatamente con sustancias celulares que tienen esta función específica (enzimas de reparación). Si no hay reparación, o si ésta

no es capaz de reintegrar la organización original del cromosoma, se producen rompimientos y rearrreglos estructurales que se pueden observar al microscopio.

Los efectos de la radiación en diferentes tejidos dependen en gran medida de la velocidad de división celular durante y después de la irradiación. Existe una gran variación en el tiempo de vida para las diferentes células; por ejemplo, hay células que viven pocos días, como las formadoras de glóbulos rojos en la médula ósea, o las que recubren las paredes del intestino y la piel, mientras que otras células, como las nerviosas, pueden acompañar al individuo toda su vida.

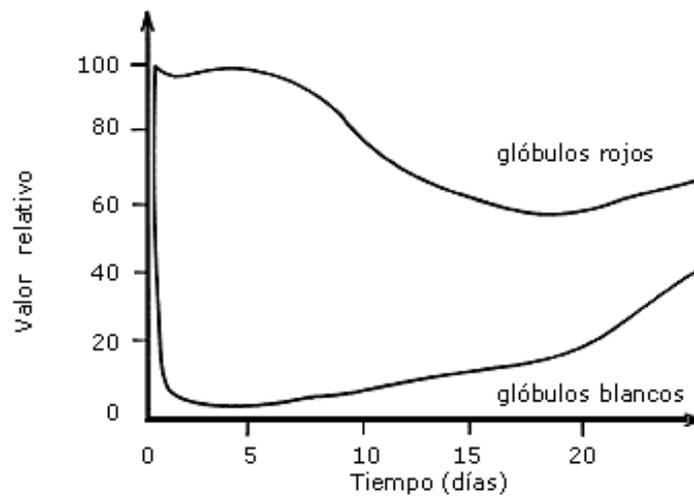
Debido a la complejidad del proceso de replicación celular y a la necesidad de precisión al transmitir el código genético, una célula es más sensible a los efectos de la radiación durante la mitosis que en otras etapas de su ciclo celular. A continuación se discuten los efectos específicos de la radiación en tejidos con diferente radiosensibilidad.

EFFECTOS EN ÓRGANOS VITALES

La *piel* fue el primer tejido que se estudió al analizar las alteraciones producidas por la radiación. Dosis cercanas a los 100 rads producen reacciones de eritema (enrojecimiento de la piel) transitorio, que desaparecen al cabo de una semana, y que pueden dejar pigmentación transitoria en la zona irradiada. Cuando la dosis es mayor, varios cientos de rads, las células de la epidermis se destruyen y se forma una zona denudada, en la cual aparecen lesiones semejantes a una quemadura. Dosis de miles de rads producen necrosis (muerte del tejido) que puede curarse si el área afectada es pequeña, ya que es posible la migración de células vecinas a la zona dañada. Si el área irradiada es amplia, la herida necrótica no cicatrizará y solamente un injerto de piel repondrá la parte dañada.

La *médula ósea* es un tejido ubicado en el interior de los huesos y se encarga de producir las células sanguíneas. Estas son los glóbulos rojos y los glóbulos blancos. Los rojos están encargados de transportar al oxígeno desde los pulmones hasta cada una de las células del organismo. Los blancos protegen al individuo de las infecciones y participan en la defensa contra cualquier agresión, incluyendo los tumores malignos. En la sangre también existen corpúsculos denominados plaquetas, de gran importancia en los procesos de coagulación sanguínea.

Todos estos componentes sanguíneos tienen una vida limitada y son formados continuamente en la médula ósea por células progenitoras. Son estas células las más sensibles a la radiación. Cuando ocurre una exposición seria (superior a 100 rads), parte de las células circulantes resultan dañadas y el número de glóbulos blancos disminuye de inmediato. Éste es uno de los primeros síntomas que aparecen cuando hay una exposición muy por encima de los valores ambientales. Las células progenitoras pueden resultar dañadas por la exposición y, entonces, bajará la producción de nuevos glóbulos rojos y blancos, lo que será evidente algunas semanas después de la irradiación. Una baja en el número de plaquetas impide la coagulación sanguínea y en estas condiciones cualquier hemorragia podría resultar fatal. La escasez de células sanguíneas puede provocar la muerte del individuo. Se ha advertido que después de 60 días, con dosis entre 300 y 600 rads, se puede producir la muerte de un ser humano.



Cambio en la cuenta sanguínea de ratas irradiadas con 500 rads al cuerpo entero. Los valores se muestran en relación con los anteriores a la irradiación. Se observa una tendencia a la recuperación.

Cuando se observa el daño agudo causado por radiación en sangre periférica, manifestado por alteraciones en la cuenta sanguínea, se debe aislar a la persona irradiada para evitar infecciones, en caso necesario transfundir plaquetas y, para casos severos, el único tratamiento posible será el trasplante de médula ósea.

Posibles consecuencias tardías de la exposición a radiación son la destrucción del tejido medular (aplasia medular) y la leucemia (tipo de cáncer desarrollado en las células precursoras). Estos efectos se discuten ampliamente en el capítulo VI.

La pared interna del *intestino* está recubierta de células que se renuevan continuamente. Como respuesta inmediata a la irradiación se reduce el número de estas células y se deteriora el proceso de absorción que normalmente ocurre en él. Si el daño es limitado (menos de 100 rads) es posible que después de leves trastornos intestinales (náusea y diarrea) el organismo repare el daño y regrese a la normalidad. Esto no sucede si la dosis es superior a 700 rads. En este caso se producen ulceraciones en la pared interior, con riesgo de infección, pudiendo presentarse perforación intestinal y severas hemorragias. El tratamiento en estos casos consiste principalmente en el equilibrio hidroelectrolítico y de proteínas, tratando de controlar las posibles infecciones. En las situaciones de mayor gravedad es indispensable la cirugía para remover los tejidos dañados. Este procedimiento resulta muy peligroso por la limitada capacidad de coagulación causada por la destrucción de las plaquetas y la reducida capacidad de defensa debida a la falta de glóbulos blancos, así como por el estado anémico en que seguramente se encontrará el paciente. Estas complicaciones causan la muerte por irradiación a los pocos días, cuando la dosis sobrepasa los 700 rads.

Como efecto tardío de una irradiación se puede producir la fibrosis intestinal, que es la sustitución de las células precursoras por tejido fibroso, disminuyendo así la elasticidad y reduciendo la luz del intestino (esto es, el diámetro interno), lo que en ocasiones causa la oclusión intestinal.

El *pulmón* es el órgano intratorácico más sensible a la radiación. Después de una irradiación del pulmón con dosis cercanas a 2 000 rads, se produce el adelgazamiento y pérdida de la permeabilidad de la pared alveolar debido a la muerte de células alveolares, y aparece una secreción que favorece el desarrollo de infecciones pulmonares. En estos casos, el tratamiento consiste en ayudar a desalojar las secreciones, evitar el desarrollo de infecciones y propiciar la recuperación de los tejidos dañados. Todo esto se logra con el empleo de medicamentos adecuados y por medio del suministro de aire u oxígeno a presión al pulmón. Como efectos tardíos, 3 o 4 meses después de la sobreexposición, se puede desarrollar una neumonitis caracterizada por alteraciones en los tejidos, colapso del equilibrio osmótico en los capilares, expansión irregular de las paredes del pulmón y paso de sangre al alveolo. Cuando se sobrevive la fase de la neumonitis, por lo general se presenta una fibrosis pulmonar que puede conducir a la falla respiratoria y ocasionalmente a la muerte.

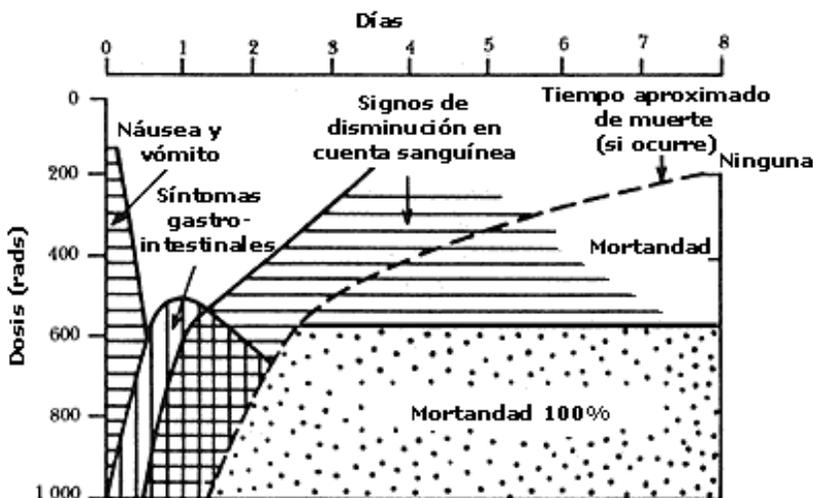
La *médula espinal* es el conjunto de nervios ubicado en el interior de la columna vertebral que conecta al cerebro

con el resto del cuerpo. El tejido nervioso de la médula espinal consta de células nerviosas y células de sostén. Un primer efecto de la irradiación de la médula con dosis mayores de 500 rads es la pérdida de la mielina que cubre las prolongaciones de las células nerviosas, lo que causa a las pocas semanas de la irradiación pérdida de insensibilidad y adormecimiento de las extremidades. Si la médula recibe dosis cercanas a 2 000 rads, se produce la parálisis, un daño irreversible.

EFFECTOS EN EL ORGANISMO

Después de esta revisión de los efectos en órganos aislados, vamos a referirnos a las consecuencias de exposiciones en que *todo el cuerpo* resulte irradiado. A las pocas horas de ocurrida una exposición excesiva a la radiación, el individuo afectado puede presentar dolor de cabeza, náuseas, falta de apetito, vómito, diarrea, pereza, disminución en la cuenta sanguínea y mala coagulación. Posteriormente puede sobrevenir la pérdida del pelo. Estas alteraciones son reversibles si la dosis es menor de 100 rads. Si la dosis es mayor, la severidad de estas alteraciones aumenta y la recuperación del individuo se dificulta. Con una sola dosis de 400 a 500 rads el 50% de los individuos expuestos muere por alteraciones en la sangre. La probabilidad de que sobrevivan dependerá de la efectividad con que se les administre el tratamiento adecuado.

Si se incrementa la dosis más allá de los 700 rads, disminuyen las esperanzas de sobrevivir y cambia el mecanismo de muerte. Así, cuando la dosis es de 1 000 rads se puede producir la perforación del intestino en uno o varios sitios, lo que hace que el contenido intestinal pase a la cavidad del abdomen llamada peritoneal, produciéndose una infección e inflamación conocida como peritonitis, que es sumamente grave. En estas condiciones es fácil que la infección pase a la sangre y cause la llamada septicemia, que todavía en la actualidad es un cuadro extraordinariamente grave que conduce a la muerte de un gran número de enfermos. Cuando la dosis alcanza los 5 000 rads hay shock nervioso, edema y hemorragia en el sistema nervioso central y la muerte viene en unas cuantas horas.



Secuencia temporal de los principales efectos biológicos inmediatos en un ser humano, causados por una irradiación aguda y de cuerpo entero.

En general, las exposiciones accidentales irradian todo el cuerpo del individuo y los efectos resultantes son los arriba mencionados. Con dosis superiores a unos 100 rads se presentan los primeros síntomas y se requiere de un seguimiento médico, mientras que dosis por encima de los 200 rads hacen indispensable la hospitalización. La recuperación será más probable mientras mayor sea la posibilidad de recibir los tratamientos adecuados, tales como transfusiones, conservación del equilibrio hidroelectrolítico, protección contra infecciones y en casos extremos, transplante de médula ósea.

EFFECTOS DURANTE IRRADIACIONES MÉDICAS

Las exposiciones médicas durante la radioterapia son controladas, pues la zona y el tiempo de irradiación han sido cuidadosamente planeados para minimizar los efectos negativos para el paciente. Sin embargo, aún no existe un método para irradiar solamente el tejido canceroso por lo que, en todo tratamiento, una parte de los órganos sanos del paciente recibirá una dosis alta de radiación. Los efectos que se pueden presentar en el nivel sistémico son: falta de apetito, náuseas, vómito, diarrea, sensación de malestar, dolor de cabeza, cansancio, somnolencia y disminución de la cuenta de glóbulos rojos y blancos. Habitualmente estos trastornos son transitorios y bien tolerados por los pacientes.

Durante un tratamiento de radioterapia, puede producirse enrojecimiento de la zona irradiada, comezón, pigmentación de la piel o formación de una capa blanco-amarillenta en la mucosa y formación de vejiguillas en la piel. Estas pueden romperse y dejar salir un poco de líquido, con lo cual se origina una secreción constante, en ocasiones con sangre. Hay caída del pelo localizada en la zona irradiada.

Con la radioterapia moderna estas reacciones son ligeras y se ha evitado el daño severo de necrosis en los tejidos. Habitualmente no se requiere un tratamiento especial para estas reacciones y basta con aplicar cremas con esteroides para aliviar los síntomas. En raras ocasiones hay que suspender el tratamiento para evitar un daño severo. Es necesario comentar que todos estos malestares se pueden justificar cuando el objetivo es salvar la vida de un paciente con cáncer que, sin estos tratamientos, estaría sentenciado a muerte.



2 En éste y el siguiente capítulo, un rad es equivalente a un rem. Esto sólo es correcto para los rayos X o gamma.

Inicio |

VI. EFECTOS TARDÍOS DE UNA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN

LOS efectos biológicos de una exposición a la radiación que más preocupan al público son posibilidad de daño genético y el cáncer. Los estudios científicos han mostrado que estos efectos son poco probables y aparecen varios años después de ocurrida la exposición. En el caso de daño genético en seres humanos, no se ha demostrado ningún caso de enfermedad hereditaria causada por una exposición a la radiación. Por el contrario, en casos de cáncer se ha comprobado la aparición de ciertos tipos de esta enfermedad, algunos años después de la irradiación con dosis altas, superiores a los 100 rads.

Podría pensarse que los efectos tardíos producidos por dosis bajas de radiación son bien conocidos, ya que un gran número de individuos (todos los seres humanos) están expuestos. Sin embargo, los efectos causados por dosis inferiores a 10 rads son imposibles de aislar de las frecuencias espontáneas o de las que son originadas por factores químicos o virales. Esta falta de conocimiento ocasiona que el público reciba una información incompleta, incomprensible, e incluso errada. En ocasiones se llega al extremo de adjudicar el nacimiento de monstruos con tres cabezas y colita de cerdo a una exposición a la radiación, cuando la realidad es que tales seres no han sido jamás observados y sólo son productos de la imaginación. Este capítulo describe la información científica que existe del tema, incluyendo aquella que ha sido obtenida con animales de experimentación.

EFECTOS GENÉTICOS

Los efectos genéticos de cualquier agente externo que actúe sobre una célula son el producto de las alteraciones (mutaciones) que el agente pueda causar en el ADN de las células reproductivas del individuo, espermatozoides u óvulos. Los descendientes de este individuo son portadores de la mutación y pueden sufrir las consecuencias de ésta e incluso transmitirla a sus propios hijos, tal como se explicó en el capítulo IV.

Diversos estudios experimentales que utilizan sistemas biológicos de prueba como bacterias, roedores y cultivos de células humanas, han demostrado que la radiación, las sustancias químicas y los virus, son posibles agentes mutagénicos, es decir, causantes de mutaciones. Con respecto a las mutaciones reproductivas (mutaciones que ocurren en el óvulo o el espermatozoide), la evidencia científica se limita a los estudios en roedores, en los que se han medido la inducción de muerte fetal, las alteraciones en el color del pelo, en el esqueleto, en la estructura de los ojos y en los cromosomas de la descendencia. Los agentes conocidos capaces de producir estos efectos son algunas sustancias químicas de uso poco frecuente (por ejemplo, el metil-metano-sulfonato) y la radiación. La inducción de estos efectos es tan poco probable que para poderlos cuantificar, se requiere exponer a miles de animales al agente mutagénico estudiado.

Es evidente que los datos que se tienen de seres humanos expuestos a agentes mutagénicos no son el resultado de experimentos, sino que provienen de los casos de los individuos que han estado expuestos por razones ocupacionales, médicas, de residencia o accidentales. Los datos indican que el grupo humano más numeroso expuesto a altas dosis está formado por los sobrevivientes de los alrededores de las explosiones nucleares ocurridas en Hiroshima y Nagasaki en 1945. Estos 100 000 ciudadanos japoneses han sido evaluados a lo largo de los 44 años posteriores a su exposición a la radiación (rayos gamma y neutrones), tratando de establecer la relación dosis-respuesta correspondiente.

La dosis recibida por cada sobreviviente ha sido estimada a partir de la distancia que mediaba entre el individuo y el epicentro de la explosión. Las dosis máximas que recibieron estos individuos son de 122 rems aproximadamente (22 rads de rayos gamma y 10 rads de neutrones). Dosis mayores se produjeron en las zonas que resultaron totalmente destruidas por la acción mecánica de la explosión, donde no hubo sobrevivientes. El daño genético en la primera generación se ha determinado estudiando a los hijos de los sobrevivientes, comparándolos con las observaciones en poblaciones similares ("testigos") no expuestas a las explosiones. Los resultados de estos estudios *no han mostrado diferencias* en las frecuencias de alteraciones genéticas entre ambas poblaciones.

Esta falta de evidencia en humanos no es totalmente inesperada ya que es muy difícil establecer relaciones causa-efecto a través de dos generaciones. Se requerirían efectos muy específicos, no causados por ningún otro agente, para poder establecer, sin lugar a duda, la correlación entre la causa y el efecto. Por ejemplo, si altas dosis de radiación causaran que los niños nacieran con dos narices, sería fácil identificar a la radiación como responsable de la mutación correspondiente. Sin embargo, la radiación solamente incrementa la frecuencia de mutaciones que se dan naturalmente en la población humana, y como este incremento es pequeño, su identificación es muy difícil.

Este es el caso del síndrome de Down (llamado popularmente mongolismo), una enfermedad genética producida por una mutación en los cromosomas de uno de los padres. Estudios epidemiológicos muestran que la frecuencia natural del síndrome de Down que es la enfermedad cromosómica más frecuente, es de 1 en 600 nacimientos, es decir que, en promedio, uno de cada 600 niños que nacen sufre la enfermedad. Esto no quiere decir que sí en un hospital han nacido 599 niños sanos, el próximo tendrá que padecer este síntoma, sino que al considerar un gran número de nacimientos, por ejemplo 600 mil, lo más probable será que cerca de mil de ellos sufran la enfermedad. Y decimos "cerca" porque de 600 mil nacimientos puede haber 970 niños enfermos, o 1 025. Estas fluctuaciones son típicas de los estudios

estadísticos.

