

EL INVIERNO NUCLEAR, UNA AMENAZA REAL PARA LA HUMANIDAD

Gabriel F. Martínez Valois

Divulgador científico, escritor y documentalista independiente

El concepto “invierno nuclear” se refiere a un evento climático catastrófico a nivel global desencadenado por una guerra nuclear global, el cual plantea en la actualidad la más grave amenaza existencial para la humanidad y contempla su extinción por completo. A pesar del fin de la Guerra Fría en 1991 con el colapso total de la Unión Soviética, actualmente todavía prevalece la posibilidad de un conflicto nuclear a gran escala, debido a las tensiones geopolíticas actuales y a la proliferación de armas nucleares hasta el día de hoy. Este artículo explora los orígenes y desarrollo de las armas nucleares, así como las bases científicas del invierno nuclear y los riesgos actuales asociados con los arsenales nucleares. Al comprender el contexto histórico y los impactos devastadores de un posible invierno nuclear, podremos abogar mejor por el desarme nuclear y por la implementación de medidas de seguridad mundial para prevenir tal catástrofe.

CONTEXTO HISTÓRICO

El desarrollo de las armas nucleares inició durante la Segunda Guerra Mundial, culminando en los atroces bombardeos a las ciudades japonesas de Hiroshima, el 6 de agosto de 1945, y Nagasaki, el 9 de agosto de 1945, con base en una idea original del físico nuclear húngaro Leo Szilard.

Concretamente, Szilard concibió la idea de una reacción en cadena el 12 de septiembre de 1933, mientras cruzaba una calle en Londres, Inglaterra.

El propio Szilard lo recordaba así muchos años después:

Estaba esperando a que cambiara el semáforo y cuando este cambió a verde y crucé la calle, de repente se me ocurrió que, si pudiéramos encontrar un elemento que se dividiera por medio de neutrones y que emitiera, a su vez, dos neutrones cuando absorbiera un neutrón, dicho elemento, si se reuniera en una masa suficientemente grande, podría sostener una reacción nuclear en cadena. En ese momento no veía cómo se podría encontrar un elemento así ni qué experimentos serían necesarios, pero la idea nunca me abandonó (Lanoutette, 2013: 195).

A partir de ese momento sucedió toda una serie de eventos en secuencia y con la vertiginosa velocidad de una avalancha de nieve, que finalmente dio como resultado la fabricación de la primera bomba atómica por parte de Estados Unidos y con ello la primera prueba nuclear.

Todo comenzó con la idea de que su viejo amigo Albert Einstein redactara una carta dirigida al presidente Roosevelt. Szilard, junto con sus compatriotas húngaros, los físicos nucleares Edward Teller y Eugene Wigner —ya establecidos en Estados Unidos en 1939— buscaban alertar al presidente sobre el peligro de que los alemanes desarrollaran primero una bomba nuclear. La motivación de Szilard surgió tras leer las publicaciones de los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann en enero de ese año, en las que anunciaban el descubrimiento de la fisión nuclear.

La carta, fechada el 2 de agosto de 1939, fue entregada a Roosevelt el 11 de octubre de 1939, en un contexto marcado por la invasión alemana a Polonia el 1 de septiembre, que dio inicio a la Segunda Guerra Mundial. Este evento, junto con la redacción y entrega de la carta, se conoció coloquialmente como “La Conspiración Húngara”. La misiva es también conocida como la “Carta Einstein-Szilard”.

Pero no sería sino hasta 1942 que iniciaría el famoso Proyecto Manhattan, que fuera dirigido por el general brigadier Leslie Groves, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos y por el físico nuclear norteamericano J. Robert Oppenheimer, creando el laboratorio de Los Álamos para tal propósito. En su apogeo, en junio de 1944, el Proyecto Manhattan empleaba a unos 129 mil trabajadores, de los cuales 84 mil 500 eran trabajadores de la construcción, 40 mil 500 eran operadores de planta y mil 800 eran personal militar. Pero lo más importante es que reunió a las mentes científicas más brillantes de esa época como

Leo Szilard, Edward Teller, Enrico Fermi, Ernest Orlando Lawrence, Otto Frisch, Niels Bohr, Felix Bloch, James Franck, Emilio Segrè, Klaus Fuchs, Hans Bethe, John von Neumann, Stanislaw Ulam y Richard Feynman, entre varios más. Al final se calcula que aproximadamente 500 mil personas estuvieron involucradas en el Proyecto Manhattan, el cual tuvo un costo aproximado de dos mil millones de dólares en ese momento (Kelly, 2020: 164).¹

La primera prueba nuclear de la historia se llevó a cabo el 16 de julio de 1945. El escritor James Gleick la describe así en el libro *Genius*, sobre la vida del físico norteamericano Richard Feynman:

A las 5:29:45 a.m. del 16 de julio de 1945, justo antes de que el amanecer iluminara el lugar llamado previamente La Jornada del Muerto, en su lugar se produjo el destello de la bomba atómica. Al instante siguiente, Feynman se dio cuenta de que estaba mirando una mancha púrpura en el suelo del jeep militar. Su cerebro científico le dijo a su cerebro civil que volviera a mirar hacia arriba. La tierra era blanca como el papel y todo lo que había en ella parecía monótono y bidimensional. El cielo empezó a pasar de plateado a amarillo y naranja, y la luz rebotaba en las nubes recién formadas al abrigo de la onda expansiva. “¡Algo crea nubes!”, pensó. Se estaba llevando a cabo un experimento. Vio un brillo inesperado procedente del aire ionizado, las moléculas despojadas de electrones por el gran calor.² A su alrededor, los testigos estaban formando recuerdos que durarían toda la vida. “Y entonces, sin un sonido, el sol brillaba; o eso parecía”, recordó Otto Frisch después. No era el tipo de luz que pudiera evaluarse con órganos sensoriales humanos o instrumentos científicos. I. I. Rabi no pensaba en (las unidades de iluminación) pies-candelas cuando escribió: “Estalló, se abalanzó, se abrió paso hasta el interior de uno. Fue una visión que se vio con algo más

¹ Lo que corresponde a aproximadamente 29 mil millones de dólares en dólares de 2025 cuando se ajusta la inflación. Esta estimación puede variar según las tasas de inflación específicas utilizadas y los métodos de cálculo, pero generalmente se acepta que está dentro de ese rango. (Nota mía.)

² Es muy famoso el hecho de que Richard Feynman fue testigo de la primera explosión atómica de la historia en el lugar de observación junto con el resto de los científicos y demás invitados especiales; pero, a diferencia de los demás, no quiso usar los lentes oscuros especiales, similares a los que usan los soldadores, que evitarían que la luz ultravioleta emitida por dicha explosión les causara ceguera, y decidió verla a través del parabrisas de un jeep militar, pues como físico sabía que el vidrio de dicho vehículo era suficiente para bloquear la luz ultravioleta emitida sin que le causara ceguera, hecho totalmente comprobable después, pues siempre gozó de buena salud visual hasta su muerte. (Nota mía.)

que los ojos”. La luz subió y bajó en silencio sobre el desierto, sin que se oyera ningún sonido hasta que la capa de aire en expansión llegó finalmente cien segundos después de la detonación.

Entonces se oyó un chasquido como el de un disparo de rifle, que sobresaltó a un corresponsal del *New York Times* que estaba a la izquierda de Feynman. “¿Qué fue eso?”, gritó el corresponsal, para diversión de los físicos que lo oyeron.

“Esa es la ‘cosa’”, gritó Feynman. Parecía un muchacho, flacucho y sonriente, aunque ya tenía veintisiete años. Un trueno sólido resonó en las colinas. Se sintió tanto como se oyó. El sonido lo hizo repentinamente más real para Feynman; registró la física acústicamente. Enrico Fermi, más cerca de la explosión, apenas la oyó mientras rompía una hoja de papel y calculaba la presión explosiva dejando caer los pedazos, uno por uno, a través del viento repentino. El júbilo, los gritos, el baile, el triunfo de ese día han quedado debidamente registrados. En el camino de regreso, otro físico pensó que Feynman iba a flotar a través del techo del autobús. Los creadores de la bomba atómica se regocijaron y se emborracharon. Celebraron la cosa, el dispositivo, el artificio. Después de dos años en este desierto marrón, habían convertido algo de materia en energía. Los teóricos, especialmente, ahora habían probado una ciencia abstracta de pizarrón contra lo definitivo. Primero una idea, ahora fuego. Era alquimia por fin, una alquimia que convertía metales más raros que el oro en elementos más perniciosos que el plomo” (Gleick, 2011: 336-338).

Algo muy curioso ocurrió ese día y por eso la cita textual de Gleick: todas esas mentes brillantes, todos esos genios científicos, todos esos hombres que, cual modernos Prometeos, fueron capaces de arrebatarse el fuego del conocimiento a los dioses del Olimpo, se comportaban como niños traviesos regocijándose de una travesura colectiva, una travesura que al final provocó la muerte de aproximadamente 110 mil personas en total en Hiroshima y Nagasaki, de acuerdo con los cálculos más conservadores del ejército norteamericano.

De ahí en adelante, varios países más tendrían sus propias bombas atómicas desatando con esto una frenética carrera armamentista.

El primero fue la Unión Soviética, con base en el espionaje científico de agentes infiltrados directamente en el Proyecto Manhattan. La información proporcionada por Klaus Fuchs, Theodore Hall, David Greenglass y otros

espías fue fundamental para poner en marcha la bomba atómica soviética. Esta información de inteligencia cubría aspectos clave del diseño de la bomba, incluido el método de implosión utilizado en la bomba Fat Man lanzada sobre Nagasaki.

