

La amenaza nuclear I

LUIS E. ACEVEDO GÓMEZ*

INTRODUCCIÓN

Hasta hoy, los riesgos de una guerra nuclear han sido calculados convencionalmente por medio del número de muertes humanas en ambos lados del conflicto al final de la batalla, tomando en cuenta ejércitos y no combatientes. Los términos "aceptable" y "no aceptable", significando ciertos millones de bajas humanas, han sido usados para establecer juicios justificados en favor de la necesidad de fabricación de nuevos y más precisos sistemas de armas. Hoy las cosas son diferentes. Dejemos a un lado el hecho de que en un holocausto nuclear (uso de todas las armas) de, digamos, 5 000 megatones, morirían alrededor de 1 000 millones de seres humanos debido a la onda de choque, al calor y a la radiación. Dejemos a un lado el hecho de que más de 1 000 millones adicionales morirían luego debido a los efectos retardados sobre sistemas de soporte de vida y lluvia radiactiva.

Algo adicional pasaría al mismo tiempo, por lo que el ser humano debería sentirse igualmente desgraciado que por la pérdida de su propia vida. El elaborado, coherente y bellamente organizado ecosistema de la Tierra (biosfera, naturaleza) sería mortalmente afectado. Algunas de sus partes persistirían y la vida en el planeta continuaría; pero quizá sólo a un nivel comparable con lo que existía aquí hace un billón de años cuando los procariontes (criaturas como las bacterias de hoy en día) se unían en arreglos simbióticos e "inventaron" las células nucleadas de las cuales nosotros somos descendientes.

Hasta hace poco se había tendido a considerar el problema de una guerra nuclear como concerniente sólo a los adversarios que poseen las armas nucleares. El control de armamentos y las negociaciones interminables dirigidas hacia la reducción de explosivos nucleares eran vistas como responsabilidad sólo de las naciones en confrontación. Hoy ya todo esto ha cambiado. No existe nación en la Tierra que se encuentre libre de la amenaza de destrucción si dos naciones, o grupos de naciones, se involucran en un intercambio de misiles nucleares. Si la Unión Soviética y los Estados Unidos, junto con sus respecti-



* Estudiante de Física, Facultad de Ciencias, UNAM.



vos aliados, empezaran a enviar sus misiles más allá de un mínimo, aún no determinado, los países neutrales sufrirían los mismos efectos a largo plazo, las mismas muertes lentas de los participantes directos. Aún países situados en el hemisferio sur tendrían que preocuparse en la misma medida que, por ejemplo, Alemania Occidental, si un intercambio a gran escala sucediera en el norte.

Hasta hoy en día se habían considerado los conflictos con armas nucleares como un esfuerzo entre adversarios por establecer dominio sobre territorios o ideologías. Con los nuevos descubrimientos es claro que cualquier territorio ganado se convertiría, a la larga, en territorio estéril, y cualquier ideología se desvanecería en la muerte de la civilización y la pérdida permanente de la memoria humana.

La continua existencia y creación de armas nucleares, la proliferación contemplada de dichas armas en otras naciones que hoy carecen de ellas, y los esfuerzos detenidos e inútiles, de deshacerse de este peligro para la vida del planeta corresponden a otro orden de problemas diferentes al que parecía unos años atrás. Ya no es un asunto político propio de la sabiduría y consideración de unos pocos hombres de estado y militares, sino un dilema global que envuelve a toda la humanidad.

Ya no existen alternativas que elegir, ni tampoco tiempo para discutir el asunto. Simplemente debemos deshacernos de una vez y para siempre de todas las armas que en realidad no son armas sino instrumentos de malevolencia pura. Según la situación, está en peligro mucho más que la humanidad misma. Se está arriesgando de una manera seria el concepto completo de vida. Esperamos que la humanidad entera, habiendo aprendido los hechos, pueda darse cuenta de lo que se deba hacer con todas las armas nucleares.

EFFECTOS DIRECTOS DE LAS ARMAS NUCLEARES

Los efectos directos debido a explosiones nucleares dependen de:

1. El diseño del artefacto nuclear.
2. La geografía exacta del lugar atacado.
3. Los materiales y métodos de construcción empleados en el lugar atacado.
4. Las condiciones climáticas (en especial la humedad en la atmósfera).

Por tales razones esta discusión es esencialmente una generalización que está sujeta a un dominio sustancial de variación e incertidumbre.

La energía de una explosión nuclear es liberada en un número de diferentes maneras:

1. La onda de choque, similar a la de una explosión química pero mucho más grande.
2. Radiación nuclear directa.
3. Radiación térmica directa, mucha de la cual es luz visible.
4. El pulso electromagnético.
5. La creación de una variedad de partículas radioactivas que son enviadas al aire en la explosión y se conoce como lluvia radiactiva cuando regresa a la tierra.

La distribución de la energía en las formas anteriores depende del tamaño y diseño de la bomba, pero es posible una descripción general.

Para hacer la descripción general sería bueno, ante todo, discutir el principio que interviene en el origen de la gran cantidad de energía liberada en una explosión nuclear. De acuerdo a la famosa ecuación desarrollada por Einstein

$$E = mc^2$$

se relaciona el concepto de masa-energía, el cual establece que no podemos hablar de una de ellas independientemente de la otra. En otras palabras, a la masa se le asocia una cantidad de energía y viceversa. De dicha ecuación podemos conocer la cantidad de energía necesaria para crear una partícula de masa m , la cual es recuperable si podemos revertir el proceso.

La diferencia entre una explosión química y una explosión nuclear radica en que en la primera, la energía liberada proviene de la energía contenida en el enlace químico, mientras que en la segunda proviene de la energía necesaria para mantener el núcleo atómico ligado.

Hay dos tipos de reacciones nucleares de las cuales podemos derivar energía. Éstas son la fisión y la fusión. En la fisión se obtiene energía debido a la liberación de partículas energéticas al dividirse un núcleo atómico. En la fusión se obtiene energía debido a la liberación de partículas energéticas, pero esta vez por la unión de dos o más núcleos atómicos. En el sol ocurren procesos de fusión y son los responsables de radiar gran cantidad de energía por tanto tiempo. En el diseño de artefactos nucleares se utiliza uno solo o ambos de los principios mencionados.