Los estudios en la población japonesa irradiada encontraron tres casos de síndrome de Down entre 5 579 nacimientos en madres que habían estado expuestas a la radiación, mientras que de 9 440 nacimientos en japonesas no expuestas, 12 sufrían la enfermedad. De estos datos se puede calcular que el grupo irradiado presentó una frecuencia de un caso con síndrome de Down por cada 1 860 nacimientos, mientras que en el grupo testigo la frecuencia fue de 1 en 787. Estos datos se podrían interpretar erróneamente y sugerir que la radiación protege a la población del síndrome de Down. La explicación científica de esta aparente paradoja es que el número de casos estudiado es muy pequeño para poder extraer información precisa. Este problema de estadística se presenta en *todos* los estudios de poblaciones humanas expuestas y, se origina, en la baja probabilidad del efecto buscado.

Teniendo en cuenta lo mencionado y la posibilidad de que la radiación pudiera inducir un daño genético en la especie humana que permanezca en las generaciones futuras, los estudios experimentales se han realizado evaluando los efectos genéticos, producto de la exposición a diversas dosis de radiación en grandes poblaciones de roedores y monos, principalmente. Debemos señalar que hay diferencias notorias entre los efectos observados de una especie animal a otra y que la extrapolación de datos animales al ser humano se basa en suposiciones generalmente inciertas, ya que hay diferencias importantes en el tamaño del cuerpo, en la composición de los tejidos y en el metabolismo.

Para proteger a la población humana del posible daño genético reproductivo causado por una exposición a la radiación, sería necesario conocer cuantitativamente y con precisión el riesgo genético. Esto quiere decir, saber cuántos niños nacen con alteraciones genéticas después de que sus padres se han expuesto a una dosis conocida. Tal como lo hemos indicado, esta información no existe, por lo que estas estimaciones de riesgo se han obtenido de los experimentos con animales. Los valores calculados, y que son los que utilizan los organismos internacionales de protección radiológica, dicen que: si una población humana fuera irradiada durante 30 años (una generación) con un total de 1 rem, en cada millón de nacimientos habría entre 10 y 20 niños con alteraciones genéticas debidas a la radiación. En esta misma población nacerán 30 000 niños con desórdenes genéticos espontáneos, cuya causa es desconocida. Estos valores indican que la frecuencia natural (o basal) de enfermedades genéticas en el ser humano es del 3%, y que una exposición a 1 rem de radiación la hace aumentar al 3.002%. Esta cantidad de radiación (1 rem) es la dosis promedio que se recibiría en 30 años debido a los usos de la radiación producida por el ser humano (véase la figura 4).

Creemos necesario destacar que, si bien de los números puede concluirse que el riesgo reproductivo asociado a la exposición a la radiación es muy pequeño, el sufrimiento que acompaña a cada niño nacido con un defecto genético puede ser muy elevado. Toda exposición innecesaria a la radiación, o a cualquier otro factor mutagénico, debe ser evitada.

EFFECTOS DIRECTOS SOBRE EL EMBRIÓN

Si una mujer embarazada se expone a la radiación existe una probabilidad relativamente alta de causar serios daños al embrión que podrían llevarlo hasta la muerte y, subsecuentemente, ocasionar un aborto, o bien la aparición de malformaciones en el recién nacido (efecto llamado teratogénesis). Los estudios con animales han demostrado que la radiación produce disminución en el tamaño de la cabeza (microcefalia) y alteraciones en la formación del esqueleto del ser irradiado *in utero*. Los estudios en aquellos sobrevivientes que se encontraban *in utero* durante las explosiones de Hiroshima y Nagasaki han mostrado que tienen menor estatura, alcanzan un peso menor y sus diámetros cefálicos son inferiores a los del grupo testigo no irradiado.

Se sabe con certeza que el embrión es más sensible a los efectos teratogénicos de los virus, de algunas sustancias químicas y de la radiación, durante ciertas etapas de su desarrollo uterino. Había 22 individuos que se encontraban antes de su 18ª semana de gestación al ser irradiados en las cercanías de Hiroshima y Nagasaki. De ellos, 13 nacieron con microcefalia y 8 sufrieron retraso mental. La dosis estimada en todos estos casos fue superior a los 150 rems. Para dosis inferiores a 50 rems no se encontraron malformaciones en el grupo estudiado.

Los estudios con animales muestran que dosis tan bajas como de unos pocos rems durante etapas críticas del desarrollo embrionario pueden causar malformaciones. Ante esto, y suponiendo que los seres humanos tenemos la misma sensibilidad a la radiación que los roedores, las autoridades internacionales encargadas de la protección radiológica han recomendado específicamente que la mujer embarazada evite toda exposición innecesaria a la radiación. Si una radiografía es indispensable, deberá asegurarse que el feto reciba la mínima radiación posible usando un delantal protector de plomo. Las mujeres en edad de procrear deben tomar las precauciones necesarias para no exponerse durante las primeras semanas de un posible embarazo. Para esto, la recomendación es posponer todo examen radiográfico hasta los 10 días que siguen a la próxima menstruación, periodo en que existe la mayor probabilidad de no encontrarse embarazada.

CÁNCER

El cáncer es una enfermedad que altera la división normal de las células, por lo que se producen tumores. El crecimiento descontrolado del tumor altera el funcionamiento normal del órgano en que se encuentra y puede causar la aparición de nuevos tumores en otros órganos. El factor causal del cáncer no es conocido, sin embargo, la

evidencia científica indica que la producción de mutaciones en el ADN de las células desempeña un papel importante en su inicio. Como vimos en el capítulo IV, los virus, algunas sustancias químicas y la radiación ionizante, son agentes capaces de producir mutaciones.

El cáncer ocupa un lugar muy importante entre las causas de enfermedad y muerte en nuestro siglo. En México, de las 360 000 muertes que ocurren cada año, se reporta que 35 000 se deben a algún tipo de cáncer. Estos datos estadísticos indican que la probabilidad natural de muerte por cáncer en México es aproximadamente del 10 por ciento.

Altas dosis de radiación, superiores a 100 rems, pueden producir cáncer. Este efecto está bien comprobado. En el cuadro 2 se encuentra una lista de algunos de los estudios que han demostrado la asociación entre la exposición a altas dosis de radiación y el cáncer. La mayoría de estos casos ocurrieron antes que se conociera la capacidad carcinogénica de la radiación, pues actualmente ya no se realizan estas actividades o bien se encuentran reguladas por organismos de seguridad radiológica.

CUADRO 2. Ejemplos de cáncer producido por exposición a dosis altas de radiación.

<i>Causas de la irradiación</i>	<i>Dosis máxima (en rems)</i>	<i>Número de expuestos</i>	<i>Tipo de cáncer</i>	<i>Casos observados</i>	<i>Casos esperados</i>
Pacientes con espondilitis anquilosante, tratados con rayos X	370 a la médula espinal	14 558	leucemia	80	5.5
Pacientes con tuberculosis, irradiados durante fluroscopias	150 a la mama	1 047	mama	41	23.5
Mineros del uranio, inhaladores de radón	6 000 al pulmón	4 146	pulmón	155	30.4
Sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki	122 al cuerpo entero	100 000	leucemia	312	30

De nuevo, el estudio más documentado es el de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. La leucemia, que es un cáncer de las células sanguíneas, es el tipo de cáncer más frecuente asociado con la radiación. Tan sólo tres años después de las explosiones ya se había registrado una frecuencia de casos de leucemia superior a la normal y la máxima incidencia se registró 10 años después de la irradiación. Aún 30 años más tarde se siguen diagnosticando nuevos casos quizá causados por la alta exposición. Entre los 100 000 individuos expuestos, en los 30 años siguientes a las explosiones se han detectado 312 casos de leucemia. La dosis promedio recibida fue de 32 rems. Tomando como grupo testigo a toda la población japonesa, en esos mismos 30 años se esperaba un total de 30 casos de leucemia dentro de un mismo número de individuos no expuestos a las explosiones. También se han reportado incrementos en cánceres de pulmón, tiroides y mama en este grupo humano.

La posibilidad de que el cáncer infantil sea causado por la irradiación del embrión *in utero* ha sido planteada a partir de estudios realizados acerca de los hijos nacidos de madres que se tomaron radiografías pélvicas durante el embarazo. La evidencia de un exceso de cáncer infantil como consecuencia de la irradiación es objeto de acalorada discusión, aún 30 años después de la primera publicación científica sobre el tema. Entre los sobrevivientes japoneses expuestos *in utero*, no se han detectado casos de cáncer.

Si bien la evidencia de la inducción de cáncer por exposiciones a altas dosis de radiación es inobjetable, el posible riesgo a dosis bajas es aún objeto de estudio científico y de controversia pública. El problema esencial es nuevamente la identificación de los posibles casos de cáncer producidos por radiación en presencia de las frecuencias normales de la enfermedad.

En una población como la de la ciudad de México se registran aproximadamente 16 450 nuevos casos de cáncer cada año (datos de 1985). Podemos preguntarnos cuántos de estos casos podrían deberse a la radiación que es producida por el ser humano, principalmente debido al uso de las radiografías en el diagnóstico médico (ver capítulo III y figura 4). Los organismos internacionales dedicados al estudio de los efectos biológicos de la radiación, como son el Comité de la Academia Nacional de Ciencias de EUA para los Efectos de la Radiación Ionizante (BEIR), el Comité Científico de la Naciones Unidas para los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) están de acuerdo en que, si una población de un millón de personas fuera irradiada con 0.1 rem, se producirían 12 casos de cáncer a causa de la exposición.³ Se sabe (Figura 4) que la dosis promedio actual debida al uso de la radiación producida por el ser humano es de unos 0.043 rems cada año. Multiplicando el factor de riesgo por la dosis recibida y el número de individuos irradiados, se obtiene para una población de 16 millones como la de la ciudad de México, un número de 83 casos fatales de cáncer cada año debido al uso de la radiación, principalmente durante exámenes radiográficos. (Sin lugar a dudas, el número de vidas salvadas cada año debido a la disponibilidad de una radiografía es miles de veces superior.)

Para poder realizar un estudio epidemiológico que confirmara estos cálculos, sería necesario tomar una población similar a la de la ciudad de México, eliminar totalmente la posibilidad de tomar radiografías y estudiar durante varios años la aparición de nuevos cánceres. El cálculo predice que, en esas circunstancias, y debido a que se deja de recibir esa radiación, los casos de cáncer serán solamente 16 367. La diferencia entre 16 450 y 16 367 es tan pequeña que sería imposible demostrar que es significativa y que se debe a la radiación. Este ejemplo, en que incluso la exposición de una megalópolis a niveles de dosis reales no es capaz de mostrar de manera precisa la correlación entre cáncer y dosis bajas, pone en evidencia el grado de dificultad de este problema científico. En el próximo capítulo se señala que, aún en un accidente como el ocurrido en Chernobil, será sumamente difícil detectar el aumento de casos de cáncer a causa de la sobrexposición.

Es necesario señalar que, para los cálculos del riesgo de cáncer por radiación mencionados en el párrafo anterior, se ha considerado que el daño producido por dosis bajas es proporcionalmente menor que el daño producido por dosis altas ("hipótesis lineal"). Esto es un supuesto porque, como lo ejemplificamos, los métodos actuales no son capaces de medir el número de casos de cáncer en el ser humano que pudieran ser producto de exposición a dosis bajas. La mayoría de los experimentos en los que se han expuesto animales a varias dosis inferiores a 100 rems, indican que la hipótesis lineal sobrestima el riesgo.

Los ejemplos presentados para el cálculo de daño genético y cáncer ilustran el uso de factores de riesgo obtenidos con irradiaciones a altas dosis, usando una hipótesis lineal dosis-respuesta. Un procedimiento similar siguen los organismos de protección radiológica para establecer los límites de dosis máxima a los que puede exponerse un individuo, tema que se discute en el capítulo siguiente.





[Nota 3] 

3 El factor de riesgo para un cáncer fatal es de 1.2×10^{-4} por rem.

Inicio

VII. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

LAS aplicaciones de la radiación y los radioisótopos son múltiples y cubren aspectos insospechados de la vida moderna. En el capítulo anterior se mostró que la radiación puede ser causa de enfermedades y por lo tanto, al igual que cualquier otro avance tecnológico, su uso requiere normas de seguridad que garanticen que los beneficios recibidos sean mayores que los riesgos a que se expone el usuario. Este capítulo relata la historia de las reglas de protección para el uso de la radiación e indica cuales son las normas actuales destinadas a proteger a quienes trabajan con radiación, a quienes se benefician con su uso y al público en general. También se analizan dos accidentes radiológicos en que la violación de las normas de protección trajo graves consecuencias para un sector de la población.

ORÍGENES

Apenas descubiertos los rayos X y la radiactividad, su uso se generalizó en los hospitales y laboratorios del mundo entero. A comienzos de nuestro siglo los tubos de rayos X se producían masivamente y se distribuían a todos los países. Por tratarse de fenómenos recién descubiertos, cuya naturaleza ni siquiera se entendía totalmente, no se tomaban precauciones y fueron muchos los que sufrieron los efectos negativos de una exposición excesiva e incontrolada. Las personas más expuestas a estas nuevas formas de radiación fueron los médicos radiólogos que utilizaban los rayos X y los científicos que manipulaban material radiactivo.

Existen muchísimas anécdotas, la mayoría con un desenlace trágico, que ilustran las consecuencias de la ignorancia de los posibles efectos biológicos de la radiación. El ayudante de laboratorio del inventor de las técnicas fluoroscópicas perdió todo su cabello, sufrió quemaduras, ulceración y finalmente falleció a causa de su exposición continua a altas intensidades de rayos X. Irene Curie, hija de Pierre y Marie, quien descubriera, junto con Frederic Joliot de la radiactividad artificial, murió a mediados de este siglo aquejada de leucemia, seguramente un efecto biológico tardío de la radiación recibida durante su juventud. Como claro ejemplo de la ignorancia sobre los efectos de la radiación, hasta hace no muchos años una conocida zapatería de la ciudad de México (igual que otras en el mundo) para promover sus ventas, ofrecía a sus clientes imágenes radiológicas "en vivo" del pie adentro del zapato.

Debido a que fueron precisamente los médicos y los físicos las primeras víctimas del exceso de radiación, rápidamente se tomó conciencia del problema dentro de la comunidad científica. En 1920 se erigió en Hamburgo un monumento que recuerda a más de 100 pioneros radiólogos fallecidos a causa de la exposición excesiva durante el ejercicio de su profesión. El primer estudio para establecer niveles aceptables de irradiación fue hecho por la Sociedad Americana de Rayos Roentgen y la Sociedad Americana del Radio en 1922, y las primeras unidades de dosis de radiación se definieron con base en la exposición que llegaba a provocar quemaduras en la piel del paciente.

En 1928, durante el Congreso Internacional de Radiología celebrado en Londres, ocurren dos hechos trascendentales para la evolución de la radiología: se define al *Roentgen*, como la unidad física que mide la cantidad de radiación producida por un tubo de rayos X durante su operación, y se establece la Comisión Internacional de Protección Radiológica, conocida como ICRP. El ICRP es un grupo internacional no gubernamental creado para examinar los fundamentos de la protección radiológica. Esta comisión ha trabajado ininterrumpidamente desde su creación proponiendo recomendaciones internacionales cuantitativas de protección radiológica. Los primeros límites propuestos eran altísimos, en comparación con las recomendaciones actuales. Inicialmente se establecía que el límite era un Roentgen diario de exposición; hoy en día el límite para el público en general es 700 veces menor.

Las recomendaciones vigentes fueron propuestas hace unos 20 años. Hoy, se encuentran en proceso de revisión a la luz de la nueva información física y biológica acumulada durante este último lapso (particularmente en lo que se refiere medidas de dosis y a la frecuencia de cáncer). Es probable que haya cambios en las normas que se establezcan durante los años noventa.

LÍMITES DE DOSIS

El objetivo de la protección radiológica es permitir el aprovechamiento de la radiación, en todas sus formas conocidas, con un riesgo aceptable tanto para los individuos que la manejan como para la población en general y las generaciones futuras. Debido a que la radiación es potencialmente dañina, no debería permitirse ninguna exposición innecesaria. El principio que gobierna la protección radiológica en caso de exposición se conoce con el nombre de ALARA (as low as reasonably attainable) que se traduce como: *tan poca radiación como sea posible lograr de modo razonable*.

Cada país cuenta con un organismo encargado de hacer cumplir la reglamentación existente en el área de seguridad radiológica, leyes que generalmente se han inspirado en las recomendaciones del ICRP. En México, es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas la que cumple esta misión.

Las recomendaciones del ICRP fijan límites para la dosis máxima que podrían recibir los trabajadores cuya actividad implica el exponerse a la radiación. Estos "trabajadores de la radiación" son los médicos radiólogos, nucleares y radioterapeutas, los técnicos que los ayudan en la práctica de su trabajo profesional, los investigadores en física atómica y nuclear que utilizan fuentes de radiación y los operadores de reactores nucleares, entre otros. Este grupo debe estar controlado individualmente de manera continua por medio del uso de dosímetros personales, instrumentos que se llevan sobre el cuerpo y que marcan la cantidad de radiación recibida por cada trabajador. El ICRP ha definido límites de equivalente de dosis para trabajadores de la radiación con el fin de limitar la aparición de efectos biológicos a un nivel considerado aceptable, en comparación con los riesgos a que se expone un trabajador en cualquier otra actividad profesional moderna.

En la actualidad (1990) se especifica para los trabajadores de la radiación un límite anual de equivalente de dosis para la irradiación del cuerpo entero igual a 5 rems. Este valor es unas 25 veces superior al valor de la radiación natural recibida en igual periodo. Debido a que el número de personas que trabajan con radiación es una fracción pequeña de la población, el efecto que su mayor exposición puede tener dentro de la totalidad de la población es sumamente reducido. Datos estadísticos recientes basados en la medición de los dosímetros personales muestran que, en promedio, un trabajador de la radiación recibe alrededor de 1 rem anual. Esta dosis, promediada sobre la población mundial, representa menos del 1% del total, por lo que no fue incluida en las figuras 3 y 4 del capítulo III.

El uso de la radiación es una actividad más de la vida moderna, que conlleva un riesgo que debe ser comparable con el riesgo asociado a otras acciones ya aceptadas por la sociedad. Estudios de salud pública indican que, en general, el riesgo que corre el público es unas diez veces menor que el riesgo que corre un trabajador en accidentes propios de su actividad. Un ejemplo de esto es el uso del transporte público. Todos sabemos que al subirnos a un vehículo de transporte corremos el riesgo de sufrir algún daño, incluso de perder la vida, debido a un posible accidente. El riesgo que corre el conductor del vehículo es mayor que el de un pasajero, pues pasa más tiempo dentro del vehículo. El conductor y la sociedad aceptan estas diferencias ya que, por ejemplo, su trabajo es el medio con el que el conductor se gana la vida, o incluso porque esta actividad puede brindarle oportunidades de realización personal.

La situación es análoga en el caso del público y los trabajadores de la radiación. El ICRP ha recomendado, para individuos del público, límites iguales a 0.5 rems anuales, que viene a ser la décima parte de lo que se recomienda para los trabajadores de la radiación. En este caso, la actividad profesional del trabajador, además de representar su realización personal como científico, médico, técnico radiólogo u operador en una planta nucleoelectrónica, aporta beneficios para la sociedad en general por medio de la generación de conocimientos, salud o electricidad.