Inicialmente, los diseños soviéticos, como el modelo del “pastel en capas” (*Sloika*) propuesto por Andrei Sakharov, eran mucho muy diferentes de los diseños desarrollados por el Proyecto Manhattan y no funcionarían. Sin embargo, el espionaje permitió a los soviéticos evitar errores iniciales e implementar directamente diseños más efectivos.

Destacan, sin embargo, los esfuerzos del físico Igor Kurchatov. A menudo llamado “el padre de la bomba atómica soviética”, Kurchatov dirigió los esfuerzos científicos. Coordinó el trabajo de varios equipos de investigación y se aseguró de que la información de los espías se integrara de manera efectiva en sus diseños. Debe notarse, sin embargo, que todo esto fue bajo la gran presión y control del temible Lavrenti Beria: el despiadado asesino y ejecutor del régimen de Stalin.

Finalmente, el 29 de agosto de 1949, la Unión Soviética detonaría su primera bomba atómica, la RDS-1 de 22 kilotones, una potencia similar a las norteamericanas.

Pero ese fue el impulso para que Estados Unidos fuera detrás de la creación de una bomba nuclear mucho más potente: la bomba de hidrógeno o Bomba H. Esta bomba funciona con base en el principio de fusión nuclear, opuesto al de la fisión nuclear, donde dos átomos uno de deuterio y otro de tritio, que son dos isótopos del hidrógeno, se unen para formar un nuevo átomo; en el proceso se libera una gran cantidad de energía y su potencia destructiva ya no se mide en kilotones sino en megatones.³

La idea de una bomba de hidrógeno, o “súper bomba”, se le ocurrió originalmente al físico italiano Enrico Fermi quien se la comentó a su colega, el físico húngaro Edward Teller, en 1941 durante una charla que tuvieron en la Universidad de Columbia. Edward Teller pasó la mayor parte del tiempo durante su participación en el Proyecto Manhattan trabajando en el

³ Un kilotón es una unidad que equivale a una tonelada de TNT en capacidad destructiva, un megatón equivale a mil toneladas de TNT o un millón de kilos de dicho explosivo.

diseño de la “súper”, como se le decía coloquialmente, y todo el último año de ese proyecto trabajó exclusivamente en su diseño.

El 3 de septiembre de 1949, un avión estadounidense de vigilancia meteorológica tomó muestras de aire sobre Japón. Al analizar esas muestras, se encontraron rastros de material radiactivo. La Marina recolectó rápidamente y analizó muestras de agua de lluvia de sus barcos y bases en todo el mundo. Un análisis detallado encontró pequeñas cantidades de Cerio-141 e Itrio-91. Pero estos isótopos⁴ tienen una vida media de uno o dos meses, por lo que debían haberse producido recientemente y el único lugar de donde podrían provenir era una explosión nuclear.

Pero Estados Unidos no había realizado ninguna prueba nuclear ese año, por lo que la única explicación posible era que la Unión Soviética había descubierto cómo fabricar una bomba nuclear y la había detonado en secreto. Esta era la noticia que los estadounidenses habían estado temiendo, pues su supremacía militar lograda a través de su propio programa nuclear estaba en riesgo.

Esto aceleró la fabricación de la “súper”, es decir la primera bomba de hidrógeno o termonuclear, y esto fue finalmente realizado por el físico nuclear Edward Teller y el matemático, físico nuclear y científico informático polaco Stanislaw Ulam, dando origen al llamado modelo o configuración Teller-Ulam, que se sigue usando hasta nuestros días.

A esta bomba se le asignó el nombre clave Mike I y fue probada en Eniwetok, en las Islas Marshall, el 1 de noviembre de 1952. Su potencia explosiva fue de 10.4 megatones (es decir, millones de toneladas de TNT equivalentes). Mike I vaporizó la isla de Elugelab y dejó un cráter de 800 metros de profundidad y tres kilómetros de ancho.

Posteriormente se unirían al “Club Nuclear” varios países más:

- El Reino Unido (1952)
- Francia (1960)

⁴ Un isótopo es una versión de un elemento químico que tiene el mismo número de protones en su núcleo, pero un número diferente de neutrones. Esto significa que los isótopos de un mismo elemento tienen propiedades químicas muy similares, pero pueden tener diferentes propiedades físicas, como la radiactividad. No todos los isótopos son radiactivos. Algunos isótopos son estables y no emiten radiación, mientras que otros son inestables y se desintegran, emitiendo radiación en el proceso como los creados en una explosión nuclear.

- China (1964)
- India (1974)
- Pakistán (1998)
- Israel (1963-1979)
- Corea del Norte (2006)

Actualmente, a pesar de los variados tratados de desarme y no proliferación nuclear, el arsenal nuclear mundial ronda las 12 mil 100 cabezas nucleares, con 90 por ciento repartidas principalmente entre Estados Unidos, con 5 mil 748 cabezas nucleares, y Rusia, con 5 mil 580. De ese total, aproximadamente 9 mil 600 se encuentran militarmente activas, es decir, listas para usarse en cualquier momento, y el resto espera ser desmantelado debido a que cumplió su ciclo de vida útil y es obsoleto.

EL INVIERNO NUCLEAR, UN GÉLIDO FINAL PARA LA HUMANIDAD

La teoría del invierno nuclear fue desarrollada por un equipo de científicos conocido como el equipo TTAPS, que incluía a Richard P. Turco, Carl Sagan, Owen Toon, Thomas Ackerman y James Pollack. El término “invierno nuclear” fue acuñado por Richard P. Turco en 1983. En ese año, Turco y su equipo publicaron un estudio titulado *Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions*, en el que exploraron las posibles consecuencias climáticas de una guerra nuclear. El estudio y las investigaciones que lo siguieron sugirieron que incluso una guerra nuclear limitada entre superpotencias nucleares podría tener efectos globales devastadores, mucho más allá de las fronteras del conflicto directo.

El físico Carl Sagan fue uno de los principales divulgadores de la teoría. En particular, Sagan fue muy vocal en sus advertencias sobre el invierno nuclear,⁵ argumentando que los efectos de una guerra nuclear no se limitarían a las áreas directamente afectadas por los ataques, sino que serían un desastre

⁵ Siendo todavía estudiante del segundo semestre de la licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, estuve presente en la conferencia dictada por el Dr. Carl Sagan en la Ciudad de México en 1987, en el auditorio del Museo Nacional de Antropología, que se tituló “La responsabilidad de los científicos ante una guerra nuclear”, en la cual el Dr. Sagan mencionó el invierno nuclear.

global que afectaría a todos los seres humanos, independientemente de su ubicación geográfica.

El invierno nuclear es un escenario hipotético propuesto por científicos para describir el impacto climático global de una guerra nuclear a gran escala. En este escenario, el estallido masivo de armas nucleares provoca una serie de efectos climáticos devastadores a nivel mundial. Esto incluye una caída drástica de las temperaturas globales debido a la cantidad masiva de polvo, hollín y partículas radiactivas lanzadas a la atmósfera tras las explosiones nucleares. Este fenómeno puede durar meses o incluso años, afectando gravemente el clima y la vida en la Tierra.

EFFECTOS AMBIENTALES DEL INVIERNO NUCLEAR

1. Oscurecimiento global: Las explosiones nucleares levantarían grandes cantidades de polvo, hollín y partículas radiactivas en la atmósfera, que bloquearían parcialmente la luz solar. Esto generaría un enfriamiento global, conocido como invierno nuclear. Se estima que las temperaturas podrían bajar entre 5 y 10 grados Celsius a nivel mundial, con efectos más severos en las regiones de mayor latitud.
2. Alteración de los patrones meteorológicos: La disminución de la radiación solar también alteraría los patrones climáticos globales, reduciendo la evaporación y cambiando las precipitaciones. Se podrían generar sequías prolongadas en muchas partes del mundo, afectando los ecosistemas y los suministros de agua.
3. Degradación de los ecosistemas: Las bajas temperaturas y la falta de luz solar afectarían gravemente la fotosíntesis, lo que dañaría las plantas y, por ende, a los herbívoros y animales que dependen de ellas. Este daño a la biodiversidad podría llevar a la extinción de muchas especies.

EFFECTOS AGRÍCOLAS

1. Colapso de la producción de alimentos: El enfriamiento global y la reducción de la luz solar dificultarían el crecimiento de cultivos agrícolas, sobre todo en las regiones más afectadas. Las cosechas globales disminuirían significativamente, lo que generaría escasez de alimentos a nivel mundial.
2. Pérdida de cosechas y tierras agrícolas: En algunos lugares, las heladas y sequías prolongadas podrían destruir la agricultura. Los cultivos de granos

esenciales, como el trigo, el maíz y el arroz sufrirían grandes pérdidas, lo que llevaría a la escasez de alimentos y al aumento de los precios.

3. Escasez de recursos alimentarios y desplazamiento: Con la caída de la producción agrícola y el agotamiento de los recursos alimentarios, habría una gran migración humana, buscando lugares más viables para la supervivencia. Esto generaría conflictos por recursos y aumentaría las tensiones geopolíticas.