ONDA DE CHOQUE

La energía generada por una explosión nuclear aumenta la temperatura a aproximadamente 10^7 °C en un espacio esférico de un metro de diámetro. Como la liberación de la energía

ocurre en una fracción de segundo, ésta misma no tiene tiempo para disiparse. Entonces se ejerce una fuerza tremenda en el aire adyacente a la esfera que empieza a expandirse a una gran velocidad. El mismo aire ejerce, entonces, una presión sobre el material de la bomba creando un equilibrio de fuerzas que hace que este material se expanda a velocidad constante. Por lo tanto el aire va a ser empujado a velocidad constante.

Como la velocidad del material de la bomba es mayor que la velocidad del sonido, el aire que se concentra en esta superficie se comprime creando lo que se conoce como la onda de choque. Como la materia es empujada hacia afuera de la explosión, la densidad detrás de la esfera de la onda de choque baja. Lo creado es un pulso como el que aparece en la figura 1 donde se puede deducir que lo que se experimenta es un golpe debido a la compresión, seguido de una descompresión. Los componentes dañinos a humanos y a edificios de la onda de choque son dos:

1. El pulso de la onda de choque.
2. Los vientos violentos que siguen después que pasa el pulso.

Como medida del posible daño se utiliza el concepto de sobrepresión (presión sobre la presión atmosférica). El pulso de sobrepresión se mide en libras/pulgada² (psi).

Para entrar en una discusión más cuantitativa es necesario establecer la diferencia entre una explosión aérea y una superficial. Una explosión aérea es aquella en la que la bola de fuego creada en la explosión no toca el suelo. Una explosión superficial es una en que la bola de fuego sí toca el suelo. Según el daño que se quiera causar en el lugar atacado, se escoge una de estas dos alternativas. El área cubierta en una explosión aérea es mayor que en una superficial, por lo tanto, si se quiere arrasar con un área considerable, se hace detonar la bomba a una altura óptima más allá de la cual el daño no es tan grande. En cambio si se quiere destruir alguna instalación subterránea, como silos de misiles u otras, se utiliza una explosión superficial.

El análisis de efectos de la onda de choque se simplifica mediante el uso de una ley de escaleo (scaling) hidrodinámica. Para explosiones nucleares a cierto valor de sobrepresión dado se tiene que

$$D \propto Y^{1/3}$$

Donde D es cierta distancia desde el centro de la explosión

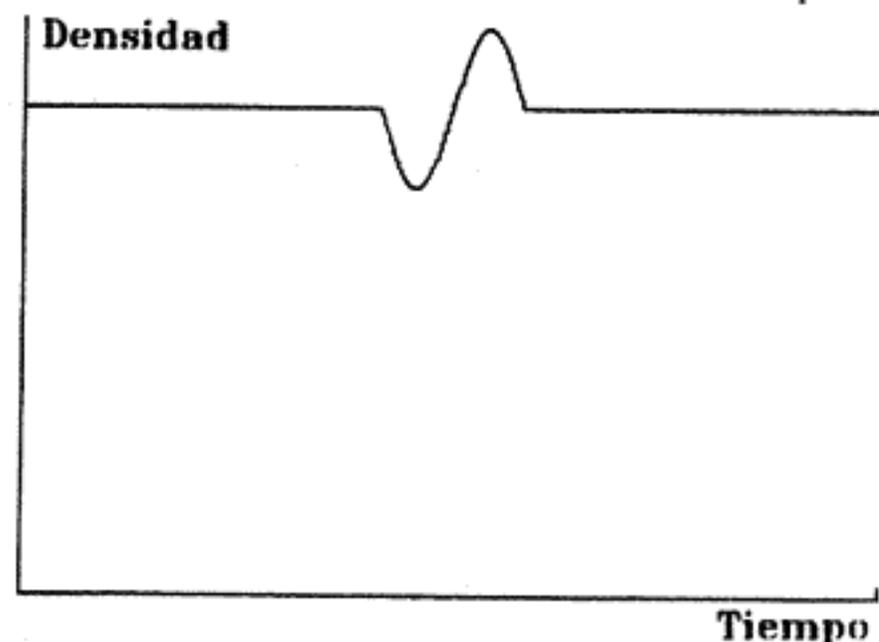
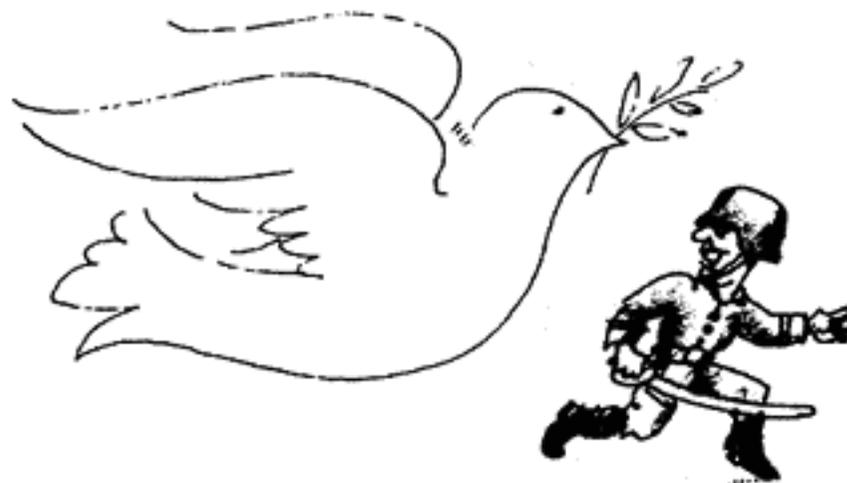


Figura 1.



