

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### EFFECTOS FISICOS DE LAS ARMAS TERMONUCLEARES

por J. Rotblat

1. Los progresos de la ciencia y la tecnología han tenido por consecuencia un gran aumento de la eficiencia y de la potencia destructiva de las armas convencionales, que contienen explosivos químicos. La introducción de las armas nucleares dio, sin embargo, una dimensión enteramente nueva a la guerra. Desde el punto de vista cuantitativo, esto representó un enorme aumento de la potencia explosiva de las armas. En el desarrollo del armamento nuclear cabe distinguir dos fases, cada una de ellas caracterizada por un aumento de tres órdenes de magnitud en la potencia explosiva, expresado en peso de TNT equivalente. La bomba atómica, como las usadas en Hiroshima y Nagasaki, representó un salto desde las toneladas a los kilotonos (kt); la bomba de hidrógeno, fabricada unos 10 años después, fue un salto de los kilotonos a los megatonos (Mt). Una bomba termonuclear puede tener una potencia explosiva superior a la de todos los explosivos utilizados en las guerras desde que se inventó la pólvora. Además, las armas nucleares almacenadas en los arsenales durante los dos decenios siguientes a la elaboración de la bomba de hidrógeno, con un total de cerca de 20 000 Mt, representan una multiplicación por 1000 de la potencia explosiva.
2. El lanzamiento de misiles de tan enorme potencia explosiva a distancias muy grandes, de 10 000 km o más, ha resultado posible porque la potencia destructiva por unidad de peso es millones de veces mayor en las armas nucleares que en las convencionales. Por ejemplo, el peso del material efectivamente necesario para provocar una explosión de 20 Mt es de aproximadamente 10 toneladas (1). Si se tuviera que obtener la misma potencia explosiva con dinamita, el peso sería superior al de cualquier edificación hecha por el hombre, como, por ejemplo, la pirámide de Keops.
3. Aun mayor importancia tienen las diferencias cualitativas entre los explosivos nucleares y los convencionales. Los dos agentes mortíferos más importantes en las guerras anteriores fueron la onda expansiva y el calor. Ambos agentes causan la muerte y heridas en un grado mayor en órdenes de magnitud cuando se emplean armas nucleares. Pero, además, las armas nucleares han traído consigo un nuevo agente letal: las radiaciones ionizantes. Su principal característica es una extensión de su acción tanto en el espacio como en el tiempo. Pueden causar muerte y enfermedad entre las poblaciones civiles de los países tanto beligerantes como no beligerantes. La prolongada duración de la radiactividad es un obstáculo para las operaciones de socorro y para la asistencia médica eficaz a los heridos. Además, los efectos nocivos de la radiación pueden continuar hasta mucho después de haber terminado las hostilidades y afectar a las generaciones futuras.
4. Otros efectos de las armas nucleares menos fáciles de medir cuantitativamente son los cambios atmosféricos perjudiciales para la agricultura, y probablemente también para la salud humana, en todas las partes del mundo. Comoquiera que la humanidad no ha sufrido nunca una guerra nuclear mundial, no cabe descartar la aparición de otros efectos directos o indirectos imprevisibles.

Anexo 1

5. En el presente anexo se examinan los fenómenos físicos conocidos, que se enumeran en el Cuadro 1, junto con los efectos físicos y biológicos concomitantes. En términos generales, puede decirse que nuestro conocimiento de los aspectos cuantitativos de esos efectos va disminuyendo del principio al final de la lista.

CUADRO 1. EFECTOS DE LA EXPLOSION DE UN ARMA NUCLEAR

Fenómeno	Efectos físicos	Efectos biológicos
Mecánico (onda expansiva)	Daños en edificios	Muerte y heridas en organismos vivos
Térmico (calor y luz)	Ignición de materiales; incendios en gran escala	Quemaduras graves y mortales; lesiones oculares
Radiación inicial (neutrones y rayos gamma)	Inducción de radiactividad	Exposición aguda de todo el organismo a las radiaciones ionizantes
Radiación residual: a) precipitación local b) precipitación mundial	Depósito de radiactividad en el suelo; inyección de radiactividad en la atmósfera	Exposición subletal y letal externa e interna; aumento de la incidencia del cáncer y trastornos genéticos
Impulso electromagnético	Sobrecargas en los circuitos eléctricos y electrónicos	- - - - -
Trastornos atmosféricos	Variaciones de la concentración de ozono; disminución de la luz solar	Disminución de la producción agrícola; hambre; desequilibrio ecológico

6. Incluso con la explosión de una sola arma, es probable que las interacciones entre los distintos efectos enumerados en el Cuadro 1 produzcan un número mayor de bajas, debido al carácter sinérgico de esas interacciones. Por ejemplo, una persona que ha sufrido una quemadura de la que normalmente podría curarse tendrá muchas menos probabilidades de recuperación si sus defensas inmunitarias han quedado debilitadas por la acción de una dosis subletal de radiaciones. De modo análogo, las lesiones de la piel y los tejidos blandos por traumatismos pueden llevar a una infección mortal si ha habido una pérdida de leucocitos y plaquetas a consecuencia de las radiaciones.

7. Hechas estas reservas, se examinan uno por uno los efectos enumerados en el Cuadro 1, pero hay que tener en cuenta que la magnitud de los efectos puede variar enormemente según los distintos parámetros asociados al modo de explosión.

8. El principal parámetro es la magnitud del arma, expresada por su potencia explosiva en peso equivalente de TNT (1 kilotón = 1000 toneladas de TNT; 1 megatón = 1 millón de toneladas de TNT). La potencia explosiva de las distintas armas nucleares varía mucho. En un extremo, en las llamadas "minibombas", las armas nucleares establecen la transición con las armas convencionales (10 toneladas de TNT, aproximadamente); en el otro extremo, encontramos potencias de decenas de megatonas. Las fuerzas estratégicas por sí solas despliegan ojivas atómicas de una potencia de 40 kt a 20 Mt, es decir, una serie que abarca un factor de 500. Con la introducción de los vectores del tipo MIRV<sup>1</sup> se produjo una tendencia a reducir la potencia de cada ojiva, pero ahora parece surgir una tendencia opuesta; por ejemplo, dando a cada una de las ojivas

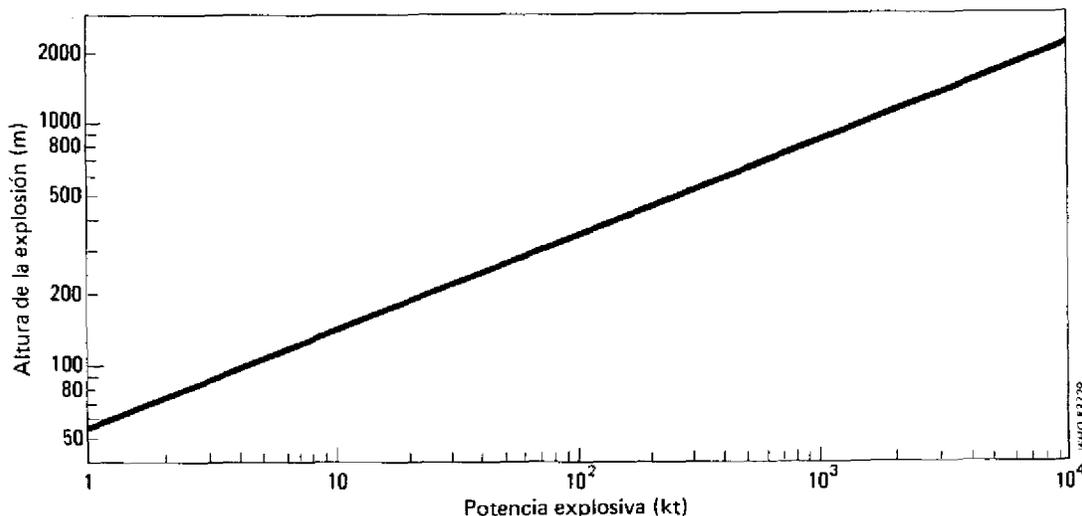
<sup>1</sup> MIRV ("multiple independently targetable re-entry vehicles") = Vehículos de reentradas múltiples dirigidas independientemente.

de los propuestos misiles MX una potencia de 500 kt. En el presente anexo se examinan los efectos de las armas termonucleares de tres potencias, a saber, 0,1, 1 y 10 Mt; los efectos de las bombas de potencias intermedias pueden deducirse por interpolación. No obstante, más adelante se hace especial mención de un arma de baja potencia: la bomba de neutrones.

9. En un arma termonuclear, la energía se libera por dos procesos: la fisión y la fusión. Según sea el diseño de la bomba, la aportación de cada uno de estos procesos al conjunto de la potencia explosiva puede variar ampliamente, ocasionando por lo tanto grandes diferencias en la amplitud del peligro de precipitación radiactiva. Suele darse por sentado que las bombas de una potencia de 100 kt o más son del tipo fisión-fusión-fisión, en que la fisión y la fusión contribuyen en la misma medida al total de energía liberada.

