

Accidentes de reactores nucleares

ROBERT C. WHITCOMB, Jr.
MICHAEL SAGE

Antecedentes y naturaleza del problema

La demanda de electricidad se ha incrementado enormemente en los Estados Unidos. La generación de electricidad de origen nuclear también se incrementó constantemente desde mediados de los años 1950. Para septiembre de 1994, los Estados Unidos tenían 109 reactores nucleares que producían cerca de 21% de su energía eléctrica, comparados con 56 unidades en Francia que producían cerca de 77% de la energía (1).

A medida que se ha expandido el uso de la energía nuclear, el potencial de accidentes en los reactores se ha incrementado. Tres accidentes han causado exposiciones públicas mensurables: Windscale en 1957, Three Mile Island (TMI) en 1979 y Chernobyl en 1986.

Alcance e importancia relativa del problema

La producción de energía nuclear en tan sólo un paso en el ciclo del combustible nuclear. Ese ciclo incluye la minería y la laminación de los yacimientos de uranio, su conversión a una forma química utilizable, el enriquecimiento del contenido isotópico del uranio 235, la fabricación de elementos combustibles, la producción de energía en los reactores, el reciclaje del combustible irradiado (un proceso que ha cesado indefinidamente en los Estados Unidos), el transporte de materiales a lo largo del ciclo,

el reacondicionamiento de las instalaciones y de los equipos y, finalmente, la disposición de desechos radioactivos. En cada paso existe el potencial de la ocurrencia de accidentes (2).

Un accidente puede terminar en exposiciones a corto (agudas) y a largo (crónicas) plazo. Las dosis reales o potenciales para las personas expuestas varían de instalación a instalación y de uno a otro lugar. Generalmente, la dosis decrece rápidamente con la distancia de la fuente. En la mayoría de casos, el interés primario en salud es el mayor riesgo de cáncer a largo plazo. La protección del público ante los accidentes nucleares comienza con el diseño y la ubicación de las instalaciones nucleares e incluye la planificación de la respuesta a la emergencia y la preparación.

Factores que afectan la ocurrencia y la severidad del problema

Características de los reactores nucleares

En cualquier proceso industrial complejo, se deben anticipar los accidentes. Quienes planifican o responden a los accidentes potenciales deben tener un amplio entendimiento del modelo y de las características operacionales de esos reactores. Se debe enfatizar que cada modelo de reactor debe ser evaluado individualmente. Por ejemplo, el reactor de Chernobyl debe ser evaluado de un modo diferente que los reactores en los Estados Unidos, ya que éste no tiene el contenido de concreto de los reactores comerciales en este país. El presente capítulo se ocupa de abordar los diseños típicos de los reactores estadounidenses.

Un reactor nuclear tiene características únicas que implican problemas especiales para quienes planifican y responden a las emergencias. En un típico receptáculo o centro del reactor, los núcleos de uranio son bombardeados por neutrones y se libera la energía térmica. Se crean dos o más átomos pequeños de la fisión de cada uno de los núcleos de uranio. Muchos de esos átomos nuevos son radiactivos. El centro se realimenta a medida que disminuyen esos 'productos de la fisión' y los radionúclidos producidos. El proceso de fisión y el descenso de los productos genera calor, el cual es removido por un sistema de enfriamiento (usualmente agua) por conversión en vapor y, finalmente, en electricidad.

Hay tres barreras principales para prevenir la liberación de los productos de la fisión. La primera barrera es el revestimiento metálico. Las píldoras de combustible de uranio se ubican dentro de este revestimiento y se acomodan en patrones específicos en el centro. Durante la operación normal, los productos de la fisión son atrapados dentro de los cilindros de combustible, pero, si se acumula demasiado calor en el centro, el revestimiento metálico del combustible se puede romper o fisurar y se liberan productos de fisión como gases nobles, yodo y cesio radiactivos. La segunda barrera es el sistema de enfriamiento del reactor. Esta incluye la tubería, las bombas y las

válvulas que suministran agua fría al centro y remueven el calor generado en su interior. Las roturas o fisuras en este sistema pueden resultar en escape de gases y de líquidos. La tercera barrera es el edificio de contención. Esta estructura de concreto alrededor del centro brinda contención física de los productos de fisión con las características de una caja mecánica de seguridad, incluyendo los sistemas de filtración y enfriamiento. Está diseñada para resistir accidentes en la planta y desastres naturales como terremotos, tormentas y colisiones de avión. La ruptura de esta barrera es indicativa de un gran accidente.

Además de estas barreras, existen otros sistemas de seguridad que también están diseñados para evitar una liberación de material radiactivo en el ambiente. Por ejemplo, los filtros y otros medios de absorción pueden atrapar la mayoría de las grandes partículas y de los compuestos reactivos antes de que lleguen al medio ambiente. Los aerosoles de contención pueden reducir el escape de los productos de la fisión. Sin embargo, puede ocurrir una liberación al ambiente si se dañan los sistemas de seguridad o la construcción de contención por fallas mecánicas, errores humanos o desastres naturales como un terremoto.

El ciclo del combustible nuclear

Pueden ocurrir accidentes en cualquier paso del ciclo del combustible nuclear, no sólo durante la operación del reactor. El uranio primero debe ser transformado en una pasta amarilla, una combinación de todos los isótopos de uranio. Dado que solamente unos isótopos de uranio pueden ser fisionados en un reactor convencional, la pasta amarilla se procesa químicamente y se convierte en un proceso gaseoso para su enriquecimiento. Los isótopos fisionados son entonces separados y concentrados en un óxido sólido de uranio. Este es transformado en píldoras en una instalación de fabricación de combustible y llevado en cilindros apropiados. Un reactor típico debe ser reabastecido cada 18 meses. El asunto de cómo disponer permanentemente de los desechos aún no ha sido resuelto; los cilindros de combustible gastado se almacenan con sistemas de enfriamiento para prevenir la acumulación de calor de los productos de la fisión. El movimiento de los cilindros dentro y fuera del centro (o en las instalaciones de almacenamiento) también implica riesgo de accidentes que podrían causar la liberación de los productos de la fisión.

El procesamiento del uranio involucra una variedad de productos químicos peligrosos, los cuales pueden ser liberados durante un accidente. Por ejemplo, el accidente de diciembre de 1985 en una instalación de conversión de uranio en Gore, Oklahoma, produjo una nube de ácido fluohídrico. Un trabajador murió y otros fueron hospitalizados por los efectos agudos de este vapor (3). Productos químicos como estos podrían ser liberados en los sistemas de agua para consumo o en la atmósfera durante un incendio u otro accidente. Una lista parcial de los productos químicos utilizados en los reactores y sus potenciales efectos en la salud, se muestran en la tabla 19.1.

Tabla 19.1 Químicos utilizados en las plantas nucleares.