y Y se conoce como la explosividad de la bomba. En los estudios realizados se ha medido D en millas y Y en megatones. Un megatón es el poder explosivo contenido en un millón de toneladas de trinitrotolueno (TNT). De esta forma, la sobrepresión P es función sólo de un parámetro Z definido como

$$Z = \frac{Y^{1/3}}{D}$$

Para explosiones de hasta el rango de megatones se ha usado el método de ajuste de cuadrados mínimos para ajustar los valores obtenidos en ensayos nucleares, y se ha obtenido que para explosiones superficiales la sobrepresión P está dada por

$$P = 39.12 Z^{1.98} \text{ psi}$$

y para explosiones aéreas

$$P = 111.5 Z^3 + 28.8 Z^{3/2} \text{ psi}$$

La aparición de dos términos en esta última ecuación se debe a que cuando la onda de choque originada por una explosión aérea toca el suelo, ésta se refleja. Debido a que el pulso reflejado pasa por una región donde ya ha pasado el pulso primario, y por lo tanto la densidad y temperatura son mayores que la del ambiente, este pulso reflejado se propaga más rápido que el primario. Entonces el frente reflejado alcanza al primario y se crea un frente de aproximadamente el doble de intensidad del pulso primario. Este nuevo frente se conoce como frente de Mach, y la región en la que este fenómeno ocurre se conoce como la región de reflexión de Mach. En la región de reflexión ordinaria el pulso reflejado llega a un punto luego que el frente primario ha pasado y se experimentan dos máximos de sobrepresión.

Con las relaciones obtenidas para P, en ambos casos se tiene para explosiones superficiales

$$R = \left(\frac{P}{39.12} \right)^{-1/1.98} Y^{1/3} \text{ millas}$$

Donde r es la distancia terrestre del centro de la explosión en la cual se siente una sobrepresión P debido a una explosión de explosividad Y. Para explosiones aéreas

$$R = \left(\left(\frac{223 Y^{1/2}}{-28.8 + (829.4 + 446P)^{1/2}} \right)^{4/3} - H^2 \right)^{1/2} \text{ millas}$$

Donde H es la altura de la detonación.

La velocidad del pulso de la onda de choque está dada por

$$V = C_0 \left(1 + \frac{6P}{P_0} \right)^{1/2}$$

Donde P_0 es la presión atmosférica, P la sobrepresión y C_0 la velocidad del sonido en el ambiente. La velocidad de los vientos está dada por

$$u = \frac{5}{7} \left(\frac{P}{P_0} \right) C_0 \left(1 + \frac{6P}{7P_0} \right)^{-1/2}$$

La mayor parte del daño causado a ciudades por explosiones de alto megatonaje es debido a la onda de choque. Ésta produce cambios súbitos en la presión del aire (presión estática) que puede derrumbar edificios y provocar vientos huracanados (presión dinámica) que causan colisiones entre objetos sueltos entre los cuales se encuentran las personas. Por ejemplo, para una explosión aérea de un megatón a 4 millas (6 km) de distancia, la sobrepresión es de aproximadamente 5 psi la cual ejercería una fuerza de más de 180 toneladas sobre la pared de una casa típica de dos niveles y causaría vientos de 160 millas por hora (255 km/hr). Aunque una sobrepresión de 5 psi no mataría a una persona, un viento de 160 mph causaría colisiones fatales entre personas y objetos cercanos. La mayor parte de las muertes serían causadas por el derrumbe de edificios ocupados. Para tener una idea de los daños se incluyen estimados de vulnerabilidad de población para distintos valo-



res de P en la tabla 1. En la tabla 2 se exponen los valores de velocidad del viento para distintos valores de P .

RADIACIÓN NUCLEAR DIRECTA

Las armas nucleares infligen radiación ionizante sobre personas, animales y plantas en dos formas distintas. La radiación directa ocurre en el momento de la explosión; puede ser intensa pero su alcance es limitado. Por otro lado, la lluvia radiactiva está constituida por partículas que se vuelven radiactivas debido a los efectos de la explosión, y por lo tanto son distribuidas a varias distancias desde el punto de la detonación. Para armas nucleares de alta explosividad el alcance de la radiación directa es menor que el de la onda de choque o el del calor. Sin embargo, para el caso de armas más pequeñas, la radiación directa puede ser el efecto letal con mayor alcance. La radiación directa hizo un daño substancial a los residentes de Hiroshima y Nagasaki.

La respuesta de un organismo a la radiación ionizante es sujeto de una gran incertidumbre científica y de una profunda controversia. Para entender los efectos de las armas nucleares se debe distinguir entre efectos a corto plazo y efectos a largo plazo, pero aún antes se deben aclarar ciertos concep-

tos de dosimetría de radiación.

El paso de partículas cargadas tales como rayos α , β , γ y x a través de la materia (incluyendo el cuerpo humano) pueden ionizar átomos y moléculas y causar daño considerable. Para cuantificar la cantidad o dosis de radiación que pasa a través de la materia se utiliza el concepto de rad. Un rad es la cantidad de radiación que deposita una cantidad de energía de 10^{-2} Joules por cada Kg de material absorbente. Sin embargo esta unidad de medida no es la más representativa del daño biológico producido por la radiación, debido a que dosis iguales de diferentes tipos de radiación producen diferente cantidad de daño. Se define, pues, la efectividad biológica relativa (RBE) o

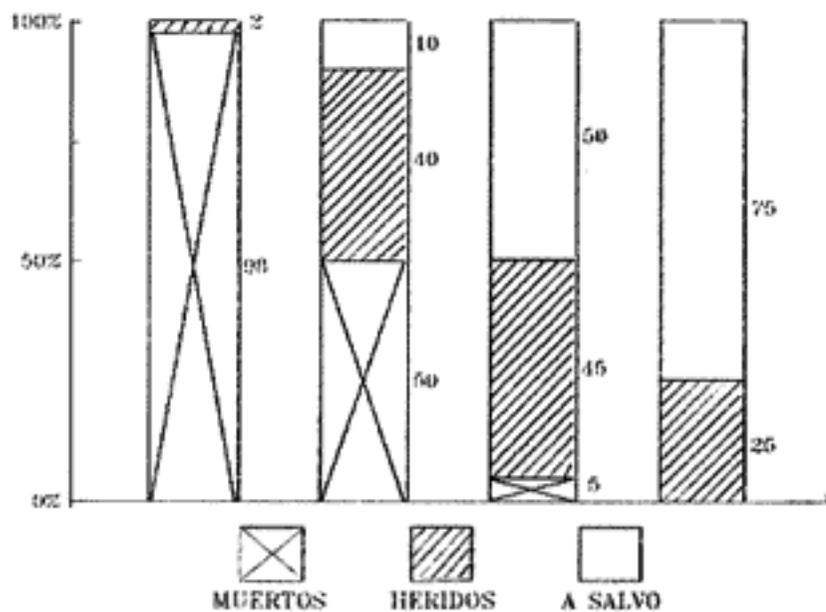


TABLA 1.- Vulnerabilidad de Población en varias zonas de Sobrepresión. Los principios usados en la construcción de esta tabla son relativamente conservadores.