10. Otro parámetro importante es la altitud a la que se produce la explosión; de ello depende que haya o no precipitación radiactiva local (véase más adelante). En la Figura 1 se muestra la altura máxima a que debe ocurrir la explosión de bombas de distinta potencia para producir una precipitación radiactiva local apreciable (2). Las bombas que estallan por debajo de la altura máxima suelen denominarse de explosión en el suelo, mientras que las que estallan por encima de esa altura se llaman de explosión aérea. El motivo de que se empleen bombas de explosión en el suelo no es necesariamente el provocar una precipitación local; se trata, con mayor probabilidad, de crear el máximo de sobrepresión con el efecto de onda expansiva.

FIG. 1. ALTURA MAXIMA DE LA EXPLOSION PARA QUE SE PRODUZCA UNA PRECIPITACION TEMPRANA APRECIABLE<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Reproducido, con autorización, de Rotblat (2).

11. Otros parámetros que influyen en los daños causados por una explosión determinada son: la naturaleza del terreno, las características del objetivo, las condiciones atmosféricas (visibilidad, velocidad y dirección del viento, lluvia, nieve), la hora y la fecha de explosión y la medida en que ésta se ha previsto. De estos parámetros se tratará, cuando proceda, al examinar los distintos efectos.

Anexo 1

EFECTO DE ONDA EXPANSIVA

12. Este es el mejor conocido de todos los efectos; provoca los mismos daños que los explosivos muy potentes ordinarios, pero tremendamente aumentados. En explosiones a una altitud de hasta 15 km aproximadamente, la mitad de la energía total liberada lo es en forma de onda expansiva. Si la bomba estalla encima de un centro de población, la onda expansiva causa el mayor número de bajas inmediatas, así como la mayor parte de la destrucción de edificios.

13. El origen de la onda expansiva es el tremendo aumento de presión en el materia vaporizado de la bomba en el instante de la explosión. La expansión de los gases causa una onda de presión que se mueve en todas las direcciones con una velocidad inicial que rebasa la del sonido. A medida que la onda se extiende, su intensidad va disminuyendo hasta que acaba desvaneciéndose del todo a una larga distancia.

14. A una distancia determinada del lugar de la explosión, la cantidad de sobrepresión (el exceso de la presión del aire sobre la presión atmosférica), cuando llega la onda expansiva, depende de la potencia de la bomba, la altitud de la explosión y la naturaleza del terreno. Por ejemplo, sobre un terreno llano la onda expansiva se propaga de manera uniforme en todas direcciones, pero lo hace de manera irregular sobre un terreno montañoso.

15. Para una potencia explosiva determinada, la altitud de la explosión tiene una importante influencia en la extensión de los daños. A medida que aumenta la altitud, crece primero, pero luego disminuye, la distancia a que se alcanza un valor determinado de sobrepresión. La Figura 2 muestra, para una bomba de 1 Mt, la distancia a que se produce un valor determinado de sobrepresión en función de la altura de la explosión (3). Para cada uno de los cuatro valores de sobrepresión hay una altura óptima a la que la sobrepresión llegará más lejos del punto cero (el punto del terreno situado debajo de la explosión). Por ejemplo, para producir una sobrepresión de 35 kPa<sup>1</sup> en la zona más amplia posible, la bomba habrá de estallar a una altura de 3,2 km; la distancia correspondiente es entonces de 7,0 km.

16. La altitud que se elegiría depende del propósito del bombardeo. Si éste tiene por objeto producir el mayor número posible de bajas en una ciudad, la bomba se haría estallar a la altura óptima para abarcar el área más amplia posible. Sin embargo, si el objeto es producir el máximo de sobrepresión en el suelo para, por ejemplo, destruir un misil en un silo subterráneo reforzado (resistente a la onda expansiva), será probable que se utilicen explosiones en la superficie o cerca de la superficie del suelo.

---

<sup>1</sup> 100 kilopascales (kPa) corresponden casi exactamente a la presión atmosférica (1 atm. = 101.325 kPa).

17. En el Cuadro 2 se describe el tipo de daños causados por la onda expansiva con varios valores de sobrepresión y de velocidades del viento que acompañan a la onda (4). El cuerpo humano puede resistir una sobrepresión bastante alta (unos 200 kPa, o aproximadamente 2 atmósferas), pero la mayoría de las muertes debidas a la onda lo serán por sus efectos indirectos, al derrumbarse edificios, al ser despedido por el soplo contra algún objeto o por la caída de escombros. Por ejemplo, una sobrepresión de 35 kPa no aplastará a un ser humano, pero el viento de 260 km por hora que acompaña a la explosión causará choques mortales entre seres humanos y objetos cercanos.

CUADRO 2. DAÑOS EN LOS EDIFICIOS POR LA ONDA EXPANSIVA<sup>a</sup>

Sobrepresión máxima (kPa)	Velocidad máxima del viento (km/h)	Efectos típicos de la onda expansiva
140	750	Son arrasadas las construcciones de hormigón armado.
70	460	Son arrasados la mayoría de las fábricas y los locales comerciales. Son destruidas y dispersadas como escombros las pequeñas viviendas de armazón de madera y ladrillo.
35	260	Son destruidos los locales comerciales de construcción ligera y las viviendas ordinarias; quedan gravemente averiadas las construcciones más sólidas.
21	150	Son arrastradas por el viento las paredes de los edificios de estructura clásica con armazón de acero; las viviendas sufren graves daños. Los vientos tienen fuerza suficiente para matar a personas al aire libre.
7	60	Son dañadas las construcciones; los pedazos de cristal y los escombros que vuelan por el aire suponen un peligro para las personas.

<sup>a</sup> Basado en Office of Technology Assessment (4).

18. Como el resultado de esos efectos indirectos depende de muchos factores, como, por ejemplo, el tipo de construcción o la situación de una persona en relación con los edificios, es imposible calcular con exactitud cuántas personas morirían por una determinada onda expansiva. Las estimaciones del número de bajas debidas a la onda expansiva, por consiguiente, difieren considerablemente. Las mejores parecen ser las hechas por el "Office of Technology Assessment of the United States Congress" (4), basadas en hipótesis acerca de la proporción de personas que resultarían muertas o heridas en zonas definidas por ciertos valores de sobrepresión. Esas proporciones se indican en el Cuadro 3 para las zonas de sobrepresión utilizadas en la Figura 2.

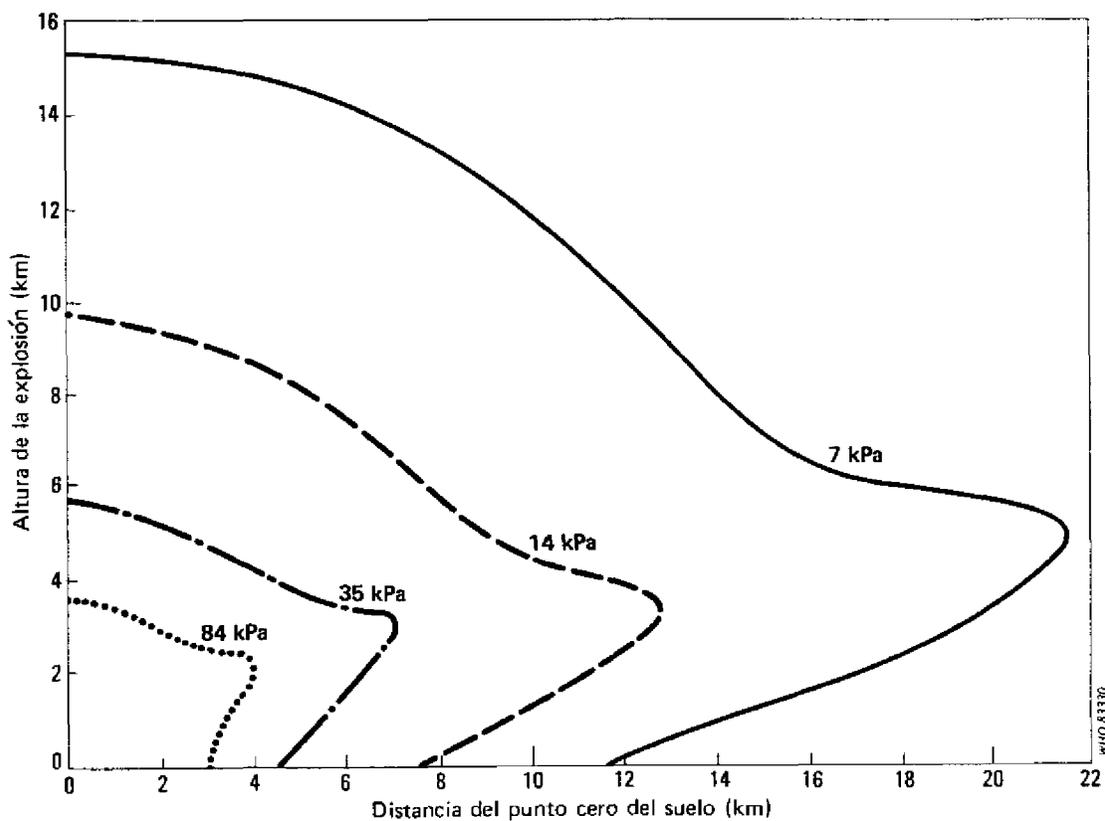
Anexo 1

CUADRO 3. VICTIMAS CAUSADAS POR LA ONDA EXPANSIVA<sup>a</sup>

Sobrepresión máxima (kPa)	Muertos (%)	Heridos (%)	Ilesos (%)
Superior a 84	98	2	-
35 - 84	50	40	10
14 - 35	5	45	50
7 - 14	-	25	75

<sup>a</sup> Basado en Office of Technology Assessment (4).