Químico	Efectos en salud
Acido sulfúrico	Irritación de los ojos, nariz, garganta, tracto respiratorio y piel; puede causar edema pulmonar, bronquitis, enfisema, conjuntivitis, estomatitis, erosión dental, traqueobronquitis, quemaduras de los ojos y la piel, y dermatitis
Cloro	Irritación de los ojos, piel, nariz y boca; puede causar lagrimeo, rinorrea, tos, atragantamiento, dolor subesternal, náusea, vómito, cefalea, mareos, síncope, edema pulmonar, neumonía, hipoxemia, dermatitis y quemaduras de piel y ojos.
Amonio	Irritación de los ojos, nariz, garganta; puede causar disnea, broncoespasmo, dolor de pecho, edema pulmonar, esputo espumoso rosado, quemaduras de piel y formación de vesículas.
Hidróxido de sodio	Irritación de la nariz; puede causar neumonitis, quemaduras de los ojos y la piel y pérdida temporal del cabello.
Hidracina	Irritación de los ojos, nariz, garganta; puede causar ceguera temporal, mareos, náusea, dermatitis y quemaduras de piel y ojos. También es un carcinógeno animal.

Fuentes: U.S. Department of Transportation. *1990 emergency reponse guidebook. Guidebook for first response to hazardous materials incidents.* Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation; 1990; U.S. Department of Health and Human Services, National Instituts of Occupational Safety and Health (NIOSH). *Pocket guide to chemical hazards.* Washington, D.C.: Department of Health and Human Services; 1990.

Impacto en salud pública: perspectiva histórica

Muchos accidentes de reactores nucleares en los Estados Unidos han involucrado reactores experimentales o en prueba. Cuatro de esos accidentes no causaron liberación de material radiactivo al ambiente, a pesar del daño central. Esos accidentes ocurrieron en el reactor de Chalk River, el *Idaho Experimental Breeder*, el *Westinghouse Test Reactor* y el *Detroit Edison's Fermi Reactor* (generador). Cantidades significativas de yodo radiactivo fueron liberadas en accidentes de reactores en dos instalaciones, una en los Estados Unidos y otra en Inglaterra. De éstos, el Windscale de Inglaterra y el SL-1 de los Estados Unidos, no tenían edificación contenedora y no eran de uso comercial o para producción de energía.

Dos accidentes significativos han ocurrido en reactores comerciales. El de Three Mile Island, Pensilvania, resultó en un daño serio de su centro y la liberación de gases nobles y yodo radiactivos. El más reciente accidente de Chernobyl en Ucrania (antigua Unión Soviética) fue el incidente más serio que se ha registrado en cualquier instalación de energía nuclear. Produjo daño masivo del centro y dejó escapar millones de curfes de productos de fisión al ambiente. La tabla 19.2 presenta un resumen de tales accidentes

Chernobyl, Ucrania

Ocurrió el 26 de abril de 1986. Causó gran contaminación en el área local, amplia dispersión y depósito de material radioactivo en toda Europa y en el hemisferio norte.

Tabla 19.2 Incidentes que involucraron daño central de los reactores nucleares.

Descripción del incidente	Sitio	Fecha	Dosis colectiva efectiva (Sv persona)*	
Daño menor del centro (sin liberación de material radiológico)	Río Chalk	1952	NA ⁺	
	Breeder Reactor, Idaho	1955	NA	
	Westinghouse, reactor de prueba	1960	NA	
	Detroit Edison Fermi	1966	NA	
Daño importante del centro (liberación de yodo radiactivo)	No comercial	Windscale, Inglaterra	1957	2.000
	Comercial	Three Mile Island, Pennsylvania	1979	40
		Chernobyl, Ucrania	1986	600.000
	Otros incidentes (liberación de productos de fisión)	Kyshtym, Chelyabinsk, Rusia	1957	2.500

*Fuente: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly. New York: United Nations; 1993. (5)

⁺ No aplica; sin liberación al ambiente.

Un estimado de 50 millones de curies de material radiactivo se liberaron al medio ambiente. Doce millones de curies (cerca del 25% del total) se liberaron el primer día del accidente. En los siguientes 9 días, otros 38 millones escaparon del abrazador centro de grafito (4).

Este era uno de los muchos reactores moderados por grafito y enfriados por agua que producían electricidad en la antigua Unión Soviética (5). Las especificaciones de la construcción de este reactor son las de los reactores rusos moderados por grafito y la causa básica del accidente fue un error humano. Durante una prueba de bajo poder, los operadores apagaron los sistemas críticos de seguridad. Las inestabilidades en el reactor causaron explosiones e incendio que dañaron el reactor y liberaron el contenido central. El fuego y la liberación terminaron 10 días después del accidente.

La precipitación radiactiva se extendió sobre gran parte de Europa y el hemisferio norte. La lluvia causó grandes variaciones en la acumulación de los radionúclidos, lo cual produjo manchas calientes localizadas. Las exposiciones a largo plazo continuaron como resultado del consumo de alimentos sembrados sobre el suelo contaminado y la irradiación directa desde los radionúclidos depositados.

La evacuación de la población general comenzó en la mañana del 27 de abril. La evacuación de la zona de exclusión de 30 kilómetros se completó el 6 de mayo. Cerca de 115.000 personas fueron eventualmente evacuadas de las áreas afectadas (5). La zona permanece evacuada hoy, aunque se ha permitido que algunas personas regresen a sus hogares en las áreas menos contaminadas y otras han ingresado a la zona de exclusión a pesar de los esfuerzos del gobierno por impedirlo.

Otras acciones protectoras se adelantaron después del accidente. Para reducir la cantidad de acumulación de yodo radiactivo en la glándula tiroides, las autoridades de salud distribuyeron potasio yodado a la población el 26 de abril y varios días después. Esta profilaxis se dio a 5,4 millones de personas en la antigua Unión Soviética, incluyendo 1,7 millones de niños. Miles de vacas y otro ganado fueron removidos de las áreas contaminadas. Las autoridades también emprendieron acciones para prevenir o reducir la contaminación del agua, la propiedad, los alimentos y la tierra.

Treinta muertes ocurrieron a los 3 meses del accidente. La explosión inicial mató 2 trabajadores. Cerca de 145 bomberos y trabajadores de emergencia sufrieron radiación aguda y 28 murieron en los 3 meses posteriores (4).

La dosis colectiva estimada efectiva (estimada para una referencia individual multiplicada por el número de personas potencialmente expuestas en la población) del evento en Chernobyl fue aproximadamente de 600.000 sieverts persona (el sieverts, Sv, es una unidad especial para expresar la cantidad de dosis. Se discute más adelante). De esta cantidad, el 40% se recibió en la antigua Unión Soviética, el 57% en el resto de Europa y el 3% en otros países del hemisferio norte (5).

Three Mile Island, Pensilvania

El 28 de marzo de 1978, una serie de fallas mecánicas y errores humanos llevó a la pérdida de refrigerante en el reactor Unidad 2, lo cual permitió el recalentamiento del centro. Durante el accidente, se liberaron grandes cantidades de material radiactivo en el contenedor, pero relativamente poca al ambiente. Los radionúclidos volátiles escaparon al sistema de ventilación pero únicamente después de pasar a través del sistema de filtración que removió los compuestos químicamente activos, incluyendo la mayor parte del yodo. El principal radionúclido liberado fue xenón y pequeñas cantidades de yodo.

La dosis efectiva colectiva estimada fue aproximadamente de 40 Sv persona. Las dosis individuales promediaron los 15 mSv a 80 km de la planta. La máxima dosis efectiva que cualquier miembro del público pudo haber recibido se estimó en 850 mSv.