Para que las recomendaciones relativas al público se cumplan es necesario planear todas aquellas acciones que provocan la liberación de núcleos radiactivos y de radiación al medio ambiente de modo que no se sobrepasen los límites. Los niveles reales se conocen gracias a muestreos del agua, aire, suelo y otros elementos ambientales, además de la información sobre los hábitos del grupo social.

Los límites de dosis no incluyen la radiación natural, por ser inevitable, ni la radiación recibida durante tratamientos médicos. Se supone que durante un examen de diagnóstico o de terapia, el beneficio al individuo es siempre superior al riesgo asociado con la irradiación. Eliminando estas dos fuentes de exposición y, de acuerdo con las cifras indicadas en la figura 4 del capítulo III, los valores promedio mundiales que el público recibe actualmente debido a fuentes de radiación susceptibles de ser limitadas, son inferiores a 0.003 rems anuales. Esto es, unas doscientas veces inferior al límite máximo recomendado para cada individuo.

Un caso especial lo constituyen las plantas de generación de energía nucleoelectrónica. En Estados Unidos desde 1974, y en otros países, posteriormente, existe una reglamentación que fija las liberaciones de radiación de un reactor a un límite máximo de 0.005 rems anuales de equivalente de dosis en la reja del reactor. Esto quiere decir que un reactor comercial generador de electricidad no debe causar un incremento de la dosis superior a 0.005 rems anuales a ningún individuo, aunque éste habite exactamente junto al reactor. Por supuesto, la población más alejada recibirá, correspondientemente, dosis inferiores. Esta reglamentación tan rigurosa equivale a exigir a cada reactor un límite de contaminación ambiental radiactiva inferior al 3% de los valores naturales.

¿ES POSIBLE DISMINUIR LA DOSIS QUE RECIBIMOS?

La contribución a la dosis total proveniente de fuentes naturales está fuera del control del ser humano y por lo tanto no es posible hacer mucho para disminuirla. Respecto al uso de los rayos X en diagnóstico médico, responsable del 16% del total de la dosis promedio actual, el ICRP ha emitido las siguientes recomendaciones: las exposiciones innecesarias deben evitarse; las exposiciones necesarias deben aportar beneficios que de otro modo no se habrían recibido y las dosis efectivamente administradas, deben limitarse a la mínima cantidad que ofrezca beneficio médico al paciente. Desde el punto de vista clínico, el pequeño riesgo que corre el paciente a causa de la radiografía debe ser más que compensado por la información anatómica contenida en la placa radiográfica como contribución al diagnóstico y al tratamiento de su enfermedad. Si éste no es el caso, no existen excusas para tomar una radiografía.

Si se decide que una radiografía es necesaria, hay cuatro mecanismos físicos que permiten reducir la dosis recibida por el paciente y por el médico o técnico encargado del examen. Estas acciones son las mismas que minimizan la exposición a cualquier tipo de radiación. Los factores son: tiempo, distancia, blindaje y contención. En primer lugar, la dosis total recibida durante una radiografía o una serie de ellas puede reducirse si se limita el *tiempo* total de la exposición a los rayos X. Esto se consigue limitando el número de radiografías solicitadas & % 151 muchas veces se repite una misma toma, hasta que alguien considera que "ya quedó bien" & % 151 y también restringiendo el tiempo de cada exposición al lapso estrictamente necesario para lograr una buena imagen. Hay grupos de físicos y radiólogos que investigan nuevos tipos de películas radiográficas que brinden una máxima información con una mínima exposición al paciente y también buscan medios para eliminar del haz de rayos X, aquellos componentes que sólo irradian al paciente sin aportar nada a la imagen.

El segundo factor es la *distancia*, ya que la intensidad de la radiación disminuye al aumentar la separación entre la fuente y el punto de irradiación. Cuando se toma una radiografía no es posible alejar al paciente del tubo, pero sí al médico o enfermera encargado del examen para evitar que sean innecesariamente irradiados.

El tercer factor, el *blindaje*, es particularmente efectivo durante los exámenes radiológicos. Aunque la radiografía sea de zonas superiores del cuerpo, parte de la radiación es dispersada & % 15es decir, desviada& % 151 hacia regiones inferiores y puede irradiar los órganos reproductivos, lo que podría causar daño genético. La protección que brinda un delantal de plomo, tanto para el paciente como para el técnico a cargo, puede reducir cien o mil veces esta dosis que es totalmente innecesaria. Esta recomendación debería constituir una práctica rutinaria durante radiografías dentales y ser rigurosamente observada al radiografiar a una paciente embarazada.

El último factor de protección, la *contención*, se aplica a fuentes radiactivas, como serían los radioisótopos usados en medicina nuclear o los productos radiactivos generados durante el funcionamiento de un reactor nuclear. Todo material activo debe confinarse a un espacio mínimo y mantenerse aislado del medio ambiente. Los isótopos para uso médico son surtidos dentro de recipientes que impiden su liberación y el mismo cuidado debería seguirse con los restos de ellos después de su utilización. Es totalmente inaceptable la eliminación de productos radiactivos a través de los sistemas normales de desagüe o de recolección de basura.

Tal como se explicó en el capítulo anterior, el embrión humano que se encuentra en una etapa extremadamente activa de desarrollo, es muy susceptible a los efectos de pequeñas dosis de radiación. Existe evidencia de que embrión o feto son, entre 5 y 10 veces más sensibles que el adulto, a enfermedades o defectos inducidos por la radiación. Por estos motivos es muy importante que una mujer embarazada no se radiografie el abdomen, sobre todo las primeras semanas de embarazo, pues es el periodo en que los órganos especializados del niño por nacer comienzan a desarrollarse. Por desgracia es precisamente en esta etapa, cuando un embarazo ni siquiera se sospecha. Existe una regla médica de protección llamada *la regla de los 10 días* que impide las irradiaciones del embrión recién engendrado. Según esta norma, sólo se deben tomar radiografías a una paciente en edad reproductiva durante los 10 días que siguen al comienzo de su periodo menstrual, es decir, cuando hay una certeza

relativa de que no está embarazada. Esta recomendación se dirige al médico que ordena una radiografía y principalmente, a la mujer cuyo hijo puede sufrir daño irreparable a causa de un examen que puede postergarse unas semanas.

¿Es posible establecer hasta dónde es segura la radiación? En el capítulo VI vimos que la respuesta no se conoce para el ser humano, pues sólo es posible identificar los efectos biológicos de altas dosis de radiación, cientos de veces superiores a las que se reciben normalmente. La posición más conservadora al respecto —y apoyada por los organismos internacionales de protección radiológica— sostiene que incluso cantidades muy pequeñas pueden causar daño. Lo que se requiere ante cada nueva situación es hacer un balance entre riesgos y beneficios. Cuando decidimos ir a Europa en avión, y no en barco, aceptamos el riesgo de un posible accidente aéreo a cambio del beneficio recibido: llegar al Viejo Continente en sólo unas cuantas horas. Del mismo modo debemos aceptar el riesgo asociado a la dosis causada por una radiografía a cambio de la posible detección de una enfermedad y, en términos generales, utilizar los beneficios del uso controlado de la radiación asegurándonos que la exposición recibida sea siempre la mínima posible.

ACCIDENTES: CIUDAD JUAREZ Y CHERNOBIL

El manejo inadecuado o irresponsable de las fuentes de radiación puede ocasionar exposiciones accidentales que por lo general afectan a los individuos directamente relacionados en el incidente, pero que también pueden afectar a grandes grupos de la población.

El uso de radioisótopos y radiación en medicina, industria, o en la generación de energía requiere de cuidados especiales ya que una irradiación excesiva puede producir efectos biológicos nocivos. A pesar de que toda actividad lleva asociado un riesgo para la salud de sus trabajadores (pensemos en las industrias químicas, la minería, la construcción, el transporte público, etc.), no existe un reglamento de protección tan severo como el que regula los usos de la radiación. Las razones de este control autoimpuesto fueron explicadas en la sección anterior. El público no siempre comprende la importancia de estos reglamentos internacionales que se originan en estudios científicos que se actualizan periódicamente. Se piensa, de manera errada, que la radiación está bien controlada porque es extremadamente peligrosa. Los cálculos hechos en el capítulo VI demuestran lo contrario. Sin lugar a dudas, el trabajador de ciertas industrias químicas o de la minería del carbón corre un riesgo muchísimo mayor que aquel que trabaja con la radiación.

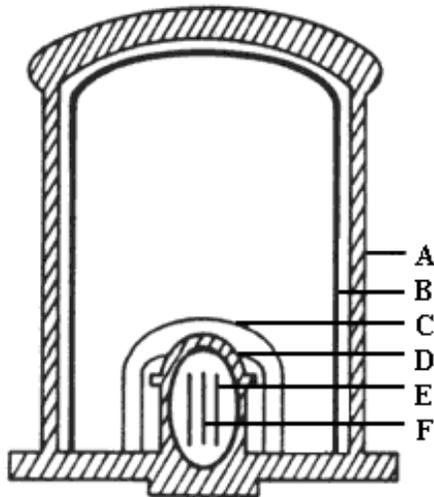
Por desgracia, las normas de seguridad radiológica no siempre se cumplen, ni en todas partes, con el mismo rigor. Existe una larga lista de accidentes que han ocasionado que muchos individuos hayan sufrido exposiciones excesivas a la radiación y que también han provocado liberaciones no controladas de radioisótopos al ambiente. Las consecuencias de cada incidente deben ser analizadas en particular. Aquí nos referiremos, solamente, a un par de casos que constituyen accidentes de suma gravedad.

En diciembre de 1983, en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, un técnico de mantenimiento de una empresa médica desarmó el cabezal de una unidad de radioterapia que se encontraba almacenada desde hacía 6 años en una bodega y extrajo un cilindro de 100 kilogramos de peso para venderlo como chatarra. El equipo había sido importado de Estados Unidos, sin informar a las autoridades mexicanas de seguridad radiológica que debían autorizar su uso, y fue relegado a la bodega sin utilizarse. El cilindro sustraído contenía aproximadamente 6 000 cápsulas pequeñas (de 1 mm de tamaño) del elemento radiactivo cobalto-60, que normalmente se utiliza para el tratamiento del cáncer. El artefacto fue perforado antes de su venta, por lo que las cápsulas radiactivas fueron saliéndose del cilindro y esparciéndose en un área muy amplia que incluía el hogar del técnico, la camioneta de la empresa con que transportó el cilindro, la carretera Ciudad Juárez-Chihuahua y el patio de chatarra. Aquí, los imanes que son utilizados para levantar los trozos de metal atrajeron parte de las cápsulas de cobalto y las mezclaron con la chatarra que posteriormente fue comprada por las fundidoras locales. En total se fabricaron 6 600 toneladas de varilla para construcción y 30 000 bases para mesa que contenían material radiactivo. El hecho se descubrió por casualidad en enero de 1984, cuando un camión que transportaba parte del metal contaminado, exportado a Estados Unidos, pasó cerca de detectores de radiación que existen en los alrededores del Laboratorio Los Álamos, en Nuevo México, y éstos indicaron la presencia de rayos gamma emitidos por el cobalto. Durante los meses que siguieron se recuperó gran parte del metal e incluso se ordenó la demolición de aquellas construcciones que ya habían utilizado la varilla contaminada.

Como consecuencia del accidente de Ciudad Juárez, unas 4 000 personas resultaron irradiadas, especialmente los trabajadores del patio de chatarra y los familiares y vecinos del técnico que se expusieron a la radiación de las

cápsulas de cobalto que durante un mes estuvieron dentro de la camioneta. El 80% de los irradiados recibió dosis inferiores a 0.5 rems, el 18% recibió entre 0.5 y 2.5 rems, y el 2% (es decir 80 personas) recibió más de 25 rems. Entre estas últimas, 5 personas fueron irradiadas entre 300 y 700 rems durante un periodo estimado de dos meses. Recordamos que estos últimos valores son dos o tres mil veces los valores de irradiación natural durante un año. A seis años del accidente no se han registrado víctimas fatales entre los afectados.

Sin duda el accidente más grave asociado a un reactor nuclear ocurrió en la llamada Unidad 4 de la planta soviética de Chernobil, en la República de Ucrania, Unión Soviética. El 28 de abril de 1986, durante el turno matutino en una planta nucleoelectrónica sueca, se comenzaron a detectar niveles de radiación que aumentaban a medida que transcurría la mañana. Este fue el primer indicio de que, a miles de kilómetros de distancia, algo anormal había ocurrido. Tres días antes, los técnicos a cargo de la Unidad 4 en Chernobil habían decidido efectuar pruebas que requerían un bajo nivel de funcionamiento del reactor. Como éste no es el régimen normal, y el diseño de los reactores instalados en Chernobil los hace particularmente inestables a baja potencia, las pruebas habían sido interrumpidas continuamente por los mecanismos de seguridad. Debido a esto, y para facilitar su trabajo, el personal responsable simplemente eliminó todos los sistemas automáticos de seguridad: el circuito de enfriado de emergencia fue desconectado, las barras de control extraídas del reactor quedaron desactivadas, las señales que indican cuándo debe pararse el reactor debido a una emergencia también y en total, se cometieron seis violaciones graves a las normas de seguridad.



- A.- Edificio contenedor, de concreto macizo reforzado con acero.
- B.- Placa de acero sellada.
- C.- Contenedor de concreto reforzado.
- D.- Vasija de acero que contiene el núcleo del reactor.
- E.- Tubos sellados de zirconio.
- F.- Cápsulas selladas que contienen el combustible de uranio.

Esquema del diseño de las barreras de seguridad en una planta nucleoelectrónica. (El reactor de Chernobil no contaba con los elementos A y B.)

Cuando se inició la prueba y la potencia del reactor comenzó a aumentar vertiginosamente debido a cierta inestabilidad, ya no fue posible controlarlo y el reactor llegó a generar 100 veces más energía que su capacidad. El combustible de uranio sobrecalentado rompió las vainas que lo contenían, entró en contacto con el agua del enfriamiento y una enorme explosión de vapor rompió las tuberías, hizo volar la cubierta del reactor, destruyó el edificio —el reactor de Chernobil no estaba alojado en un edificio contenedor reforzado como los reactores comerciales de los países occidentales— y lanzó trozos ardientes de grafito y residuos del combustible a las zonas vecinas. El material radiactivo contenido en el núcleo del reactor escapó libremente y formó un penacho gaseoso que ascendió hasta 10 kilómetros de altura. Desde allí se distribuyó sobre gran parte de Europa y Asia, para volver a caer en las semanas siguientes, contaminando lugares habitados y tierras agrícolas.

La cifra de víctimas inmediatas del accidente de Chernobil llegó a 31 personas, principalmente entre los operadores del reactor y el personal de bomberos que ayudó a combatir el incendio de la planta. Estas muertes se debieron a la explosión inicial, a quemaduras y a los efectos de la radiación. Dosis mayores que las normales se registraron en varios países de ambos continentes. Se estima que, en Europa central, el accidente causó

equivalentes de dosis de 0.1 rem para la población adulta y el doble para niños menores de 10 años (la diferencia se debe a que los factores de efectividad biológica son mayores para los niños que para los adultos debido a que su organismo se encuentra en crecimiento rápido). Polonia fue el país vecino más afectado por la radiación, con dosis entre 0.2 y 0.6 rems para menores, dependiendo de la localidad. Para la población de la Unión Soviética occidental se calcula que recibió una dosis total promedio de 3.3 rems, esto es, unas 16 veces la cantidad anual que se recibe por causas naturales.

Respecto de las consecuencias a largo plazo de esta exposición que sobrepasó los niveles ambientales, usando los factores de riesgo presentados en el capítulo anterior, se estima que para el grupo más expuesto, las 16 000 personas que vivían alejadas entre 3 y 7 kilómetros de la planta y que recibieron un exceso de 50 rems, la probabilidad de morir por cáncer aumentó de un 20% que es lo normal (frecuencia natural en la Unión Soviética), a un 20.6%. ⁴ [Nota 4] El número de muertes por cáncer esperadas normalmente para este grupo es de 3 200 y las adicionales debidas al accidente y calculadas a partir de los valores ya presentados, llegan a 96. Sólo un estudio epidemiológico sumamente cuidadoso realizado durante los próximos 70 años, capaz de detectar el aumento en los valores esperados de 3 200 a 3 296 casos de cáncer en las 16 000 personas expuestas, podrá comprobar lo acertado de esta predicción. Para los 75 millones de personas que viven en la Unión Soviética a menos de 1 000 kilómetros de Chernobil, la sobreexposición promedio estimada es de 0.8 rems, equivalente a cuatro años de exposición a radiación ambiental. Para este grupo tan numeroso, se estiman 7 500 muertes adicionales, que se deben agregar a los 9.5 millones de muertes por cáncer esperadas normalmente en este grupo dentro de los próximos 70 años. Debido a las fluctuaciones estadísticas, será imposible detectar epidemiológicamente esta variación. Hay que mencionar que las cifras en las que se basan estas predicciones son objeto de estudio actualmente y podrían ser modificadas en el futuro.

Los dos accidentes mencionados y la mayoría de situaciones anormales producidas durante el uso de la radiación, tienen como factor común la irresponsabilidad, negligencia e indisciplina del personal supuestamente responsable de la operación. En el caso de Chernobil, el director de la nucleoelectrícula fue juzgado por un tribunal soviético y condenado a diez años de trabajos forzados por "la falta de control y falta de responsabilidad en la planta". Estas situaciones de descuido no es privativa de las actividades que utilizan radiación, sino bastante común en nuestro mundo tecnológico. Un estudio reciente estima que el 65% de los accidentes de la aviación comercial se originan en errores humanos. Solamente una educación de excelencia y mecanismos rigurosos de selección para el personal a cargo de la operación de material e instrumentos que utilizan o producen radiación, permitirá reducir aún más, la probabilidad de accidentes causantes de irradiación totalmente innecesaria en seres humanos.



[Nota 4] 

4 La frecuencia natural de cáncer en un país depende de la suma de varios factores como la distribución por edades de la población, el desarrollo económico, los hábitos alimenticios, factores ambientales, etc. así como del sistema estadístico de control de fallecimientos. Por esto, no debe sorprender que la frecuencia soviética sea diferente de la expresada para México en el capítulo VI.

Inicio |

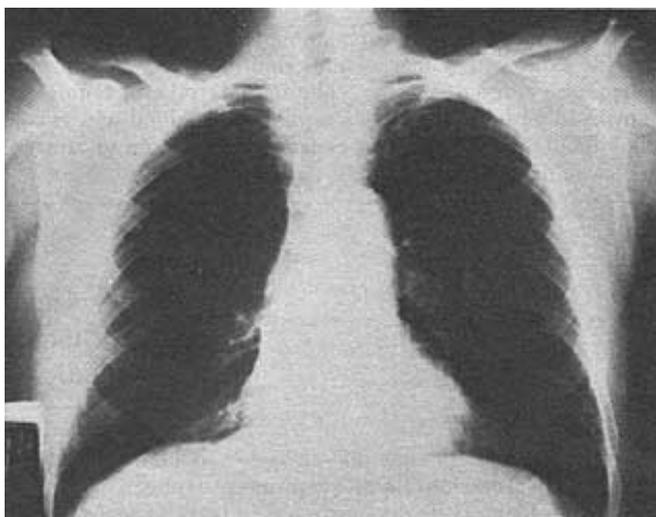
VIII. LOS BENEFICIOS DE LA RADIACIÓN EN LA MEDICINA

LA MEDICINA es el área que más se ha beneficiado con las propiedades de la radiación. En este capítulo se explican algunas de las múltiples técnicas de diagnóstico y de tratamiento de enfermedades en que se usa radiación. Se describen las bases físicas de las radiografías, la medicina nuclear y la radioterapia, así como sus principales ventajas clínicas. Debido a que la cantidad de radiación necesaria para la mayoría de los exámenes de diagnóstico o los tratamientos de radioterapia es mucho mayor que la de los niveles naturales, es en los usos médicos donde mejor se aprecia la necesaria evaluación que se establece entre los riesgos y los beneficios inherentes a cualquier uso de la radiación.