Tabla 2. Valores de velocidad del viento a distintos valores de sobrepresión

P (psi)	u (mph)	u (km/hr)
200	2 078	3 325
150	1 777	2 843
100	1 415	2 264
50	934	1 494
30	669	1 070
20	502	803
10	294	470
5	163	261
2	70	112

Tabla 3. QF para distintos tipos de radiación.

Tipo de radiación	QF
rayos x y γ	≈ 1
b (electrones)	≈ 1
protones rápidos	1
neutrones rápidos	≈ 3
neutrones lentos	hasta 10
partículas α	hasta 20

el factor de calidad (QF) de cierto tipo de radiación como el número de rads de radiación X o de radiación gama que produce el mismo daño biológico que un rad de la radiación dada.

En la tabla 3 aparecen valores de factor de calidad para distintos tipos de radiación.

Definimos entonces la cantidad conocida como rem (*rad equivalent man*) como

$$\text{rem} = \text{rad} \times \text{QF},$$

y por definición un rem de cualquier tipo de radiación produce aproximadamente el mismo daño biológico.

Una dosis de 600 rads por un periodo corto de tiempo (6 a 7 días) tiene 90% de probabilidad de causar enfermedad fatal causando la muerte en una semana. Entre la región 300-600 rads no se conoce el comportamiento de la curva de razón de muertes, pero se estima que una dosis de 450 rads por un corto tiempo causa la muerte a la mitad de la gente expuesta a ella. La otra mitad se enfermaría pero se recuperarían con el tiempo. Una dosis de 300 rads mataría el 10% de las personas expuestas. Una dosis de entre 250-450 rads causaría serias enfermedades de las que la gente se podría recuperar, pero estas enfermedades harían a la gente altamente susceptible a otras enfermedades e infecciones.



Una dosis de entre 50-200 rads causaría náusea y disminuiría la resistencia a otras enfermedades. Una dosis de 50 rads no causaría efectos a corto plazo.

Los efectos debidos a dosis bajas son a largo plazo y se miden estadísticamente. Si una población numerosa se expone a 50 rads de radiación, entre 0.4 y 2.5% de ellos contraería cáncer luego de varios años. También habrían efectos genéticos serios sobre una fracción de los expuestos. Dosis más bajas de 50 rads producen efectos menores. Se ha estimado, a *grosso modo*, que la distancia (en millas) a la cual una persona no protegida recibe una dosis D (en rads), debidos a una bomba de hidrógeno de explosividad Y (MT), está dada por

$$R = 3.15 \left(\frac{Y}{D} \right)^{.132} \text{ millas}$$

RADIACIÓN TÉRMICA DIRECTA

Aproximadamente 35% de la energía de una explosión nuclear se libera en forma de radiación térmica. Los efectos son análogos a los efectos debido a un destello de dos segundos de duración de una enorme lámpara solar. Como esta radiación viaja a casi la velocidad de la luz, ésta precede a la onda de choque por varios segundos, así como el relámpago precede al trueno.

Para calcular el daño causado por la radiación térmica, se considera ésta como una bola de fuego y su daño se estima hallando la energía por unidad de área medida a cierta distancia de la explosión. Si no existe atenuación atmosférica, la energía térmica (E_{total}) a una distancia D de la explosión, puede ser considerada como esparcida uniformemente sobre la superficie de una esfera de área igual a $4\pi D^2$. La energía recibida por unidad de área de la esfera es, pues

$$Q = \frac{E_{\text{Total}}}{4\pi D^2}$$

Cuando se considera la absorción de calor por las partículas de la atmósfera y además la dispersión de la radiación, existe un factor de atenuación, y la ecuación se representa:

$$Q = \frac{T E_{\text{Total}}}{4\pi D^2}$$

donde T , la transmitancia, es la fracción de radiación que se transmite y depende de la visibilidad, la absorción y la distancia. La energía total (E_{total}) puede representarse como una fracción de la explosividad total de la bomba

$$E_{\text{Total}} = f Y$$

y por lo tanto

$$Q = \frac{f T Y}{4\pi D^2}$$

Utilizando el hecho de que un megatón (1MT) equivale a una energía de 10^{15} calorías, y suponiendo una visibilidad de 40 millas (64 Km)¹

¹ El factor de atenuación para esta visibilidad con una distancia del orden del alcance de la bola de fuego es de aproximadamente 0.8.

$$Q = \frac{2500 f Y}{4\pi D^2} \text{ cal/cm}^2$$

donde Y está en MT y D en millas. Para una explosión superficial f es aproximadamente 0.18, y para una explosión aérea f es aproximadamente 0.35. Entonces para explosiones superficiales y aéreas respectivamente se tiene

$$R = \left(\frac{442.4 Y}{Q} \right)^{1/2} \text{ millas}$$

y

$$R = \left(\frac{860.3 Y}{Q} - H^2 \right)^{1/2} \text{ millas}$$

donde R es la distancia a que ocurre cierta energía por unidad de área (Q) y H es la altura de la detonación de la explosión aérea.