Windscale, Inglaterra

Cuando el Reino Unido comenzó la producción de armas nucleares, los reactores de plutonio se construyeron en el sitio llamado Windscale, sobre la costa noroeste de Inglaterra. En 1957, un incendio en un reactor liberó una cantidad importante de productos de fisión. Dado que se liberó yodo radiactivo, se tomaron acciones protectoras para la leche. Otros productos alimenticios y el agua no requirieron acciones protectoras. La ingestión de yodo con la leche se consideró como la forma más probable de exposición.

La dosis efectiva colectiva estimada recibida en el Reino Unido y en Europa para todos los radionúclidos fue de aproximadamente 2.000 Sv persona. De esta cantidad, 900 Sv persona se debieron a inhalación, 800 a ingestión de leche y otros alimentos y 300 a exposiciones externas a radionúclidos depositados sobre el terreno (5).

Kyshtym, Chelyabinsk, Rusia

El 29 de septiembre de 1957, un accidente mayor ocurrió en una instalación de reprocesamiento en la antigua Unión Soviética. Aunque este accidente no ocurrió en una planta nuclear, los resultados son típicos de lo que se podría esperar de un accidente catastrófico. El evento ocurrió como resultado de la falla de un equipo de monitorización del proceso, el cual llevó a la pérdida de refrigeración en un tanque de almacenamiento de desechos. La explosión y el fuego liberaron cerca de 1 Ebq de materiales radiactivos, 90% de los cuales se depositaron localmente y el resto (cerca de 100 PBq) se dispersaron lejos del sitio de la explosión. El becquerel, Bq, es la unidad de actividad expresada en desintegraciones por segundo. El prefijo E es un multiplicador de 10^{18} y el prefijo P uno de 10^{15} . La nube radiactiva alcanzó una altura de 1 km, aproximadamente, y la precipitación radiactiva se extendió a una distancia de 300 km desde el sitio del accidente.

La dosis efectiva colectiva estimada recibida por la población evacuada fue de 1.300 Sv persona, aproximadamente. La recibida por la población no evacuada fue de 1.200 Sv persona (5).

Factores que influyen en la morbilidad y la mortalidad

Rutas de exposición

Una nube atmosférica de material radiactivo transportado por el aire desde una planta es la principal fuente de exposición pública durante los estados iniciales de los accidentes en reactores nucleares. La exposición puede incluir una dosis externa recibida mientras se está inmerso en la nube y una dosis interna por inhalación de gases o partículas. La nube está compuesta de mezclas variables de gases nobles (kriptón, xenón), yodo y partículas materiales. El período de liberación puede ser corto (pocas horas) o durar varios días.

Si la liberación original contiene primariamente gases radiactivos inertes, la contaminación superficial y el potencial para exposición a largo plazo son pequeños. Sin embargo, si se liberan grandes cantidades de partículas de la planta, la contaminación superficial y la exposición a largo plazo serán importantes. Mucho tiempo después de la liberación inicial, la exposición pública a los radionúclidos depositados sobre la tierra, carros, viviendas, maquinaria, alimentos de cosecha o agua pueden continuar tanto por radiación externa directa como por ingestión. Los radionúclidos pueden ingerirse directamente con el agua, las frutas y los vegetales contaminados por los materiales radioactivos. Los alimentos de cosecha también absorberán y asimilarán radionúclidos del suelo y la contaminación a largo plazo de las frutas, los vegetales o los animales puede ser de interés en salud. Además, las vías indirectas se pueden desarrollar a través de la cadena alimentaria, como sucede con la leche o con la carne de vacas que ingirieron pasto, alimentos o agua contaminada con radionúclidos. Los radionúclidos más comunes por esta vía son el yodo, el estroncio y el cesio.

Potenciales efectos en la salud

Los principales efectos adversos pueden ser causados por lesión directa (accidentes de transporte ocurridos durante una evacuación), por estrés en el momento del accidente (infarto de miocardio, daño psicológico) o por exposición a materiales radiactivos o químicos liberados durante el accidente. Se consideran aquí solamente las exposiciones a radiación que tienen efectos adversos.

Un accidente radiológico puede resultar en exposiciones a corto y largo plazo. La dosis para las personas expuestas varía según las instalaciones y las localidades. Generalmente, la dosis disminuye rápidamente de acuerdo con la distancia de la fuente. El interés primario en la salud es el riesgo de la aparición de cáncer.

El efecto biológico de la exposición depende de la dosis absorbida, el tipo de radiación, la tasa de exposición, la superficie corporal expuesta y de los órganos expuestos (por ejemplo, glándula tiroides). Dado que el material genético es particularmente sensible a la radiación, los tejidos que se dividen rápidamente (por ejemplo, los que forman la sangre, las células de las mucosas intestinales) son más sensibles al daño que las que lo hacen más lentamente (por ejemplo, células musculares, sistema nervioso).

La exposición de una parte del cuerpo, como una extremidad o un sólo órgano, es menos dañina que la de todo el organismo con la misma dosis. La tasa de dosis también tiene una influencia significativa en la respuesta biológica. Debido a los mecanismos reparadores del cuerpo, los efectos de una dosis de 5 Sv en forma instantánea son muy diferentes de aquéllos ocasionados por la misma dosis en un mes o más. Los efectos adversos se incrementan con la combinación de la dosis total, la proporción expuesta del cuerpo y la tasa de dosis.

Dosis

La radiación es energía emitida por materiales radiactivos como ondas o partículas. Los tres tipos de radiación son alfa, beta y gamma. Las dos primeras son partículas liberadas de los núcleos de un átomo. Los rayos gamma son ondas electromagnéticas con energía similar a la de los rayos X.

La dosis absorbida es la cantidad de energía depositada en el cuerpo durante un exposición a la radiación. La dosis absorbida se mide en julios por kilogramo (J/kg). La unidad que expresa esta cantidad es el gray (Gy). Un gray es igual a 1 J/kg (6).

Dado que los diferentes tipos de radiación producen diferentes daños titulares a la misma dosis absorbida, ésta a menudo se multiplica por un factor balanceado de radiación, para dar una dosis equivalente. La unidad especial para expresar esta cantidad es el sievert (Sv) (7).

Otra medida, la dosis efectiva, es usada ya que una dosis de radiación particular a una parte del cuerpo no produce el mismo impacto potencial en la salud que la misma dosis en otra parte de la economía. Por ejemplo, cuando el yodo radiactivo es tomado internamente, se concentra selectivamente en la glándula tiroides. Cuando decae, la mayoría de su energía se deposita en la tiroides. Para calcular el efecto que la dosis

recibida por la tiroides tiene sobre todo el cuerpo (es decir, la dosis efectiva), uno debe multiplicar la dosis tiroidea por un factor tisular balanceado.

Cuando grandes poblaciones o grupos de población están expuestos, se emplea una unidad de dosis colectiva efectiva (Sv persona). Esta representa la dosis efectiva estimada para un individuo de referencia en la población, multiplicado por el número de personas potencialmente expuestas.