EFFECTOS EN LA SALUD

1. Radiación y enfermedades: Tras las explosiones nucleares, se liberarían grandes cantidades de radiación en forma de lluvia radiactiva. Esto causaría efectos inmediatos en la salud, como ceguera, quemaduras por radiación, enfermedades agudas por radiación y un aumento de casos de cáncer en las personas expuestas.
2. Enfermedades respiratorias: Las partículas radiactivas suspendidas en el aire serían inhaladas por las personas, provocando problemas respiratorios graves y enfermedades pulmonares, como la neumonía por inhalación de material radiactivo y cáncer pulmonar.
3. Efectos a largo plazo en la salud: Además de los cánceres, la exposición prolongada a la radiación aumentaría el riesgo de enfermedades genéticas y reproductivas. Las personas expuestas también podrían sufrir daños en sus sistemas inmunitarios, lo que les haría más vulnerables a infecciones.
4. Desplazamientos y escasez de atención médica: A medida que las personas huyen de las zonas afectadas, muchas comunidades carecerían de acceso adecuado a servicios de salud, medicamentos y alimentos, lo que incrementaría la mortalidad en la población.

LLUVIA RADIATIVA

Después de una explosión nuclear, la lluvia radiactiva es el fenómeno por el cual partículas radiactivas de varios isótopos radiactivos caen a la Tierra en forma de lluvia, nieve o polvo. Estas partículas provienen de la explosión misma y pueden estar presentes en el aire durante semanas, incluso meses después del ataque. La lluvia radiactiva tiene efectos directos sobre la salud de las personas y el medio ambiente, contaminando cuerpos de agua, suelos y alimentos.

Los isótopos radiactivos generados por una guerra nuclear tienen efectos graves y prolongados tanto en la salud humana como en el medio ambiente.

ESTRONCIO-90 (Sr-90)

El estroncio-90 es un isótopo radiactivo de la familia de los metales alcali-notérreos, y se forma principalmente por la fisión de átomos de uranio o plutonio durante una explosión nuclear. Tiene una vida media de aproximadamente 28.8 años, lo que significa que tardará ese tiempo para reducirse a la mitad de su radiactividad inicial. El estroncio-90 es particularmente peligroso porque tiene una serie de efectos nocivos.

IMPACTO DEL ESTRONCIO EN LA SALUD HUMANA

1. Contaminación interna: El Sr-90 es químicamente similar al calcio, por lo que es fácilmente absorbido por el cuerpo y depositado en los huesos y dientes. Cuando las personas consumen alimentos o agua contaminada con este isótopo, puede acumularse en los huesos y tejidos óseos.
2. Efectos a largo plazo: La radiación del Sr-90 emite partículas beta, lo que puede dañar las células óseas y los tejidos circundantes. Esto aumenta significativamente el riesgo de cáncer óseo y leucemia, especialmente en niños, ya que sus huesos están en desarrollo y son más vulnerables a la radiación.
3. Efectos reproductivos: En niveles elevados de exposición, también puede haber daños a los sistemas reproductivos, afectando tanto a hombres como a mujeres.

IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE

1. Contaminación del suelo y agua: El Sr-90 se puede infiltrar en el suelo y el agua, donde permanece durante décadas debido a su vida media larga. Esto hace que las áreas afectadas sean peligrosas para la agricultura, contaminando cultivos y agua potable.
2. Ecosistemas acuáticos: Dado que se comporta de manera similar al calcio, el Sr-90 puede ser absorbido por organismos acuáticos (como peces) y entrar en la cadena alimentaria, afectando tanto a los ecosistemas acuáticos como a las personas que consumen estos animales contaminados.

OTROS ISÓTOPOS RADIATIVOS DE LARGA DURACIÓN

Además del estroncio-90, existen otros isótopos radiactivos generados por las explosiones nucleares que tienen impactos similares debido a su larga vida media.⁶ A continuación, se describen algunos de los más relevantes:

CESIO-137 (Cs-137)

- Vida media: 30.1 años.
- Propiedades: El cesio-137 es uno de los isótopos más comunes generados por explosiones nucleares. Se comporta de manera similar al potasio y puede ser absorbido por los tejidos humanos, especialmente por los músculos.
- Impacto en la salud: Su radiación beta y gamma puede causar daño a los órganos internos, incluyendo cáncer, trastornos del sistema inmunológico y daño celular.
- Impacto ambiental: El Cs-137 se dispersa por el aire y puede contaminar el suelo, los cultivos y el agua, afectando tanto al ambiente como a los seres humanos que consumen alimentos o agua contaminados.

IODO-131 (I-131)

- Vida media: 8.02 días.
- Propiedades: Aunque tiene una vida media más corta que otros isótopos, el iodo-131 es particularmente peligroso debido a su alta radiactividad y su afinidad por la glándula tiroides. Es muy eficaz en la irradiación de tejidos.
- Impacto en la salud: Si es inhalado o ingerido, el iodo-131 puede ser absorbido por la tiroides, lo que aumenta el riesgo de cáncer de este órgano, especialmente en niños.

⁶ La vida media de un material radiactivo es el tiempo que tarda la mitad de la cantidad original en desintegrarse. Sin embargo, esto no significa que el material sea la mitad de peligroso después de una vida media. La radiactividad disminuye con el tiempo, pero sigue siendo peligrosa durante mucho tiempo.

Imagine que tenemos una pila de desechos radiactivos. Si la vida media es de 30 años, después de 30 años, la mitad de esos desechos se habrá desintegrado. Pero la otra mitad sigue siendo radiactiva y peligrosa. Después de otros 30 años, la mitad de lo que queda se desintegrará, y así sucesivamente. Aunque la cantidad de material radiactivo disminuye, sigue siendo peligroso durante muchas vidas medias.

- Impacto ambiental: El I-131 puede ser liberado en grandes cantidades durante una explosión nuclear, y su rápida dispersión puede contaminar fuentes de agua y alimentos.

PLUTONIO-239 (Pu-239)

- Vida media: 24 mil 100 años.
- Propiedades: El plutonio-239 es uno de los isótopos más peligrosos. Es generado durante la fisión nuclear y se utiliza en armas nucleares. Tiene una vida media extremadamente larga.
- Impacto en la salud: El plutonio es tóxico y radiactivo. Si se inhala o ingiere, puede depositarse en los pulmones, huesos e hígado, causando cáncer y enfermedades respiratorias graves. Dado que su vida media es tan larga, puede seguir siendo un peligro durante miles de años.
- Impacto ambiental: Debido a su alta toxicidad y larga persistencia, el plutonio-239 puede contaminar el medio ambiente durante milenios, afectando tanto a la fauna como a los ecosistemas.

URANIO-238 (U-238)

- Vida media: 4.5 mil millones de años.
- Propiedades: Aunque el U-238 no es tan radiactivo como otros isótopos, es precursor de varios productos radiactivos peligrosos, como el radón. Su vida media es extremadamente larga, lo que significa que la contaminación por U-238 persistirá durante miles de millones de años.
- Impacto en la salud: El uranio es un metal pesado tóxico que puede dañar los riñones, y si se inhala o ingiere, aumenta el riesgo de cáncer.
- Impacto ambiental: El U-238 puede contaminar suelos y aguas subterráneas, afectando la biodiversidad y la agricultura durante miles de años.

El impacto del invierno nuclear no se limitaría al clima. Las consecuencias ecológicas incluyen la pérdida de biodiversidad, la acidificación de los océanos y el colapso de ecosistemas completos. En términos humanitarios, las hambrunas serían inevitables debido a la disminución drástica en la producción de alimentos. Además, las enfermedades podrían propagarse más rápidamente en un mundo debilitado por la desnutrición y el colapso de infraestructuras médicas.

¿SIGUE SIENDO VÁLIDA LA TEORÍA ACTUALMENTE?

Aunque los modelos iniciales eran limitados por la capacidad computacional de la época, investigaciones más recientes han confirmado y refinado estas predicciones. Un estudio (Robock *et al.*, 2007) utilizó modelos climáticos avanzados para simular los efectos de un conflicto nuclear regional, y encontró que incluso una guerra limitada podría tener consecuencias globales significativas. Estas simulaciones indican que las temperaturas globales podrían descender varios grados Celsius, causando fallas generalizadas en los sistemas agrícolas.

En la actualidad, aunque algunos expertos consideran que los efectos extremos de un invierno nuclear podrían ser menos devastadores de lo que se pensaba inicialmente, los riesgos aún se calculan lo suficientemente serios como para que los estudios sobre las consecuencias del uso de armas nucleares sigan siendo un tema de gran preocupación.

LAS POLÍTICAS DE DISUASIÓN NUCLEAR: MAD, FIRST STRIKE Y EL SISTEMA PERÍMETRO SOVIÉTICO

La detonación de la primera bomba soviética en 1949 tomó por sorpresa a Estados Unidos, que confiaba en su supremacía nuclear; los temores aumentaron posteriormente con una prueba en 1953 de un arma semitermonuclear y en 1956, con la prueba de la Tercera Idea de Sajarov, equivalente al dispositivo norteamericano Castle Bravo.⁷

Las tensiones entre las dos naciones aumentaron considerablemente cuando, en 1956, la Unión Soviética invadió Hungría. Este acto generó una creciente preocupación en Estados Unidos y Europa, mientras que en el ámbito estadounidense se gestaba una fuerte reacción social, impulsada por el senador Joseph McCarthy, el Comité de Actividades Antiamericanas de la Cámara de Representantes y el caso de Julius y Ethel Rosenberg, ciudadanos estadounidenses ejecutados en 1953 tras ser condenados por

⁷ Detonado el 1 de marzo de 1954, Castle Bravo sigue siendo el dispositivo nuclear más potente jamás detonado por Estados Unidos y la primera arma termonuclear propulsada por deuteruro de litio, probada utilizando el diseño Teller-Ulam. La potencia de Castle Bravo fue de 15 megatonnes de TNT.

espionaje. Este clima de desconfianza se intensificó con el lanzamiento del Sputnik en 1957, que desató temores de un posible ataque comunista desde el espacio, además de la preocupación de que, si los soviéticos podían poner un satélite en órbita, también podrían lanzar un dispositivo que reentrara en la atmósfera e impactara cualquier parte del planeta. John F. Kennedy aprovechó esta situación para resaltar la supuesta brecha en los bombarderos y misiles, áreas en las que se percibía (erróneamente) que los soviéticos superaban a Estados Unidos. A su vez, la retórica belicista de los líderes soviéticos aumentó la presión política. El incidente del U-2 en 1960, en el que estuvo involucrado Francis Gary Powers, así como la Crisis de Berlín y la prueba de la Bomba Tsar en 1961 (que es la bomba de hidrógeno o termonuclear más grande construida por el hombre y tuvo una potencia de 50 megatonnes) y finalmente la Crisis de los Misiles de Cuba en 1962, contribuyeron a intensificar aún más las tensiones entre las dos superpotencias.