El efecto dañino de la radiación térmica en la gente es de dos tipos: uno causado por la radiación incidente directamente sobre la piel y el otro por el contacto con un fuego iniciado por la radiación. La gravedad del primero depende de la duración de la exposición y la pigmentación de la persona. Entre 5 y 6 cal/cm² recibidas por 10 segundos producirían quemaduras de segundo grado. Entre 8 y 10 cal/cm² causarían quemaduras de tercer grado. Para una bomba de un megatón esta exposición se experimentaría a aproximadamente 8 millas de la detonación. La combustión de ropa, cortinas y otras telas requiere de entre 20-25 cal/cm², lo que ocurriría a aproximadamente 5 millas de la explosión. Quemaduras de tercer grado sobre el 24% del cuerpo, o de segundo grado sobre el 30% del cuerpo, producen un trauma serio y sería fatal a menos que se atienda con servicio médico especializado.

Por otro lado la luz visible produce ceguera temporal a las personas que miran en dirección de la explosión, y total o permanente si se enfoca la explosión a través de la pupila directamente a la retina, independientemente de la distancia a que se encuentre la persona del centro de la explosión. En una explosión que ocurra durante la noche el daño sería mayor debido a que la pupila se encuentra más abierta por la cantidad de luz en el ambiente.

La radiación termal debido a una explosión nuclear podría encender material combustible. Los fuegos de más probable propagación son causados por radiación térmica, la cual pasaría a través de ventanas e incendiaría camas y muebles dentro de las casas. Otra posible fuente de fuegos que causarían más daño en zonas urbanas sería el daño producido por la onda de choque tanto a circuitos eléctricos como a líneas de gas en edificios y casas.

El peligro de los fuegos mencionados anteriormente aumentaría en caso de que el fuego se propagara sobre un área mayor a la inicial. Los fuegos masivos podrían clasificarse en dos grupos:

1. Tormenta de fuego, en la cual vientos violentos entrantes a la zona de fuego crean temperaturas extremadamente altas, pero evitan la propagación del fuego hacia afuera.

2. Conflagración, en la cual el fuego se propaga a lo largo de un frente. Este último tipo de fuego dependería de la geografía del área, de la velocidad y dirección del viento, así como de los detalles de construcción de los edificios.

En una tormenta de fuego moriría, posiblemente, la gente en el área del fuego debido al calor, y de asfixia la gente en los refugios. La conflagración se propaga lo suficientemente lento como para que la gente pueda escapar, sin embargo podría matar a los heridos imposibilitados de caminar.

PULSO ELECTROMAGNÉTICO (PEM)

El pulso electromagnético es una onda electromagnética similar a las ondas de radio, que resulta de reacciones secundarias, las cuales ocurren cuando la radiación gamma nuclear es absorbida por el aire o el suelo. Difiere de las ondas de radios comunes en dos aspectos. Primero, crea campos eléctricos de mayor intensidad. Mientras una onda de radio produce una



diferencia de potencial de aproximadamente una milésima de voltio cuando mucho en una antena, el PEM podría producir una diferencia de potencial de miles de voltios. Segundo, es un pulso sencillo que desaparece completamente en una fracción de segundos. Esto significa que éste es similar a la señal eléctrica del relámpago, pero la subida en voltaje es típicamente cien veces más rápida, por lo que mucho del equipo diseñado para proteger las instalaciones eléctricas de un relámpago trabajaría muy lento para proteger el equipo del PEM.

Una explosión superficial produciría un PEM del orden de 10⁴ voltios/metro a cortas distancias (dentro del alcance de los 10 psi de sobrepresión) y del orden de 10³ V/m a mayores distancias (región de 1 psi). Las explosiones aéreas producen menos PEM, sin embargo, explosiones de gran altura (sobre 19 millas, 30 Km) producen un PEM de gran intensidad con alcance de cientos o miles de millas.

No existe evidencia de que el PEM produzca daño físico a los humanos. El daño debido al PEM es más bien sobre sistemas eléctricos o electrónicos, particularmente aquellos que están conectados a cables largos como líneas eléctricas o antenas. Las estaciones de radio son vulnerables no sólo por la pérdida de energía eléctrica, sino también por el daño a componentes electrónicos conectados a sus antenas.



LLUVIA RADIATIVA

La radiación de importancia en las explosiones nucleares es de neutrones, rayos gamma, y en menor grado, partículas beta. La penetración de los rayos gamma y neutrones en el tejido animal es del orden de 20 cm, justo el alcance que causa el máximo daño al organismo. Si la penetración fuera de algunos milímetros o menos, la radiación sería absorbida en la superficie de la piel y no llegaría a los órganos vitales; si fuera de varios metros o más, mucha de la radiación atravesaría el cuerpo sin interactuar. Los rayos beta tienen una penetración de pocos milímetros y pueden causar efectos dolorosos en la piel si caen sobre ella. Las partículas radiactivas que emiten rayos gamma y beta (núcleos radioactivos creados por la fisión de la explosión) pueden causar daño serio si son inhalados o si penetran en la cadena alimenticia.

Esencialmente todos los neutrones y mucha de la radiación gamma se producen en reacciones de fusión y fisión durante la misma explosión. La captura de neutrones por los residuos de la bomba y por el aire, tierra y/o agua alrededor produce radiación gamma adicional y una gran variedad de radioisótopos.

Si la explosión es aérea y la bola de fuego no toca tierra, ésta no es vaporizada y los fragmentos de fisión se elevan a la atmósfera. El material que se eleva se condensa en partículas pequeñas y éstas, se distribuyen, luego de un tiempo apreciable, sobre un área grande. En el caso de bombas de alta explosividad (más de un megatón), el material radiactivo se eleva a la estratosfera y es distribuido sobre una fracción alta de la superficie terrestre. El daño que pueda producir este material depende del tiempo de decaimiento o vida media del isótopo.

Si la explosión es superficial, parte de la tierra es vaporizada y mezclada con los residuos de la bomba. Este material se eleva con el aire caliente. Al subir se enfría y se solidifica en partículas de gran variedad de tamaño. El tiempo que permanecen suspendidas en el aire depende de su tamaño. Las partí-

culas más pesadas caen primero. Mientras permanecen en el aire son empujadas por el viento, en lo que descienden.