Efectos agudos

La dosis aguda resulta de una exposición instantánea o de corto plazo (menos de unos pocos días) a la radiación o a los materiales radiactivos. Después de una dosis corporal total de menos de 1 Sv, un individuo puede no presentar síntomas pero puede presentar aberraciones cromosómicas en los linfocitos sanguíneos y menor recuento celular. Una dosis mayor puede producir el síndrome de radiación aguda, una condición con síntomas dependientes de la dosis. Las dosis agudas en todo el cuerpo, mayores de 1 Sv pueden causar vómito, hemorragia y un mayor riesgo de infección debido al recuento reducido de células blancas. El tratamiento puede incluir antibióticos, transfusiones y, posiblemente, trasplante de médula ósea. Las dosis agudas en todo el cuerpo, mayores de 10 Sv, comprometen el sistema gastrointestinal, causando diarrea y desequilibrio electrolítico y pueden afectar el sistema nervioso central causando convulsiones, trastornos de la marcha y coma. El 99% de las personas expuestas a tales dosis morirá. Afortunadamente, en tiempos de paz, esas dosis de radiación en todo el cuerpo son muy raras.

Efectos crónicos

Las dosis crónicas resultan de exposiciones a largo plazo (varios días, años o toda la vida) a la radiación o a los materiales radiactivos depositados en el ambiente o internamente en el cuerpo. El aspecto más apremiante en salud, asociado con los accidentes con reactores nucleares, son los efectos tardíos de la exposición a largo plazo a bajos niveles de radiación (8). Se han recopilado datos sobre los efectos biológicos de la radiación de estudios en animales y en humanos expuestos a irradiación diagnóstica, terapéutica u ocupacional y en guerras. Entre los expuestos se incluyen los niños *in utero* durante la toma de radiografías, las personas en tratamiento para espondilitis anquilosante, los mineros de uranio y los sobrevivientes de los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki durante la segunda guerra mundial. Los estudios muestran evidencia de 3 tipos de efectos tardíos: somáticos en las personas expuestas, teratogénicos sobre el feto expuesto *in utero* y genéticos sobre la descendencia de la persona expuesta.

Factores de riesgo y efectos en la salud

Los factores de riesgo para los expuestos durante una liberación de radiación son numerosos. Obviamente, si ocurre un accidente, quienes viven cerca de una planta

nuclear o con el viento a favor aumentan la probabilidad de exposición. Las personas como granjeros o trabajadores de la construcción, que trabajan a cielo abierto, también tienen mayor riesgo pues les toma más tiempo el retorno a casa para buscar refugio o para evacuar. Para alertar a estas personas en caso de un accidente, las autoridades de emergencia deben utilizar sirenas o alarmas por radio o televisión. Además, se deben desarrollar sistemas para alertar a quienes no oyen. Las personas que tienen dificultades para la evacuación también se encuentran en riesgo. Por ejemplo, las personas con limitaciones físicas, los pacientes de hospitales y ancianatos y los prisioneros requieren ayuda especial y mayor tiempo para su evacuación. En las áreas alrededor de las instalaciones nucleares, quienes necesiten asistencia deben estar plenamente identificados en el plan local de emergencia. Los planes deben incluir alertas en las escuelas locales, los hospitales y las prisiones. Entre los grupos de población más sensibles a esta exposición, están los niños y los fetos, que requieren consideraciones adicionales cuando se implementen las acciones de protección. Por ejemplo, los niños y las mujeres embarazadas deben ser evacuados antes que el resto de la población o a niveles menores de dosis esperadas. El desarrollo de planes de respuesta ante la emergencia en condados y estados puede reducir el riesgo adicional de aquellos grupos especiales. Muchos factores de riesgo para las exposiciones ambientales a largo plazo después de que ha pasado la nube son idénticos a los factores que pueden incrementar la exposición durante una liberación radiactiva. Los niños y los fetos son más sensibles a la radiación que los adultos. Los niños son más vulnerables a la exposición por radionúclidos en la leche, por consumirla más que los adultos. Es posible que la gente que vive en las áreas rurales y las de bajo nivel socioeconómico coman más frutas y vegetales cosechados localmente y que estén en mayor riesgo de ingerir contaminantes de esas fuentes. Una población que use aguas superficiales (de reservorios o ríos) puede recibir exposición adicional al beber agua contaminada de corrientes o por acumulación directa desde la nube.

El principal efecto somático de la exposición a radiación es el cáncer, en especial leucemia, cáncer de tiroides, de seno y pulmonar. De acuerdo con los estimativos actuales del riesgo de los niveles bajos de radiación para el público, una dosis de 1 Sv en todo el cuerpo incrementa un riesgo individual de cáncer fatal durante su vida en 5%, uno de cáncer no fatal en 1% y uno de severos efectos genéticos en 1,3%. Para algunos expuestos a 1 Sv, el incremento total del riesgo es entonces de 7,3% (7,9).

El principal efecto teratogénico descrito en los estudios de sobrevivientes de los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki ha sido el retardo mental y el reducido tamaño de la cabeza, especialmente entre quienes se expusieron *in utero* entre 8 y 15 semanas luego de la concepción.

Después de las doce semanas de gestación, la exposición materna a cantidades importantes de yodo radiactivo puede destruir la glándula tiroides del feto.

Los efectos genéticos entre la descendencia de la población expuesta pueden incluir mutaciones y aberraciones cromosómicas. Esos cambios pueden ser transmitidos y manifestarse como desórdenes en la descendencia. La radiación no ha demostrado

causar tales efectos en humanos pero los estudios experimentales en plantas y animales sugieren que tales efectos son posibles.

Ninguno de esos riesgos estimados para exposiciones de bajo nivel son precisos, puesto que son extrapolaciones de los riesgos asociados con exposiciones relativamente altas. El riesgo exacto a bajos niveles no se conoce. Como sea, dado que la interacción de la radiación con los tejidos humanos es peligrosa aún a bajos niveles, las exposiciones más allá de la radiación natural deben reducirse.

Implicaciones en salud pública y estrategias de prevención

Exposiciones agudas

Si a pesar de las precauciones para prevenir la exposición, algunas personas se exponen a fuentes externas o internas de radiación luego de un accidente en una planta nuclear, mucha de esa morbilidad y mortalidad todavía se puede evitar. Para las exposiciones agudas, la prestación de primeros auxilios para prevenir el choque por trauma o para mantener la respiración, tienen alta prioridad. Las personas expuestas externa o internamente pueden requerir tratamiento sintomático en un hospital especializado si su dosis en todo el cuerpo es >50 rem (los Estados Unidos continúan usando las unidades tradicionales de dosis aunque se está promoviendo el uso del sistema internacional: $100 \text{ rem}=1 \text{ Sv}$). Sin embargo, las personas cuya piel y ropas se han contaminado con material radiactivo pueden también poner en riesgo al personal hospitalario y a otros pacientes. Entonces, esas personas deben asistir en primer lugar a procedimientos de descontaminación tanto para prevenir los efectos adversos en su salud como en la de otras personas. El tratamiento de las lesiones por radiación depende del grado de exposición y si ésta es interna o externa. Es en extremo improbable que un paciente vivo esté tan contaminado como para poner en riesgo de radiación aguda al personal médico o de rescate. Por tanto, para cualquier víctima de radiación agudamente expuesto, las prioridades usuales del cuidado en urgencias (salvar la vida y prevenir lesiones adicionales) son la descontaminación del paciente y minimizar la exposición del personal que lo atiende.