FIG. 2. SOBREPRESIONES MAXIMAS EN EL SUELO PARA UNA EXPLOSION DE 1 Mc<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Basado en Glasstone y Dolan (3).

19. Un método más sencillo consiste en utilizar el concepto de "zona letal". Esta se define como la zona circular dentro de la cual el número de supervivientes es igual al número de personas muertas fuera de la misma. Se obtiene entonces el número total de muertos partiendo del supuesto de que todas las personas que están dentro de la zona mueren, pero ninguna fuera de ella. Del Cuadro 3 puede deducirse que la "zona letal" corresponde a una sobrepresión de aproximadamente 40 kPa, si bien con frecuencia se supone a este respecto un valor de 35 kPa (5). En el Cuadro 4 se dan los datos pertinentes para una sobrepresión de 35 kPa respecto de las tres potencias consideradas en este trabajo. En los puntos 1 y 2 se dan las alturas óptimas de explosión y las correspondientes distancias máximas. En el punto 3 se dan las distancias para una explosión en la superficie del suelo. Como las armas de guerra pueden hacerse estallar a distintas altitudes, el último punto indica la zona letal calculada para el promedio de los valores indicados en los puntos 2 y 3.

CUADRO 4. EFECTOS DE LA ONDA EXPANSIVA (PARA UNA SOBREPRESION DE 35 kPa)

	Potencia explosiva (Mt)		
	0,1	1	10
1. Altura óptima de la explosión (km)	1,5	3,2	6,9
2. Distancia de la explosión a la altura óptima (km)	3,2	7,0	15,0
3. Distancia de la explosión en la superficie del suelo (km)	2,1	4,5	9,7
4. Zona letal (km <sup>2</sup> )	22	104	480

20. La zona de daños ocasionados por la onda expansiva varía como la potencia explosiva elevada a  $2/3$ . Esto ha llevado a caracterizar las bombas en términos de "megatonaje equivalente" (MTE) (2), por referencia a la bomba de 1 Mt. Así, una bomba de 100 kt tiene un MTE de unos 220 kt, en lo que se refiere al efecto de onda expansiva, puesto que  $0,1^{2/3}=0,22$ . Del mismo modo, una bomba de 10 Mt tiene un MTE de unos 4,6 Mt. De esto se deduce que varias bombas pequeñas producen mayores efectos de onda expansiva que una sola bomba de la misma potencia total. Por ejemplo, 5 bombas de 200 kt cada una tienen una zona letal que es casi el doble de la de una bomba de 1 Mt.

21. El concepto de zona letal ofrece un método sencillo para calcular el número total inmediato de personas muertas; es igual a la zona letal multiplicada por la densidad de población. Por ejemplo, en una ciudad con una densidad de población de 10 000 habitantes por km<sup>2</sup>, el número de muertos por la onda expansiva causada por una bomba de 1 Mt podría ser de más de un millón. Es probable que el número de heridos fuera mayor que el de muertos, pero muchos de los heridos morirían también en una guerra nuclear en la que se utilizaran varias bombas y en la que hubiera una importante precipitación radiactiva que entorpecería las operaciones de socorro.

22. En una ciudad, la densidad de población, y por lo tanto el número de bajas, dependen de la hora del bombardeo. Si ocurriera durante el día en una jornada laboral, cuando muchos habitantes de las zonas suburbanas hubieran acudido al centro de la ciudad para trabajar, habría muchas más víctimas que si el bombardeo se produjera de noche o durante el fin de semana.

23. En ciertas circunstancias, los efectos indirectos de la onda expansiva podrían producir resultados aun más catastróficos. Por ejemplo, en países de tierras bajas donde el territorio está protegido por diques, la ruptura de éstos por la onda expansiva podría ocasionar la inundación de extensas zonas.

Anexo 1

RADIACION TERMICA

24. En el momento de la explosión, la temperatura alcanza hasta millones de grados centígrados. A temperaturas tan elevadas, un cuerpo emite radiaciones electromagnéticas, parte de ellas en la región visible, creando una masa luminosa de aire, la llamada "bola de fuego". Un análisis del mecanismo de formación de la bola de fuego muestra que la radiación térmica se emite en dos impulsos. el primero, breve, dura unas milésimas de segundo y el segundo dura algunos segundos. Cuanto mayor es la potencia explosiva de la bomba, mayor es la duración del segundo impulso; para una bomba de 100 kt, el segundo impulso es de unos 2 segundos, mientras que para una bomba de 10 Mt dura más de 10 segundos.
25. El primer impulso consiste sobre todo en radiación ultravioleta y lleva consigo solamente una pequeña fracción de la energía total irradiada, pero suficiente para lesionar los ojos de una persona que mirara hacia la explosión. La mayor parte de la energía térmica, correspondiente aproximadamente a la tercera parte de la energía total liberada en la explosión, es transportada por el segundo impulso.
26. Las personas que estuvieran mirando en aquel momento hacia el lugar de la explosión quedarían temporalmente cegadas por el componente visible del destello térmico. En un día claro, esta ceguera provocada por el destello podría ocurrir a distancias de hasta 50 km. En una noche clara, las distancias serían mucho mayores, extendiéndose hasta el horizonte. Una bomba de 10 mt que estallara a una altura de 15 km podría causar esta ceguera por destello a una distancia de 200 km.
27. No obstante, la mayoría de las bajas causadas por el destello térmico lo serían por otras dos causas: las quemaduras mortales o graves de las personas y los animales directamente expuestos a la radiación, y los incendios causados por el destello de calor.
28. La distancia a que estos efectos podrían ocurrir estaría principalmente determinada por la potencia explosiva de la bomba, pero dependería asimismo de las condiciones atmosféricas y de la altura de la explosión, en las explosiones ocurridas en la superficie del suelo, parte de la energía quedaría absorbida en la capa de polvo y/o de vapor de agua próxima al suelo. Con una visibilidad bastante buena, el destello de calor podría causar víctimas a distancias muy superiores de la distancia a que causan bajas la onda expansiva y la radiación nuclear inicial.
29. La medida física del impulso térmico es la fluencia de radiación, es decir, la cantidad de energía que cae sobre una unidad de superficie (en joules por m<sup>2</sup>). En el punto 1 del Cuadro 5 se muestra la fluencia que da un 50% de probabilidades de causar quemaduras de tercer grado (3). La lesión producida por una exposición a una cantidad determinada de energía térmica depende de la duración del impulso térmico: cuanto mayor es la duración, más energía térmica se requiere para producir un grado determinado de quemadura. Como ya se ha dicho, la duración del impulso aumenta con la potencia explosiva, por lo que se requiere una fluencia mayor de radiación para producir quemaduras de tercer grado a medida que aumenta la potencia de la bomba.

CUADRO 5. EFECTOS TERMICOS<sup>a</sup>

	Potencia explosiva (Mt)		
	0,1	1	10
1. Fluencia de energía que produce quemaduras de tercer grado con un 50% de probabilidad ( $Jm^{-2}$ )	$35 \times 10^4$	$41 \times 10^4$	$46 \times 10^4$
2. Distancia para un 50% de probabilidad de quemaduras de primer grado (km)	7,3	16,0	31,0
3. Distancia para un 50% de probabilidad de quemaduras de segundo grado (km)	5,9	12,9	25,9
4. Distancia para un 50% de probabilidad de quemaduras de tercer grado (km)	4,8	11,0	21,8
5. Distancia letal (km)	4,4	10,5	20,4
6. Zona letal ( $km^2$ )	60	350	1300

<sup>a</sup> Basado en Glasstone y Dolan (3).

30. En los puntos 2, 3 y 4 del Cuadro 5 se dan las distancias a las que hay un 50% de probabilidades de que se produzcan quemaduras de primer, segundo y tercer grado (3). Se ha partido del supuesto de una explosión en el aire, una visibilidad de 20 km y una pigmentación media de la piel. Una piel morena requiere menos fluencia de radiación para que se produzca la misma lesión.