Cuando se construye una bomba de hidrógeno para que produzca la máxima explosión posible, alrededor del 50% de su energía es debida a la fisión de uranio. Es posible eliminar la mayor parte del uranio en el diseño de dichas bombas, y aunque esto reduce el tamaño de la explosión, puede eliminar casi toda la lluvia radiactiva. Este artefacto se conoce como una bomba "limpia".

Aunque la intensidad de radiación de cada núcleo radiactivo decae exponencialmente a razones diferentes, la mezcla de los diferentes isótopos produce radiación que está dada aproximadamente por la relación.

$$I = I_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-1.2}$$

donde I_0 es la intensidad al tiempo t_0 . Esta ley produce una disminución de 0.1 en la intensidad, cada vez que t aumente por un factor de 7. Alrededor del 80% de la dosis se recibe el primer día, 90% la primera semana y el restante 10% se distribuye en un tiempo largo. Esta relación de decaimiento se cumple antes de un tiempo de seis meses después de la explosión. Luego de éste la radiactividad decrece más rápidamente.

La cantidad de radiación recibida en un punto en el suelo se describe en términos de la razón a la cual un ser humano recibiría una dosis de radiación de rayos gamma, si estuviese situado en el punto. La distribución de radiación recibida se podría idealizar asumiendo una cierta velocidad constante del viento en una sola dirección y descartando la posibilidad de lluvia (agua). Siendo así, los patrones de distribución de la lluvia radiactiva tendrían forma más o menos elíptica, desplazada en la dirección del viento desde el centro de la explosión. En dichos patrones elípticos se pueden marcar contornos de dosis que las personas expuestas recibirían en cierto tiempo dado.

El área A_f afectada por un contorno de radiación es el área cubierta por una dosis de intensidad D o mayor, para una bomba de explosividad Y . Esta se puede aproximar por la fórmula

$$A_f = \frac{C (e^{-\beta D Y} - e^{-\alpha D Y}) Y}{D} \text{ millas}^2$$

Las constantes C , α , y β dependen de factores tales como el viento, el terreno, el por ciento de fisión de la bomba y la altura de la detonación; así también, en menor grado en la explosividad Y . Asumiendo una velocidad de viento de 15 mph (24/km/hr), terreno plano, 50% fisión, explosión superficial, y Y del orden de 1 MT las constantes son:

$$\alpha = 0.032 \text{ MT/rem}$$

$$\beta = 5.8 \times 10^{-5} \text{ MT/rem}$$

$$C = 1.6 \times 10^5 \text{ millas}^2 \text{ rem/MT.}$$

Con estos valores tenemos que

$$A_f = 1.6 \times 10^5 \left(e^{-5.8 \times 10^{-5} D Y} - e^{-0.032 D Y} \right) \frac{Y}{D} \text{ millas}^2$$

para el alcance amplio de valores entre Y/D igual a B y Y/D igual a α .

Por ejemplo el área Af sobre la cual el máximo daño biológico debido a una explosión de 1 MT excede 100 rems es

$$A_f \approx 1.6 \times 10^3 \text{ mi}^2 (\approx 4.1 \times 10^3 \text{ Km}^2)$$

La tabla 4, resume los efectos médicos de la radiación en los humanos, en función de la dosis total recibida

SINERGISMOS - EFECTOS COMBINADOS

La discusión hasta aquí expuesta ha estado basada en los efectos de una explosión nuclear, considerando cada efecto por separado. Sin embargo, la realidad es que los daños debido a dos o más de los efectos anteriormente discutidos pueden ocurrir, aunque no existen métodos aceptados de calcular el efecto y la probabilidad de dichos daños. Lo que los datos tienden a sugerir es que los efectos aislados no son muy imprecisos en cuanto a muertes inmediatas, pero que las muertes que ocurran al cabo de un tiempo desde la explosión pueden deberse a los efectos combinados. Podríamos considerar tres casos:

1. Radiación nuclear combinada con radiación térmica. Las quemaduras graves exponen el sistema sanguíneo a una tensión considerable y a menudo causan anemia. En experimentos con animales de laboratorio se ha comprobado que la exposición de una víctima de quemaduras a más de 100 rems de radiación, bloquearía la capacidad de la sangre para recuperarse de las quemaduras. Por lo tanto, una dosis subletal de radiación haría imposible la recuperación de quemaduras que, sin radiación, no causarían la muerte.

2. Radiación nuclear combinada con lesiones mecánicas. Las lesiones mecánicas, efectos indirectos de la onda de choque, pueden ser de varios tipos. Objetos que vuelen pueden causar heridas sangrantes, huesos rotos, conmoción y heridas internas. Existe evidencia de que todo este tipo de lesiones se agravan si la persona ha sido expuesta a 300 rems o más de radia-



ción, especialmente si la persona no es tratada médicamente. El daño en la sangre debido a la radiación hace a la víctima más susceptible a una pérdida de sangre e infecciones. El número de muertes inmediatas y no inmediatas aumentaría al considerar este sinergismo.

3. Radiación térmica combinada con lesiones mecánicas. La combinación de estos dos efectos expone el cuerpo a una tensión considerable, y haría insostenible padecer ambos, aun cuando cada uno por separado fuera tolerable.

Aparte de estos podríamos considerar el posible sinergismo entre lesiones y daño al medio ambiente. Por ejemplo, una posible sanidad (debida a la pérdida de luz eléctrica y agua) podría complicar los efectos de cualquier tipo de lesión.