Lo anterior dio lugar a una serie de reacciones exacerbadas por parte de diversos personajes y, al final, políticas de disuasión nuclear.

Algunos pensaron que su mejor curso de acción era lanzar un ataque nuclear no provocado contra los soviéticos mientras Estados Unidos todavía llevaba la delantera en sus armas nucleares.

El secretario de Marina Matthews sugirió convertirse en “agresores por la paz”. John von Neuman, el matemático, físico, informático e ingeniero húngaro-estadounidense, fundador de la teoría de juegos, dijo: “Si usted dice ‘¿por qué no bombardearlos mañana?’, yo digo, ¿por qué no bombardearlos hoy? Si usted dice ‘hoy a las cinco en punto’, yo digo ¿por qué no a la una en punto?”.

Todo esto culminó en una serie de políticas de disuasión nuclear por parte de ambas potencias, que se enlistan a continuación:

MAD (MUTUAL ASSURED DESTRUCTION) O DESTRUCCIÓN MUTUA ASEGURADA
 La doctrina de disuasión nuclear MAD es una estrategia militar que se basa en la idea de que, si dos potencias nucleares entran en conflicto, ambas estarían dispuestas a usar armas nucleares, lo que llevaría inevitablemente a la destrucción total de ambas naciones. En otras palabras, la doctrina se fundamenta en el concepto de que ninguna de las dos partes iniciará un ataque

nuclear, ya que ambas se asegurarían de sufrir consecuencias catastróficas, incluso si una de ellas logra un primer ataque.

La MAD se basa en la capacidad de ambas potencias para lanzar un ataque nuclear de represalia, incluso si el adversario les ha asestado un golpe primero. Es decir, cada país debe tener suficiente capacidad de ataque nuclear que no pueda ser destruida en un primer ataque, lo que garantizaría que la represalia sería inevitable. La idea es que el costo de la guerra nuclear para ambas naciones sería tan alto que ambas evitarían el conflicto.

CREADORES Y ORIGEN DE DOCTRINA MAD

La doctrina de la Destrucción Mutua Asegurada fue formulada durante la Guerra Fría, en la década de 1950. Fue el resultado de la carrera armamentista nuclear entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Aunque no se puede atribuir a una sola persona, algunos de los principales pensadores que influyeron en el desarrollo de la MAD incluyen a científicos y estrategas militares como Herman Kahn, de la Escuela de Pensamiento Estratégico de la corporación RAND en Estados Unidos, y los teóricos de la disuasión nuclear en general. Kahn (1960) fue uno de los primeros en exponer, en su libro *On Thermonuclear War*, el concepto de que la guerra nuclear podría ser evitada si ambas partes estaban seguras de que sufrirían una destrucción total.

La doctrina MAD fue formalmente desarrollada en la década de 1960, cuando tanto Estados Unidos como la Unión Soviética adquirieron suficiente capacidad nuclear como para asegurar la posibilidad de represalias devastadoras. En particular, se consolidó durante la presidencia de John F. Kennedy en Estados Unidos y la administración de Nikita Jrushchov en la Unión Soviética.

AÑO DE CREACIÓN DE LA DOCTRINA MAD

Aunque las ideas relacionadas con la disuasión nuclear existían antes, la doctrina de la Destrucción Mutua Asegurada se estableció formalmente en la década de 1960, cuando ambos bloques militares poseían suficientes arsenales nucleares y sistemas de entrega capaces de garantizar un ataque de represalia. Sin embargo, su consolidación y reconocimiento como parte esencial de la política de defensa no se alcanzó plenamente hasta finales de la década de 1960.

FIRST STRIKE (PRIMER GOLPE)

La doctrina nuclear estadounidense de *First Strike* es una estrategia militar en la que se plantea la posibilidad de un ataque nuclear preventivo por parte de Estados Unidos contra un adversario, con el objetivo de desactivar o destruir la capacidad nuclear del enemigo antes de que pueda realizar un ataque en represalia. En otras palabras, en lugar de esperar a ser atacado, esta doctrina contempla la opción de atacar primero para reducir la amenaza antes de que se materialice.

CARACTERÍSTICAS DE LA DOCTRINA *FIRST STRIKE*

La doctrina *First Strike* se basa en la premisa de que si Estados Unidos tiene la capacidad de lanzar un ataque nuclear sorpresa y destruir la mayoría de las armas nucleares del enemigo antes de que puedan ser utilizadas, se podría evitar una respuesta devastadora, como una represalia nuclear masiva. En este sentido, se subraya la importancia de contar con armas nucleares lo suficientemente avanzadas y un sistema de inteligencia eficaz para identificar las amenazas.

Aunque esta doctrina es diferente a la de Destrucción Mutua Asegurada (MAD), ya que no se basa en la amenaza de represalias, el *First Strike* busca establecer un dominio total en el campo nuclear, asegurando la aniquilación del adversario de manera preventiva.

CREADORES Y DESARROLLO

La idea del *First Strike* se desarrolló a lo largo de la Guerra Fría, especialmente después de que la Unión Soviética comenzara a aumentar su capacidad nuclear. A medida que ambas superpotencias competían por la supremacía en armas nucleares, Estados Unidos contempló la posibilidad de atacar preventivamente a la URSS para evitar ser atacado. En los primeros años de la Guerra Fría, el desarrollo de esta doctrina estuvo influenciado por la necesidad de asegurar la superioridad estratégica de Estados Unidos frente a la creciente amenaza soviética.

Una de las figuras clave en la creación y formulación de la estrategia *First Strike* fue el presidente Dwight D. Eisenhower y su equipo militar, a partir de la década de 1950. Durante su presidencia (1953-1961), Estados Unidos adoptó una política de “destrucción masiva” como parte de la Doctrina de

Contención, que se centraba en impedir la expansión del comunismo. La estrategia *First Strike* estaba vinculada al concepto de destrucción masiva, en el que la primera nación en lanzar un ataque nuclear intentaría asegurar su ventaja estratégica al destruir las capacidades de represalia del enemigo.

AÑO DE CREACIÓN

La doctrina *First Strike* comenzó a tomar forma en la década de 1950, durante los primeros años de la Guerra Fría, y fue formalizada y profundizada en la década de 1960. El presidente John F. Kennedy continuó la adopción de esta doctrina, en especial tras la Crisis de los Misiles en Cuba (1962), cuando la URSS demostró su capacidad para colocar misiles nucleares cerca de las fronteras de Estados Unidos.

Cabe destacar que aunque el concepto de *First Strike* existió en la teoría y en la planificación militar, nunca fue una política formalmente anunciada o implementada en un conflicto real. Durante la Guerra Fría, las tensiones nucleares llevaron a una especie de “equilibrio del terror”, donde la doctrina de Destrucción Mutua Asegurada (MAD) prevaleció como una disuasión más que la de un ataque preventivo.

THE SOVIET PERIMETER SYSTEM O DEAD HAND (SISTEMA PERIMETRAL SOVIÉTICO O MANO MUERTA)

La doctrina de disuasión nuclear soviética conocida como *The Soviet Perimeter System* fue un sistema de control automatizado de armas nucleares que se diseñó para garantizar la represalia nuclear de la Unión Soviética en caso de que sufriera un ataque nuclear devastador y sus líderes quedaran incapacitados o muertos. La idea fundamental detrás de este sistema era asegurar que, incluso si la cúpula política y militar soviética era destruida en un primer ataque, el sistema de armas nucleares soviéticas pudiera seguir funcionando de manera autónoma y llevar a cabo un ataque de represalia, lo que garantizaría la “destrucción mutua asegurada”.

CARACTERÍSTICAS DEL DEAD HAND

Dead Hand era un sistema altamente secreto y automatizado que involucraba una serie de sensores, estaciones de monitoreo y un sistema de comunicación en la URSS. El sistema estaba diseñado para activar un contraataque

nuclear si se detectaba un ataque nuclear contra la Unión Soviética, sobre todo si los dirigentes soviéticos no podían dar una orden debido a que estaban muertos o incapacitados. El funcionamiento del sistema dependía de varios factores, incluyendo:

1. Sensores de radiación: Estos detectaban las señales de una explosión nuclear.
2. Detección de fallas en las comunicaciones: Si las comunicaciones entre los líderes soviéticos y las fuerzas militares se interrumpían debido a un ataque masivo, el sistema se activaba automáticamente.
3. Comando autónomo: Si se cumplían ciertas condiciones, el sistema era capaz de lanzar armas nucleares de forma automatizada, sin necesidad de la intervención humana directa.