31. En condiciones de guerra, es probable que las quemaduras de tercer grado resulten mortales. En el punto 5 del Cuadro 5 se dan las distancias a las cuales hay casi 100% de probabilidades de que se produzcan quemaduras de tercer grado (3). Pueden usarse, por lo tanto, para calcular las zonas letales. Una comparación entre el punto 6 y la última línea del Cuadro 4 muestra que la zona letal por los efectos del calor es considerablemente más extensa que la de los efectos de la onda expansiva. Pero en este caso no podría usarse la densidad de población para calcular el número de muertos, porque esta cifra dependería del número de personas que estuvieran al aire libre en el momento de la explosión o situadas en línea recta frente a la onda térmica que penetrase por las ventanas. En un fin de semana de verano, hasta un 25% de la población podría estar expuesta al destello de calor, mientras que en una noche de invierno quizá estuviera expuesto solamente el 1% (4).

32. No obstante, las muertes y lesiones por el efecto térmico pueden ser consecuencia de los incendios originados por el destello de calor. Los materiales inflamables y combustibles pueden incendiarse aproximadamente a las mismas distancias a que se sufren quemaduras graves. Incluyen el mobiliario de las viviendas y los tejidos del interior de los edificios, así como la hierba y las hojas secas fuera de ellos. También pueden originarse incendios como efecto indirecto de la onda expansiva; los hornos y estufas dañados, los caloríferos volcados, las cañerías de gas rotas y el combustible de los automóviles y de los puestos de gasolina pueden originar incendios que, a su vez, pueden contribuir a la muerte de los heridos que no estén en condiciones de huir.

Anexo 1

33. En ciertas circunstancias, los incendios pueden adquirir proporciones mucho más peligrosas y quemar grandes zonas transformadas en una enorme hoguera. Se distinguen dos tipos de esta clase de acontecimientos: la tormenta de fuego y la conflagración. En la tormenta de fuego, la unión de muchos incendios pequeños crea una columna de convección única que aspira hacia adentro desde un perímetro exterior y puede crear una temperatura de más de 1000 °C. Dentro de la zona de la tormenta de fuego, las personas, incluso dentro de refugios suficientemente sólidos para resistir el efecto de la onda expansiva, pueden morir por asfixia a consecuencia de la falta de oxígeno o resultar incineradas por la alta temperatura. Se ha afirmado que esas tormentas de fuego tienen pocas probabilidades de ocurrir con el tipo de edificios corrientes en las ciudades modernas, pero otros creen lo contrario. No hay ninguna experiencia directa en que basarse.

34. En una conflagración, el frente del incendio se mueve hacia afuera y se va extendiendo mientras quede material para alimentarlo. La extensión y la importancia de los daños causados por esos incendios pueden rebasar con mucho los originados directamente por el destello de calor.

#### RADIACION NUCLEAR INICIAL

35. Las reacciones nucleares que originan la explosión de la bomba producen diversos tipos de partículas nucleares y radiaciones; las más importantes de las emitidas simultáneamente con la explosión son los neutrones y los rayos gamma. Los rayos gamma y otras radiaciones continúan siendo emitidos después de la explosión, pero se ha convenido en considerar que todas las radiaciones emitidas dentro del minuto siguiente a la explosión pertenecen a la categoría de radiación inicial. Transportan el 5%, aproximadamente, de la energía total liberada.

36. Los neutrones (partículas elementales de aproximadamente el mismo peso atómico que el hidrógeno) son emitidos en los procesos tanto de fisión como de fusión y su número total es proporcional a la potencia explosiva de la boma. Aun antes de que el material de la bomba se disperse, los neutrones sufren interacciones nucleares en las cuales disminuyen su energía y su número, pero la emisión final de neutrones sigue excediendo en varios órdenes de magnitud a la de cualquier otro método de producción de los mismos.

37. A medida que los neutrones se alejan de la fuente, se van propagando por una zona mayor y su fluencia va disminuyendo. Pero la principal razón de la disminución del número de neutrones es la absorción exponencial en el aire que atraviesan. Esta absorción por sí sola reduce el número de neutrones por un factor de 10 cada vez que cruzan unos 600 m de aire de densidad normal (2). El resultado de la absorción exponencial es que la distancia a que se alcanza una fluencia determinada de neutrones varía muy poco con la potencia explosiva del arma.

38. Cuando los neutrones alcanzan un organismo vivo algunos son absorbidos, introduciendo así en el organismo una dosis de radiación ionizante. La dosis se mide por la cantidad de energía absorbida por unidad de masa. La unidad de dosis es el gray (Gy), que corresponde a la absorción de 1 joule por kilogramo de tejido; pero sigue usándose todavía mucho la antigua unidad, el rad (igual a la centésima parte de un gray).

39. Una dosis a todo el cuerpo de 4,5 Gy (450 rad) de rayos gamma, medida en la superficie de un organismo humano adulto, si se recibe en un breve espacio de tiempo (hasta un día), provocará probablemente la muerte al cabo de pocas semanas en un 50% de la población expuesta. En los niños pequeños basta una dosis menor. Los neutrones son biológicamente más eficaces que los rayos gamma pero, en lo que respecta a los efectos agudos, cabe suponer que tienen la misma eficacia biológica.

40. En el Cuadro 6 la primera línea da las distancias a que recibirán una dosis de neutrones de 4,5 Gy (450 rad) las personas que estén al aire libre inmediatamente después de la explosión de la bomba. Se trata de distancias oblicuas, medidas desde el punto de la explosión y no desde el punto cero del suelo. Se advertirá que un aumento de la potencia por un factor de 100 aumenta la distancia solamente en un 50%.

CUADRO 6. EFECTOS DE LA RADIACION INICIAL (DISTANCIA OBLICUA PARA UNA DOSIS EN TODO EL CUERPO DE 4,5 Gy)

	Potencia explosiva (Mt)		
	0,1	1	10
Neutrones (km)	1,6	2,0	2,4
Rayos gamma (km)	1,8	2,6	4,1
Zona letal (km <sup>2</sup> )	11	22	54

41. La probabilidad de muerte después de una exposición aguda a las radiaciones aumentará rápidamente al crecer la dosis. Con una dosis de unos 6 Gy (600 rad) la probabilidad de muerte es de casi 100%. Las distancias a que se recibe esa dosis son sólo ligeramente inferiores a los valores dados en el Cuadro 6; teniendo en cuenta los elementos de incertidumbre, pueden tomarse estos valores para definir las zonas letales.

42. Los neutrones pueden producir asimismo efectos retardados, especialmente la inducción de radiactividad en el suelo y en las paredes de los edificios.

43. Los rayos gamma (iguales a los rayos X, pero producidos en el núcleo) son emitidos también en el instante de la explosión, pero la mayor parte es emitida después por reacciones secundarias, por ejemplo, las interacciones de los neutrones con el aire y la desintegración de los productos de fisión. Como sucede con los neutrones, los rayos gamma son emitidos con una amplia serie de energías y se absorben también exponencialmente, aunque algo menos que los neutrones. No obstante, con bombas de mucha potencia y a grandes distancias ocurre un fenómeno en virtud del cual la intensidad de la radiación gamma que alcanza un punto determinado es muy superior a lo que hubiera sido de otro modo. Como los neutrones, los rayos gamma instantáneos o casi instantáneos son emitidos antes de la onda expansiva y se desplazan delante de ella por el aire de densidad normal. Pero los rayos gamma de los productos de fisión son emitidos después de pasar la onda expansiva, cuando hay un periodo de menor densidad del aire; por consiguiente, los rayos gamma que se desplazan por este aire enrarecido están mucho menos atenuados.

44. En la segunda línea del Cuadro 6 se dan las distancias oblicuas a las que los rayos gamma liberarán una dosis de 4,5 Gy (450 rad). El "reforzamiento hidrodinámico" que acaba de describirse se refleja claramente en el hecho de que la variación de la distancia con la potencia de la bomba es mayor que en el caso de los neutrones.

45. En la última línea del Cuadro 6 se dan las zonas letales para los efectos combinados de los neutrones y los rayos gamma. En las condiciones aquí expuestas, la dosis total se debe casi enteramente a los rayos gamma.

Anexo 1

46. En el Cuadro 7 se indican las zonas letales correspondientes a la onda expansiva, al calor y a las radiaciones iniciales de armas de diferentes potencias. Se ve que para bombas de más de 10 kt la acción nociva de la radiación inicial se registra en una zona devastada ya por la onda expansiva y por el calor. Pero incluso en esas zonas la radiación inicial puede causar un aumento del número de víctimas. Una fina capa opaca de cualquier sustancia puede proteger a una persona contra el destello de calor, pero para atenuar la dosis de radiación se necesita una capa más espesa. Una persona que se salvara de la onda de calor y sufriera heridas no mortales por la onda expansiva tendría probabilidades de morir si recibiera además una dosis subletal de radiación.