RADIOGRAFÍAS

Comencemos refiriéndonos al uso más general de radiación en medicina, *las radiografías*, es decir el uso de los rayos X para exámenes de diagnóstico (conocido como radiodiagnóstico). Los rayos X son producidos en un tubo de vidrio al vacío que se encuentra en el interior del aparato metálico frente al cual se ubica al paciente. Después de que se produce la radiación, se transmite en línea recta y a la velocidad de la luz, penetra el cuerpo del paciente, lo atraviesa, sale por el otro lado, y se encuentra con una placa radiográfica (similar en muchos aspectos a una película fotográfica) donde quedará grabada una imagen anatómica del interior del cuerpo.

¿Cómo se forma la imagen del interior? Al atravesar el cuerpo del paciente, los rayos X son absorbidos más fuertemente por los huesos que por el tejido blando, de manera que al salir, aquellos rayos que en su camino encontraron huesos han sido debilitados (atenuados) más que aquellos que sólo debieron atravesar tejido sin hueso. La diferente atenuación queda registrada en la película radiográfica con diferentes niveles de iluminación y de sombra, consiguiéndose una imagen del interior.



Radiografía de tórax.

El mayor contraste (diferencia entre zonas claras y zonas oscuras) se obtiene entre la imagen de los huesos y la del tejido blando. Pero diferentes estructuras musculares no aparecen tan claramente diferenciadas y para visualizarlas se ha ideado introducir al cuerpo humano sustancias que causan fuerte atenuación de los rayos X. Es así como se logra observar todo el aparato digestivo, el urinario, el respiratorio y el cardiovascular. Al introducir sustancias radioopacas (el bario, entre otras) al torrente circulatorio, se pueden visualizar en la radiografía los vasos sanguíneos del riñón, cerebro, etcétera.

En los últimos cuarenta años se ha logrado obtener imágenes radiográficas de sólo un plano del cuerpo, ya sea

transversal o longitudinal. A esta técnica se la llama *tomografía*. Si la imagen es de un plano transversal, es decir perpendicular al eje vertical del cuerpo, y su análisis se realiza con una computadora, la técnica se conoce como tomografía axial computarizada (TAC). Para conseguir estas imágenes se utiliza un tubo de rayos X giratorio que da una vuelta alrededor del paciente, en el plano de interés, emitiendo radiación que atraviesa el cuerpo desde muchísimos ángulos. La absorción del haz para cada ángulo se mide con detectores electrónicos que giran al otro lado del cuerpo, al unísono con el tubo emisor. Hace más de diez años, un examen TAC se tardaba un par de minutos; actualmente, los modelos más avanzados de tomógrafos lo efectúan en pocos segundos.

Con la técnica TAC bien empleada, es posible lograr imágenes de planos delgados del cuerpo (un centímetro) distinguiendo en ellos estructuras tan pequeñas como un par de milímetros. Este invento ha representado otro gran avance en el diagnóstico, pues permite estudiar con precisión la anatomía de una región, así como las alteraciones propias de las diferentes enfermedades. El médico cuenta ahora con un diagnóstico más preciso que le permite seleccionar el tratamiento más adecuado y brindar un pronóstico más acertado.



Imagen de tomografía axial computarizada que muestra un plano delgado del cerebro humano. Los óvalos en la parte superior son los ojos.

La dosis absorbida durante un examen tomográfico puede llegar a ser de algunos rads (más que toda la radiación natural recibida en cinco años), por lo que su empleo debe limitarse a aquellos casos en que sea indispensable para lograr el diagnóstico e imposible de realizar con otra técnica de menor riesgo.

Existen, además, otras técnicas que se conocen con el nombre de radiología armada, las cuales permiten introducir, bajo control radiológico, distintos equipos al cuerpo del paciente. Estos aparatos permiten realizar acciones terapéuticas o de diagnóstico sin necesidad de operar. Es posible, por ejemplo, dilatar y obliterar vasos sanguíneos, así como obtener biopsias de tejidos profundos.

Los progresos de la radiología no se deberían medir considerando solamente el mejoramiento en la calidad de las imágenes obtenidas, pues es más importante la amplia difusión de sus técnicas a todos los rincones del mundo. Debido al gran número de personas sometidas a exámenes radiográficos cada año, ha sido muy significativo desarrollar métodos para reducir la exposición de cada paciente a la radiación, sin descuidar la calidad de la imagen. Con técnicas de alto voltaje, por ejemplo, se produce radiación de mayor energía que fácilmente atraviesa el cuerpo del paciente y contribuye en gran parte a formar la imagen. Si la energía fuera menor, como ocurría con los aparatos más antiguos, la radiación de baja energía contenida en los rayos X la absorbería el paciente y no contribuiría a que se formara la imagen. Ahora se utilizan filtros que reducen aún más la radiación poco penetrante. Otro inconveniente conocido desde los inicios del radiodiagnóstico era la exposición de grandes zonas del cuerpo que no necesariamente requerían ser visualizadas. El empleo de colimadores, cada vez mejor diseñados, permite irradiar solamente la zona de interés reduciendo así la exposición innecesaria.

Apenas se inventó la televisión, se adaptaron televisores a los equipos radiológicos, permitiendo establecer técnicas con control remoto que eliminan la irradiación del personal del gabinete radiológico y que además permiten un control más preciso de la zona por irradiar. Más recientemente, han aparecido pantallas fluoroscópicas fabricadas con elementos llamados "tierras raras", en vez del tungstato de calcio usado en un principio. La fluorescencia producida es ahora mucho mayor y se ha podido reducir la exposición al paciente hasta en un 50 por ciento.

MEDICINA NUCLEAR

Existe otra especialidad médica dedicada fundamentalmente al diagnóstico y que también hace uso de la radiación. Se trata de la *medicina nuclear*, que comprende técnicas para obtener imágenes de los órganos internos o del esqueleto. Estas imágenes no representan solamente la estructura anatómica del órgano visualizado, sino que también aportan datos muy importantes sobre su estado de funcionamiento.

Para lograr estas imágenes, la medicina nuclear utiliza elementos radiactivos que se producen generalmente en reactores nucleares. Cantidades pequeñísimas de estas sustancias son introducidas al paciente, ya sea por vía oral, intramuscular o intravenosa, y dependiendo del elemento utilizado van a depositarse en el órgano o tejido específico que se desea estudiar. Los núcleos de estos radioisótopos emiten espontáneamente radiación desde el interior de los tejidos, la cual atraviesa el cuerpo y sale al exterior, donde puede ser detectada por instrumentos especiales. Las imágenes se graban en película fotográfica, pero no de manera directa como en los experimentos de Becquerel relatados en el primer capítulo, sino a través de detectores electrónicos muy complejos que permiten observar cada uno de los rayos provenientes del paciente, amplificar la señal y convertirla en luz que se registrará en la placa fotográfica. Este sistema permite que la cantidad de material radiactivo (y por ende la dosis) que el paciente reciba sea extraordinariamente baja.

La información obtenida a partir de estos estudios permite conocer la cantidad del radioisótopo que se depositó en el órgano, la velocidad a que ocurre esta acumulación, o bien la velocidad a que lo desecha, y así conocer detalles de la capacidad funcional del órgano estudiado. Por otra parte, la imagen permite ver la distribución del material radiactivo, comprobar si es homogénea, como ocurre en los órganos sanos, o identificar zonas de concentración irregular cuyas características permiten, por ejemplo, advertir la presencia de un tumor o un quiste.

En la actualidad existen instrumentos llamados gamma-cámaras o cámaras de centelleo, que cuentan con un gran número de detectores que operan simultáneamente. Estos detectores están controlados por un sistema computarizado que permite registrar procesos dinámicos como, por ejemplo, la función de los riñones. En este caso se puede medir la capacidad de eliminación de orina de cada riñón, su paso hacia la vejiga, las condiciones en que ésta se llena, etc. Otros estudios similares son la observación del paso de la sustancia radiactiva por las cavidades del corazón, con lo que se puede medir su volumen y eficacia para impulsar la sangre. Igualmente se puede medir la cantidad de sangre que circula por minuto por alguna parte del cerebro. Estas imágenes que combinan datos tanto estructurales como funcionales hacen que, en algunos casos de padecimientos vasculares, cardiacos, respiratorios, cerebrales y hepáticos, la medicina nuclear entregue al médico información más precisa que la que se podría obtener con rayos X u otras formas de diagnóstico.

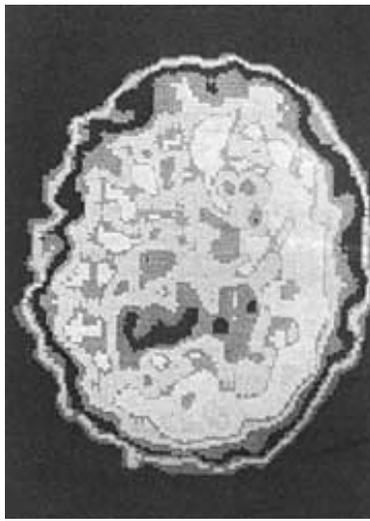


Imagen de medicina nuclear que muestra el cerebro de un paciente que sufre una oclusión en la arteria carótida. La zona negra interior corresponde a la lesión.

Otro empleo de los átomos radiactivos en medicina nuclear es en el *tratamiento de algunas enfermedades*. Desde los inicios de esta especialidad médica, hace poco más de cuarenta años, se ha utilizado el yodo radiactivo en el tratamiento de algunas enfermedades de la glándula tiroides. Poco tiempo después se encontró la enorme eficacia de este elemento en el tratamiento de algunos tipos de cáncer de la glándula.

Actualmente se investiga la preparación de un gran número de moléculas, en especial del tipo de los anticuerpos, capaz de fijarse en forma específica a diversas clases de tumores. A estas moléculas se les puede agregar radioisótopos que emiten radiación beta, con un procedimiento llamado "marcado". Las partículas de la radiación, electrones, son poco penetrantes y por lo tanto depositarán su energía en la cercanía de la molécula marcada, es decir en el tumor. De esta manera se conseguiría destruir al tumor en su ubicación original sin dañar los tejidos vecinos.

Una tercera rama de la medicina nuclear es el *radioinmunoanálisis*, en que no se administran radioisótopos al paciente sino a muestras de su sangre u orina. Como lo indica su largo nombre, se trata de técnicas que utilizan la radiación para analizar sustancias dependiendo de sus propiedades inmunológicas. Las sustancias radiactivas son incorporadas a un anticuerpo específico para la sustancia que se desea analizar, que puede ser una hormona, una vitamina, un medicamento, una enzima, o incluso un virus. Cuando estos anticuerpos marcados se agregan a la muestra de sangre u orina, el anticuerpo se dirige hacia la hormona, droga o enzima correspondiente y la detección de la radiación emitida permite medir las cantidades de la sustancia de interés. En vista de que los detectores de radiación son capaces de notar la presencia de unos pocos núcleos radiactivos, estos métodos de análisis se caracterizan por su extrema sensibilidad y pueden cuantificar cantidades tan pequeñas como billonésimas de gramo (¡la milésima parte de una millonésima de gramo!). Hoy, éste es el método de diagnóstico que utiliza radiactividad más usado en el mundo (y no se expone al paciente a la radiación). Tan sólo en Estados Unidos, cada año se realizan 40 millones de radioinmunoanálisis.

RADIOTERAPIA

Estas técnicas de diagnóstico, radiografías y medicina nuclear, aprovechan la capacidad que tiene la radiación de atravesar el cuerpo y entregar información en el exterior. Una filosofía opuesta es la que rige el uso de la radiación como herramienta terapéutica. La *radioterapia* intenta maximizar la absorción de la radiación dentro del cuerpo, de modo que la energía originalmente transportada por los rayos se deposite en una zona del cuerpo ocupada por un tumor, ocasionando tanto daño local como sea posible.

La ionización, mecanismo por el cual la radiación entrega parte de su energía al medio que atraviesa, se produce en cualquier parte de las células irradiadas. Se acepta que ocurrirá daño letal si la ionización ocurre en el núcleo celular, lo cual ocasiona el rompimiento de los cromosomas. Ahora bien, debido a que el daño letal es más aparente durante la etapa de mitosis (capítulo IV) y los tumores malignos presentan mayor número de mitosis que los tejidos normales (pues son de rápido crecimiento) es de esperar y de hecho así ocurre, que el daño mayor se produzca en el tejido enfermo.

La limitación en la cantidad de radiación usada en radioterapia se debe al hecho inevitable de que el tejido sano que rodea al tumor también resulta irradiado, por lo cual se produce, de modo paralelo al efecto deseado, un efecto negativo para la salud del paciente. La radioterapia busca entonces el óptimo equilibrio entre una máxima irradiación al tumor y una mínima irradiación al tejido sano vecino. Este es el único caso en el que, al aplicar gran cantidad de radiación a un ser vivo, se produce un beneficio.

La práctica de la radioterapia se ha visto enriquecida por los logros del radiodiagnóstico, pues ahora es posible conocer con precisión el sitio, el tamaño y la extensión de la enfermedad a irradiar. El plan terapéutico puede realizarse con gran detalle y así concentrar la radiación en el volumen de tejido enfermo, reduciendo la dosis a los tejidos sanos.

La radiación más utilizada en radioterapia es la que proviene del elemento cobalto-60. El núcleo de cobalto-60 es inestable y al decaer se emite radiación electromagnética (rayos gamma) de alta energía. Son estos rayos los que se orientan hacia el tumor durante el tratamiento. Otro elemento utilizado en radioterapia es el cesio-137, que también decae y produce rayos gamma, pero de menor energía que aquellos del cobalto-60. La vida media de estos núcleos es de algunos años, lo que quiere decir que la actividad (rayos gamma emitidos en cada segundo, ver capítulo II) disminuye apreciablemente con el transcurso de los años (Figura 1). Las fuentes radiactivas deben ser reemplazadas periódicamente en los hospitales y clínicas para asegurar que los tratamientos brinden la dosis apropiada en un tiempo de irradiación no demasiado largo.

Ha habido un gran avance en radioterapia desde sus comienzos, a principios de siglo, hasta la fecha. Los primeros equipos utilizados emitían radiación de energía relativamente baja, lo que producía una dosis más elevada en piel y era difícil alcanzar valores suficientemente altos para curar el tejido enfermo profundo. Por esto se ideó la terapia de movimiento, en donde se multiplican las puertas de entrada y se logra concentrar una dosis suficiente en la zona ocupada por el tumor.

Además de los rayos gamma existen otras técnicas de radioterapia que usan diferentes radiaciones para lograr una mejor localización de la dosis en la zona del tumor, una mejor penetración, o una mayor efectividad biológica (ver capítulo II). Los principales departamentos de radioterapia cuentan hoy en día con aceleradores de electrones (llamados linacs) que producen haces de estas partículas y también rayos X de alta energía. Los electrones son partículas que penetran débilmente el cuerpo humano, por lo que su uso es ideal para el tratamiento de tumores superficiales, en que se desea concentrar la dosis en unos pocos centímetros bajo la piel. La modalidad de rayos X de un linac presenta varias ventajas respecto de los rayos gamma del cobalto. Los primeros pueden ser mucho más intensos que los segundos, acortando el tiempo de tratamiento; debido a su alta energía son más penetrantes y depositan una dosis mayor en profundidad; su excelente definición geométrica permite proteger mejor las estructuras vitales vecinas al tumor. Aunque se reconozcan las ventajas de un linac respecto de una fuente de cobalto, hay que estar conscientes de la gran simplicidad del manejo de esta última, en comparación con el trabajo que requiere la operación de un acelerador dentro de un ambiente hospitalario. En países desarrollados, la operación de un linac requiere la presencia permanente de un físico médico, que es un profesional interdisciplinario especializado. En países tercermundistas, este tipo de profesional no siempre existe.

En unos pocos centros hospitalarios del mundo se usan otras partículas nucleares en radioterapia: neutrones, protones, partículas alfa, piones, o iones pesados. Cada técnica tiene ventajas y desventajas, dependiendo del tipo de tumor que se trate, pero todas comparten una característica: un altísimo costo económico. Los centros que las utilizan están generalmente asociados a un laboratorio de física nuclear o de altas energías, con el que comparten el uso de un acelerador. Los tratamientos con estas partículas todavía se consideran en una etapa de investigación.

El desarrollo de la energía nuclear también ha repercutido favorablemente en el campo de la radioterapia, pues aumentó el número de elementos radiactivos posibles de usar en implantaciones internas, procedimiento llamado braquiterapia. Esta técnica consiste en introducir la sustancia radiactiva, contenida dentro de semillas o agujas selladas, al interior de una cavidad del paciente donde se encuentra un tumor y dejarla durante un tiempo. El efecto que se aprovecha es la corta distancia entre la fuente radiactiva y el volumen por irradiar, lo que proporciona dosis relativamente altas en la zona cercana a la fuente y dosis bajas en regiones alejadas. Su uso en particular es indicado para los casos de cáncer en cavidades del cuerpo humano, como el cáncer en el útero, en la cavidad oral, o bien en lesiones accesibles a ser implantadas por ser superficiales; o bien en tumores profundos, utilizando la cirugía como vía de acceso. En este último caso es deseable implantar isótopos radiactivos de vida media corta, como el oro-198 (vida media de 3 días), ya que las semillas depositadas pueden quedarse en forma

permanente. Si se usara un elemento radiactivo de vida media más larga, el material debería extraerse un vez liberada la dosis deseada.

Desde comienzos de este siglo, el radio ha sido el elemento más usado en braquiterapia, pero debido a que en su decaimiento pasa por un elemento gaseoso (el radón), es posible que las agujas selladas que contienen el material radiactivo presenten fugas (causadas por rupturas producidas durante la inserción y remoción de las agujas del cuerpo del paciente) que pueden ocasionar exposiciones innecesarias para el paciente y el personal hospitalario.