Establecer el nivel de exposición individual clínicamente es generalmente más preciso que hacerlo con la exposición de la población general. Las lecturas de dosímetros personales, las mediciones de radiactividad en y sobre el cuerpo y el establecimiento clínico de los síntomas y signos y el recuento de células blancas en sangre, pueden evidenciar el nivel de exposición. Para la población general, las exposiciones se pueden estimar de los niveles de radiación medidos por los detectores alrededor de la planta y por factores como la distancia y la dirección de las personas desde la planta, y el tiempo que les toma llegar a diferentes localidades expuestas. El análisis de las muestras biológicas y de los contadores de radiación en todo el cuerpo se pueden usar para detectar niveles internos de radionúclidos. Aunque los estudios de aberraciones

cromosómicas en linfocitos sanguíneos puede detectar exposiciones tan bajas como 10 rem pocas horas después del accidente, los exámenes médicos y el tratamiento deben estar confinados a las personas que están altamente expuestas o contaminadas, o a quienes hayan ingerido o inhalado grandes cantidades de material radiactivo.

Exposiciones crónicas

Para las exposiciones crónicas de bajo nivel, tanto internas como externas, no está claro si el seguimiento a largo plazo y su monitorización puedan reducir la morbilidad y la mortalidad subsecuentes. Sin embargo, la evaluación clínica debe ser continua, especialmente para las personas que hayan ingerido o inhalado materiales radiactivos. Este seguimiento es esencial con el fin de establecer la asimilación del material y su eliminación y para dar un mejor estimativo de la dosis total. Los estudios epidemiológicos basados en los registros de personas expuestas pueden dar más información sobre los efectos de la radiación de bajo nivel, aunque el bajo poder estadístico puede hacer difícil su interpretación (8).

Medidas de prevención y control

Factores del diseño y la ubicación

La prevención de un accidente en un reactor nuclear debe ser una prioridad durante los estadios iniciales del diseño de la planta. Uno de los factores más importantes de seguridad es la elección del lugar, el cual debe tomar en cuenta las consideraciones geográficas y meteorológicas. No se debe elegir uno con alta actividad sísmica aunque es imposible conseguir uno sin historia de vibraciones. La probabilidad de terremotos para una zona general, se puede estimar según la actividad sísmica en el pasado y la localización de las fallas. Tampoco debe quedar sobre planicies inundables o en áreas propensas a huracanes o tornados. Los potenciales efectos adversos en salud de una liberación se pueden limitar localizando la planta en un lugar con baja densidad de población y estableciendo una zona inhabitada alrededor de la planta que actúe como barrera entre el reactor y la población.

Después de elegir el lugar, la planta debe estar diseñada de acuerdo con las condiciones del lugar. Las características especiales de la construcción pueden incrementar la seguridad de la planta. De ahí que, en áreas en las cuales los tornados o los terremotos pueden ocurrir, se deben construir plantas altamente resistentes a los vientos y al impacto de los escombros lanzados; donde pueden ocurrir sismos, las plantas deben resistir las vibraciones de los temblores menores.

Factores relativos a la operación de la planta

Aunque muchos de los sistemas de seguridad de las plantas nucleares son computarizados, los operadores son esenciales para el funcionamiento seguro de la

planta. Para disminuir la probabilidad de un error humano, el personal es entrenado para responder a condiciones inusuales y se asignan responsabilidades específicas durante un accidente. Sin embargo, la fatiga por los cambios rotativos, el aburrimiento y el entrenamiento o la supervisión inadecuados, pueden llevar a la comisión de un serio error humano. De hecho, todos los accidentes radiológicos pueden ser parcialmente atribuidos a errores humanos. Para evitar el sabotaje deliberado, el personal de planta puede usar sistemas de seguridad que no permitan permanecer en el lugar al personal no autorizado y limiten el acceso a las áreas sensibles de la planta.

Desde luego, las autoridades elegidas y los trabajadores de emergencia como los bomberos y policías deben también aprender a ayudar en las actividades de evacuación y en su propia protección de los peligros de la radiación y la de otros. Los planes federales y estatales de respuesta a la emergencia proveen un programa a las agencias para su uso y ayudarlas a reducir los posibles errores del discernimiento humano durante un accidente.

Vigilancia de accidentes

La *Nuclear Regulatory Commission*, NRC (*Comisión Reguladora Nuclear*) y la *Federal Emergency Management Agency*, FEMA (*Agencia Federal de Manejo de Emergencias*) han establecido un sistema para la identificación de sucesos inusuales en las instalaciones nucleares. El operador de una instalación nuclear debe notificar al CRN los cambios en el estado normal de la planta para que las autoridades puedan prepararse para responder a cualquier liberación. Un sistema de clasificación en línea, basado en cuatro niveles de acción en emergencia define la severidad del estado de un accidente en un reactor y el potencial para una liberación. La investigación de reportes de sucesos inusuales puede aclarar los tipos de accidentes que ocurren en una instalación nuclear. Otros operadores de la planta de energía nuclear son notificados de los resultados de esas investigaciones con el fin de que puedan evaluar la seguridad de sus propios procedimientos y evitar accidentes similares. Los niveles de acción en emergencia definidos por el CRN se describen en la tabla 19.3.

Planeación de la respuesta de emergencia

Desde el accidente de Three Mile Island en 1979, la FEMA ha desarrollado un plan de contingencia nacional, el plan federal de respuesta a emergencias radiológicas (*Federal Radiological Emergency Response Plan*, FRERP), para coordinar la respuesta federal a las emergencias radiológicas en tiempos de paz (10). El FRERP describe el concepto del gobierno federal de operaciones para responder a estas emergencias, subraya las políticas federales y los supuestos que sustentan este concepto de operaciones, sobre los cuales los planes de respuesta de la agencia federal están basados, y especifica las autoridades y responsabilidades de cada agencia que tenga un papel en el manejo de tales emergencias.

Las agencias federales individuales (por ejemplo, *Centers for Disease Control and Prevention*, CDC) han desarrollado planes más específicos aplicables a sus propias

Tabla 19.3 Niveles de acción en emergencia definidos por la *Nuclear Regulatory Commission* (Comisión Reguladora Nuclear).

Nivel de acción en emergencia	Estado de la planta
Notificación de un evento inusual	Potencial deterioro del nivel normal de la seguridad de la planta sin liberación de radiactividad que requiera respuesta fuera del lugar
Alerta	Deterioro real o potencial de la seguridad de la planta a un nivel importante; se espera que cualquier liberación potencial esté por debajo de los niveles establecidos para la acción de emergencia.
Emergencia en el sitio	Falla real o probable de los sistemas de seguridad que normalmente dan protección al público; se espera que la liberación potencial no exceda los niveles de acción establecidos, excepto en las áreas cercanas a los límites de la planta.
Emergencia general	Deterioro o fundición real o inminente del centro con un potencial para la pérdida de la integridad de la contención; se espera que la liberación potencial exceda los niveles de acción establecidos.

Fuente: U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Response technical manual*. RTM-92, vol. 1, rev.2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Division of Operational Assessment, Office for Analysis and Evaluation of Operational Data; 1992. (17)

capacidades y responsabilidades (11,12). Todos los lugares que cuentan con plantas de energía nuclear en operación tienen planes de emergencia locales y estatales, pero no todos han sido aprobados por la FEMA. La Oficina General de Contabilidad ha notificado al Congreso de los Estados Unidos acerca de las ‘acciones adicionales necesarias para mejorar la preparación de emergencia alrededor de las plantas de energía nuclear’, especialmente la necesidad de un control y una coordinación más centralizados en la agencia federal (13).