CUADRO 7. ZONAS DE LESIONES LETALES POR DIVERSOS EFECTOS (km<sup>2</sup>)<sup>a</sup>

Tipo de causa	Potencia explosiva				
	1 kt	10 kt	100 kt	1 Mt	10 Mt
Onda expansiva	1,5	4,9	22	104	480
Calor	1,1	10,5	60	350	1 300
Radiación inicial	2,9	5,7	11	22	54

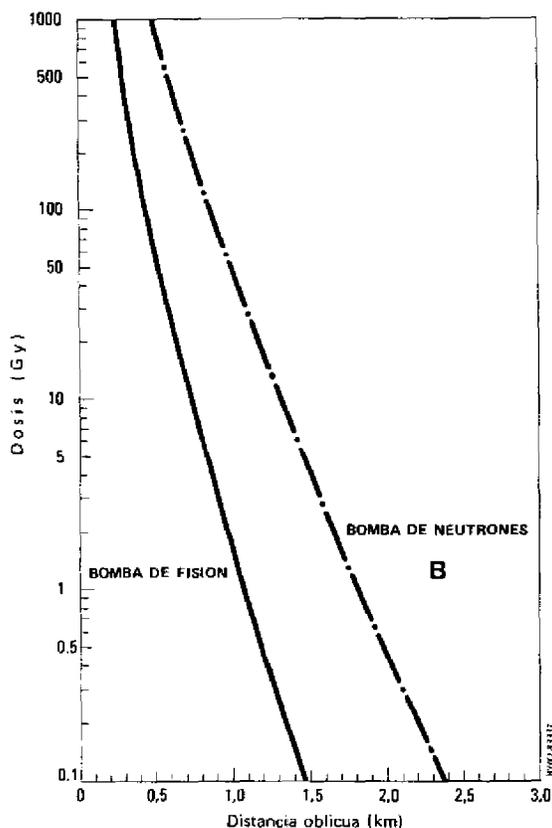
<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

47. Respecto de las armas de potencia menor, la zona letal producida por la radiación inicial rebasa la producida por la onda expansiva y el calor, particularmente en el caso de la bomba de neutrones.

48. Las ojivas de radiación aumentada (ORA), comúnmente llamadas bombas de neutrones, están diseñadas deliberadamente para matar por radiación sin producir muchos daños concomitantes por efecto de la onda expansiva y del calor.

49. La ojiva de radiación aumentada está fabricada de tal manera que la fisión contribuye poco a la liberación de energía y es mínima la pérdida de neutrones. Se ha ideado como arma de uso táctico, que libera una dosis letal para los tripulantes de los tanques. La energía liberada es relativamente pequeña, aproximadamente 1 kt, pero es transportada principalmente por los neutrones. En la Figura 3 se muestra la dosis de neutrones en función de la distancia del punto de explosión de 2 bombas, ambas de una potencia de 1 kt (2). La curva A corresponde a la bomba de fisión y la B a la bomba de neutrones. La figura indica que a pequeñas distancias la bomba de neutrones libera más de 10 veces la dosis de una bomba de fisión; esta diferencia va aumentando a medida que crece la distancia, hasta alcanzar un factor de 100.

FIG. 3. DOSIS DE NEUTRONES PRODUCIDA POR UN ARMA DE 1 kt<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

50. Pese a la alegación de que la bomba de neutrones, además de dejar los edificios intactos, no perjudicaría a la población civil, si se usara una gran cantidad de bombas de este tipo - como sería lógico que ocurriera en operaciones militares - habría muchas bajas en la población civil. Por ejemplo, si se empleara una serie de bombas de neutrones, incluso espaciadas a intervalos de hasta 2,3 km, el nivel de radiaciones en toda la zona abarcada por la salva disparada sería suficiente para liberar una dosis de neutrones letal para todas las personas que estuvieran en aquel momento al aire libre (2).

#### PRECIPITACION RADIATIVA

51. La fisión es uno de los dos procesos nucleares principales en las armas termonucleares. Consiste en la escisión de núcleos de uranio o de plutonio en dos fragmentos. Esta escisión puede ocurrir de muchas maneras, pero en la mayoría de los casos ambos fragmentos son radiactivos y, a su vez, se desintegran para transformarse en otras sustancias radiactivas. El resultado de la explosión es por lo tanto la creación de un gran número (aproximadamente 300) de sustancias radiactivas diferentes, cada una de las cuales se va desintegrando con su propio periodo característico. Este periodo varía desde una fracción de segundo hasta muchos millones de años. La desintegración de las sustancias radiactivas va acompañada de la emisión de rayos beta (electrones rápidos) y rayos gamma.

52. La cantidad total de radiactividad producida es colosal. La explosión de una bomba de 1 Mt en que la mitad de la potencia explosiva se deriva de la fisión origina una actividad de rayos gamma que, 1 hora después de la explosión, equivale a aproximadamente 300 000 toneladas de radio.

### Anexo 1

53. Además de los fragmentos de la fisión hay otras sustancias radiactivas: el plutonio producido por el uranio en el casco exterior de la bomba, el tritio producido en el proceso de fusión y la radiactividad inducida por los neutrones en los diversos materiales por los que pasan. En la mayoría de los casos estas sustancias contribuyen relativamente poco al peligro de radiación.

54. El depósito de radiactividad en el suelo, que puede originar la exposición a radiaciones de personas y animales, se llama precipitación radiactiva. Todas las armas nucleares que se hacen estallar en el aire originan esta precipitación, pero el lugar y el momento en que se produce - y, por lo tanto, la magnitud del riesgo - dependen principalmente de la altitud de la explosión.

55. Con explosiones a altitudes tales que la bola de fuego no toca el suelo, los productos de fisión, inicialmente en forma gaseosa, se elevan con la bola de fuego a grandes alturas en la troposfera y la estratosfera; cuanto mayor es la potencia de la explosión, mayor es la altura. Cuando la temperatura de la bola de fuego es suficientemente baja, las sustancias radiactivas forman partículas por condensación y coagulación. Estas partículas son muy pequeñas y, por eso, su descenso es muy lento; pueden tardar meses en llegar al suelo. Para entonces habrán sido transportadas ya por vientos estratosféricos alrededor del planeta. En semejantes condiciones no hay precipitación, o hay muy poca, en los lugares próximos al de la explosión. Este tipo de precipitación se denomina "mundial" o "retardada".

56. Con las explosiones en superficie o a altitudes lo bastante pequeñas para que la bola de fuego toque el suelo, enormes cantidades de tierra y de escombros son aspiradas con la bola de fuego junto con los productos de fisión. A medida que se enfría la bola de fuego, la radiactividad se condensa en las partículas del material procedente del suelo; muchas de éstas son partículas grandes, que descienden luego por la fuerza de la gravedad al cabo de un día, más o menos, a distancias no muy grandes del lugar de explosión (varios centenares de kilómetros). Esto constituye la precipitación "local" o "temprana", que puede contener alrededor del 60% de la radiactividad total. La importancia y la localización de la precipitación temprana depende principalmente de las condiciones meteorológicas, en particular de la velocidad y la dirección del viento.

57. El tamaño de la bola de fuego y la altitud máxima de la explosión para que la bola de fuego toque el suelo dependen de la potencia explosiva del arma. Como puede verse en la Figura 1, para las tres potencias aquí examinadas las alturas máximas de la explosión para que ocurra una precipitación local apreciable son 340, 860 y 2150 m, respectivamente.

### Precipitación local

58. La exposición de las poblaciones a la radiactividad de la precipitación puede suceder de varias maneras y en diferentes momentos. En el Cuadro 8 se muestran varias vías de exposición. Para la precipitación local, la vía C - es decir, la irradiación externa por rayos gamma de materias depositadas en el suelo - representa el peligro mayor. Si toda la radiactividad contenida en la precipitación temprana producida por 1 bomba de 1 Mt (a la que la fisión contribuiría en un 50%) se depositara de manera uniforme sobre una zona de 1 km<sup>2</sup>, la tasa de dosis a 1 m por encima del nivel del suelo sería aproximadamente de 15 000 Gy (1 500 000 rad) por hora al cabo de 1 hora de haberse producido la explosión. Para armas de otras potencias, la dosis es proporcional a la potencia (teniendo en cuenta el contenido de fisión de la bomba).

CUADRO 8. VIAS DE EXPOSICION A LOS RAYOS GAMMA EN LA PRECIPITACION RADIATIVA

- |    |  |
|----|--|
| A. | Externa, debida al paso de una nube radiactiva                   |
| B. | Interna, debida a la radiactividad inhalada con el aire          |
| C. | Externa, debida a la radiactividad depositada en el suelo        |
| D. | Interna, debida al consumo de alimentos contaminados             |
| E. | Interna, debida a la inhalación de radiactividad en resuspensión |

59. Las tasas de dosis a que efectivamente podrían estar expuestas las poblaciones son alteradas por dos factores: la desaparición progresiva de la radiactividad con el tiempo y la dispersión de la precipitación con la distancia.

60. La desintegración de los distintos productos de la fisión y su transformación en otras sustancias radiactivas provoca con el tiempo una variación bastante compleja de las tasas de dosis. En el Cuadro 9 se muestran las tasas de dosis en diversos momentos, hasta 10 000 horas (aproximadamente 1 año) después de la explosión, partiendo del supuesto de que la intensidad de dosis después de 1 hora (tasa de dosis de referencia) es de 1 Gy (100 rad) por hora.