Este sistema aseguraba que incluso en caso de una destrucción casi total del mando soviético, el país aún podría lanzar un ataque nuclear devastador, lo que mantenía la disuasión activa.

CREADORES Y DESARROLLO

El *Soviet Perimeter System* o *Dead hand* fue creado por científicos y estrategas militares soviéticos durante la Guerra Fría, probablemente a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970, aunque su existencia y detalles no fueron oficialmente reconocidos hasta mucho después del colapso de la Unión Soviética. El desarrollo de este sistema fue un reflejo de la creciente preocupación de la URSS por la capacidad de un ataque nuclear sorpresivo por parte de Estados Unidos o sus aliados, en especial después de eventos como la crisis de los misiles en Cuba en 1962.

Este sistema fue una respuesta al concepto *First Strike* de Estados Unidos, que postulaba la posibilidad de un ataque preventivo para destruir las capacidades nucleares soviéticas. El *Dead Hand* aseguraba que, incluso si la URSS fuera atacada de manera sorpresiva, aún existiera una opción para una represalia devastadora.

AÑO DE CREACIÓN

El *Dead Hand* probablemente comenzó a desarrollarse a finales de la década de 1960 o principios de la década de 1970, aunque la información sobre su im-

plementación exacta es algo difusa debido a su naturaleza clasificada y secreta. Se estima que el sistema fue plenamente operativo en los años ochenta durante los gobiernos de Leonid Brezhnev y Mijail Gorbachov. A pesar de ser funcional durante la Guerra Fría, la existencia del *Dead Hand* no fue confirmada públicamente hasta después de la disolución de la Unión Soviética en 1991.

TAN LEJOS, TAN CERCA: LAS VECES QUE EL MUNDO HA ESTADO CERCA DE UNA GUERRA NUCLEAR

Nuestro mundo ha estado varias veces cerca de quedar reducido a cenizas radiactivas por toda una serie de incidentes que van desde los demenciales hasta meros accidentes, aquí enumeraremos los principales.

1. Crisis de los misiles de Cuba (1962): Tal vez el enfrentamiento nuclear más famoso, este enfrentamiento de 13 días entre Estados Unidos y la Unión Soviética por los misiles balísticos soviéticos desplegados en Cuba acercó peligrosamente al mundo a un conflicto nuclear. Cabe señalar que las brillantes y racionales actuaciones del presidente John F. Kennedy y de su hermano Robert, junto con Adlai Stevenson II, lograron poner fin al conflicto, por supuesto con la colaboración de sus contrapartes soviéticas.
2. Able Archer 83 (1983): Un ejercicio militar de la OTAN simuló realísticamente un hipotético periodo de tensiones nucleares agudizadas entre los países miembros de ese organismo y la URSS. El realismo del ejercicio llevó a algunos líderes soviéticos a creer que era una tapadera para un auténtico primer ataque nuclear, que acercaba al mundo a una guerra nuclear.
3. Incidente de la falsa alarma soviética de 1983: El 26 de septiembre de 1983, el teniente coronel soviético Stanislav Petrov identificó correctamente una falsa alarma en el sistema de alerta temprana soviético, ya que un radar soviético confundió el reflejo del sol en unas nubes con misiles nucleares norteamericanos, lo que evitó un posible ataque nuclear de represalia contra Estados Unidos.
4. Incidente del cohete noruego (1995): El 25 de enero de 1995, un equipo de científicos noruegos y estadounidenses lanzó un cohete de investigación que los operadores de radar rusos confundieron con un posible ataque nuclear. Las fuerzas nucleares rusas se pusieron en alerta máxima, pero la situación se resolvió sin que se produjera una escalada.

5. Guerra de Kargil (1999): El conflicto entre India y Pakistán en el distrito Kargil, de Cachemira, acercó a los dos vecinos con armas nucleares a una posible confrontación nuclear.
6. Crisis nuclear de Corea del Norte (1994): Las tensiones entre Estados Unidos y Corea del Norte aumentaron debido al programa nuclear de Corea del Norte. La intervención diplomática del expresidente estadounidense Jimmy Carter ayudó a evitar un posible conflicto.

Estos incidentes ponen de relieve la importancia de una comunicación sólida, sistemas de verificación y esfuerzos diplomáticos para evitar malentendidos y posibles conflictos nucleares.

UN JUEGO LLAMADO ¿CUÁNTOS SOBREVIVEN DESPUÉS DE UNA GUERRA NUCLEAR GLOBAL?

En la rama de las matemáticas conocida como teoría de juegos, creada por el Dr. John von Neumann, el escenario de una guerra nuclear a menudo se enmarca como un conflicto de intereses entre dos partes, normalmente dos naciones o superpotencias, cada una con la capacidad de lanzar ataques nucleares devastadores. Si bien la destrucción mutua puede parecer el resultado inevitable, el razonamiento detrás del pensamiento estratégico es que ninguna de las partes quiere iniciar una guerra nuclear porque las consecuencias son catastróficas.

Un concepto clave que se ha aplicado a tales situaciones es el “dilema del prisionero”. En este caso, el dilema es sobre si lanzar o no un ataque nuclear. Si ambas partes evitan el lanzamiento, ambas sobreviven (aunque en un estado precario). Sin embargo, si una de las partes ataca mientras la otra no, la parte que ataca obtiene una gran ventaja (o al menos cree que la obtiene). Pero, si ambas partes deciden atacar preventivamente, el resultado es la aniquilación mutua.

El juego puede ser modelado de la siguiente manera:

1. Si ambos países lanzan un ataque nuclear: Ambos sufren una destrucción masiva y esencialmente pierden todo.
2. Si un país ataca y el otro no: El país que ataca puede dominar, pero aun así enfrentaría enormes represalias, posiblemente haciendo que las ganancias sean mínimas o nulas.

3. Si ninguno de los países ataca: Ambos mantienen la paz y la supervivencia; esto se ve como lo menos riesgoso, pero también como lo menos “gratificante” en términos de poder o control.

En este contexto, la “recompensa” de iniciar un ataque nuclear a menudo se ve como infinito negativo (pérdida total), mientras que la recompensa por la moderación puede ser la supervivencia, que, en comparación, sigue siendo una victoria. Este “estancamiento nuclear” incentiva a los países a evitar la guerra y, en su lugar, a centrarse en la disuasión.

Además, algunos teóricos de los juegos han estudiado la idea de la dominación de la escalada, en la que los países intentan establecer la capacidad de escalar un conflicto a niveles nucleares y luego desescalarlo para evitar cruzar el umbral de la destrucción mutua asegurada. El principio clave aquí es que los actores racionales, reconociendo la absoluta destructividad de las armas nucleares, evitarán la confrontación directa.

Pero ¿después de una guerra nuclear global alguien sobreviviría?

La respuesta corta es simplemente nadie.

En 1951, el Departamento de Defensa Civil de Estados Unidos hizo un cortometraje en cine que fue transmitido frecuentemente por la televisión y proyectado en todas las escuelas de la Unión Americana. Se llamaba *Duck and Cover* (Agacharse y cubrirse) y era un corto que contenía animación 2D y acción real con actores, para educar a la población desde niños hasta adultos, sobre qué hacer en caso de un ataque nuclear para salvar la vida. Estaba protagonizado por un personaje que era una tortuga de nombre Bert que caminaba por una calle de una ciudad común, mientras sonaba una canción pegajosa. Y ahí se instruía qué hacer en caso de un ataque nuclear en cualquier ciudad norteamericana. Los actores que eran niños y adolescentes enseñaban cómo actuar en caso de que la explosión los tomara por sorpresa en la calle o en la escuela, donde había que meterse debajo de los pupitres.

Aunque este tipo de tácticas serían inútiles para quienes se encuentren en la Zona Cero durante una explosión nuclear en la superficie, serían beneficiosas para la mayoría de las personas que estén lejos del hipocentro de la explosión. Los análisis científicos recientes han apoyado en gran medida la idea general de refugiarse en el interior en respuesta a una explosión nuclear. Permanecer en el interior puede dejar las calles despejadas para que los

vehículos de emergencia accedan a la zona. Esto se conoce como el protocolo de refugio en el lugar y, junto con la evacuación de emergencia, se recomiendan como las dos contramedidas que se deben tomar cuando los efectos directos de las explosiones nucleares ya no son una amenaza para la vida y se necesita protección para no entrar en contacto con la lluvia radiactiva de las armas nucleares.

Esto suponiendo que el ataque a una ciudad determinada fuera con armas nucleares de baja potencia.

En el contexto actual, la eficacia de tales medidas contra una explosión en la superficie o estando en la zona cero es, de hecho, muy cuestionable. Las recomendaciones de la película se basaban en la comprensión de los efectos inmediatos de una explosión nuclear, como las ondas expansivas, el calor y la radiación. Si bien agacharse y cubrirse podría brindar cierta protección contra los escombros que salen volando en ciertas situaciones, sería insuficiente contra las consecuencias catastróficas de una detonación nuclear, especialmente en la zona cero o cerca de ella.

Las evaluaciones modernas de las amenazas nucleares reconocen que las mejores formas de protección implican estrategias más integrales, como:

1. Refugio en el lugar: permanecer en el interior de un edificio bien sellado puede brindar cierta protección contra la lluvia radiactiva, en lugar de permanecer afuera durante una explosión.
2. Refugios designados contra la radiación: están contruidos especialmente para resistir los efectos de la radiación y las explosiones, lo que proporciona un entorno mucho más seguro durante y después de un evento nuclear.
3. Planes de preparación para emergencias: tener un plan de evacuación, comunicación y acceso a los recursos puede mejorar significativamente la seguridad y las posibilidades de supervivencia en caso de un ataque nuclear.
4. Educación pública: comprender la naturaleza de las amenazas nucleares y la importancia de la preparación puede ayudar a las comunidades a responder de manera más eficaz.