Hoy en día, los organismos internacionales recomiendan no adquirir nuevas cantidades de radio para tratamientos de braquiterapia. Los hospitales que ya lo posean deberán sustituirlo, dentro de sus posibilidades económicas, por otra sustancia. Entre éstas, el cesio-137 es el que tiene mejores cualidades. Los organismos internacionales recomiendan que no se done el radio sustituido a otros países o instituciones para uso médico, pues así se conseguiría dentro de algunos años la total eliminación del radio en los hospitales del mundo. Con esto se brindaría un servicio de mayor seguridad a los pacientes y al personal. Este es un ejemplo de cómo el propio uso de técnicas y elementos logra que se perfeccione el conocimiento de sus limitantes y que se aumente la seguridad asociada. Nadie podrá negar el beneficio del uso del radio en la primera mitad de este siglo, de igual manera, nadie podrá, en esta etapa final del siglo XX, estar a favor de que se continúe adquiriendo radio para aplicaciones médicas.

Con mucho menor riesgo que el radio se pueden usar en braquiterapia otros isótopos como el yodo-131, que con una vida media de 7 días es ampliamente utilizado en los problemas de la glándula tiroides. El fósforo-32 tiene una vida media de dos semanas y ha sido usado en el tratamiento de problemas hematológicos, en las cavidades abdominal y pleural, en cáncer de la próstata, etc. Estos dos isótopos, por su vida media tan corta, son introducidos directamente al organismo y ahí residen hasta que terminan de decaer.



IX. EL CASO DE LA SEÑORA GARCÍA

HASTA este momento hemos descrito las principales características de la radiación y su uso en la medicina. Creemos oportuno narrar de manera anecdótica una de las miles de experiencias que se viven a diario en todas las clínicas oncológicas del mundo y que representa uno de los empleos más importantes de la radiación al servicio de la vida. Este capítulo ha sido escrito en un lenguaje sencillo, con el doble propósito de interesar al lector en la historia y de que analice algunos de los conceptos científicos y técnicos adquiridos durante la lectura del libro. El caso que se presenta ilustra cómo la investigación científica pura e interdisciplinaria ha permitido que enfermedades incurables hasta hace unos años, hoy en día puedan ser controladas y así aumentar la esperanza de vida de toda la población.

UN CASO DE LA VIDA REAL

La señora Josefina García, de 40 años, espera nerviosa su turno. La sala de espera de la clínica, con su iluminación artificial le impide adivinar si ya oscurece en la ciudad. Finalmente se ha decidido a consultar al médico, gracias a los buenos consejos de una vecina. En los últimos meses ha tenido sangrados y escurrimientos vaginales que no son normales y no puede explicar.

La secretaria le avisa que es su turno y pasa con el doctor Pérez Martínez, especialista en ginecología. Después de un interrogatorio minucioso sobre sus síntomas, el facultativo se dispone a realizar un examen médico, para lo cual le pide a la paciente que pase al cuarto de examen, se quite su ropa y se ponga una bata desechable. El examen es cuidadoso y completo, empezando por la cabeza y el cuello y terminando con un reconocimiento ginecológico. Para este examen, en una mesa especial, la enfermera coloca a la paciente en posición ginecológica que facilita el examen de los genitales externos. Luego, el médico, con sus manos enguantadas, introduce sus dedos a través de la vagina y el recto para identificar cuidadosamente, al útero y los ovarios. Con esto se busca detectar alguna anomalía que explique los trastornos que presenta la paciente. Después introduce un espejo vaginal que le permite observar el cuello uterino, en donde observa la existencia de un tejido que sangra fácilmente. Con unas pinzas especiales toma un pequeño fragmento del tejido para un estudio posterior con el microscopio. Esta muestra la coloca en un frasco que contiene formol para que el pedacito de tejido no se descomponga.

Una vez terminado el examen, la señora García pasa al vestidor y el doctor Pérez a su escritorio, en donde consigna sus hallazgos en el expediente. También anota una lista de estudios necesarios para conocer el diagnóstico de la paciente y su estado general de salud, pues esta información será básica durante el tratamiento que se recomiende.

La señora García recibe todas sus indicaciones, entre ellas la de llevar de inmediato el fragmento del tejido del cuello uterino al laboratorio de anatomía patológica para que se realice el examen histopatológico de la muestra. "¿Cómo me encontró?", pregunta la paciente con algo de timidez. "Obviamente usted no está muy bien y por eso tiene los síntomas que me ha referido. Cuando tengamos los resultados de todos estos estudios estaré en condiciones de darle una información completa y proponerle el tratamiento más adecuado. Pero sí puedo anticiparle que, aun en el peor de los casos, podremos ofrecerle un tratamiento capaz de curarla." En este momento la paciente se atreve a preguntar: "¿Tengo cáncer?" El médico responde: "No lo podemos asegurar hasta que no conozca el resultado de la biopsia, pero encontré en el cuello de su matriz un tejido sospechoso. Le repito que usted ha venido a tiempo para poder curarla, aunque el resultado de la muestra sea positivo. Vaya tranquila, señora, pues con los estudios estaremos en condiciones de resolver satisfactoriamente su problema."

Terminada la consulta, y después de pagar los honorarios, la señora Josefina abandona la clínica, preocupada por lo que dijo el médico, pero aliviada por haberlo consultado en el momento oportuno.

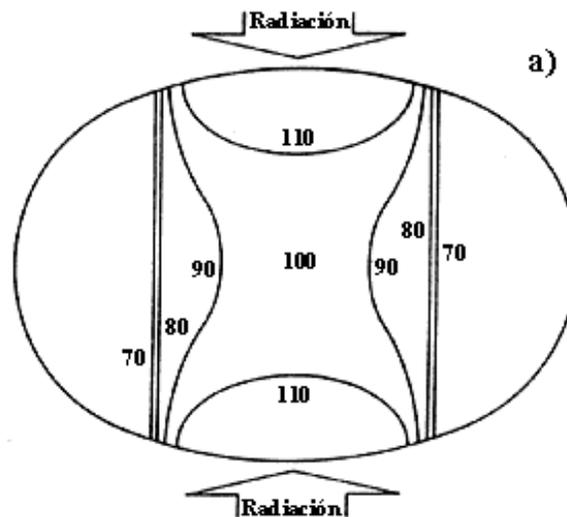
Al día siguiente se presenta en ayunas a primera hora en el laboratorio y pacientemente se somete a los exámenes y sus respectivos tiempos de espera. La biometría hemática es un examen de sangre que determinará una posible anemia, como también la presencia de un proceso infeccioso agregado. En la química sanguínea, el segundo análisis, se estudian determinados elementos para conocer el funcionamiento de los riñones y detectar una posible condición diabética. El examen general de orina complementa la información de los análisis anteriores, y el de las

heces fecales es importante para descartar procesos parasitarios. La lista de exámenes incluía dos tipos de radiografías. La primera, torácica (que muestra al pulmón y al corazón), es rutinaria para todo paciente que presente un tumor. La otra, la urografía excretora, informa sobre el funcionamiento de los riñones y en ella se puede observar si existe algún obstáculo en el trayecto de la orina desde el riñón a la vejiga, lo cual es frecuente en las pacientes con tumores avanzados del cuello de la matriz. Todo esto lo aprendió la señora Josefina conversando con las jóvenes tecnólogas que la atendieron.

Después de cuatro horas y media en el laboratorio y en el gabinete de rayos X, y unos miles de pesos menos en su bolsa, la señora García emprende el regreso a su hogar donde la espera el trabajo diario de madre y ama de casa.

Un par de días más tarde, con los resultados de los estudios practicados, la paciente regresa con el doctor Pérez Martínez. Este la recibe atentamente, como es su costumbre, la interroga sobre su estado de salud en los últimos días y lee los informes clínicos. Su rostro amable se torna grave. "Señora García, estos resultados confirman la sospecha de cáncer cérvico-uterino." El corazón de la paciente pareció encogerse y un escalofrío la recorrió de pies a cabeza. "¡Cáncer! Y mis hijos aún pequeños, ¿qué será de ellos si yo muero?" Miles de pensamientos se atropellaban en su mente y por unos segundos perdió la noción del lugar donde se encontraba. La voz del médico la obligó a volver a la realidad de la consulta. "Tal como se lo he mencionado, afortunadamente usted vino tan pronto notó que algo andaba mal, su enfermedad no está avanzada y estamos seguros de que con un tratamiento con radiaciones usted quedará curada. Es posible que usted dude acerca de cuál es el tratamiento más adecuado, pues existen dos posibilidades: cirugía o radioterapia. Quiero señalarle que, en términos generales se puede afirmar que ambos procedimientos son efectivos y que, en mujeres muy jóvenes, con un cáncer incipiente, se prefiere la cirugía. Esto, porque se puede proteger por lo menos un ovario y mantener la vagina con un funcionamiento normal. Para mujeres ya cercanas a la menopausia, o con un cáncer no incipiente, la radioterapia constituye el procedimiento más apropiado. Es importante que sepa que a consecuencia del tratamiento se suspenderán sus menstruaciones y ya no podrá volver a embarazarse. Si usted está de acuerdo, quiero que se presente en el departamento de radioterapia mañana mismo, para comenzar su atención." Al bajar las escaleras del edificio, diez minutos más tarde, una lágrima rodaba por la mejilla de la señora.

La señora Josefina García fue recibida en el Departamento de Radioterapia del Hospital Central, donde se la sometería a un tratamiento con radiación. El médico radioterapeuta revisa todos los estudios practicados y vuelve a examinar a la enferma confirmando lo señalado por el ginecólogo. Inmediatamente después mide los diámetros anteroposterior y lateral de la pelvis de la paciente y, en un papel, dibuja el contorno de la enferma, señalando el volumen de tejido que desea irradiar. Esta información la pasa al personal del Departamento de Física del mismo hospital, donde realizarán el plan del tratamiento estableciendo las puertas de entrada de la radiación, su angulación y demás factores físicos que permitan la concentración de la dosis en el volumen a irradiar, minimizando la radiación que reciban los tejidos sanos (Figura 7).



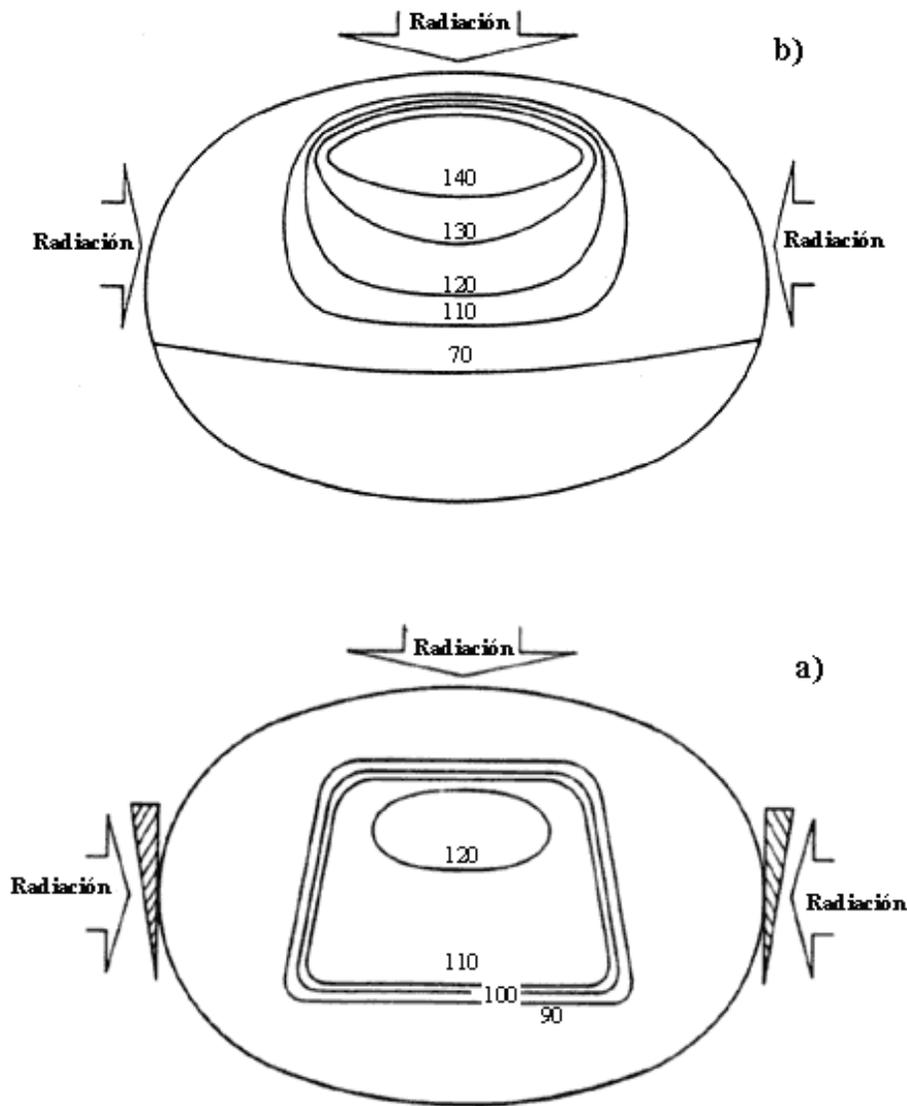


Figura 7. Planeación del tratamiento para una paciente con cáncer cervicouterino que está irradiada con cobalto-60. Se muestra un corte del cuerpo y tres posibles modalidades de irradiación: a) irradiación con dos campos opuestos; b) irradiación con tres campos; c) irradiación con tres campos, más filtros de cuña para concentrar la dosis en la zona del tumor. Los números en las curvas indican valores relativos de la dosis. El plan más adecuado es el 7c) pues se obtiene una dosis homogénea en un volumen importante de la pelvis.

Este tratamiento será con radiación externa de cobalto-60 y lo recibirá diariamente, de lunes a viernes, durante 4 semanas. Al finalizarlo, la enferma se deberá hospitalizar para que se le aplique material radiactivo intracavitariamente, en su matriz, con lo que aumentará la dosis a la parte central y punto de partida del tumor (Figura 8), lo cual aumentará también las probabilidades de curación.

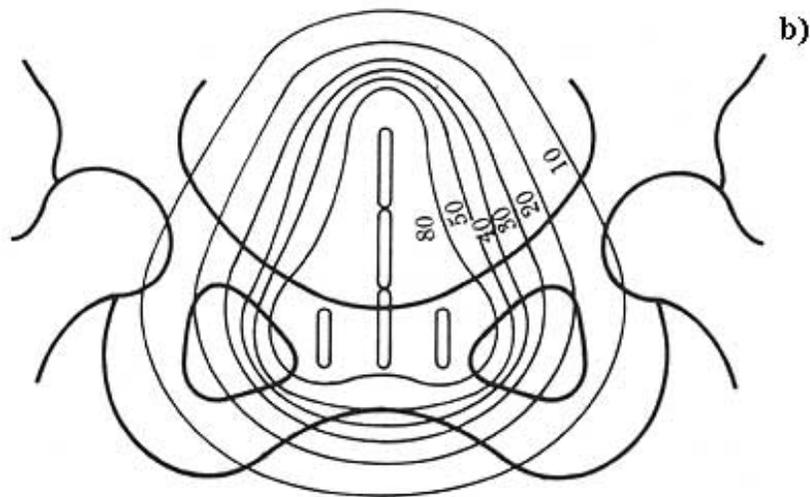
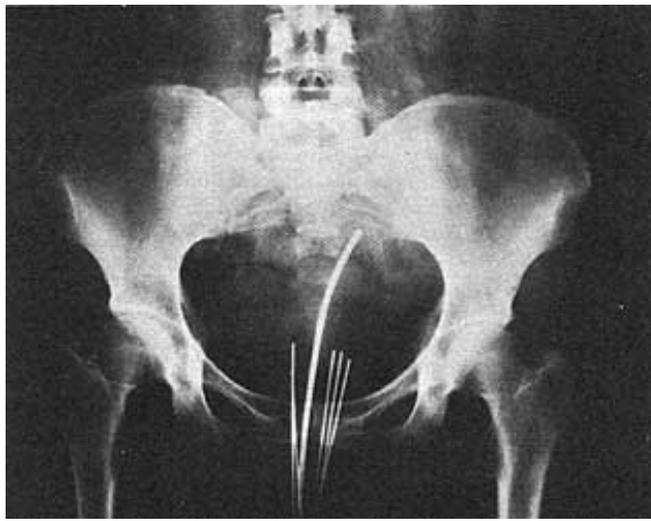


Figura 8. a) Radiografía y b) distribución de dosis para el tratamiento de cáncer cervico-uterino con material radioactivo intracavitario. Las fuentes radioactivas se insertan a través de los conductores largos observados en a). Los números en b) indican los valores relativos de la dosis para un tratamiento con cinco fuentes radiactivas.

Antes de iniciar el tratamiento, la señora Josefina es informada sobre posibles molestias futuras, pero no se le dice más para evitar sugestionarla. Hay ocasiones en que las pacientes toleran todo el mes de irradiaciones sin ningún tipo de trastorno. De cualquier manera, la enferma deberá pasar a consulta semanal con el medico radioterapeuta para que él evalúe la tolerancia al tratamiento, solicite los estudios de control necesarios y prescriba los medicamentos apropiados para facilitar el bienestar de la enferma en esta etapa.

Una vez completada esta primera fase, se le practica una radiografía de control a la paciente en donde se visualiza el volumen de tejido que se va a irradiar y, una vez verificado que todo está correcto, se inicia el tratamiento.

La señora García, en una camilla, queda colocada debajo del aparato que contiene al cobalto-60. A una distancia de medio metro sobre su abdomen se ubica el cabezal del aparato irradiador, que parece un gran cilindro de metal verde. En un momento dado, ve salir a las enfermeras de la sala, escucha cerrarse una puerta y luego percibe un ruido metálico proveniente del irradiador. La señora García está completamente sola dentro de la sala de tratamiento. Durante varios minutos pareciera que no ocurre nada. Su vista se fija en el techo y su pensamiento vuela a su familia. Nuevamente escucha el ruido del aparato. Una enfermera aparece a su lado y sonriendo le dice que ya terminó la irradiación, que puede vestirse, y que la esperan al día siguiente. La señora Josefina camina tambaleándose, más por la emoción que por algún malestar físico.

Cada día que pasa, doña Josefina llega más tranquila y empieza a familiarizarse con el lugar y el personal que la atiende. Hay días en que el tratamiento la angustia, y la paciente se cubre con una coraza mental que pareciera protegerla y permitirle controlarse hasta que acaba la irradiación.

La tolerancia al tratamiento ha sido muy buena durante la primera semana, lo que la hace llegar optimista a su consulta de control. Después de informarle al médico que todo evoluciona sin contratiempo, la paciente se decide a preguntarle sobre la anunciada hospitalización al final del mes. El doctor responde que el tratamiento intracavitario será exactamente como un examen ginecológico, sólo que se le dejará una sonda adentro del útero y dos "aplicadores", que parecen caniquitas, uno a cada lado del cuello uterino. Estos aplicadores no contienen todavía material radiactivo. Se insertan y se lleva a la enferma al gabinete de rayos X, donde se tomará una radiografía para comprobar que estén en una posición correcta (Figura 8). Después de este control, la paciente regresará a su cuarto, donde se le introducirá, sin molestias, el material radiactivo al interior de los aplicadores. El doctor le explica que mientras se encuentre hospitalizada, con el material radiactivo en su interior, no deberá recibir visitas, ya que ese material estará emitiendo radiación y no es justo exponer innecesariamente a otras personas.