CUADRO 9. TASAS DE DOSIS DE RAYOS GAMMA ORIGINADOS POR LA PRECIPITACION RADIATIVA EN DIFERENTES MOMENTOS DESPUES DE UNA EXPLOSION NUCLEAR<sup>a</sup>

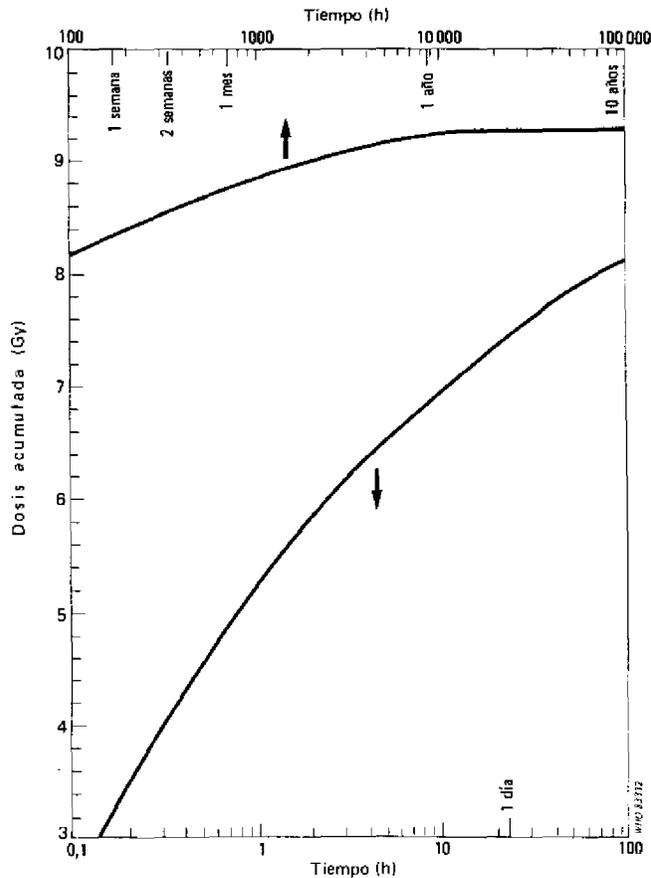
Tiempo (h)	Tasa de dosis relativa (Gy/h)
1	1
2	0,40
4	0,15
6	0,10
12	$5 \times 10^{-2}$
24	$2,4 \times 10^{-2}$
36	$1,6 \times 10^{-2}$
48	$1,1 \times 10^{-2}$
72	$6,2 \times 10^{-3}$
100	$3,6 \times 10^{-3}$
200	$1,7 \times 10^{-3}$
500	$5,0 \times 10^{-4}$
1 000	$2,3 \times 10^{-4}$
2 000	$1,1 \times 10^{-4}$
5 000	$3 \times 10^{-5}$
10 000	$6 \times 10^{-6}$

<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

Anexo 1

61. La dosis total recibida después de una exposición durante algún tiempo puede calcularse integrando las tasas de dosis en el periodo correspondiente. La Figura 4 muestra el resultado de esta integración empezando desde 1 minuto después de la explosión hasta un momento determinado, partiendo asimismo del supuesto de que al cabo de 1 hora la tasa de dosis es de 1 Gy (100 rad) por hora. (Para otras dosis medias iniciales, las ordenadas de la Figura 4 han de multiplicarse por la tasa de dosis efectiva al cabo de 1 hora.) La figura indica también cómo se hace el cálculo de la dosis total recibida por una persona que penetra en un lugar donde hay precipitación en un momento dado después de la explosión y permanece en él durante cierto tiempo. La dosis se determina entonces por la diferencia en las ordenadas correspondientes a las horas de entrada y salida.

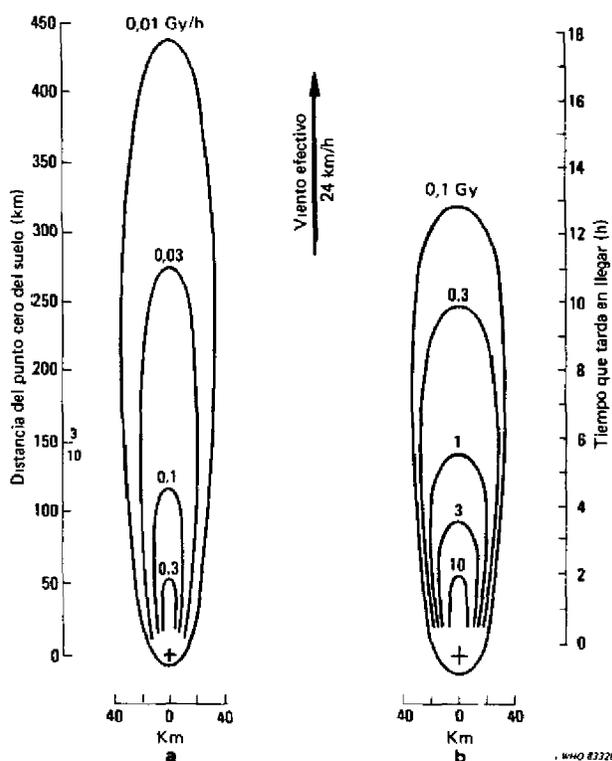
FIG. 4. DOSIS ACUMULADA A CONSECUENCIA DE LA PRECIPITACION LOCAL EN FUNCION DEL TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA EXPLOSION<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

62. A una distancia determinada de la explosión, la dosis realmente recibida dependería de la distribución de la precipitación en el espacio. Para una bomba determinada, la distancia recorrida por las partículas de la precipitación y el momento y lugar de su depósito dependen principalmente de la velocidad y la dirección del viento. A medida que las partículas son arrastradas más lejos por el viento, se difunden por zonas más extensas, de modo que el ritmo a que puede recibirse la dosis de radiación se reduce rápidamente con la distancia. Esta disminución se añade a la desintegración radiactiva que se registra durante el tiempo transcurrido antes de que las partículas de la precipitación lleguen al suelo. Con un viento constante, sin gradiente anemométrico, en cualquier momento siguiente a la explosión la radiactividad se habrá propagado de tal manera que las líneas que unen todos los puntos correspondientes a la misma dosis tendrán forma de cigarro. En la Figura 5 se muestran: a) varias curvas de tasas de dosis correspondientes a una precipitación originada por una bomba de 2 Mt con un contenido de 50% de productos de fisión 18 horas después de la explosión, con una velocidad del viento de 24 km por hora; y b) las curvas de las dosis totales que resultarían de una exposición a estas tasas de dosis (3). Hay que señalar que esas curvas representan una situación transitoria en el espacio y en el tiempo. En cualquier lugar, la actividad crece primero con el tiempo, a medida que una mayor precipitación alcanza la localidad y se deposita, pero después disminuye por desintegración natural.

FIG. 5. CURVAS CORRESPONDIENTES A LA PRECIPITACION ORIGINADA POR UNA BOMBA DE 2 MT DESPUES DE 18 HORAS DE LA EXPLOSION: a) INTENSIDAD DE DOSIS Y b) DOSIS TOTAL<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Reproducido, con autorización, de Rotblat (2).

Anexo 1

63. La Figura 5 tiene por objeto ilustrar la situación sólo de manera muy simplificada. En realidad la configuración es mucho más complicada, porque muchos factores pueden perturbar la modalidad de la precipitación. El viento puede cambiar de velocidad o de dirección, lo que alterará las curvas. Puede después registrarse un lavado de la precipitación por la lluvia o la nieve si las partículas llevadas por el aire llegan a una región en donde hay una de estas precipitaciones atmosféricas. Tal situación puede crear los llamados "puntos calientes", es decir pequeñas zonas en donde se deposita una gran cantidad de radiactividad. La lluvia que caiga después de la precipitación radiactiva puede reducir algo la radiactividad.

64. No obstante, un cuadro hipotético de la situación sigue siendo útil al permitir una estimación aproximada del posible riesgo de radiación producido por la precipitación temprana. En el Cuadro 10 se da el tiempo calculado de llegada, la intensidad de dosis de referencia y la dosis total acumulada a distintas distancias a sotavento para una bomba de 1 Mt (2). Como se muestra, a distancias de hasta 800 km la dosis que una persona que está al aire libre puede acumular a consecuencia de la explosión de una de esas bombas es de 0,1 Gy (10 rad). Como término de comparación puede señalarse que la dosis producida por fuentes naturales es de aproximadamente 0,001 Gy (0,1 rad) al año.

CUADRO 10. TASA DE DOSIS Y DOSIS ACUMULADAS EN UN MODELO TEORICO DE PRECIPITACION (BOMBA DE 1Mt, VELOCIDAD DEL VIENTO 24 km/h)<sup>a</sup>

Distancia a sotavento (km)	Tiempo que tarda en llegar (h)	Tasa de dosis de referencia (Gy/h)	Dosis acumulada (Gy)
100	4,2	2,7	7,8
200	8,3	1,1	2,7
300	12,5	0,54	1,2
400	16,7	0,32	0,66
500	20,8	0,20	0,39
600	25,0	0,13	0,24
700	29,2	0,09	0,16
800	33,3	0,06	0,10

<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

65. En el Cuadro 11 se muestran las zonas dentro de las cuales pueden recibirse dosis hasta unos límites determinados (2); se indica que esas zonas son aproximadamente proporcionales a la potencia explosiva. También se ve que la explosión de una bomba de 10 Mt podría producir una dosis de por lo menos 0,1 Gy (10 rad) en el territorio de prácticamente cualquier país de Europa.