En resumen, si bien la estrategia de “agacharse y cubrirse” cumplió su propósito durante una época de mayor ansiedad por las amenazas nucleares, sus consejos están en gran medida desactualizados e insuficientes para la realidad

de una explosión nuclear. Las estrategias de defensa civil modernas se centran en medidas más eficaces que aborden las complejidades de tales amenazas. Sin embargo, dicho de una manera real y contundente, en una guerra nuclear global todos morirían, simplemente unos antes que otros.

Tragedias menores a las de una guerra nuclear global nos han demostrado fríamente lo difícil que es para los organismos de ayuda como los bomberos, la Cruz Roja y la policía, tratar de mantener el orden. Tenemos como ejemplo el accidente nuclear más grave de la historia: el accidente nuclear de Chernobyl.

Ocurrido el 26 de abril de 1986 en la planta de Chernobyl, cerca de la ciudad de Pripyat, en la entonces Unión Soviética (ahora Ucrania), fue el peor desastre en la historia de la energía nuclear.

Durante una prueba de seguridad mal diseñada, los técnicos cometieron varios errores que llevaron a una reacción en cadena descontrolada en el reactor número 4, que a su vez era un reactor nuclear mal diseñado y no tenía una estructura de concreto reforzado a su alrededor como mecanismo de contención.⁸ Esto resultó en una serie de explosiones masivas que liberaron una gran cantidad de material radiactivo a la atmósfera.

DAÑOS LOCALES Y GLOBALES POR EL ACCIDENTE DE CHERNOBYL

- **Locales:** La ciudad de Pripyat y las áreas circundantes fueron severamente contaminadas. Se estableció una zona de exclusión de aproximadamente 30 kilómetros alrededor de la planta, que luego se amplió para incluir áreas altamente contaminadas. Miles de personas fueron evacuadas, y la región sigue siendo inhabitable hasta hoy.
- **Globales:** La nube radiactiva se extendió por gran parte de Europa, contaminando grandes áreas de tierra y afectando la salud de millones de

⁸ Este accidente, así como el de la planta nuclear de Fukushima, no significan de ningún modo que las plantas nucleares sean un peligro para la humanidad, prueba de ello son los casi nulos accidentes graves que han tenido plantas en países como Francia o Estados Unidos, países que usan varias. Por el contrario, plantas nucleares bien diseñadas y operadas con los protocolos de seguridad adecuados, ofrecen energía eléctrica, barata y limpia, contribuyendo a aliviar el problema de la contaminación ambiental por el uso de combustibles fósiles y mitigando el cambio climático al reducir la llamada huella de carbono. Además, el supuesto problema de los desechos nucleares radiactivos está resuelto desde finales de la década de los años 50 y actualmente se almacenan de forma totalmente segura, sin ofrecer, incluso un peligro para generaciones futuras (nota del autor).

personas. Se estima que entre 50 y 185 millones de curies de radionúclidos escaparon a la atmósfera. Los efectos a largo plazo incluyen un aumento en los casos de cáncer y otras enfermedades relacionadas con la radiación. La radiación liberada en Chernobyl fue aproximadamente 400 veces mayor que la liberada por la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima

La dosis máxima anual permitida para el ser humano no se mide en curies, sino en sieverts (Sv) o milisieverts (mSv),⁹ que son unidades de medida de la dosis de radiación absorbida por el cuerpo humano. En general, la dosis máxima anual permitida para los trabajadores expuestos a radiación es de 50 mSv, mientras que para el público en general es de 1 mSv.

- Radiación en el lugar del accidente: En las áreas más afectadas del edificio del reactor, los niveles de radiación alcanzaron hasta 300 Sv/h (sieverts por hora), lo cual es suficiente para causar la muerte en poco más de un minuto.
- Dosis recibidas por los trabajadores: Los trabajadores que murieron dentro del primer mes posterior del desastre recibieron dosis típicas de alrededor de 6 Sv.
- Impacto global: La dosis de radiación global de Chernobyl, promediada en todo el planeta, fue relativamente baja en comparación con la exposición local cerca del lugar del accidente. Se ha estimado que la dosis media global para las personas a causa del desastre de Chernobyl fue de aproximadamente 0.001 a 0.01 sieverts (1 a 10 milisieverts, mSv). En otros lugares, especialmente en Europa, los niveles de radiación fueron bajos, pero aun así significativos. En algunas partes de Europa se estimó que la dosis de radiación para la población oscilaba entre 1 y 10 milisieverts (mSv), mientras que zonas como Suecia, Bielorrusia, Ucrania y Rusia recibieron las dosis más altas fuera de las inmediaciones de la planta.

⁹ Una radiografía de tórax típica arroja una dosis de aproximadamente 0,1 mSv. Un vuelo de ida y vuelta de Nueva York a Tokio puede dar dosis de aproximadamente 0,03 mSv debido a la radiación cósmica.

Este desastre muestra cómo incluso en accidentes graves, pero no tanto como una guerra nuclear, los servicios de protección civil enfrentan enormes desafíos para responder de manera eficiente y proteger a la población. Y todavía tenemos como ejemplo desastres naturales como sismos, tormentas de nieve, huracanes e inundaciones, en los cuales las autoridades de protección civil batallan para ayudar a la población.

JUGANDO CON FUEGO, ¿ES REALMENTE POSIBLE UNA GUERRA NUCLEAR?

Varios analistas alrededor del mundo constantemente piensan en esta posibilidad. A continuación, enumeraremos algunos posibles escenarios.

Escalada de un conflicto convencional: Uno de los escenarios más plausibles para una guerra nuclear global podría surgir de la escalada de un conflicto convencional entre Estados con armas nucleares. Por ejemplo, un enfrentamiento militar localizado (quizás en áreas de tensión geopolítica como Europa del este, el sur de Asia o el mar de China meridional) podría escalar hasta el punto en que una o más potencias nucleares sientan que el uso de armas nucleares es necesario para protegerse o lograr sus objetivos militares.

- **Desencadenante:** Un ataque sorpresa, una agresión territorial significativa o un error de cálculo militar en el que las fuerzas convencionales se vean abrumadas y las armas nucleares sean vistas como una forma de cambiar el equilibrio de poder.

Terrorismo nuclear o actores no estatales:¹⁰ Otro riesgo potencial es el uso de armas nucleares por actores no estatales o grupos terroristas. Si bien esto no conduciría necesariamente a una guerra nuclear global, el uso de armas nucleares por parte de un grupo como ISIS u otra organización extremista

¹⁰ En *The Fourth Protocol* (El cuarto protocolo) la película británica de espionaje ambientada en la Guerra Fría de 1987 protagonizada por Michael Caine y Pierce Brosnan. Dirigida por John Mackenzie, basada en la novela del mismo nombre de 1984 de Frederick Forsyth, se aborda la posibilidad teórica de armar una bomba atómica en Inglaterra, burlando ingeniosamente las alertas de introducción de material nuclear al país, y obteniendo todas las piezas necesarias por medio de distintos proveedores fuera del país. Si bien es ficción, puede ser una realidad en países con una laxa o nula vigilancia nuclear en sus fronteras.

podría provocar una respuesta desproporcionada de un Estado nuclear, posiblemente desencadenando una escalada hacia un conflicto más amplio. Un Estado rebelde como Corea del norte podría apoyar a estos grupos proporcionándoles todos los elementos necesarios y las instrucciones para armar una bomba atómica primitiva pero eficiente, usando distintos proveedores globales para no despertar sospechas y escoger un país del tercer mundo, que no cuente con vigilancia nuclear, para armarla.

- Desencadenante: Un ataque terrorista exitoso que implique un dispositivo nuclear robado o casero, seguido de una represalia militar.

Ataques cibernéticos o fallas tecnológicas:¹¹ Los sistemas militares modernos dependen cada vez más de la ciberseguridad, y un ciberataque importante podría manipular o interrumpir los sistemas de comando y control nuclear, lo que llevaría a un lanzamiento erróneo o a falsas alarmas. El peligro es que estos ataques podrían desencadenar una respuesta nuclear, incluso si no existe una amenaza real.

- Desencadenante: Un ciberataque a los sistemas de comando nuclear (por ejemplo, piratería de sistemas de detección de alerta temprana o instalaciones de lanzamiento de misiles) que cause una falsa alarma o una mala interpretación de los movimientos del enemigo.

El colapso del control de armamentos: Si los acuerdos de control de armamentos entre las potencias nucleares (por ejemplo, el nuevo START, el Tratado sobre Fuerzas Nucleares de Alcance Intermedio) continúan erosionándose o colapsando, las naciones pueden acelerar el desarrollo y despliegue de armas nucleares, lo que llevaría a una carrera armamentista. En un mundo donde las potencias nucleares están expandiendo agresivamente sus arsenales, las probabilidades de conflicto por las armas nucleares aumentarían.

¹¹ El brillante periodista británico James Burke, en su documental *Connections 1*, transmitido por la BBC de Londres, en su primer capítulo llamado *The Trigger Effect* transmitido en el Reino Unido el 17 de octubre de 1978, detalla la dependencia actual del mundo a redes tecnológicas complejas a través de una narrativa detallada de la ciudad de Nueva York y el apagón de 1965, el cual fue provocado por la falla de un simple relé o disyuntor eléctrico que costaba unos cuantos dólares en una central eléctrica.