Con esta explicación detallada, la señora García se siente más tranquila y recibe el resto del tratamiento sin angustia. Al llegar el momento de la aplicación intracavitaria, que se realiza sin anestesia, el médico la felicita pues el tumor, para esas fechas, prácticamente ha desaparecido. La estancia hospitalaria resulta un poco molesta para doña Josefina, pues las enfermeras que siempre se habían mostrado amables y dispuestas a acompañarla cuando ella lo necesitaba, en esta ocasión reducen al mínimo el tiempo que pasan junto a la paciente, para no irradiarse innecesariamente. En ocasiones, la señora García se siente impotente para resolver sus problemas por sí sola.

Se completan todas las fases del tratamiento y la señora García regresa a su hogar. Recibe instrucciones para presentarse a consulta en un mes más, fecha en que se iniciarán las sesiones clínicas de control que deberá mantener durante toda su vida. Aunque las posibilidades de curación sean buenas, en ocasiones hay recaídas que conviene diagnosticar oportunamente para realizar otro tratamiento que rescate la vida de la paciente.

Durante los primeros días en su casa, doña Josefina siente algunos trastornos rectales y de la vejiga que desaparecen en 10 o 15 días, de acuerdo con lo que el médico le había anunciado. Por fin se cumple el mes y, nuevamente con angustia, va a recibir el veredicto.

Pasa con el médico. Éste la interroga sobre las molestias sentidas recientemente y luego le practica un examen ginecológico. Una vez terminado, sonriendo le dice: "El tumor ha desaparecido totalmente, no existe ninguna evidencia de enfermedad." La señora García recibe emocionada las felicitaciones sinceras del facultativo.

Doña Josefina García regresa una vez más a su hogar, llena de optimismo y felicidad por las buenas noticias. Mientras va en el autobús piensa acerca de las maravillas de la ciencia moderna y los cientos o miles de científicos que en el curso de la historia han realizado los progresos que permitieron que ella y miles de personas como ella, puedan recuperar su salud y seguir siendo útiles a su familia y a la sociedad. Al llegar a casa y dar la noticia a su esposo y a sus hijos, ese día se convierte en una fiesta familiar.

REFLEXIONES FINALES

Al quedarse solo después de la consulta, el doctor Pérez Martínez reflexiona sobre el caso de su paciente. Fueron muchos los factores que determinaron el resultado satisfactorio en este caso. En primer lugar, la detección temprana de la lesión, aun ya con manifestaciones clínicas, permitió un tratamiento con buenas probabilidades de curación. Sí el cáncer cérvico-uterino es detectado aun antes de que existan manifestaciones de la enfermedad o daño visible a los tejidos, la probabilidad de curación se acerca al 100%. (Este diagnóstico temprano se consigue con el llamado examen Papanicolaou.) A medida que la enfermedad avanza, se requieren procedimientos más agresivos, molestos y costosos para los pacientes, que a pesar de ello, disminuyen la probabilidad de curación.

En segundo lugar, los avances recientes en las técnicas de obtención de imágenes del interior del cuerpo humano (ultrasonido, TAC, resonancia magnética y PET, entre otras), hacen factible lograr gran precisión en el diagnóstico de una enfermedad y en el control del tratamiento aplicado. En el caso de la terapia intracavitaria descrita en el relato, el contar con técnicas de imágenes permitió que después de verificar radiográficamente la adecuada posición de los aplicadores, se introdujeran las fuentes radiactivas en el cuello uterino. De esta manera, el médico

pudo colocar los aplicadores vacíos, sin tener que preocuparse por exponerse a la radiación. Así se obtuvo una óptima ubicación para aplicar la dosis adecuada. Además, la inserción diferida del material radiactivo eliminó la posibilidad de una irradiación totalmente innecesaria al personal encargado de los cuidados hospitalarios de la paciente (que pueden llegar a ser más de diez personas).

Las fuentes radiactivas actuales, debido a la pureza que se puede lograr en su composición, son de un tamaño muy reducido, por lo que no es molesta su inserción intracavitaria. Esto, aunado al hecho de que la radiación externa actual no produce dolor, hace mucho más tolerable para la paciente este tratamiento que la cirugía.

Las radiografías de la zona del tumor permiten también planear con precisión el tratamiento de irradiación externa. Este trabajo, mostrado anteriormente en la figura 7, requiere conocer las características del haz de radiación a emplear, así como su interacción con los diversos órganos y tejidos que resultarán irradiados. Esta información ha sido acumulada a lo largo de muchos años de investigación en física y en radiobiología.

El desarrollo científico y tecnológico han permitido salvar la vida a la señora García.



X. OTROS USOS DE LOS RADIOISÓTOPOS Y DE LA RADIACIÓN

ADEMÁS de las aplicaciones médicas ya descritas existe una infinidad de actividades agrícolas, industriales y científicas en que se utiliza la radiación. Estas técnicas se basan generalmente en los mismos principios que las aplicaciones médicas: la propiedad de los radioisótopos de emitir radiación penetrante que permite "seguirle la pista" al elemento radiactivo y la propiedad de las dosis altas de radiación para producir cambios en la estructura celular de los organismos irradiados. Este capítulo describe algunos de los logros obtenidos con el uso de la radiación en agricultura, hidrología, industria, investigación biomédica, esterilización de material médico e irradiación de alimentos. Al final del capítulo se discute el uso de la energía nuclear en la generación de electricidad.

USO DE TRAZADORES

Cuenta la historia que la primera utilización práctica de un elemento radiactivo como trazador ocurrió en 1911, en una pensión de Manchester, Inglaterra. Uno de los huéspedes, llamado George de-Hevesy, trabajaba como ayudante en un laboratorio en que se experimentaba con los radioisótopos, recientemente descubiertos. Cada noche, al servirse la comida que preparaba la dueña de la pensión, al parecer con esmero, a De-Hevesy le asaltaba la sospecha de que le estaban dando sobras de los días anteriores.

Conociendo las propiedades de los radioisótopos, se le ocurrió agregar una pequeña cantidad de un elemento radiactivo a los restos de su comida. Al día siguiente llevó a la pensión un electroscoPIO, instrumento sensible a la radiación; cuando el menú se repitió, acercó el electroscoPIO al plato y comprobó que la comida emitía radiación. Entusiasmado, intentó explicarle su descubrimiento científico a la dueña quien desgraciadamente fue poco receptiva a las palabras entusiastas y... De-Hevesy tuvo que buscarse inmediatamente otra pensión. George de-Hevesy continuó trabajando en el tema y en 1943 obtuvo el premio Nobel de Medicina por sus aportes al campo del uso de radioisótopos como trazadores.

Una de las aplicaciones más interesantes de los radioisótopos como trazadores corresponde al estudio del aprovechamiento de los *fertilizantes* en las plantas. La importancia de este conocimiento es tanto económica como ecológica. Para los países en vías de desarrollo, la compra de fertilizantes significa un desembolso anual de grandes sumas de dinero —generalmente divisas— pues muchos de los fertilizantes son importados. Además, el uso excesivo o inadecuado de un fertilizante puede dañar al medio ambiente. Lo ideal es conocer, con precisión, la cantidad de fertilizante que se debe aplicar a cada tipo de cultivo y en qué forma, para lograr un máximo aprovechamiento.

La técnica de trazadores radiactivos consiste en incorporar al fertilizante un radioisótopo (por lo general fósforo-32), aplicar el fertilizante y, posteriormente, detectar la radiación emitida por el fósforo-32 para seguirlo en su camino metabólico dentro del vegetal. Estas observaciones permiten determinar qué cantidad de fertilizante llega a la planta y cuánto se desperdicia en el terreno. El uso de radioisótopos es la única manera para saber cuál es fósforo proveniente del fertilizante y distinguirlo del que la planta absorbe naturalmente del suelo donde crece.

Entre los logros de la técnica del fósforo-32 como trazador se puede mencionar un estudio en que participaron varios países en vías de desarrollo. El trabajo demostró que el fertilizante fosfatado, ya fuera depositado directamente sobre la superficie del suelo, o mezclado con éste, suministraba a las plantas de arroz más del doble de fósforo que si se depositaba a 10 cm de profundidad entre las filas de plantas. Resultados como éste han permitido ahorrar grandes cantidades de fertilizante sin disminuir la productividad de cultivos esenciales para la alimentación de millones de personas.

Los estudios *hidrológicos* comprenden, entre otros, la medición de la cantidad de agua caída en forma de lluvia y nieve, las características de los depósitos acuíferos subterráneos, la determinación del flujo de los ríos y arroyos, la medición de pérdidas de agua de presas, canales o lago, y la comprensión de la dinámica de lagos y reservas. En estas investigaciones los análisis isotópicos prestan una ayuda insustituible por la información que brindan de los isótopos presentes naturalmente en el agua y acerca del uso de elementos radiactivos agregados a aquella para un fin específico.

Esta última técnica consiste en inyectar una cantidad conocida de un radioisótopo al volumen de agua que se desea estudiar y, posteriormente, seguir la pista del elemento radiactivo determinando, a partir de la evolución de la concentración del radioisótopo, ciertas características del sistema acuífero. En el caso de fuentes de agua subterránea, el empleo de trazadores radiactivos permite conocer el contenido y el origen del agua, la velocidad y dirección del flujo, la relación entre el depósito y las aguas superficiales, las posibles conexiones entre acuíferos, etc. Uno de los radioisótopos más usados en estos estudios es el tritio (hidrógeno-3). Las técnicas actuales permiten reconocer un átomo de tritio en 10^{18} átomos de hidrógeno (uno entre un millón de millones de millones), por lo que la cantidad de tritio inyectada al medio acuático durante el estudio es sumamente pequeña.

El estudio de isótopos naturales presentes en el agua se basa en la capacidad técnica de detectar pequeñísimos cambios en la concentración de deuterio (hidrógeno-2) y de oxígeno-18, ambos presentes naturalmente en el agua junto a los isótopos más abundantes hidrógeno-1 y oxígeno-16.

Existen varios procesos naturales que afectan la composición isotópica del agua (es decir, la proporción en que se encuentra cada uno de los isótopos de un elemento en la muestra). Durante la evaporación y condensación del agua, necesarias para la formación de nubes y producción de lluvias, los isótopos más pesados se hacen más escasos. Las moléculas de agua (H_2O) formadas por átomos de los isótopos livianos (hidrógeno-1 y oxígeno-16) son más volátiles que aquéllas constituidas por los isótopos pesados (hidrógeno-2 y oxígeno-18), por lo que el vapor de agua formado en la evaporación de los océanos contiene una fracción menor de hidrógeno-2 y oxígeno-18 que el agua del mar donde se origina. Como consecuencia de este fenómeno, lluvias sucesivas de un mismo vapor de agua original contendrán cada vez menos isótopos pesados. Estas diferencias se pueden medir, y los resultados se usan para determinar el origen del agua en los acuíferos, identificar conexiones entre lagos y aguas subterráneas, velocidad de flujos, etcétera.

Otro proceso natural que cambia la composición isotópica del agua es la condensación del vapor en diferentes temperaturas y altitudes (el contenido del isótopo pesado disminuye con la altura). Este último efecto es muy útil pues permite identificar la zona de donde proviene el agua de un depósito. Las variaciones observadas son de un 0.3% de disminución de oxígeno-18 y 2.5% de disminución de hidrógeno-2, por cada 100 metros de aumento en la altitud del lugar donde se produce la condensación.

Un ejemplo de la aplicación de estas técnicas lo constituye un proyecto realizado en la llanura costera de Nicaragua, entre el Océano Pacífico y una cordillera con cimas de 1 700 m de altitud, situada a 20 km de la costa. Se deseaba conocer el origen de los depósitos de agua del llano, una superficie de 1 100 km², a unos 200 m de altura sobre el nivel del mar. Los estudios de concentración isotópica mostraron que las aguas poco profundas de la llanura recibían el líquido localmente, mientras que el agua de los pozos profundos se originaba en la lluvia caída en las montañas, a más de 300 m de altitud. Estudios similares dentro de América Latina se han efectuado en Brasil, Guatemala, Jamaica y México.

En la *industria* es posible agregar radioisótopos a un proceso y seguir su avance para estudiar algunos problemas industriales como el grado de mezcla de fluidos, polvos o gases, la eficiencia de la filtración en ventilación, la velocidad de flujo en tuberías, la detección de fugas en tubos subterráneos y el control de cables que transportan gases.

INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA

En la actualidad casi todas las áreas de la investigación biomédica utilizan elementos radiactivos como trazadores; esto ha hecho que se descubran las vías metabólicas por las cuales se transportan las sustancias en el organismo. En el área de la farmacología, la posibilidad de marcar tanto los medicamentos como los tóxicos, permite seguirlos y así conocer cómo actúan, dónde se acumulan y qué tejidos pueden aliviar o dañar. Mencionamos brevemente que el estudio de los oncogenes (genes que, se piensa, pueden causar cáncer) se realiza marcando el ADN con elementos radiactivos.

MUTACIONES INDUCIDAS EN SEMILLAS

En el capítulo referente a los efectos genéticos de la radiación se vio que es posible inducir mutaciones en el material genético de un organismo, las que ocasionarán cambios en alguna de las características de los descendientes. Al irradiar semillas para inducir mutaciones se espera producir cambios genéticos que resulten benéficos para el cultivo de las plantas, como sería una mayor resistencia a alguna enfermedad específica, mejor

adaptación a ciertas condiciones ambientales, o un mayor rendimiento en las cosechas. Como no es posible controlar una irradiación para que sólo produzca mutaciones beneficiosas, ni mucho menos escoger la característica que deseamos modificar, los experimentos en que se inducen mutaciones en semillas son extremadamente largos. Miles de semillas antes de ser plantadas, son irradiadas con rayos gamma o neutrones y, posteriormente observadas para identificar las mutaciones que podrían ser beneficiosas. Actualmente, las mejores variedades de cebada que se cultivan en Europa, el trigo cultivado en Italia y el arroz cultivado en California, provienen de mutaciones inducidas.

Un ejemplo de este uso de la radiación es el desarrollo, en Hungría, de una variedad de arroz resistente a una enfermedad altamente dañina. Se decidió comenzar a experimentar con arroz Cesariot, una variedad usada en Francia que presentaba una conocida resistencia a la enfermedad. Sin embargo, el clima húngaro no es igual que el clima francés y el arroz Cesariot se tardaba demasiado en madurar y no se conseguían buenas cosechas. Con radiación se intentó inducir en la semilla Cesariot una mutación genética que acelerara la maduración sin perder la resistencia a la enfermedad. Muestras de semillas se irradiaron con diversas dosis de rayos gamma y neutrones de alta energía. Se plantaron las semillas irradiadas y se observaron las dos primeras generaciones para seleccionar aquellas plantas que producían flores antes que el resto. Uno de los mutantes producido con irradiación de neutrones, florecía tres semanas antes que el arroz Cesariot. Estas semillas se plantaron y las plantas producidas mantuvieron esta característica. A esta línea se le llamó Cesariot temprano, unos años más tarde ya estaba comercialmente disponible en Hungría para su cultivo.

Muchos otros mutantes se utilizan actualmente para alimentar a la población mundial. Algunos de éstos son cereales de alto rendimiento que forman parte de la "Revolución verde". Las espigas de estas variedades son cortas y duras, de manera que el uso de fertilizantes se traduce en un incremento del grano, en vez de que crezcan las hojas o los tallos.

ESTERILIZACIÓN

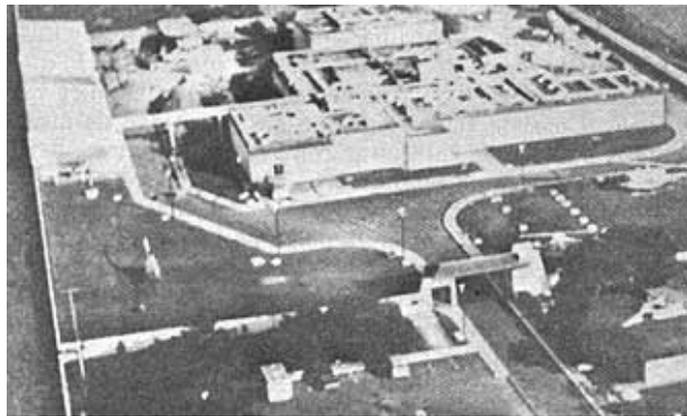
Las técnicas de esterilización buscan causar un efecto benéfico a través del uso controlado de una gran cantidad de radiación. Nos referiremos a la esterilización de insectos dañinos, a la destrucción de gérmenes en materiales de uso médico y a la preservación de alimentos.

Se estima que las pérdidas agrícolas debidas a la presencia de ciertos insectos alcanzan el 10% de la cosecha total. En el nivel mundial, esto equivale a perder la producción de todo un país como Estados Unidos. Tradicionalmente se han utilizado sustancias químicas para controlar las poblaciones dañinas, pero, después de algunos años de uso se ha observado que, por un lado, los insectos se han vuelto resistentes a los insecticidas, y por otro, los residuos venenosos que quedan en las frutas y hortalizas resultan dañinos para el medio ambiente.

Existe una técnica de *esterilización de insectos*, en la que se usa radiación ionizante, que ha demostrado su utilidad en varias ocasiones. Consiste en irradiar una gran cantidad de insectos con dosis suficientemente altas como para volverlos estériles, es decir, incapaces de reproducirse. Estos insectos son liberados en las zonas infestadas por sus propios congéneres, así, al aparearse con los insectos de la plaga no se producirá descendencia. La liberación repetida de insectos estériles logra reducir considerablemente el tamaño de la población. La radiación que se emplea atraviesa los insectos y los esteriliza, sin dejarlos radiactivos, por lo que las moscas liberadas no producen ninguna irradiación del medio ambiente.

Uno de los ejemplos más espectaculares del uso exitoso de esta técnica es la erradicación de la mosca del Mediterráneo, en territorio mexicano, hace unos 10 años. En 1977 llegó a México, por el sur, una de las plagas agrícolas más serias: la mosca del Mediterráneo. Esta mosca es dañina para unas 200 plantas frutales y ha causado pérdidas cuantiosas en varios países. Apenas la hembra ha sido inseminada busca un fruto u hortaliza para depositar sus huevos. Una vez que encuentra un huésped apropiado, la mosca inserta un aparato anatómico con forma de jeringa bajo la cáscara del fruto y deja allí sus huevos. En un par de horas salen larvas de los huevos y éstas comienzan a alimentarse del fruto que rápidamente se pudre. Una semana más tarde, las larvas migran a la superficie del fruto y, finalmente, se establecen en el suelo o en desperdicios orgánicos, donde se transformarán en insectos adultos listos para reproducirse. La vida de la hembra dura un mes y a lo largo de ella pone entre 200 y 300 huevos. Tomando en cuenta las limitaciones en la cantidad de alimento disponible, se estima que unas 1 000 hembras pueden producir más de un millón de descendientes en tres generaciones. Con estas cifras, la producción agrícola en un área de 30 000 km² (aproximadamente la superficie del estado de Yucatán o la mitad de la República de Panamá) puede resultar infestada en sólo tres meses.