ESCENARIO DE ATAQUE NUCLEAR

Puerto Rico es una isla situada en el Caribe y es la de menor extensión territorial de las Antillas Mayores. Desde 1493, año en que fue descubierta por Cristóbal Colón, pasó a ser colonia de España. En 1898 le fue concedida la Carta Autonómica por los reyes de España, la cual cedía los poderes al pueblo de Puerto Rico para establecer su propio gobierno. Sin embargo, esta situación fue aprovechada por Estados Unidos, y en el mismo año la isla fue invadida por el ejército de dicha nación, estableciéndose en la isla un gobierno militar. Desde entonces la isla pasó a ser colonia de Estados Unidos, hasta que en el

Dosis (rems)	Síntomas	Tratamiento	Pronóstico
0-100	cambios en la sangre detectables (sobre los 25 rems)	no requerido	excelente
100-200	vómitos, jaqueca, somnolencia, leucopenia moderada (pérdida de leucocitos)	vigilancia hematológica, reposo	recuperación total en pocas semanas
200-600	leucopenia severa, hemorragias internas, ulceraciones, pérdida de cabello (sobre los 300 rems), infecciones	trasfusión sanguínea, antibióticos, hospitalización	probabilidad de muerte, 0% a extremo inferior, 90% al extremo superior
600-1 000	lo mismo que antes, pero más severo	considerar trasplante de la médula ósea	probabilidad de muerte en tre 90 y 100%. Larga convalecencia para los sobrevivientes
1 000-5 000	diarreas, fiebre, desbalance electrolítico	mantener balance electrolítico	muerte entre 2 y 14 días
sobre 5 000	convulsiones escalofríos, ataxia (irregularidades en el funcionamiento del sistema nervioso)	proporcionar sedantes	muerte entre 1 y 2 días

Tabla 4. Efectos médico de la radiación en los seres humanos

año de 1952 se creó el Estado Libre Asociado de Puerto Rico, sistema de gobierno que sigue prevaleciendo hasta nuestros días. Siendo territorio de los Estados Unidos, el pueblo de Puerto Rico está comprometido a tomar parte activa en las fuerzas armadas del Sistema de Defensa de los EE.UU. Hoy en día la situación es tal, que el Departamento de Defensa de los EE.UU. tiene diseminada alrededor de toda la isla una red de bases militares, así como facilidades de comunicaciones, lo que forma parte del sistema estratégico de defensa. Una de estas instalaciones es la Base de Roosevelt Roads. Dicha base se encuentra situada en la zona este de la isla de Puerto Rico. La base naval Roosevelt Roads es el cuartel general de las fuerzas navales del Caribe del ejército de Estados Unidos, cuartel general Fleet Air Caribbean, y contiene el Caribbean Atlantic Fleet Weapons Training Facility (AFWTF). Es la base naval de mayor extensión territorial del ejército de Estados Unidos y parte de una red de facilidades de comunicaciones y de operaciones de aviones, submarinos y barcos del sistema estratégico nuclear, que dicho ejército tiene esparcido por todo el territorio puertorriqueño.

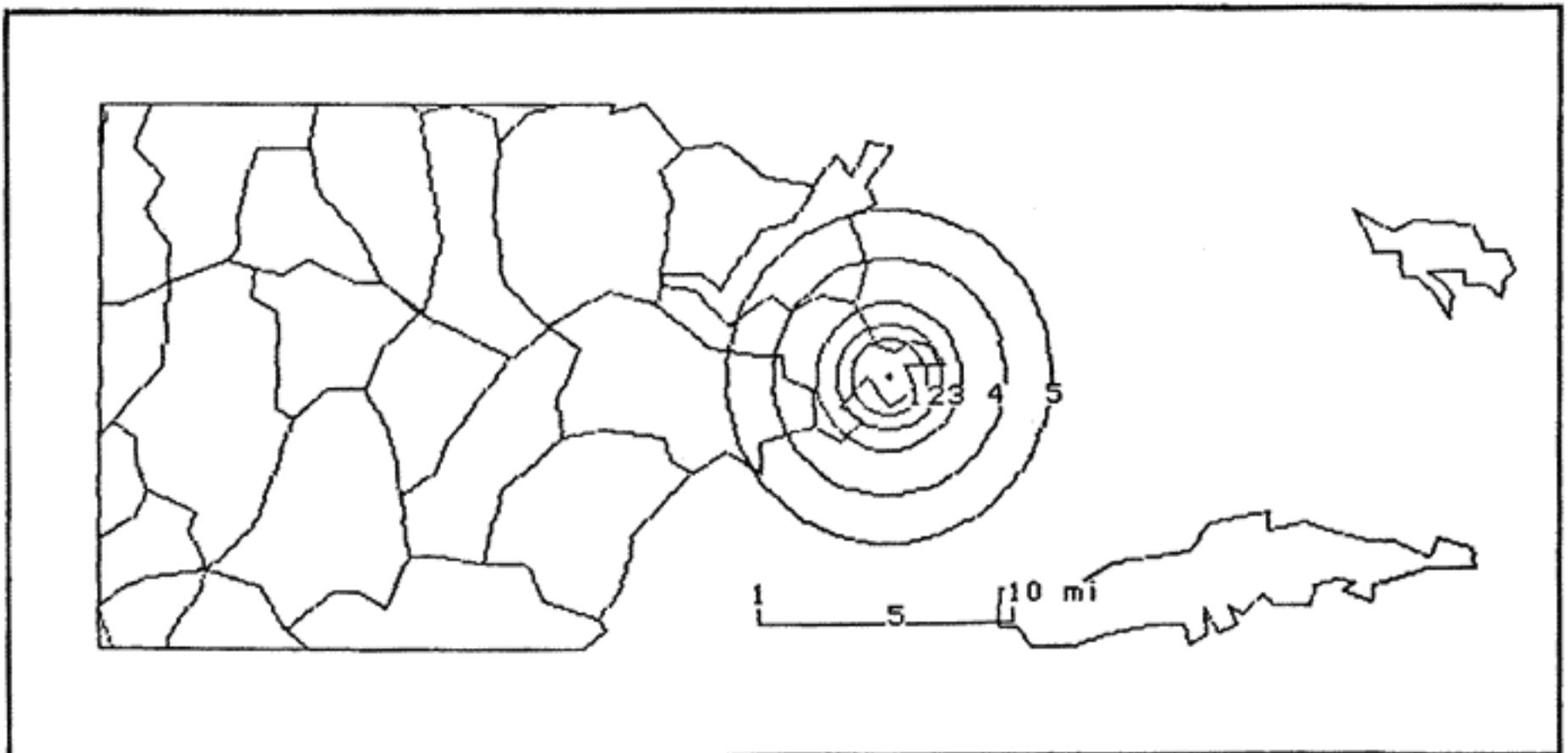
Como ejemplo de los efectos debido a una explosión nuclear a continuación se incluye el cálculo de muertes inmediatas debido a la onda de choque, radiación térmica y la lluvia radiactiva producidas por una explosión nuclear sobre esta base militar.

