

Consecuencias del impacto de asteroides y cometas con la Tierra y posibles medidas de mitigación

MSc. Francisco González-Veitia

Instituto de Geofísica y Astronomía, Dpto. de Geofísica y Geología Ambiental, Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31, La Coronela, municipio La Lisa, La Habana, CUBA, CP. 11600. E-mail: francisco@iga.cu

Recibido: 11/10/2024	Aceptado: 19/1/2025
----------------------	---------------------

Resumen

En el presente artículo se analizó el potencial destructivo del impacto de asteroides y cometas con la Tierra, así como sus efectos sobre la vida y el medio ambiente. A través del análisis de bibliografía especializada se particularizó en la descripción de cada efecto perjudicial de los impactos en el caso local, continental y a escala planetaria, definiendo algunas posibles estrategias de mitigación para tratar de evitar esta catástrofe natural o asimilar sus consecuencias. Finalmente se discutió el carácter complejo de los posibles efectos y su interacción combinada dentro del panorama de impacto. Se llegó a la conclusión de que la combinación de tecnología avanzada, cooperación internacional y educación pública será clave para proteger a nuestro planeta de esta amenaza cósmica.

Palabras clave: asteroides, cometas, impactos

Consequences of the impact of asteroids and comets with the Earth and possible mitigation measures.

Abstract

This article analyzes the destructive potential of asteroid and comet impacts with Earth, as well as their effects on life and the environment. Through a review of specialized literature, the article details each harmful impact effect at the local, continental, and global levels, defining possible mitigation strategies to try to avoid this natural catastrophe or assimilate its consequences. Finally, the complex nature of the potential effects and their combined interaction within the impact landscape are discussed. It was concluded that the combination of advanced technology, international cooperation, and public education will be key to protecting our planet from this cosmic threat.

Keywords: asteroids, comets, impacts

1. Introducción

El impacto de un asteroide sobre la Tierra (fig. 1) iniciaría una rápida serie de eventos que, para impactos suficientemente grandes, podrían causar un gran número de víctimas humanas, de animales, gran daño al medio ambiente y a la infraestructura económica.

Estos efectos fatales son principalmente una función de la energía cinética del impacto. El tipo de objeto (cometa o asteroide, rocoso o de hierro) y forma y ángulo de impacto, son todos parámetros secundarios en comparación con la energía liberada.



Fig. 1: Impacto de asteroide sobre la Tierra (representación artística Getty image)

La velocidad de un cuerpo impactante está relativamente bien restringida para diferentes tipos de objetos. La mayoría de los asteroides chocan con velocidad entre 15 y 23 km s⁻¹, mientras que los cometas de período corto promedian alrededor de 50 km s⁻¹, por lo que, para un objeto de igual masa, los cometas entregan aproximadamente 4 veces más energía cinética (sin embargo, estos solo forman alrededor del 3% del riesgo de impacto total [SDT 2017]).

La mayoría de los efectos inmediatos de un impacto de cualquier tamaño son una función importante de la distancia al evento. Estos efectos pueden clasificarse como locales o regionales en virtud de su extensión desde el lugar del impacto. No hay demarcación exacta de estas designaciones: los fenómenos físicos reales son los mismos, pero se extienden más lejos del sitio del impacto para impactos mayores.

Desde la propuesta de Álvarez de que la extinción marcada por el límite K/T fue iniciada por un impacto (Alvarez et al., 1980), la mayoría de las investigaciones se han centrado en los efectos globales de impactos muy grandes (fig. 2). Sin embargo, varios autores han reconocido que los efectos locales y regionales de impactos más pequeños pueden tener graves consecuencias para nuestra civilización global y delicadamente equilibrada (Toon et al., 1997).

A partir de estos antecedentes el presente trabajo tiene como objetivo analizar el potencial destructivo del impacto de asteroides y cometas con la Tierra, así como sus efectos sobre la vida y el medio ambiente.



Fig. 2: Impacto de asteroide en Chicxulub actual México hace unos 65 millones de años (representación artística AFP. APP)

2. Análisis y discusión

El impacto de un asteroide o cometa en la Tierra es un evento de consecuencias potencialmente catastróficas, capaz de desencadenar cambios drásticos en el medio ambiente, el clima y la vida en nuestro planeta. A lo largo de la historia, estos impactos han dejado huellas imborrables, desde la extinción de los dinosaurios hace 66 millones de años hasta eventos más recientes como la explosión de Tunguska en 1908. Los efectos de un impacto pueden variar desde destrucción localizada hasta alteraciones globales, dependiendo del tamaño, la velocidad y la composición del objeto. Este análisis explora los diversos efectos que un asteroide o cometa podría tener, tanto a nivel inmediato como a largo plazo, en la Tierra y sus ecosistemas.