El programa llevado a cabo en México se llama "Moscamed" y tiene como objetivos detener el avance de la mosca hacia el norte, erradicarla de México, Guatemala y finalmente, de toda América Central. El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) se encargó del entrenamiento del personal necesario y desarrolló un sistema para el crecimiento, irradiación con rayos gamma y liberación de millones de moscas por semana. El proyecto en que también participó la FAO (Food and Agriculture Organization), requirió construir la "fábrica" que se muestra en la fotografía, para la producción de las moscas estériles. En enero de 1981 se había detenido la migración de la mosca y finalmente fue erradicada del territorio mexicano donde ya había infestado tres millones de hectáreas (una superficie mayor que el área total cultivada con frijol en México) causando pérdidas por millones de dólares al año. Actualmente se están utilizando moscas estériles en Guatemala y México para protegerse de una reinvasión.



Edificio construido en Tapachula, Chis., para servir de "fábrica" de moscas estériles del proyecto Moscamed.

Un uso ya rutinario de la radiación en grandes cantidades es la *esterilización de productos médicos*, tales como algodón, guantes y ropa de cirugía, suturas, jeringas, válvulas cardiacas, prótesis, etc. Para algunos de estos productos, los métodos alternativos de esterilización, como el calor o el vapor, no se pueden utilizar pues destruirían las características del material. En estos casos, la técnica más efectiva y barata resulta ser la irradiación con rayos gamma de cobalto-60.

Los productos que se van a esterilizar son introducidos en paquetes herméticamente sellados, impermeables a microorganismos. La radiación gamma atraviesa el paquete e irradia todas las partes del objeto que, mientras no se abra, la esterilización durará por tiempo indefinido. Como la irradiación casi no aumenta la temperatura, los objetos hechos de plástico no sufren daño térmico. En ocasiones, éste es el único método para esterilizar preparaciones de origen biológico y también polvos, pomadas o soluciones. El material irradiado no queda activado (la energía de los rayos gamma es demasiado baja), por lo que el usuario no recibe ninguna dosis al utilizar el material.

Un tercer ejemplo del uso de altas dosis de radiación (y que no produce ninguna actividad en el producto irradiado) se refiere a la *preservación de alimentos*. Grandes cantidades de alimentos se desperdician, debido a que se descomponen rápidamente, en particular en climas calurosos y húmedos o en comunidades que no cuentan con refrigeradores u otros métodos para prolongar la vida de un alimento, desde la cosecha hasta el consumo.

Desde hace 35 años se sabe que la radiación puede extender la vida de ciertos alimentos. Los estudios realizados en varios países no han detectado efectos nocivos asociados al consumo de esta comida, y es así como hasta ahora unos 30 países han autorizado la comercialización de productos comestibles irradiados. Los estándares internacionales han sido establecidos conjuntamente por la IAEA, la FAO y la Organización Mundial de la Salud.



Hongos irradiados con diferentes dosis de rayos gamma (los números indican las dosis recibidas, en miles de rads). Se observa que las dosis más altas mejoran la conservación del producto.

Existen varias técnicas de preservación de alimentos que difieren según la cantidad de radiación utilizada. Se conoce como radappertización (en honor de Nicolás Adapperte, el inventor de las "conservas" en 1810) el método en que se usan dosis suficientes para que el número de microorganismos en el alimento se reduzca prácticamente a cero. En estos casos, la energía que recibe el producto es 10 veces menor que aquella que sería necesaria para preparar con él una conserva enlatada. Otra técnica consiste en irradiar para interferir, no los procesos microbiales, sino ciertas características fisiológicas del producto, como sería la inhibición de brotes en las papas, ajos y cebollas, y el retraso en la maduración de frutas.

Aproximadamente existen 30 irradiadores de alimentos en el mundo, cuatro de ellos en América Latina (en Brasil, Chile, Cuba y Perú), y los productos irradiados incluyen frutas y vegetales (papas, cebollas, ajos, frutas secas, champiñones, fresas y mangos), especias y condimentos, granos y harinas, carne y pescado (res semipreparada, pollo, camarones) y productos para pacientes que requieran una dieta estéril en su tratamiento médico.

ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA

El uso de energía nuclear en un reactor constituye una tecnología totalmente diferente de las descritas previamente en este libro. Sin embargo, debido a que el funcionamiento de un reactor produce radiación que afecta a la vida, hemos considerado necesario incluir un breve análisis sobre el uso actual de plantas nucleoelectricas, sus principales ventajas y desventajas respecto a otras alternativas energéticas y las formas como la radiación de un reactor llega al medio ambiente.

El desarrollo científico y tecnológico, particularmente en los últimos 100 años, han llevado a una gran parte de la humanidad a un nivel de vida que requiere altos consumos de energía. La llamada sociedad tecnológica actual gasta 20 veces más energía de lo que se gastaba hace cientos de años para mantener a una sociedad de desarrollo primitivo basada en la agricultura. Las mayores diferencias se deben al uso de energía en el transporte, en la industria, en las técnicas agrícolas modernas y en los usos domésticos. El 76% del consumo energético actual ocurre en naciones industrializadas, y el resto, en países en vías de desarrollo. Paradójicamente, el 73% de la población mundial, vive en países aún no desarrollados.

Un análisis sencillo de esta situación nos hace concluir que el consumo mundial de energía continuará en aumento en el futuro cercano. En primer lugar, la población mundial sigue creciendo, sobre todo en los países más pobres. Estos son precisamente los países que necesitan mejorar el nivel de vida de su población y, por lo tanto, requerirán una mayor cantidad de energía disponible. Esta energía se consume diariamente en iluminación, calefacción, combustible para los vehículos de transporte y otros usos directos, y también, de manera indirecta, al gastarla para producir los alimentos y objetos de uso común. (La fabricación de un kilogramo de papel consume la energía contenida en medio kilo de petróleo, y en la construcción de una casa de 100 m² se usa tanta energía como la que se obtiene de 10 000 kilos de petróleo.) Por otro lado, los países industrializados continuarán su progreso mejorando el nivel de vida de sus sectores menos favorecidos, renovando áreas urbanas e industriales a medida que el tiempo las vuelva obsoletas y todo esto ocasionará aún mayores gastos de energía.

El 25% del uso total de energía en el mundo presente es para producir electricidad. La producción de electricidad

se realiza en una planta eléctrica que utiliza un combustible para mover una turbina conectada a un generador de electricidad. Las plantas termoeléctricas queman petróleo o carbón y con el vapor producido se impulsa la turbina. En una planta hidroeléctrica se usa la fuerza de una caída de agua para mover la turbina generadora, y en una planta nucleoelectrica se aprovecha para el mismo efecto la energía que se libera al fisionarse los núcleos de uranio. Existen otras fuentes de electricidad, como es el aprovechamiento de la energía solar, de la energía del viento y de los depósitos de agua y gases calientes en el interior de la superficie terrestre, pero su contribución actual a la producción total de electricidad es muy pequeña.

Hay dos aspectos principales que han hecho necesaria la inclusión de un análisis sobre reactores en este libro. Uno es la producción de residuos radiactivos durante el funcionamiento normal del reactor y, el otro, es la posibilidad de un accidente en que se libere una gran cantidad de sustancias radiactivas al medio ambiente. Una planta nucleoelectrica produce anualmente durante su funcionamiento normal un volumen de dos metros cúbicos de *desechos radiactivos* sólidos de alta actividad y 23 mil metros cúbicos de residuos sólidos de menor actividad. Estos desechos son almacenados en contenedores especialmente diseñados y permanecen bajo control continuo. Como las vidas medias de algunas de estas sustancias llegan a los miles de años, la contención de los desechos debe ser tal, que se asegure que durante ese lapso no entrarán en contacto con ninguno de los ciclos biológicos. Pequeñas cantidades de desechos son liberados al medio ambiente durante el funcionamiento normal de un reactor, pero bajo la estricta norma de no sobrepasar en un año 5 milirems de equivalente de dosis a ningún ser que viva en las cercanías de la planta. Esta cantidad es menor que el 3% de los valores de radiación recibidos de manera natural. (Esto se discutió en el capítulo VII.)

Durante un *accidente* grave en un reactor nuclear, el interior de éste, donde ocurren las reacciones de fisión del uranio, entra en contacto directo con el medio ambiente y se libera parte del material radiactivo ahí contenido. Los reactores comerciales (usados como plantas generadoras de electricidad) han sido diseñados con múltiples barreras de contención, de modo que, en caso de un accidente en el interior, la radiactividad no encuentre un camino fácil para salir al exterior. Durante el accidente de la Isla de Tres Millas en EUA en 1979, estas barreras ayudaron a evitar una dispersión importante del material radiactivo. En el caso del reactor Chernobil, estas barreras prácticamente no existían (el reactor se había diseñado para producir el plutonio necesario en la fabricación de bombas nucleares, no como planta nucleoelectrica) y, tal como se explicó en el capítulo VII, en esa ocasión la contaminación radiactiva fue de gran magnitud. Estos accidentes son los más graves que se conocen en la industria nucleoelectrica. Son más de 400 los reactores que hoy funcionan en 26 países que acumulan unos 4 500 años-reactor de experiencia.

Pareciera que estas características de los reactores los harían totalmente inaceptables como fuentes energéticas hoy en día. Sin embargo, antes de sacar conclusiones, es necesario preguntarse sobre la seguridad y las virtudes ecológicas de las otras fuentes de energía.

La generación de hidroelectricidad pareciera un método limpio y seguro. Sin embargo, la construcción de grandes presas para la acumulación del agua, en ocasiones representa un grave atentado al equilibrio ecológico de la zona. Además, una presa siempre corre el riesgo de colapsarse, ya sea durante un terremoto o por fallas estructurales. Miles de personas han muerto en las avalanchas que siguen a la destrucción de una presa, haya sido diseñada o no para producir electricidad.

El carbón es probablemente el combustible que cuenta con mayores reservas en nuestro planeta, a pesar de las grandes cantidades ya consumidas. Sin embargo, la extracción del carbón en las minas es sumamente peligrosa y ha cobrado miles de vidas de mineros que aún en nuestros días mueren a causa de las explosiones de gas grisú, o como consecuencia de inundaciones en el interior de los túneles. Además, la combustión de carbón es muy contaminante. Se produce humo, cenizas, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. El 99% del humo y las cenizas se pueden eliminar con un precipitador electrostático, pero la fracción que queda, de tamaño menor que una milésima de milímetro, fácilmente se instala en los pulmones. El óxido de azufre se origina en el contenido natural de azufre del carbón quemado y a través de una serie de reacciones químicas puede transformarse en ácido sulfúrico o algún sulfato metálico que va a depositarse en los pulmones de los individuos donde ejerce una acción corrosiva. La famosa tragedia de Londres en los años cincuenta, en que miles de seres humanos perdieron la vida a causa de la contaminación, fue causada por la excesiva quema del carbón. El siguiente contaminante asociado a la combustión del carbón son los óxidos de nitrógeno que, se piensa, tienen un efecto carcinógeno cuando se asocian con otras sustancias o moléculas de nuestro cuerpo.

El uso del petróleo como combustible lleva asociado también una serie de riesgos. Explosiones como la de San

Juan Ixhuatepec, México (San Juanico) ocurrida en 1985,, en que murieron más de 500 personas o los graves accidentes de barcos petroleros en que vastas áreas de tierra y mar resultan gravemente dañadas con la consecuente muerte de miles de ejemplares de la flora y fauna, son noticia casi regular en nuestros periódicos. Tan sólo durante 1989 ocurrieron gravísimos derrames de petróleo, uno en Valdez, Alaska; otro en la Antártida y al menos un par en zonas altamente habitadas en el Este de Estados Unidos. Miles de kilómetros de playas se han inutilizado por el aceite derramado y miles de especies animales y vegetales resultaron afectadas. Sobre todo en Alaska y Antártida, se puede sufrir un daño que no será reparable antes de que pasen algunas décadas.

Un efecto ambiental común tanto a la combustión de carbón y de petróleo es la producción de bióxido de carbono. Este gas no es directamente dañino, pero causa el llamado efecto invernadero, debido al cual la temperatura de nuestro planeta podría aumentar, rompiendo el delicado equilibrio que mantiene a la vida tal como la conocemos. En los últimos años se ha comenzado a observar cierta evidencia climática de que el calentamiento pudiera ya haber empezado.

Los datos aportados son una confirmación de que toda tecnología que se aplique con exceso afecta al medio ambiente y lleva implícito un riesgo. El beneficio de una amplia disponibilidad de energía no es de ninguna manera gratuito y el precio que se debe pagar no se contabiliza solamente en pesos o en dólares. Nuestra civilización ha exigido del planeta recursos extraordinarios para poder llegar al nivel de desarrollo que hoy conocemos. Pareciera que estamos comenzando a observar el deterioro inevitable que nuestro progreso ha causado en el suelo, aire, agua, flora y fauna que nos rodea. Los accidentes que, además de las víctimas humanas, causan cada vez más catástrofes ecológicas, son en su gran mayoría causados por factores humanos: operadores de un reactor que realiza pruebas que violan las reglas y medidas de seguridad, el capitán de un barco petrolero que duerme borracho en su camarote en el momento en que una mala maniobra causa el derrame del combustible transportado, el uso de equipo industrial obsoleto al que no se le brinda el mantenimiento apropiado, etc. La industria nucleoelectrónica comparte la culpa con otras actividades de alto riesgo cuando ambas violan la reglamentación destinada a evitar accidentes. Pero tanto una como la otra son elementos indispensables en nuestra sociedad tecnológica. Una mayor preocupación por el medio ambiente, además de una selección rigurosa de aquellos individuos responsables de la seguridad industrial, posiblemente disminuirá el efecto negativo, y aparentemente inevitable, que nuestro bienestar causa al planeta.



XI. ¿ES NECESARIA LA RADIACIÓN PARA LA VIDA?

LA HIPÓTESIS más aceptada hoy en día sobre el origen de los procesos evolutivos que culminaron con la aparición del ser humano sobre la Tierra sostiene que los compuestos orgánicos más simples pudieron sintetizarse debido a la acción de diversas fuentes de energía sobre precursores inorgánicos. Experimentos realizados en los últimos 50 años han demostrado que es posible producir azúcares, aminoácidos (que constituyen las proteínas), compuestos nitrogenados y otras moléculas orgánicas a partir de sustancias inorgánicas como el metano, el amoníaco, o el agua, irradiados con luz solar intensa, descargas eléctricas, calor, radiación ultravioleta, partículas alfa, beta y gamma, o bombardeo con electrones y protones. Estos procesos pudieron haber ocurrido en las orillas arcillosas de los charcos que formaban el paisaje primitivo de nuestro planeta antes que existiera la vida. Se piensa que las moléculas orgánicas se organizaron en gotitas microscópicas y que debido a la continua exposición a la radiación natural incidente sobre la Tierra, fueron transformándose en moléculas cada vez más complejas. Estos sistemas pudieron aislarse del medio ambiente formando una membrana. Después, constituirse en precursores de las células tal como las conocemos actualmente y, por lo tanto, de la vida.

Hasta el momento, la teoría recién expresada sólo está parcialmente avalada por experimentos. Se espera que en el futuro se puedan reproducir en un laboratorio las condiciones que permitieron el desarrollo biológico sobre la Tierra y así mejorar la comprensión de estos procesos. Sin embargo, con la evidencia científica actual, sería difícil negar que nuestra existencia depende, fundamentalmente, de materia y energía originada en las estrellas. Así, la respuesta al título de este capítulo debiera ser positiva.

No obstante, deseáramos insistir en el papel que desempeña la radiación en nuestro mundo de hoy, el umbral del siglo XXI. Sin duda, el mayor efecto del uso de la radiación ha sido y es la posibilidad de obtener radiografías del cuerpo humano para realizar diagnósticos médicos. Gracias a este procedimiento, no sólo se han salvado millones de vidas humanas, sino que la esperanza de vida de toda la humanidad ha aumentado. La radioterapia constituye el tratamiento adecuado para un poco más del 50% de los pacientes con cáncer, tanto como método curativo (complementario de la cirugía o la quimioterapia), o como método paliativo que ayuda al bienestar del paciente y en algunos casos a prolongar la vida útil de enfermos con cáncer ya avanzado. Miles de enfermos han sobrevivido años que han sido de gran valor para ellos y sus familias gracias a este uso de la radiación.

Otros usos de la radiación fueron descritos en el libro. La mayoría de ellos, por ejemplo el radioinmunoanálisis o la esterilización de jeringas y algodón, nos han beneficiado directamente (en el instante de necesitar un diagnóstico específico o la simple colocación de una inyección) y lo más probable es que ni siquiera supiéramos que en el método intervino la radiación. Estas y otras aplicaciones son parte de nuestra vida actual y si prescindieramos de ellas, bajaría la calidad de vida que gozamos.

Es nuestra esperanza que el lector haya comprendido cuáles son las normas de seguridad que deben ir asociadas con una exposición a la radiación, de manera que pueda decidir si el beneficio de usarla es mayor que el riesgo. Toda actividad moderna lleva un riesgo asociado, desde salir a la calle a pie y tener que cruzar las calles, arriesgándonos a que nos atropellen, hasta tomar un avión y arriesgarnos a una caída. Cada vez que decidimos cruzar la calle o viajar en avión estamos decidiendo que el beneficio es mayor que el riesgo. Nuestra actitud frente a los usos de la radiación deberá ser similar.

En este libro hemos explicado los efectos biológicos de la radiación y hemos insistido en su probabilidad de ocurrencia. Para las dosis bajas que recibe el público, ya sea al tomarse una radiografía, al volar en jet, o al vivir cerca de una planta nucleoelectrica, la probabilidad de sufrir un efecto biológico negativo es muy pequeña si se la compara con la probabilidad de daño asociada a otras actividades de nuestra vida diaria. Por ejemplo, está demostrado que el tabaco produce cáncer pulmonar y, sin embargo, suman millones los fumadores. La probabilidad de morir a causa del tabaco es de un 30% entre los fumadores. Esto quiere decir que, de un millón de fumadores, 300 000 fallecen por enfermedades relacionadas con su hábito. Otra actividad considerada normal es viajar en automóvil. El número de víctimas de accidentes en la carretera indica que el riesgo asociado a utilizar un auto es de 2%, es decir que de cada 10 millones de automovilistas, 200 000 pierden la vida en accidentes.

En el capítulo VI, dedicado a los efectos biológicos tardíos de la radiación en el ser humano, se calculó el riesgo de cáncer para una ciudad de 16 millones de habitantes que utilizan radiación de acuerdo con los promedios

mundiales de dosis. El resultado que se obtuvo, menos de 100 casos de cáncer anuales debido a la exposición, principalmente a las radiografías, confirma que los usos comunes y corrientes de la radiación no conllevan un riesgo mayor que el de otras acciones aceptadas socialmente. El beneficio asociado a estos usos sobrepasa con creces, el riesgo.