Podemos observar un mapa de la isla de Puerto Rico, que incluye la isla de Mona al oeste de la isla principal y al este las islas de Culebra (arriba) y Vieques (abajo). La isla principal tiene una forma más o menos rectangular con un largo de aproximadamente 100 millas (160 km) y un ancho de 35 millas (56 km). (Figra 2.)

NATURALEZA Y CONDICIONES DEL ATAQUE

Tipo de bomba-termonuclear de 50% fisión y 50% fusión.
 Explosividad (Y)-un megatón.
 Modalidad del ataque-ataque sencillo con una sola bomba.
 Epicentro de la explosión-Base Naval Roosevelt Roads.
 Altura de la explosión (H)-2220 pies (680 m) (explosión superficial).

Figura 2. Efectos inmediatos aproximados dedidos a la onda de choque y radiación térmica de una explosión superficial de 1 Megaton sobre Roosvelt Roads.



DESCRIPCION DE LOS EFECTOS MECANICOS Y TERMICOS

Círculo	Radio (mi)	Sobrepresión (PSI)	Vientos (mph)	Calor (cal/cm ²)	Grado de quemaduras
1	1.40	20	502	30.92
2	1.99	10	294	15.35
3	2.83	5	163	7.62	SEGUNDO
4	4.49	2	70	3.02	PRIMER
5	6.37	1	35	1.50

- Las personas expuestas sufren quemaduras graves; si no mueren.
- 3 Las casas de madera y cemento son destruidas o dañadas seriamente.
- Las personas expuestas sufren quemaduras serias.
- Combustion espontánea de la ropa y otros combustibles.
- 4 Daño moderado a los hogares (grietas, vidrios rotos, paredes interiores derribadas, techos destruidos). Probablemente el área comprendida dentro de esta región es completamente quemada.
- 5 Daño ligero a estructuras comerciales.
- Daño moderado a las residencias.

DAÑOS INMEDIATOS CAUSADOS

CIRCULO	DAÑOS
1	Los edificios de concreto reforzado son destruidos. La inmensa mayoría de las personas muere.
2	Los edificios comerciales colapsan.

NOTA: Cada círculo indica el alcance medio de los efectos mencionados. Los efectos actuales en una región determinada, pueden variar considerablemente en función de las condiciones del tiempo, el diseño específico de los edificios, del grado de exposición de las personas y de las irregularidades en la explosión de la bomba termonuclear.

TABLA 5.- Tabla de Muertes causados por los efectos de la onda de choque, radiación térmica y lluvia radiactiva.

Efecto	Área afectada		Muertes
	mi ²	Km ²	
onda de choque	25	64	44,333
radiación térmica	190	486	
lluvia radiactiva	350	896	161,717

Tiempo-día típico de verano con visibilidad de 40 millas (64 Km).

CRITERIOS UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DE MUERTES

Para el caso de la onda de choque se supone que el número de personas que sobreviven a dicho efecto dentro del área donde la sobrepresión excede 5 psi, es igual al número de personas que muere en las áreas donde la sobrepresión es menor a 5 psi, y por lo tanto el número de muertes debido a la onda de choque es la población que se encuentra dentro del contorno circular correspondiente a 5 psi. En el caso de la radiación térmica y de lluvia radiactiva se usa un criterio similar. Se cuenta la población que se encuentra en un contorno circular de calor de 7 cal/cm² y también dentro del contorno correspondiente a una radiación de 450 rems para cada caso por separado.

SUPOSICIONES

1. Se supone una velocidad horizontal constante del viento de 15 mph hacia el oeste.
2. En el cómputo de dispersión y transporte de sustancias radiactivas se descartan los posibles efectos de la lluvia, el gradiente vertical del viento, las variaciones en la dirección del viento y otros factores secundarios.

3. Se supone que el 50% de personas potencialmente expuestas a dosis de radiación letales (mayores de 600 rems) logran evitar dicha exposición (ésto es un factor de protección de 0.5).

4. Se ignoran posibles sinergismos.

MÉTODO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DE FATALIDADES

Conociendo el área afectada por cada uno de los efectos a considerar se multiplica dicha cantidad por la densidad poblacional en el área afectada. Para el caso de la lluvia radiactiva, además, se multiplica por el factor de protección de 0.5.

RESULTADOS

Los resultados se resumen en la tabla 5. La ilustración de los daños debido a los efectos considerados se observa en las figuras 2 y 3. La figura 2 es un modelo computarizado realizado para ilustrar los efectos producidos por la onda de choque y la radiación térmica. La figura 3 es el diagrama idealizado de la distribución de radiación para este escenario.

Vale la pena mencionar que el número de muertes calculado es relativamente bajo para este ataque nuclear. La razón para ello es que el área cubierta por los tres efectos considerados corresponde más bien a una región rural lejana de los centros urbanos de alta densidad poblacional. Un trabajo realizado en torno a los efectos originados por la onda de choque y la radiación térmica de explosiones sobre distintos posibles blancos alrededor de la isla, indica que en una explosión aérea de 1 MT sobre un receptor radial naval de comunicaciones del ejército de EE.UU., situado en Sabana Seca, a unas 6 millas al oeste del núcleo urbano de la ciudad capital de San Juan, morirían de inmediato alrededor de 900,000 personas debido sólo a estos dos efectos. Esta cantidad es casi una tercera parte de la población total de la isla de Puerto Rico.

Figura 3.- Efectos debido a la lluvia radiactiva en una explosión superficial de 1 MT sobre Roosevelt Roads. El epicentro se encuentra en el punto marcado con una cruz. Se pueden observar los contornos de radiación al cabo de 18 horas de la explosión, dentro de los cuales la radiación es mayor a la indicada. La velocidad y dirección del viento es según se indica.