- **Desencadenante:** Una ruptura del tratado, seguida de un aumento significativo de los arsenales de armas nucleares, lo que aumenta el riesgo de un primer ataque mal calculado por una potencia contra otra.

Lanzamiento accidental: En momentos de mayor tensión, como un enfrentamiento o un ejercicio militar importante, un lanzamiento accidental o una interpretación errónea de un acontecimiento podría desencadenar una guerra nuclear. En el pasado ha habido situaciones en las que se ha llegado a un punto de inflexión (como la falsa alarma soviética de 1983), en las que se necesitó una acción rápida y decisiva para evitar una catástrofe. En el entorno actual, con tensiones entre Estados con armas nucleares como Estados Unidos, Rusia y China, un malentendido similar podría conducir a una escalada nuclear.

- **Desencadenante:** Un lanzamiento accidental o una interpretación errónea de una prueba o ejercicio de misiles como un ataque nuclear real, lo que provocaría un ataque de represalia.

Estupidez humana: Carlo Cipolla, un historiador y economista italiano, escribió un ensayo humorístico y perspicaz sobre la naturaleza de la estupidez humana, que desde entonces se ha vuelto bastante famoso. En él, Cipolla propone cinco leyes básicas de la estupidez humana que, según él, son de aplicación universal y pueden ayudar a explicar gran parte de nuestro comportamiento.

Las cinco leyes básicas de la estupidez humana

1. **Primera ley:** Siempre e inevitablemente, todos subestimamos la cantidad de individuos estúpidos en circulación. Cipolla sostiene que, sin importar cuán inteligentes o racionales creamos que son las personas, siempre hay muchas más personas estúpidas de las que esperamos. Las personas tienden a pasar por alto la prevalencia de la estupidez, lo que a menudo conduce a errores de cálculo y consecuencias sorprendentes.
2. **Segunda ley:** La probabilidad de que cierta persona sea estúpida es independiente de cualquier otra característica de esa persona. Esta ley establece que la estupidez es un rasgo aleatorio, no correlacionado con la

inteligencia, la educación, la riqueza o el estatus social. En otras palabras, se pueden encontrar individuos estúpidos en todos los ámbitos de la vida, independientemente de sus aparentes capacidades o posiciones.

3. Tercera ley: Una persona estúpida es aquella que causa pérdidas a otra persona o a un grupo de personas sin obtener ninguna ganancia, o incluso posiblemente incurriendo en una pérdida, para sí misma. Aquí, Cipolla define la estupidez como un comportamiento que daña a otros sin ningún beneficio para la persona que causa el daño (y posiblemente dañándose a sí misma también). En esencia, una persona estúpida es aquella que actúa de una manera que sólo da resultados negativos, sin ningún beneficio racional para ellos.
4. Cuarta ley: Las personas no estúpidas siempre subestiman el poder dañino de los individuos estúpidos. Según Cipolla, las personas tienden a subestimar el daño que pueden causar las personas estúpidas. El daño causado por la estupidez suele ser mayor de lo esperado porque las personas inteligentes pueden no reconocer el alcance total de las consecuencias que surgen de las acciones de los individuos estúpidos.
5. Quinta ley: Una persona estúpida es el tipo de persona más peligroso. Cipolla sostiene que las personas estúpidas son particularmente peligrosas porque, a diferencia de los criminales o las personas con malas intenciones, sus acciones son impredecibles. Dado que las personas estúpidas causan daño sin ningún interés propio o intención consciente, incluso en su propio perjuicio, su comportamiento es mucho más difícil de anticipar o contrarrestar, lo que las vuelve extremadamente peligrosas para la sociedad.

- Desencadenante: la estupidez humana.

SOBRE LAS PARADOJAS NUCLEARES, O HISTORIAS DE HÉROES Y VILLANOS

La paradoja radica en el doble uso de la energía nuclear, para destruir el mundo o para el bien de la humanidad. Un ejemplo curioso es la creación del llamado Método de Montecarlo.

El Método de Montecarlo, que es un método matemático, fue desarrollado por el matemático, físico e informático polaco-estadounidense Stanislaw Ulam, mientras trabajaba en el desarrollo de la bomba de hidrógeno. Su trabajo en

el método estaba estrechamente vinculado a la necesidad de simular y resolver problemas físicos complejos relacionados con las explosiones nucleares.

Mientras Ulam y Von Neumann trabajaban en la aplicación conceptual del Método de Montecarlo, las computadoras de la época no eran lo suficientemente potentes como para realizar directamente los cálculos necesarios. Sin embargo, pudieron utilizar las primeras computadoras (como la ENIAC de la Universidad de Pensilvania) para llevar a cabo la enorme cantidad de simulaciones aleatorias necesarias que usa este método matemático y se utilizaron para realizar simulaciones para el diseño de la bomba de hidrógeno, lo que básicamente les permitió ejecutar muchos escenarios diferentes e identificar los diseños más eficaces.

Ahora bien, el Método de Montecarlo tiene varias aplicaciones pacíficas, una de las más curiosas es en la animación 3D.

En la animación 3D se utiliza el método de Montecarlo para simular cómo interactúa la luz con las superficies y los materiales de una escena, en particular en el campo del trazado de rayos y la iluminación global. Para reproducir imágenes realistas en gráficos 3D es necesario modelar el comportamiento complejo de la luz, como la forma en que se refleja, refracta, dispersa y absorbe a medida que viaja a través de una escena. Estas interacciones son extremadamente complejas de calcular con exactitud.

El Método Montecarlo es muy adecuado para la renderización (la generación final de una imagen en 3D) porque es excelente para resolver integrales complejas de alta dimensión (como las interacciones de la luz en una escena) que son imposibles o computacionalmente costosas de calcular con exactitud. Al utilizar un muestreo aleatorio, permite una aproximación de la física del mundo real (como el comportamiento de la luz) de una manera que es computacionalmente factible, incluso para escenas complejas con muchas fuentes de luz y materiales intrincados.

RenderMan de Pixar-Disney, uno de los paquetes de software de renderizado más famosos utilizados en la industria cinematográfica, fue uno de los pioneros en la aplicación del Método de Montecarlo para producir imágenes fotorrealistas. *RenderMan* es un renderizador de calidad de producción que se ha utilizado en muchas películas emblemáticas como *Toy Story*, *Buscando a Nemo* y *Los Increíbles*.

RenderMan fue uno de los primeros sistemas en integrar técnicas basadas

en el Método de Montecarlo, como el trazado de trayectorias y la radiosidad (otro método de iluminación global), en el proceso de producción.¹²

Otros usos pacíficos del Método de Montecarlo son: finanzas y gestión de riesgos, gestión y optimización de la cadena de suministro, predicción meteorológica y modelado climático, ingeniería y fiabilidad estructural, investigación médica y desarrollo de fármacos, inteligencia artificial y aprendizaje automático, química computacional, teoría de juegos y toma de decisiones estratégicas, astronomía y exploración espacial, y control de calidad y fabricación.

¿LA HUMANIDAD ESTÁ PERDIDA? ALGUNAS PALABRAS DE ALIENTO Y ESPERANZA
Varios actores políticos, sociales y hasta la Iglesia católica han hecho lo posible por detener una catástrofe nuclear global, mediante tratados de desarme y llamados a la paz.

1. Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP)

- Fecha: 1 de julio de 1968 (entrada en vigor el 5 de marzo de 1970).
- Objetivos: Prevenir la expansión de armas nucleares, fomentar el desarme nuclear y promover la cooperación para el uso pacífico de la energía nuclear.
- Actores clave: Estados Unidos, la Unión Soviética (ahora Rusia) y el Reino Unido fueron los principales impulsores. El tratado ha sido firmado por casi todos los países del mundo.

2. Acuerdos SALT I (Strategic Arms Limitation Talks)

- Fecha: 1972.
- Objetivos: Limitar la cantidad de armas nucleares estratégicas de Estados Unidos y la Unión Soviética.
- Actores clave: Estados Unidos y la Unión Soviética. Estos acuerdos fueron negociados principalmente durante la presidencia de Richard Nixon y el liderazgo de Leonid Brezhnev en la URSS.

¹² El autor tiene una experiencia profesional en animación 3D y gráficas por computadora de más de 35 años, y ha recibido entrenamiento en Estados Unidos y ha asistido a varias conferencias sobre gráficas por computadora como las que ofrece SIGGRAPH anualmente.

3. Acuerdos SALT II

- Fecha: 18 de junio de 1979 (no ratificado por el Senado de Estados Unidos, pero cumplido *de facto* hasta 1986).
- Objetivos: Continuar las restricciones en armas nucleares estratégicas, ampliando los límites establecidos en SALT I.
- Actores clave: Nuevamente Estados Unidos y la Unión Soviética, bajo las presidencias de Jimmy Carter y Leonid Brezhnev.

4. Tratado INF (Tratado sobre Fuerzas Nucleares de Alcance Intermedio)

- Fecha: 8 de diciembre de 1987.
- Objetivos: Eliminar todos los misiles nucleares de alcance intermedio y de corto alcance, así como las plataformas de lanzamiento de estos misiles.
- Actores clave: Estados Unidos y la Unión Soviética (Rusia en la actualidad), bajo las presidencias de Ronald Reagan y Mijaíl Gorbachov.

5. Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBT)

- Fecha: 24 de septiembre de 1996 (aunque aún no ha entrado en vigor debido a la falta de ratificación de algunos países clave).
- Objetivos: Prohibir todas las pruebas nucleares, en todas sus formas y en cualquier lugar.
- Actores clave: Iniciado bajo la iniciativa de la ONU, con un enfoque conjunto de Estados Unidos, Rusia y otros países con capacidad nuclear.