¿Por qué entonces el temor exagerado del público a usar la radiación? Tal como se planteaba en la introducción, una causa es la pobre calidad de la información que se publica. Esto se debe a una posible ignorancia del tema por quienes efectúan los reportajes, pero también a un interés comercial por vender más. Por desgracia, el público se interesa más por conocer los desastres y las tragedias (reales o posibles) que por informarse de hechos menos espectaculares. Las noticias de caídas de avión o de dramas pasionales ocupan muchas más páginas de periódico y minutos de televisión que la información sobre asuntos de educación o de personalidades en el mundo actual. Y el tema de los peligros de la radiación es muy comercial, sobre todo debido a que el público se siente mal informado y se interesa por conocer más. En 1979 ocurrió un accidente sin que hubiera ninguna víctima debido al reactor estadounidense de la Isla de Tres Millas, y aún hoy, 10 años más tarde, por el solo hecho de tener que ver con radiación, se recuerda cada año el aniversario en los medios de comunicación del mundo entero. Otros hechos, que objetivamente han producido más daño, como la tragedia de San Juanico en que murieron cientos de mexicanos en una explosión de gas, no reciben una cobertura periodística proporcional.

La radiación ha sido siempre parte de nuestra vida, y como tal, la enseñanza de sus propiedades y del manejo cuidadoso que debe dársele debería formar parte de la educación general que recibe la población. Si así fuera, el temor infundado que se siente actualmente disminuiría y, probablemente, algunas de las situaciones accidentales debidas a la ignorancia no ocurrirían.

A pesar de que este libro está orientado hacia el análisis de los usos benéficos de la radiación, sentimos necesario expresar nuestro rechazo tajante al uso de este agente, como el de cualquier otro, para fines bélicos y destructivos. Casi un siglo de investigaciones básicas y aplicadas a cerca de la radiación nos han mostrado las posibilidades que brinda su uso responsable y controlado. Así entendida, la radiación ha colaborado en el logro de mejores condiciones de vida para toda la humanidad.



GLOSARIO

ADN (ácido desoxirribonucleico). Molécula en forma de hilos largos que constituye los cromosomas y es responsable de almacenar la información genética.

acelerador. Máquina usada para aumentar la energía cinética de las partículas cargadas, acelerándolas con campos eléctricos.

actividad. Número de desintegraciones de un material radiactivo por segundo. Se mide en Curies.

agente carcinogénico. Factor físico, químico o biológico, capaz de inducir la transformación de una célula normal en célula cancerosa.

agente mutagénico. Factor físico, químico o biológico, capaz de producir cambios en el ADN .

anticuerpo. Proteína producida por los animales en respuesta a una proteína o carbohidrato extraños al organismo, con el fin de activarlos.

anemia. Disminución de la cifra normal de glóbulos rojos o hemoglobina en la sangre.

anemia aplásica. Anemia producida por daño a la médula ósea.

átomo. La porción más pequeña de un elemento que puede existir y retener todas las características físicas y químicas del elemento. Consiste en un núcleo con carga eléctrica positiva rodeado por uno o más electrones con carga negativa.

bacteria. Microorganismo celular que se reproduce por mitosis. Algunas bacterias son causantes de enfermedades, otras son indispensables en la fijación del nitrógeno por las plantas, y otras participan en la descomposición de la materia orgánica.

blindaje. Barrera de material que permite reducir la intensidad de las radiaciones.

braquiterapia. Tratamiento terapéutico con fuentes radiactivas ubicadas a corta distancia (pocos centímetros) o insertadas dentro del tejido a irradiar.

cáncer. Crecimiento exagerado y anormal de células que pierden su función y que son capaces de invadir otros tejidos y reproducirse en ellos.

carga eléctrica. Propiedad de una partícula que le permite interactuar a través de fuerzas eléctricas. Arbitrariamente se ha asignado al electrón la carga negativa y al protón la positiva.

célula. Estructura básica que constituye a los organismos vivos. Célula reproductiva: El óvulo o el espermatozoide. Célula somática: Todas las células que no son reproductivas.

célula precursora. Células que en un tejido se encargan de formar a las restantes que integran dicho tejido.

cérvico-uterino. Referente al cuello del útero.

ciclo celular. Ciclo de cambios que ocurren durante la replicación de una célula.

citoplasma. Sustancia localizada en el interior de la membrana celular y que rodea al núcleo.

código genético. Información sobre las características de un individuo, se encuentra codificado en el ADN .

cromosoma. Estructura en forma de hilo, constituido por ADN y proteínas, contiene un conjunto de genes. El número de cromosomas es característico de la especie

cuello uterino. Parte inferior del útero.

Curie. Unidad de medición de la actividad de una muestra radiactiva. Es igual a 37 mil millones de decaimientos radiactivos por segundo.

decaimiento radiactivo. Emisión espontánea de radiación por núcleos radiactivos.

desecho radiactivo. Toda sustancia radiactiva que se produce como consecuencia de un uso de la radiación o los radioisótopos y que no es utilizada. Existen normas estrictas sobre el manejo de los desechos para evitar que contaminen el medio ambiente.

dosímetro. Instrumento que mide la dosis absorbida.

dosis absorbida. Energía depositada por la radiación ionizante en una unidad de masa en materia irradiada. Se mide en rads.

efectividad biológica. Factor de comparación entre las dosis absorbidas de radiaciones diferentes que causan un mismo efecto biológico. Vale uno para rayos X y gamma, y más de uno para otras partículas.

electrón. Partícula elemental, con carga eléctrica negativa, que es uno de los constituyentes del átomo.

elemento. Sustancia consistente en su totalidad de átomos con igual número de protones en el núcleo.

embrión. Individuo en proceso de desarrollo a partir del óvulo fertilizado y antes del nacimiento.

energía. Capacidad de efectuar un trabajo.

energía nuclear. Energía liberada durante una reacción nuclear, resulta de la transformación de parte de la masa del núcleo atómico en energía.

enzima. Proteína producida por las células, que actúa modificando la velocidad con que ocurren las reacciones químicas que se llevan a cabo en el organismo.

equivalente de dosis. Producto de la dosis absorbida (medida en rads) y el factor de efectividad biológica. Se mide en rems.

espermatozoide. Célula reproductiva masculina.

estadística. La colección y el estudio de hechos numéricos o datos y su interpretación en términos matemáticos, con referencia especial a la teoría de probabilidad.

esterilización. Procedimiento que destruye la capacidad reproductiva de un ser vivo.

fecundación. Unión de un espermatozoide con un óvulo.

fluctuación estadística. Variación en los valores observados en fenómenos que ocurren al azar.

fluorescencia. Propiedad de ciertas sustancias que primero absorben radiación de cierta energía y luego la emiten con una energía diferente.

frecuencia estadística. Número de casos que presentan una cierta característica, dentro de un número total de individuos observados. Frecuencia basal: Frecuencia estadística natural o espontánea.

gen. Parte del cromosoma que contiene la información para cierta característica hereditaria.

glóbulos blancos. Células maduras en la sangre que participan en la defensa del organismo contra la invasión de microorganismos o sustancias extrañas.

glóbulos rojos. Células maduras en la sangre que se encargan de transportar el oxígeno a los tejidos.

Gray. Unidad de dosis absorbida, igual a 100 rads.

hemofilia. Enfermedad caracterizada por la excesiva fluidez de la sangre; como ésta no coagula, el paciente puede fallecer por sangrado.

hipótesis lineal. Suposición de que la magnitud de un efecto es directamente proporcional a la magnitud de la causa.

hormonas. Sustancias específicas producidas por glándulas, secretadas a la sangre y transportadas a todo el organismo.

ICRP . Comité Internacional de Protección Radiológica.

ion. Atomo o molécula con carga eléctrica positiva o negativa.

ionización. Formación de iones a partir de átomos o moléculas, para lo cual es necesario transferir una determinada energía.

irradiar. Someter un cuerpo a algún tipo de radiación.

leucemia. Cáncer en el tejido encargado de formar la sangre.

linac. Acelerador lineal de electrones.

médula espinal. Tejido nervioso que se encuentra dentro del canal de la columna vertebral, del cual salen o entran los nervios que transmiten las distintas sensaciones (dolor, olor, frío, etc.) y las órdenes para los distintos movimientos de todo el organismo.

médula ósea. Tejido que se encuentra dentro de los huesos y que está encargado de formar la sangre.

meiosis. Proceso de división específico de las células reproductivas, consiste en dos divisiones sucesivas similares a la mitosis, pero los cromosomas se duplican sólo una vez, de tal manera que el número de cromosomas presentes en cada una de las cuatro células hijas es la mitad del presente en la célula madre.

membrana celular. Organela que envuelve a la célula.

milirad. La milésima parte de un rad.

milirem. La milésima parte de un rem.

mitocondria. Estructura celular encargada de la producción de energía.

mitosis. Proceso por el cual el núcleo de las células somáticas se divide en dos después de haber duplicado el número de cromosomas. Como resultado, las dos células hijas tienen el mismo número de cromosomas que la célula madre.

molécula. Partículas que constan de dos o más átomos del mismo o distinto elemento.

muón. Partícula elemental liviana, con una masa 207 veces la del electrón, con carga eléctrica positiva o negativa.

mutación. Cambio en la constitución química del ADN.

necrosis. Muerte de los tejidos.

neutrón. Partícula constituyente del núcleo atómico, de igual masa que el protón, sin carga eléctrica.

núcleo atómico. Parte central del átomo que contiene la mayor parte de su masa, constituida por protones y neutrones, con carga eléctrica neta positiva.

núcleo celular. Estructura central de la célula, que contiene a los cromosomas y que, por lo tanto, controla las características hereditarias de la célula y el organismo.

organelas. Estructuras que forman la célula.

organismo. Ser vivo.

órgano. Parte multicelular que constituye una unidad estructural y funcional en un ser vivo.

óvulo. Célula reproductiva femenina.

papanicolaou. Estudio microscópico y por tinciones especiales de las células desprendidas de los tejidos.

partícula alfa. Núcleo del elemento helio, formado por dos protones y dos neutrones que es emitido espontáneamente y con gran energía por algunos átomos radiactivos.

partícula beta. Electrón de gran energía emitido espontáneamente por algunos átomos radiactivos. Este electrón es creado en el núcleo durante la emisión.

PET (*positron-emission tomography*). Técnica que permite obtener imágenes de planos del cuerpo, a partir de la emisión de electrones positivos (positrones) por sustancias radiactivas inyectadas al paciente. La información contenida en estas imágenes no es solamente anatómica, sino también funcional.

placenta. Órgano que conecta al feto con el cuerpo de la madre y que tiene a su cargo la nutrición del nuevo ser.

planta nucleoelectrónica. Reactor nuclear diseñado y operado para producir energía eléctrica.

plaquetas. Células de la sangre que participan principalmente en los mecanismos de coagulación. Su participación en otros procesos, como el crecimiento tumoral, es un tema activo de investigación actual.

proteína. Compuesto orgánico que constituye los tejidos de los seres vivos.

protón. Partícula constituyente del núcleo atómico, con masa igual a 1 836 veces la masa del electrón, y con carga eléctrica positiva.

rad. Unidad de dosis absorbida, igual a 100 ergs absorbidos en un gramo de materia irradiada.

radiación. Energía en movimiento, puede consistir en ondas o partículas atómicas o nucleares.

radiación artificial. Término usado para referirse a la radiación producida por el ser humano.

radiación electromagnética. Radiación que consiste en ondas asociadas a campos eléctricos y magnéticos. Se propaga a la velocidad de la luz. Dependiendo de su energía, se le conoce como ondas de radio, televisión, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

radiación ionizante. Radiación con la capacidad de causar, directa o indirectamente, ionizaciones. Los protones, neutrones, electrones, núcleos atómicos, rayos X y rayos gamma son radiación ionizante.

radiación natural. Radiación presente en el ambiente, cuyo origen es independiente de cualquier actividad humana. También se le llama radiación de fondo.

radioactividad. Desintegración espontánea de algunos núcleos atómicos, con la emisión de partículas alfa, beta y rayos gamma.

radiobiología. Rama de la ciencia que estudia los efectos de la radiación en la materia viva.

radioisótopo. Núcleo radiactivo.

radiosensibilidad. Respuesta de un sistema biológico a los efectos de la radiación. Se expresa como la magnitud

o la rapidez de la respuesta.

rayos cósmicos. Radiación proveniente del espacio, originada en las estrellas.

rayos gamma. Radiación electromagnética de alta energía, producida espontáneamente por algunos núcleos atómicos.

rayos X. Radiación electromagnética de alta energía, invisible y muy penetrante. Su principal uso es obtener radiografías (imágenes del interior del organismo).

reacción en cadena. Serie de fisiones del núcleo atómico que se retroalimentan debido a que los neutrones de las fisiones anteriores producen, a su vez, nuevas fisiones. Se utiliza en los reactores y en las armas nucleares.

reactor nuclear. Aparato que permite aprovechar la energía almacenada en los núcleos atómicos. La fisión de estos núcleos libera energía que puede ser utilizada para generar electricidad. En este caso se trata de un reactor de potencia, conocido como planta nucleoelectrónica.

rem. Unidad de equivalente de dosis, igual al producto de la dosis absorbida (en rads) por un factor de efectividad biológica.

resonancia magnética. Técnica de diagnóstico que utiliza las propiedades del núcleo de hidrógeno en campos magnéticos para obtener imágenes del interior del organismo.

ribosoma. Estructura celular encargada de la síntesis de proteínas.

sangre periférica. La sangre que circula por los vasos sanguíneos irrigando todo el organismo.

Sievert. Unidad de equivalente de dosis, igual a 100 rems.

TAC (tomografía axial computarizada). Técnica de radiodiagnóstico que obtiene imágenes de planos transversales al eje del cuerpo del paciente. Esto se logra haciendo girar el aparato de rayos X alrededor del cuerpo, en el plano de interés. La información es transformada en imagen con la ayuda de una computadora.

tejido. Conjunto de células del mismo tipo asociadas para cumplir una función.

tomografía. Técnica en que se usan rayos X para obtener imágenes de planos distintos del cuerpo de un individuo, con fines de diagnóstico.

tumor. Crecimiento excesivo y anormal de un tejido, de carácter no inflamatorio.

ultrasonido. Sonido no audible de alta frecuencia, utilizado en varias prácticas médicas de diagnóstico. Uno de sus usos más comunes es, p.e. durante un embarazo, obtener imágenes del feto. No es radiación ionizante, por lo que el riesgo es mucho menor que una radiografía.

velocidad de la luz. Velocidad de propagación de todo tipo de radiación electromagnética. Es la máxima velocidad posible para cualquier partícula, según la teoría de la relatividad especial de Einstein. Su valor medido es de 300 mil kilómetros por segundo.

vida media. Tiempo necesario para que la mitad de los núcleos de un radioisótopo en una muestra decaigan emitiendo radiación.

virus. Microorganismo capaz de producir enfermedades. Sólo es capaz de multiplicarse en el interior de una célula viva. Debido a su tamaño reducido, los virus son visibles sólo con microscopios de gran amplificación, como el de electrones.

Início



BIBLIOGRAFÍA

Curie, Eve, *Madame Curie*, Gallimard, París, 1938.

Johns, H. E., *The Physics of Radiology*, Charles C. Thomas, Springfield, 1961.

DeRobertis, E. D. P., F. A. Saez y E. M. F. DeRobertis, hijo, *Cell Biology*, W. B. Saunders Company, Filadelfia, 1975.

ICRP (The International Commission on Radiological Protection), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP , publicación 26, Pergamon Press, Oxford, 1977.

BEIR (U. S. National Academy of Sciences Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation), *Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, Washington, 1980.

Cohen, B. L., *Before It's Too Late*, Plenum Press, Nueva York, 1983.

Ishihara, T. y M. S. Sasaki (comps.), *Radiation-induced Chromosome Damage in Man*, Alan R. Liss, Inc., Nueva York, 1983.

Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas, *Accidente por contaminación con cobalto-60*, Dirección General de Comunicación Social CNSNS , IT-001, México, 1984.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Naciones Unidas, Nueva York, 1985.

IAEA (International Atomic Energy Agency), *Bulletin*, Viena, 1985-1989.

Brandan, M. E., *La radiación*, Colección Ciencia, Secretaría de Educación Pública, México, D.F., 1986.

Rickards, J., *Las radiaciones*, Colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, D.F., 1986.

Cohen, B. L., *The Nuclear Reactor Accident at Chernobil, ussr*, Am. J. Phys. 55, 1076-1083, 1987.

Lazcano-Araujo, A., *El origen de la vida*, Trillas, México, D.F., 1988.

Menchaca, A., *El discreto encanto de las partículas elementales*, La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1988.

Inicio



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 2000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



CONTRAPORTADA

No queda claro en la mente de las personas por qué las radiaciones son, en algunos casos, benéficas y, en otros, perjudiciales. Así, la instalación de una planta nucleoelectrica puede provocar reacciones de rechazo y, sin embargo, parecen admirable una radiografía que muestra al médico la presencia de un padecimiento y, en consecuencia, la manera de tratarlo. Estas posiciones subjetivas, basadas en la mala información, movieron a un radioterapeuta, una genetista toxicóloga y una física nuclear a escribir *La radiación al servicio de la vida*, libro que ofrece una imagen interdisciplinaria con el fin de informar al día sobre la radiación, sus efectos y sus usos al servicio de la vida, los riesgos asociados y las medidas de protección.

Con el fin de ensanchar los alcances de su libro, los autores hacen un recorrido breve por la historia de cómo el hombre descubrió la radiación: el científico alemán W. K. Roentgen, en 1895, publicó el resultado de años de trabajo que lo llevaron a encontrar unos rayos misteriosos, que llamó X, y que registrados en placas fotográficas permitían ver a través de los objetos. Tal fue el principio de la radiografía, hoy tan común. Incluyen después, entre otros muchos científicos, la relación de los estudios de personajes tan notables como los esposos Curie y el físico Becquerel.

Hacen luego un resumen del nutrido arsenal de conceptos físicos necesarios para comprender fenómenos. La explicación, clara y concisa, la inician con una verdad descubierta en fecha relativamente reciente: la vida, desde que apareció en la Tierra, ha estado expuesta a la radiación, la de origen cósmico y la de los elementos radiactivos. En seguida analizan la consecuencia de la exposición a los efectos de la radiación de un organismo vivo y que se pueden manifestar a corto y largo plazo para, finalmente, analizar la curación de un cáncer por medio de la medicina nuclear. Detallan luego las normas de seguridad más comunes para afrontar los riesgos de exposición a radiaciones nocivas.

María Ester Brandan obtuvo su licenciatura en física en la Universidad de Chile y el doctorado en esa especialidad en la Universidad de Wisconsin. Es investigadora del Instituto de Física de la UNAM y miembro del SNI. Rodolfo Díaz Perches estudió medicina en la UNAM e hizo estudios de posgrado en EUA y el Reino Unido. Es radioterapeuta certificado por el Royal College of Surgeons y el Royal College of Physicians de Inglaterra, miembro de la Academia Nacional de Medicina e investigador de Proyectos Interdisciplinarios de la UNAM. Patricia Ostrosky es bióloga egresada de la UNAM, hizo su maestría en ciencias biomédicas-genética en la Universidad de Tel-Aviv y el doctorado en ciencias biomédicas-farmacología en la UNAM. Es jefa del Laboratorio de Toxicología Celular del IIB de la UNAM y miembro del SNI.

Inicio |