CUADRO 11. ZONAS CUBIERTAS POR DETERMINADAS DOSIS DE RAYOS GAMMA ACUMULADAS A CONSECUENCIA DE LA PRECIPITACION (km<sup>2</sup>)<sup>a</sup>

Límite superior de dosis acumulada (Gy/h)	Potencia explosiva (Mt)		
	0,1	1	10
10	90	900	11 000
8	120	1 200	14 000
6	190	1 700	18 000
4	290	2 600	27 000
2	540	5 400	52 000
1	930	10 500	89 000
0,5	2 200	18 600	148 000
0,25	3 900	32 000	234 000
0,10	6 700	53 000	414 000

<sup>a</sup> Basado en Rotblat (2).

66. Hay que señalar que todos estos cálculos representan las dosis máximas de rayos gamma que una persona podría recibir si permaneciera todo el tiempo al aire libre. En realidad, las personas (pero no la mayoría de los animales) permanecerán probablemente en el interior de los edificios, y algunas incluso en refugios, durante parte del tiempo. Esta circunstancia reduciría la dosis por un factor dependiente del tipo de construcción, el espesor de las paredes y los techos, la altura del piso en un edificio de varias plantas, su proximidad a otros edificios, etc.

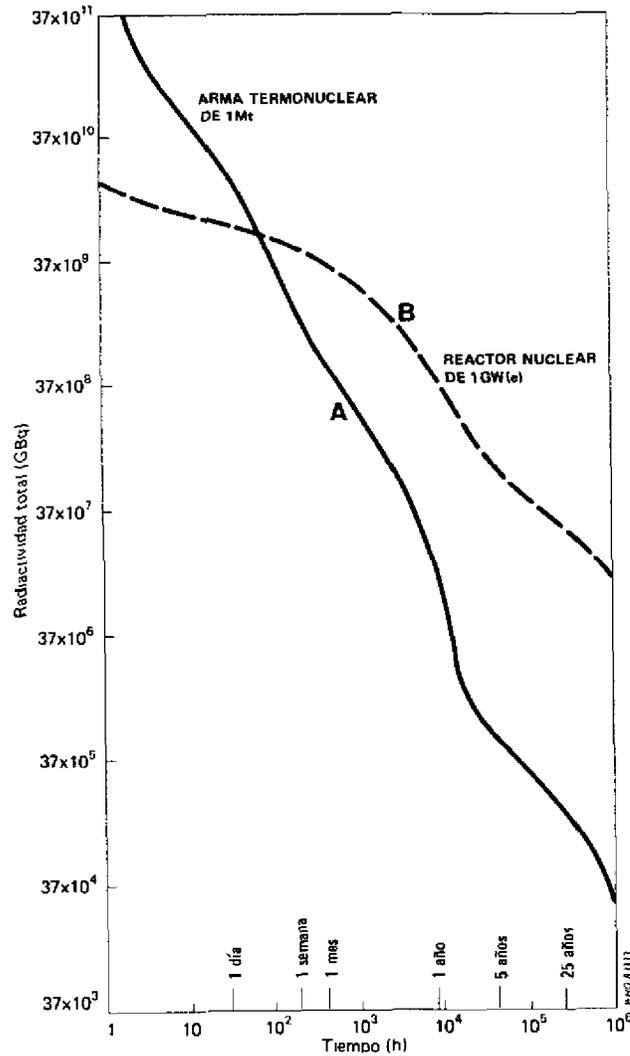
67. La protección que confieren esos elementos se expresa como factor de protección, que es la relación entre la dosis que hubiera recibido una persona al aire libre y la recibida en el interior de un edificio o refugio en el mismo lugar. Un buen refugio puede tener un factor de protección de 1000 o más, pero por término medio se considera razonable un valor de 5 en las poblaciones urbanas y de 3 en las zonas rurales.

68. Conviene tener presente asimismo que las dosis de los Cuadros 10 y 11 corresponden solamente a los rayos gamma y no tienen en cuenta los efectos de los rayos beta, emitidos por casi todos los productos de fisión. Los rayos beta pueden contribuir como emisores tanto externos como internos, en este último caso cuando una persona inhala aire que contiene partículas radiactivas o ingiere esas partículas con bebidas o alimentos contaminados.

Anexo 1

69. Hay otro factor que podría agravar la situación en relación con la precipitación. En una guerra nuclear es probable que sean objetivos primarios las centrales de producción de energía eléctrica. Si una central nuclear es alcanzada por una bomba nuclear, el contenido radiactivo del reactor será aspirado con la bola de fuego, transportado por el viento y depositado en forma de precipitación local junto con los productos de fisión de la bomba. Sin embargo, la desintegración de la radiactividad procedente de un reactor es mucho más lenta que la procedente de una bomba (véase Fig. 6) y, por lo tanto, la zona quedará contaminada durante mucho más tiempo (6).

FIG. 6. DESINTEGRACION DE LA RADIATIVIDAD EMITIDA POR:  
a) UNA BOMBA DE 1 Mt; b) 1 REACTOR NUCLEAR DE 1 GW(e)<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Reproducido, con autorización, de Fetter y Tsipis (6).  
Copyright © 1981, Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos.

### Precipitación mundial

70. La proporción de la radiactividad de los productos de fisión que no es depositada como precipitación local, así como toda la radiactividad en las explosiones a gran altitud, son llevadas a grandes alturas por la bola de fuego y se estabilizan en la troposfera o en la estratosfera. Finalmente, vuelven a caer en forma de precipitación retardada o mundial.

71. El ritmo del descenso y la distribución geográfica de esta precipitación vienen determinados por varios factores: el movimiento dentro de la estratosfera, el traslado de la estratosfera a la troposfera, el movimiento dentro de la troposfera y, por último, el depósito en el suelo. El ritmo a que las partículas son trasladadas de un compartimiento a otro parece seguir una ley exponencial; en consecuencia, puede hablarse de un tiempo de "media permanencia", es decir, el tiempo que tardan en salir de un compartimiento la mitad de los átomos radiactivos.

72. En las capas superiores de la estratosfera hay un traslado bastante rápido entre los hemisferios. Por eso, la radiactividad inicialmente inyectada en la alta estratosfera se dividirá igualmente entre los hemisferios norte y sur, para repartirse luego por todo el planeta, aunque con menor concentración en las regiones tropicales.

73. En las capas bajas de la estratosfera, el intercambio entre los hemisferios es mucho más lento (la media permanencia dura unos 5 años), por lo que toda la radiactividad depositada en ese compartimiento permanecería en el hemisferio en el que se hubiese producido la explosión. El descenso desde la troposfera al nivel del suelo es rápido, con una media permanencia de aproximadamente 1 mes (7).

74. El principal resultado del largo tiempo necesario para el descenso de la precipitación mundial es que todos los materiales de periodo corto se han desintegrado y la radiactividad, cuando desciende, es ya tan débil que el riesgo exterior debido a los rayos gamma ha dejado de ser predominante en relación con el riesgo interior debido a los rayos beta. El principal riesgo interior se debe entonces a la ingestión de la radiactividad que ha penetrado en la cadena alimentaria después de depositarse en el suelo.

75. A corto plazo, presenta un grave riesgo el yodo-131, que tiene un periodo de permanencia de unos 8 días; han de transcurrir unas 4 semanas para que su actividad descienda hasta ser 10 veces menor. La principal vía de penetración del yodo-131 en el organismo humano es la leche de las vacas que han pastado en prados contaminados. El ciclo por el que el yodo-131 pasa de la bomba a la atmósfera, la hierba, la vaca, la leche y el hombre es muy rápido. Se ha descubierto leche con una concentración apreciablemente elevada de yodo radiactivo a miles de kilómetros de distancia de lugares donde se habían practicado ensayos nucleares.

76. En la precipitación muy retardada, las sustancias radiactivas más preocupantes son el estroncio-90 y el cesio-137. Sus periodos de permanencia son tan largos (aproximadamente 29 y 30 años) que el tiempo que tardan en depositarse disminuye muy poco su actividad. Estos elementos causan preocupación porque pueden incorporarse a distintos órganos del cuerpo humano; el estroncio se acumula en los huesos y en la dentadura y el cesio es fijado por los tejidos blandos. Los rayos beta y gamma emitidos por estos cuerpos pueden liberar considerables dosis internas. La incorporación de esas sustancias al organismo humano sigue una complicada cadena biológica que va desde el suelo y las plantas a los animales y al hombre. El estroncio-90 llega al hombre principalmente por la leche y la carne, mientras que el cesio-137 penetra con el pescado, las hortalizas y otras plantas.