6. Tratado START I (Tratado de Reducción de Armas Estratégicas)

- Fecha: 31 de julio de 1991.
- Objetivos: Reducir los arsenales nucleares de Estados Unidos y la Unión Soviética (y posteriormente de Rusia), limitando la cantidad de misiles nucleares estratégicos y ojivas nucleares.
- Actores clave: Estados Unidos y la Unión Soviética, con los presidentes George H. W. Bush y Mijaíl Gorbachov.

7. Tratado START II

- Fecha: 3 de enero de 1993.
- Objetivos: Continuar con la reducción de armas nucleares, particularmente

en lo que respecta a misiles balísticos intercontinentales (ICBM) y misiles de alcance medio.

- Actores clave: Estados Unidos y Rusia, bajo la presidencia de Bill Clinton y Borís Yeltsin. Aunque el tratado fue firmado, nunca entró en vigor.

8. Tratado START III

- Fecha: 1997 (formalmente conocido como el Tratado de Reducción de Armas Estratégicas).
- Objetivos: Reducción adicional de armas nucleares entre Rusia y Estados Unidos.
- Actores clave: Estados Unidos y Rusia. Estos tratados y acuerdos han sido pasos importantes hacia la limitación y el eventual desarme nuclear, aunque aún existen muchos desafíos para lograr un mundo completamente libre de armas nucleares.

9. Tratado sobre la Prohibición de Armas Nucleares (TPAN)

- Fecha: 7 de julio de 2017.
- Objetivos: Prohibir de manera total las armas nucleares. Este tratado representa un esfuerzo global hacia el desarme nuclear total.
- Actores clave: Impulsado por la ONU, con el apoyo de muchos países no nucleares, aunque los países con armas nucleares, como Estados Unidos, Rusia, China y otros, no lo han firmado.

10. Tratado de Tlatelolco

- Nombre completo: Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe.
- Fecha de firma: 14 de febrero de 1967.
- Fecha de entrada en vigor: 22 de abril de 1968.
- Lugar de firma: Ciudad de México, en el edificio de la Secretaría de Relaciones Exteriores, ubicado en la Plaza de Tlatelolco (de ahí su nombre).
- Objetivo: El Tratado de Tlatelolco tiene como principal objetivo proscribir (prohibir) las armas nucleares en toda América Latina y el Caribe. En otras palabras, establece la región como una zona libre de armas nucleares. Este acuerdo fue uno de los primeros en el mundo en establecer una zona libre de armas nucleares y fue un paso muy importante en los esfuerzos internacionales para reducir la proliferación de armas nucleares.

- Principales creadores: El tratado fue impulsado principalmente por México, que desempeñó un papel fundamental en su creación, bajo la presidencia de Gustavo Díaz Ordaz. México fue un fuerte defensor del desarme nuclear desde la década de 1940. Sus principales creadores fueron:

Alfonso García Robles

- Rol clave: Alfonso García Robles fue un diplomático mexicano que jugó un papel central en la negociación y redacción del Tratado de Tlatelolco. Fue un defensor incansable del desarme nuclear y promovió el tratado como una forma de garantizar la seguridad regional sin la necesidad de armamentos nucleares. Su liderazgo y su habilidad diplomática fueron cruciales para conseguir el apoyo de otros países latinoamericanos.
- Reconocimientos: Debido a sus esfuerzos en la promoción del desarme nuclear, García Robles recibió el Premio Nobel de la Paz en 1982. El comité Nobel destacó su contribución significativa al esfuerzo por crear zonas libres de armas nucleares, no sólo en América Latina, sino en todo el mundo.

*Dr. Carlos Graef Fernández*¹³

- Rol clave: El Dr. Carlos Graef Fernández fue un físico mexicano experto en temas nucleares, que también jugó un papel crucial en el Tratado de Tlatelolco. Aunque su función no fue diplomática como la de García Robles, Graef Fernández fue una figura fundamental en la sensibilización sobre los peligros de las armas nucleares y en la creación de una infraestructura científica y técnica para la cooperación nuclear pacífica en la región. Fue un defensor del uso pacífico de la energía nuclear y contribuyó al desarrollo del Tratado de Tlatelolco desde una perspectiva científica y técnica.
- Contribuciones: Además de su trabajo en el Tratado de Tlatelolco, el Dr. Graef Fernández tuvo un impacto significativo en la promoción del uso pacífico de la energía nuclear en México y América Latina, y fue uno de los principales impulsores de la cooperación internacional en el ámbito nuclear pacífico en la región.

¹³ La participación del Dr. Carlos Graef Fernández en este tratado a veces es omitida, pero fue comunicada en una plática personal del autor de este artículo con el finado matemático mexicano el Dr. Alberto Barajas Célis, colega y amigo del Dr. Graeff, en 1996.

Países signatarios iniciales: En total, 33 países de América Latina y el Caribe firmaron el tratado.

Contenido y relevancia del Tratado de Tlatelolco

- Los países firmantes se comprometieron a no fabricar, adquirir, poseer o permitir el emplazamiento de armas nucleares en su territorio.
- También se comprometieron a cooperar en la utilización pacífica de la energía nuclear.
- Supervisión: la Organización para la Proscripción de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe (OPANAL), con sede en la Ciudad de México, se estableció para supervisar la implementación del tratado y asegurar su cumplimiento.

CONCLUSIÓN

El invierno nuclear es un recordatorio poderoso de los riesgos inherentes a la acumulación y el uso de armas nucleares. Mientras que los avances en la ciencia han mejorado nuestra comprensión de este fenómeno, también han subrayado la urgencia de reducir las tensiones globales y promover el desarme nuclear. La cooperación internacional y el compromiso con la paz son esenciales para evitar un escenario que podría marcar el fin de la civilización tal como la conocemos.

Para cerrar este artículo citemos la frase de Christiaan Huygens (4 de abril de 1629-8 de julio de 1695), quien fue un matemático, físico, ingeniero, astrónomo e inventor holandés considerado una figura clave en la Revolución científica.

Qué vastitud la de estos orbes y qué poco considerable es comparada con ellos la Tierra, el teatro sobre el cual se juegan todos nuestros poderosos designios, todas nuestras navegaciones, y todas nuestras guerras. Una consideración muy pertinente, y materia de reflexión para los reyes y príncipes que sacrifican las vidas de tantas personas sólo para halagar su ambición y convertirse en dueños de algún lamentable rincón de este pequeño lugar". ❖

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas referentes a los mundos planetarios, sus habitantes y sus producciones*, hacia 1690.

BIBLIOGRAFÍA

- Cipolla, C.M., *The Basic Laws of Human Stupidity*, Nueva York, Doubleday, 2021 [publicado por primera vez en italiano, con el título *Allegro, ma non troppo*, en 1988].
- Gleick, J., *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*, Nueva York, Open Road Integrated Media, 2011.
- Kahn, H., *On Thermonuclear War*, Princeton, Princeton University Press, 1961.
- Kelly, C.C., *The Manhattan Project: The Birth of the Atomic Bomb in the Words of Its Creators, Eyewitnesses, and Historians*, Nueva York, Atomic Heritage Foundation-Black Dog & Levental Publishers, 2020.
- Lanoutette, W.-S., *Genius in the Shadows-A Biography of Leo Szilard, the Man Behind the Bomb*, Nueva York, Skyhorse Publishing, 2013.
- Rhodes, R., *The Making of the Atomic Bomb*, Nueva York, Simon & Schuster, 1986.
- Rhodes, R., *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb*, Nueva York, Simon & Schuster, 1995.
- Robock, A.O., “Nuclear Winter Revisited with a Modern Climate Model and Current Nuclear Arsenals: Still Catastrophic Consequences”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 112(D13), 2007.
- Sagan, C., *Cosmos*, Nueva York, Random House, 1980.
- Sagan, C., “The Nuclear Winter: The world after Nuclear War”, *Parade Magazine*, vol. 275, núm. 9, 1983, pp. 4-11.
- Sagan, C. y R. Turco, *A Path Where No Man Thought: Nuclear Winter and the End of the Arms Race*, Nueva York, Random House, 1990.
- Toon, O.B., “Atmospheric Effects and Societal Consequences of Regional Scale Nuclear Conflicts and Acts of Individual Nuclear Terrorism”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7, núm. 8, 2007, 1973-2002.

Quiero agradecer la invitación y estimulación para escribir este artículo, del estimado y admirado Dr. Jean André Joseph Meyer Barth. Además, quiero agradecer al finado Dr. Alberto Barajas Célis, al Dr. Fernando Ángeles Uribe, la Dra. Xóchitl Cruz, al finado Dr. Alfonso Serrano Pérez-Grovas, al finado Dr. Arcadio Poveda Ricalde, al Dr. René Carrillo Moreno, al Dr. Marcos Ley Koo, a mi maestro y mentor el Q.F.B Gerardo Méndez Cortés y, al final, pero nunca menos, a mi querido amigo el biólogo M. en C. Aquiles Bernal Moreno, por su bonhomía, apoyo y por compartir su sabiduría y reflexiones éticas. Sin duda, estoy y estaré siempre en deuda con todos y cada uno de ellos, mis amigos, mentores y maestros de la Facultad de Ciencias, del Instituto de Astronomía y del Instituto de Matemáticas de la UNAM, desde que yo era estudiante de física a finales de los ochenta hasta el día de hoy.