Los países vecinos han comenzado a desarrollar planes que establecen esfuerzos cooperativos y respuestas ante los potenciales accidentes con efectos fuera de las fronteras. Uno de esos planes se desarrolla entre los Estados Unidos y Canadá (14).

La FEMA regularmente conduce ‘ensayos’ y ejercicios de campo para probar los planes federales de respuesta a las emergencias radiológicas. Todas las agencias con responsabilidad primaria participan en esos ejercicios para poner a prueba su propia destreza y refinar el plan de respuesta federal. Las autoridades locales y del estado también participan en ellos para desarrollar formas de interacción entre los diferentes niveles. Sin embargo, los ejercicios no pueden probar totalmente un plan de emergencia ni pueden anticipar totalmente los asuntos políticos, económicos y sociales que influyen en las recomendaciones en salud pública durante una emergencia.

Reducción de las exposiciones lejos del accidente de un reactor nuclear

La *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos ha elaborado guías para las acciones de protección donde se encuentran los niveles en los cuales

las acciones son tomadas con el fin de reducir la dosis potencial de radiación al público. No se trata de dosis actuales sino proyectadas o estimadas que se recibirían si no se actúa.

Las acciones para reducir o eliminar la exposición del público luego de un accidente en una planta nuclear se debe basar en la posibilidad de que un problema potencialmente serio se esté desarrollando y pueda continuar muchos años luego de la liberación real de material radiactivo. Los planes de respuesta federal a las emergencias contienen requerimientos específicos con respecto a la notificación de las autoridades locales, estatales y federales. El grado de respuesta por las agencias federales y del estado depende de la severidad del accidente y del tamaño de la población potencialmente expuesta. Las decisiones para iniciar una acción protectora en particular se basan en factores como las condiciones climáticas locales y las condiciones en la planta, las cuales influyen en la probabilidad de una liberación y la del tipo de isótopos liberados.

Para ser efectivas, las acciones protectoras deben reunir los siguientes criterios (15):

- La acción debe ser efectiva en la reducción o la prevención de la exposición del público y no debe implicar mayor riesgo para la salud que el accidente mismo (por ejemplo, si una liberación ya ha comenzado, los beneficios de la evacuación deben ser sopesados contra la dosis que recibiría durante la evacuación).
- La implementación de la acción protectora debe ser factible tanto logística como financieramente.
- La agencia o agencias responsables de la implementación deben estar claramente identificadas y deben tener la autoridad para implementar las acciones.
- El impacto económico de la acción protectora sobre el público, los negocios, la industria o el gobierno no deben exceder el impacto en salud y el impacto económico del accidente mismo.

Acción protectora en la fase temprana

La fase temprana de un accidente de un reactor nuclear también se conoce como la fase de nube. Esta fase comienza con la notificación del evento y acaba cuando cesa la liberación o el paso de la nube en la zona afectada.

Para la población general, la EPA recomienda que la acción protectora sea tomada si la dosis tiroidea proyectada es de 25 rem, como mínimo, o si la dosis proyectada para todo el cuerpo es de 1 a 5 rem (16). Sin embargo, se pueden aplicar límites más rigurosos por las autoridades de salud del estado, particularmente para las mujeres gestantes y los niños. Las acciones protectoras pueden incluir evacuación, albergue o administración de potasio yodado (KI) para la población potencialmente expuesta. Las actuales GAP para la fase temprana se presentan en la tabla 19.4.

Una de las primeras decisiones es avisarle a la gente acerca de la evacuación o la permanencia en casa con puertas y ventanas cerradas y ventilación apagada mientras pasa la nube. La permanencia en casa y el uso de protección respiratoria como pañuelos o toallas húmedas pueden reducir la inhalación de partículas pero no de gases nobles.

Tabla 19.4 Guías de acción protectora para la fase temprana de un incidente nuclear

Acción protectora	Dosis proyectada	Comentarios
Evacuación (o albergue)	1 – 5 rem*	Evacuación (o para algunas situaciones, el albergue) debe ser iniciada con un rem.
Administración de yodo estable	25 rem ⁺	Requiere aprobación de las autoridades médicas del estado.

* La suma de la dosis efectiva equivalente resultante de la exposición externa y la dosis efectiva equivalente registrada proveniente de todas las formas de inhalación importantes durante la fase temprana.

⁺ Dosis equivalente registrada de yodo radiactivo en la glándula tiroides.

Fuente: U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Response technical manual*. RTM-92, vol. 1, rev.2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Division of Operational Assessment, Office for Analysis and Evaluation of Operational Data; 1992. (17)

El albergue puede también reducir la exposición gamma de la nube por un factor de 2-10, pero es una alternativa para períodos cortos de tiempo por la infiltración de gases y vapores en el albergue por el intercambio normal del aire con el aire externo. La decisión de mantener a las personas en un albergue antes que evacuarlas es cuestionable si el período de liberación es impredecible o mayor de varias horas. La evacuación es un método más efectivo, pero generalmente más costoso, para la reducción de la exposición pública antes de que haya ocurrido la liberación. Las autoridades que deben decidir la orden de una evacuación deben considerar factores como las condiciones climáticas adversas (las cuales pueden hacer inconveniente la evacuación), la probabilidad de una liberación, la disponibilidad de albergues para los evacuados y la calidad de las rutas de evacuación. Si una liberación ya ha comenzado, los beneficios de la evacuación deben ser sopesados contra la dosis que se espera recibir durante el proceso.

Si se libera yodo radiactivo de la planta, la administración de yodo estable como tabletas de yoduro de potasio (KI) puede disminuir o bloquear la toma de yodo radiactivo por la tiroides. No obstante, las tabletas de KI no protegen de la exposición externa de radiación o la exposición a otros radionúclidos inhalados. Para que sea efectivo, el KI se debe administrar cada 3 horas antes de la exposición al yodo radiactivo (17). Aunque algunas personas también pueden sufrir efectos luego de la toma de KI, la evaluación del riesgo por la FDA sugiere que el riesgo de una dosis tiroidea proyectada de 25 rem sobrepasa al de un uso corto de KI (18). Durante una liberación actual, la dosis potencial de yodo radiactivo a la tiroides se estima usando un modelo de dispersión basado en las condiciones actuales o inminentes en la planta. La decisión de usar o no KI y la determinación de cómo debe ser distribuido se deja a los estados. Sin embargo, la distribución rápida de tabletas de KI requerida durante una emergencia es difícil, el almacenamiento para una improbable liberación es costoso y las tabletas tienen una duración limitada.

Acciones protectoras en la fase intermedia

La fase intermedia también se conoce como la fase de reubicación o de reingreso y se extiende hasta el primer año después de la liberación. La dosis proyectada en 2 rem incluye la suma de la dosis efectiva equivalente de radiación gamma externa y la dosis equivalente efectiva de inhalación de materiales suspendidos recibidos en un año. Si las dosis proyectadas en el primer año son de 2 o más rem, los residentes deben ser evacuados o, si ya lo están, permanentemente reubicados fuera del área contaminada. Las guías durante esta fase, recomendadas por la EPA, se muestran en la tabla 19.5.