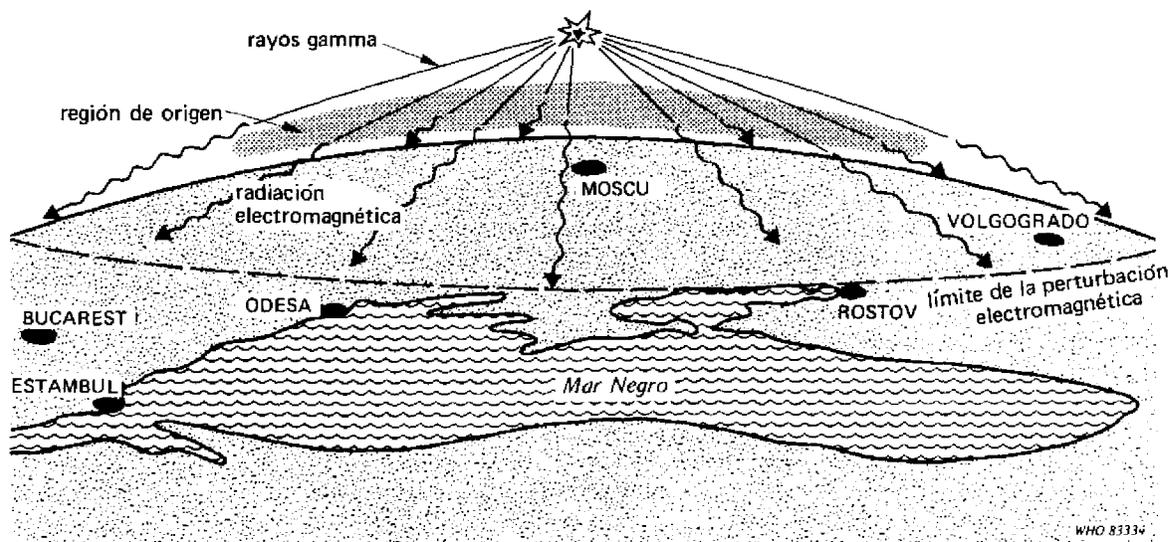
Anexo 1

IMPULSO ELECTROMAGNETICO (IEM)

77. En una explosión a gran altitud, los rayos gamma procedentes de la bomba provocan la emisión de electrones de los átomos del aire con los que chocan. Estos electrones son impulsados en órbitas circulares en el campo magnético de la tierra y ese movimiento crea una onda electromagnética. El resultado es la producción de un breve impulso de radiación electromagnética, de naturaleza semejante a la de las ondas de radio, pero abarcando un espectro continuo de longitudes de onda y con una amplitud de millones de veces mayor que la de una retransmisión radiofónica ordinaria. Este impulso puede producir al nivel del suelo campos eléctricos de unos 50 000 voltios por metro. Debido al tiempo de generación sumamente corto, que es del orden de nanosegundos, el IEM puede producir en los circuitos eléctricos sobrecargas suficientemente fuertes para quemar o averiar sus componentes e inutilizar el equipo.

78. Puede también producirse un IEM con explosiones a baja altitud, pero el mecanismo es algo diferente y el radio de acción limitado a 10-20 km. En las explosiones a muy grandes altitudes, el radio de acción del impulso crece enormemente, hasta miles de kilómetros. Por ejemplo, el IEM que produciría una explosión sobre Nebraska, a una altitud de 350 km, recubriría prácticamente todo el territorio continental de los Estados Unidos de América, así como algunas partes del Canadá y de México (8). En la Figura 7 se muestra la zona que abarcaría la explosión de una bomba a 100 km sobre Moscú; el efecto del IEM alcanzaría desde la península de Kola al mar Negro (9).

FIG. 7. IMPULSO ELECTROMAGNETICO PROVOCADO POR UNA EXPLOSION A GRAN ALTITUD<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Reproducido de Naciones Unidas (9).

79. El IEM no es directamente peligroso para el hombre, pero la sobrecarga eléctrica puede causar averías permanentes en el equipo eléctrico y electrónico no protegido y de este modo desorganizar el suministro eléctrico, así como las comunicaciones telefónicas y por radio. Los modernos aparatos de estado sólido, como los transistores y los circuitos integrados, que han sustituido casi completamente las válvulas termiónicas en los aparatos de radio y televisión, son muchas veces más sensibles al IEM y por lo tanto más fácilmente inutilizados.

### EFECTOS ATMOSFERICOS

80. A diferencia del IEM, que puede producir graves trastornos incluso con la explosión de una sola bomba, los efectos atmosféricos sólo son importantes cuando estallan muchas. Las dos fuentes más probables de trastornos atmosféricos son la inyección en la atmósfera de a) óxidos de nitrógeno y b) partículas de materia.
81. Las elevadísimas temperaturas de las explosiones nucleares favorecen la formación de óxidos de nitrógeno; si se producen en la estratosfera, actúan como catalizadores, convirtiendo el ozono en oxígeno ordinario. La nube en forma de hongo producida por un arma de gran potencia sube a la estratosfera y se ha pensado que unos miles de bombas de potencias del orden de megatonnes podrían causar una destrucción del 50% de la capa de ozono de la estratosfera (10). Esto tendría por consecuencia un aumento de la cantidad de radiación ultravioleta que llega al suelo, la cual se multiplicaría por 3 o más, con el consiguiente aumento de la incidencia del cáncer de la piel y de melanomas. Podrían sobrevenir asimismo alteraciones climáticas, pero su naturaleza y extensión son difíciles de predecir.
82. Si el material de la bomba se inyectara en la troposfera, como sucedería con explosiones de bombas de menor potencia, se registraría una reacción inversa, es decir, un aumento de la concentración de ozono (11). Esto ocurre así porque la acción catalítica del óxido de nitrógeno origina la oxidación del monóxido de carbono y del metano existentes en la troposfera. No obstante, el principal efecto de la explosión de muchas bombas a bajas altitudes sería la inyección en la atmósfera de grandes cantidades de partículas de materia.
83. Hay dos fuentes de inyección de esta clase. Una es la formación de un cráter por la bola de fuego, con el desplazamiento de grandes cantidades de materia del suelo. Una parte sería lanzada a la atmósfera en forma de polvo fino y podría permanecer en suspensión durante mucho tiempo. Una bomba de 1 Mt podría inyectar en la atmósfera unas 50 000 toneladas de materia. Unas 2000 explosiones de esa potencia podrían inyectar tanta materia como la erupción volcánica del Krakatoa en 1883 (12).
84. La segunda fuente de partículas de materia serían los múltiples incendios provocados por las explosiones en zonas industriales, ciudades y bosques, así como en depósitos de petróleo y de gas, que podrían ser objetivos en una guerra nuclear. Los distintos hidrocarburos y otros gases emitidos tendrían también por consecuencia la producción de ozono y crearían una capa espesa de niebla y humo sobre una gran parte del mundo. El cielo se volvería amarillo y la menor cantidad de luz azul reduciría probablemente la fotosíntesis en las plantas. La dispersión y la absorción de la luz por las partículas muy pequeñas en suspensión en el aire podrían reducir la intensidad de luz solar en un orden de magnitud (11). No se sabe bastante todavía acerca de esos efectos, pero podrían tener consecuencias catastróficas para la agricultura y resultar tan devastadores como los otros efectos de la guerra nuclear.

Anexo 1

BIBLIOGRAFIA

1. Lapp, R. E. Kill and overkill, Londres, Weidenfeld & Nicholson, 1962.
- \*2. Rotblat, J. Nuclear radiation in warfare, Londres, Taylor & Francis, 1981 (SIPRI).
- \*3. Glasstone, S. y Dolan, P. J., ed. The effects of nuclear weapons, 3<sup>a</sup> ed., Washington, DC, US Government Printing Office, 1977.
- \*4. Office of Technology Assessment, Congress of the United States. The effects of nuclear war. Washington, DC, 1979.
5. Lewis, K. N. The prompt and delayed effects of nuclear war. Scientific American, 241: 27-39 (1979).
6. Fetter, S. A. y Tsipis, K. Catastrophic releases of radioactivity. Scientific American, 244: 33-39 (1981).
7. Krey, P. W. y Krajewski, B. Comparison of atmospheric transport model calculations and observations of radioactive debris. Journal of geophysics research, 75: 2901 (1970).
8. Broad, W. J. Nuclear pulse. Science, 212: 1009, 1116, 1248 (1981).
- \*9. Naciones Unidas, Estudio amplio sobre las armas nucleares. Nueva York, 1980 (documento A/35/392).
10. National Academy of Sciences. Long-term worldwide effects of multiple nuclear-weapons detonations. Washington, DC, 1975.
11. Crutzen, P. J. y Birks, J. W. The atmosphere after a nuclear war: twilight at noon. Ambio, 11: 114-125 (1982).
12. Westing, A. H. Environmental impact of nuclear warfare. Environmental conservation. 8: 269 (1981).

---

\* Las referencias marcadas con un asterisco son las fuentes principales utilizadas en este anexo.