Adicionalmente, el acceso a las áreas altamente contaminadas debe restringirse para prevenir la entrada del público. La acción de la lluvia y la nieve también disminuye la concentración de radionúclidos sobre las estructuras y la superficie del terreno, aunque las corrientes superficiales pueden volver a contaminar los lagos y los arroyos después de cada lluvia.

Acciones protectoras para la ruta de ingestión

Se pueden tomar en cualquier momento durante la fase intermedia y continuar muchos años después de la liberación. Tratan de limitar la ingestión de materiales radiactivos contenidos en los alimentos. Hay dos tipos de acciones que se pueden tomar en este período - preventivas y de emergencia. Las acciones preventivas, como la ubicación diaria de las vacas sobre alimentos almacenados, tienen un mínimo impacto sobre la contaminación radiactiva de los alimentos humanos o animales. Las acciones de emergencia, que tienen un impacto mayor, incluyen el aislamiento de alimentos que contienen radiactividad para prevenir su introducción en el comercio o su confiscación y disposición. Las guías preventivas de la FDA se basan en dosis proyectadas de 0,5 rem para todo el cuerpo, la médula ósea o cualquier otro órgano, o de 1,5 rem para la glándula tiroides. Las de emergencia, una dosis proyectada de 5 rem para todo el cuerpo, la médula ósea u otro órgano o de 15 rem para la tiroides (tabla 19.6) (19).

La ingestión de alimentos o agua contaminada se puede prevenir suministrándolos a los residentes si es necesario. La preparación normal de los alimentos como el pelado

Tabla 19.5 Guías de acción protectora para exposición a radioactividad durante la fase intermedia de un incidente nuclear

Acción protectora	Dosis proyectada	Comentarios
Reubicación de la población general	≥ 2 rem	La dosis beta en piel puede ser 50 veces más alta.
Aplicación de técnicas simples de reducción de dosis	< 2 rem	Esas acciones protectoras deben tomarse para reducir las dosis a niveles tan bajos como los prácticos

Fuente: U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Response technical manual*. RTM-92, vol. 1, rev.2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Division of Operational Assessment, Office for Analysis and Evaluation of Operational Data; 1992. (17)

o el lavado, puede remover la contaminación de algunas frutas y vegetales, respectivamente. Puede ser necesario destruir los alimentos que no se pueden descontaminar apropiadamente. La contaminación importante de la leche se puede evitar suministrando alimentos y agua no contaminados al ganado. El éxito de esta acción depende de la disponibilidad de alimentos almacenados y agua fresca, y de la habilidad de los granjeros para movilizar las vacas de las pasturas en corto tiempo.

Acciones protectoras en fase tardía

La fase tardía también se conoce como la fase de recuperación de un accidente. Durante ella, el principal objetivo es reducir la radiación en el ambiente a niveles que llevarían a la población general a un acceso no restringido a la zona antes contaminada. Puede durar muchos años.

Recomendaciones para investigación

- Recoger información sobre las formas óptimas de educar al público sobre el potencial riesgo de los reactores nucleares, los efectos de cualquier liberación radiológica y las acciones protectoras que se pueden adelantar en el evento de una liberación. Tal educación puede aliviar la ansiedad pública acerca de posibles accidentes y minimizar su exposición si ocurre uno.
- Conducir mayores investigaciones sobre las formas de controlar el error humano asociado con los accidentes. Por ejemplo, examinar si los sistemas de seguridad se pueden diseñar para que los operadores de planta no puedan apagarlos, si los turnos rotativos se pueden eliminar, si es necesario mejorar los actuales programas de entrenamiento y cómo se puede mantener la calidad del trabajo durante el apagado de los fines de semana o las noches.

Tabla 19.6 Guías de acción protectora de la FDA para ingestión de alimentos contaminados

PAG	Organo de interés	Dosis proyectada por la comisión
Preventiva (bajo impacto)	Todo el cuerpo, médula ósea y cualquier otro órgano	0,5 rem
	Tiroides	1,5 rem
Emergencia (alto impacto)	Todo el cuerpo, médula ósea y cualquier otro órgano	5 rem
	Tiroides	15 rem

Fuente: U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Response technical manual*. RTM-92, vol. 1, rev.2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Division of Operational Assessment, Office for Analysis and Evaluation of Operational Data; 1992. (17)

- Ya que los accidentes pueden ocurrir a través del ciclo del combustible nuclear, asegurar que los planes federales de respuesta a la emergencia, pongan más énfasis en la planeación para accidentes en todas partes del ciclo más que concentrar los esfuerzos solamente en la preparación para un evento catastrófico en un reactor de energía nuclear.
- Conducir investigaciones adicionales para determinar cuáles isótopos serán la mayor fuente probable de exposición durante una variedad de escenarios de liberación. Hasta el accidente de Three Mile Island, los planes de emergencia se centraron sobre una gran liberación de yodo radiactivo. Sin embargo, durante ese accidente, se liberó menos yodo del esperado. En Chernobyl, los isótopos de larga vida continúan siendo un riesgo significativo, más allá de lo que se tenía previsto.
- Examinar formas de mejorar la opinión experta de las agencias federales y del estado en la respuesta de emergencia y la seguridad radiológica.
- Proveer a los estados de guías más concretas sobre el valor de las reservas de KI o su distribución durante un accidente.
- Reevaluar los métodos tradicionales de tratamiento de las víctimas de un accidente radiológico mayor, en vista de la experiencia ganada en el tratamiento del trauma y la exposición a severa radiación durante y después del desastre de Chernobyl.

Resumen y conclusiones

El reactor central es el componente principal de una planta de energía nuclear. Los sistemas complejos de enfriamiento y protección del reactor convierten la energía térmica en electricidad y filtran los efluentes. Los desastres naturales, las fallas mecánicas y los errores humanos pueden contribuir a un accidente por daño en los sistemas de seguridad o del centro mismo. Una liberación de material radiactivo, como gases nobles y yodo radiactivo, es más probablemente causada por una serie de disfunciones o errores que no por un evento único. Para prevenir las exposiciones, los ingenieros deben diseñar plantas nucleares con una reducida posibilidad de accidente. El personal de la planta debe también ser entrenado para mantener los sistemas de seguridad y responder apropiadamente si ocurre un accidente.

Los efectos sobre la salud de una liberación pueden ser agudos o crónicos. Las dosis relativamente altas de radiación pueden dañar la médula ósea, la mucosa intestinal y el sistema nervioso. El cáncer o los defectos genéticos inducidos por la radiación pueden no aparecer inmediatamente sino muchos años después de la exposición y pueden ser inducidos por dosis bajas. Los químicos almacenados en las instalaciones nucleares también implican riesgo durante un accidente. La exposición pública se puede evitar o reducir con planeación y respuestas apropiadas ante posibles accidentes. El público alrededor de la planta puede ser evacuado o albergado antes o durante una

liberación no intencional, con el fin de prevenir la exposición externa y la inhalación de radionúclidos. Después que finaliza la liberación, los alimentos, el agua y las superficies contaminadas pueden ser fuente de exposición. El suministro de agua y alimentos frescos puede reducir la ingestión directa de radionúclidos. Sin embargo, estos también pueden acumularse en alimentos (por ejemplo, leche de vaca) y pueden requerirse diferentes estrategias para prevenir la exposición. Si ésta ocurre a pesar de las acciones protectoras, la morbilidad y la mortalidad se pueden reducir mediante el cuidado médico apropiado para los efectos agudos y, posiblemente, a través de tamizaje del cáncer a largo plazo.

Las poblaciones y los individuos que son más sensibles a la radiación pueden estar en alto riesgo por un accidente. Los niños y los fetos son más sensibles a la radiación que los adultos y están más expuestos a través de la leche de vaca. La gente que vive cerca de una planta nuclear está en mayor riesgo de exposición durante un accidente, como también quienes trabajan fuera de casa. La gente que come vegetales y frutas de huertos locales tiene mayor probabilidad de ingerir radionúclidos. Los ancianos, los discapacitados o los hospitalizados requieren asistencia especial durante una emergencia. Las acciones protectoras para reducir el riesgo que las liberaciones radiológicas implican para esas personas se deben incluir en los planes

La planeación ante accidentes en las plantas nucleares se ha expandido y continúa haciéndose después de accidentes como el de Three Mile Island o el de Chernobyl. Se requieren planes estatales de emergencia y ejercicios para probar esos planes alrededor de las instalaciones nucleares. Los planes multinacionales están siendo desarrollados para las instalaciones cerca de las fronteras. En todos los planes, sin embargo, los ejercicios no exploran totalmente los problemas políticos, económicos, sociales y técnicos que se desarrollarían en una emergencia real. Además, los planes de respuesta de emergencia deben ser flexibles y las agencias de estado y federales deben mantener la opinión experta técnica y administrativa para enfrentar los asuntos de la respuesta en la emergencia.

Referencias

1. American Nuclear Society. World list of nuclear power plants. *Nuclear News* 1994;37:57-76.
2. Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency. *The safety of the nuclear fuel cycle*. Washington, D.C.: Organization for Economic Cooperation and Development; Nuclear Energy Agency; 1992.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Assessment of the public health impact from the accidental release of UF₆ at the Sequoyah Fuels Corporation facility at Gore, Oklahoma*. U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG 1189. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office; 1986.
4. The International Chernobyl Project. Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures. Technical report by the International Advisory Committee. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1992.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly. New York: United Nations; 1993.

6. International Commission on Radiation Units and Measurements. *Quantities and units in radiation protection dosimetry*. ICRU Report 51. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1993.
7. International Commission on Radiological Protection. *1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. New York: Pergamon Press; 1991.
8. National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR). *Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation*. BEIR V. Washington, D.C.: National Academy Press; 1990.
9. National Council on Radiation Protection and Measurements. *Limitation of exposure to ionizing radiation*. NCRP Report No.116. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements; 1991.
10. Federal Emergency Management Agency. Federal radiological emergency response plan. *Federal Register* 1984;49:35896-925.
11. U.S. Department of Health and Human Services (HHS). *HHS radiological emergency response plan*. Washington, D.C.: Department of Health and Human Services; 1985.
12. U.S. Department of Health and Human Services. *Centers for Disease Control emergency response plan*. Washington, D.C.: Department of Health and Human Services; 1990.
13. U.S. General Accounting Office. *Further actions needed to improve emergency preparedness around nuclear power plants*. Gaithersburg, MD: U.S. General Accounting Office; 1984.
14. Governments of Canada and the United States of America. *Joint radiological emergency response plan*. Draft, October 11, 1994.
15. International Commission on Radiological Protection. *Protection of the public in the event of a major radiation accident*. ICRP Publication 40. New York: Pergamon Press; 1984.
16. U.S. Environmental Protection Agency. *Manual of protective action guides and protective actions for nuclear incidents*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency; 1992.
17. U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Response technical manual*. RTM-92. vol. 1 rev 2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Division of Operational Assessment, Office for Analysis and Evaluation of Operational Data; 1992.
18. Food and Drug Administration. *Potassium iodide as a thyroid-blocking agent in a radiation emergency: recommendations on use*. Washington, D.C.: Department of Health and Human Services; 1982.
19. Food and Drug Administration. *Accidental radioactive contamination of human food and animal feed: recommendations for state and local agencies*. Washington, D.C.: Department of Health and Human Services; 1982.

Lecturas recomendadas

- American Medical Association. *A guide to the hospital management of injuries arising from exposure to or involving ionizing radiation*. Chicago: American Medical Association; 1984.
- Arnold L. *Windscale 1957: anatomy of a nuclear accident*. London, U.K.: MacMillan Academic and Professional Ltd.; 1992.
- Dohrenwend BP. Psychological implications of nuclear accidents: the case of Three Mile Island. *Bull NY Acad Med* 1983;59:1060-76.
- Eichholz G. *Environmental aspects of nuclear power*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science; 1982.
- Fabrikant J. The effects of the accident at Three Mile Island on the mental health and behavioral responses of the general population and nuclear workers. *Health Phys* 1983;45:579-86.
- Gardner MJ, Winter PD. Mortality in Cumberland during 1959-78 with reference to cancer in young people around Windscale. *Lancet* 1984;1:216-7.

- Goldhaber MK, Tokuhata GK, Digon E, et al. The Three Mile Island population. *Public Health Rep* 1983;98:603-9.
- Goldhaber MK, Staub SL, Tokuhata GK. Spontaneous abortions after the Three Mile Island nuclear accident: a life table analysis. *Am J Public Health* 1983;73:752-9.
- Health Physics Society. *Guide for hospital emergency departments on handling radiation accident patients*. McLean, VA: Health Physics Society; 1985.
- Hubner KF. Decontamination procedures and risks to health care personnel. *Bull N Y Acad Med* 1983;59:1119-28.
- Lester MS. Public information during a nuclear power plant accident: lessons learned from Three Mile Island. *Bull N Y Acad Med* 1983;59:1080-6.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. *Protection of the thyroid gland in the event of releases of radioiodine No 55*. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements; 1977.
- Nuclear Regulatory Commission. *Reactor safety study: an assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants*. Springfield, VA: U.S. Nuclear Regulations Commission; 1975.
- Nuclear Regulatory Commission. *Population dose and health impact of the accident at the Three Mile Island nuclear station*. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1979.
- Nuclear Regulatory Commission. *Report on the accident at the Chernobyl nuclear power station*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office; 1987.
- Shleien B. *Preparedness and response in radiation accidents*. Washington, D.C.: Food and Drug Administration; 1983.
- Shleien B, Schmidt GD, Chiaechierini RP. Background for protective action recommendations: accidental radioactive contamination of food and animal feeds. Washington, D.C.: Food and Drug Administration; 1984.
- Sutherland RM, Mulcahy RT. Basic principles of radiation biology. In: Rubin P, Bakermeier RF, Krackov SK, editors. *Clinical oncology for medical students and physicians*. 6th ed. Rochester, NY: American Cancer Society; 1983. p.40-57.
- Urguhart J, Palmer M, Cutler J. Cancer in Cumbria: the Windscale connection. *Lancet* 1984;1:217-8.
- Wald N. Diagnosis and therapy of radiation injuries. *Bull N Y Acad Med* 1983;59:1129-38.