Progresión de sucesos en el impacto de un asteroide o cometa (fig. 3):

- Traza atmosférica luminosa (Bólide)
- Explosión atmosférica y ondas de choque
- Llegada de trozos a tierra (caída de meteoritos)
- Perturbaciones electromagnéticas
- Formación de cráteres
- Terremotos
- Tsunamis
- Incendios a distinta escala
- Efectos climáticos de corta, media y larga duración



Fig. 3: consecuencias posibles de un gran impacto de asteroide o cometa sobre la Tierra (fotos Instagram, Global new, Amino, Wikipedia, Gstatic)

Efectos locales o regionales de los impactos.

Radiación térmica

Cuando un objeto se mueve rápidamente y choca con la superficie de la Tierra, aproximadamente la mitad de su energía cinética se convierte inmediatamente en calor (fig. 4), (Melosh, 1989). A velocidades de impacto por encima de unos 15 km s^{-1} , las temperaturas máximas en el momento del choque superan los 10000 K de modo que el proyectil sólido y una masa aproximadamente equivalente de material de la superficie se convierte en gas o plasma incandescente.



Fig.4: Radiación luminosa y térmica después del impacto, Captura de la serie Universo.

La conversión del calor perdido por la bola de fuego y las consecuencias para los humanos y estructuras a una distancia determinada del impacto depende de muchos factores, como el tamaño de la bola de fuego, curvatura de la Tierra (la bola de fuego debe estar por encima del horizonte para un observador a la distancia seleccionada), nubosidad, transparencia atmosférica, duración de la exposición y la naturaleza de los materiales afectados.

Sacudida sísmica.

El impacto de un meteoróide con la superficie de la Tierra produce un temblor análogo al creado por un terremoto (fig. 5). Las ondas sísmicas más dañinas emitidas en un fuerte terremoto o un impacto son ondas superficiales, que viajan a unos 5 km s^{-1} sobre la superficie de la Tierra. El tiempo de llegada de estas ondas a una distancia r en kilómetros del sitio de impacto es, por lo tanto, aproximadamente $r/5$ segundos después del impacto. La cantidad de devastación a una distancia dada del impacto puede ser estimada calculando la intensidad de la sacudida I como se define en la Escala de intensidad Modificada de Mercalli (Richter, 1958).



Fig.5: Sismos después del impacto. Captura de la serie Universo.

Deposición de eyecciones.

El destino de las eyecciones que viajan lo suficientemente rápido como para volar más allá de la región de la bola de fuego de baja densidad depende de la liberación de energía en el impacto (fig. 6). La bola de fuego que se forma cerca de los impactos que liberan aproximadamente 200 MT se eleva de manera flotante a la atmósfera, después se equilibra con el entorno, bloqueando el vuelo de eyecciones de rápido movimiento y extrayendo la mayor parte de las eyecciones de partículas y polvo hacia arriba. Este material luego llueve a favor del viento desde el sitio del impacto, similar a la deposición observada de las cenizas de las erupciones volcánicas.



Fig.6: Deposition of ejecta después del impacto. Captura de la serie Universo.

Onda de Choque

La atmósfera en la vecindad de un gran impacto se ve muy perturbada por la expansión de la bola de fuego y el penacho de material eyectado. El repentino desplazamiento rápido del aire cercano al impacto produce fuertes ondas de choque que comprimen y se descomponen en ondas sonoras que continúan calentando el aire. Estas ondas se expanden lejos del lugar del impacto, debilitándose a medida que se alejan y son análogas a las que producen los aviones supersónicos al romper la barrera del sonido (fig. 7). A distancias cortas, estos chorros de aire pueden ser muy destructivos, derrumbar edificios, puentes y volcar carros y camiones. La fuerza de tales ondas se mide por la sobrepresión, el exceso de presión en la onda en comparación con la que existe en la esfera de atmósfera ambiental. Los edificios y las ventanas de vidrio, en particular, son sorprendentemente vulnerables a pequeñas sobrepresiones. Una sobrepresión de solo 0.3 atm es suficiente para colapsar una estructura de acero, y 0.004 atm son suficientes para romper ventanas de vidrio.



Fig.7: Onda de choque tras el impacto. Captura de la serie Universo.

Tsunamis por impactos oceánicos (fig. 8)

Los tsunamis producidos por causas diversas están entre los fenómenos naturales más peligrosos y complejos, siendo responsables de grandes pérdidas de vidas y destrucción masiva de propiedades en muchas áreas costeras de los océanos del mundo.

Dado que existe evidencia del impacto de un asteroide en la Tierra, tenemos que concluir que existe una probabilidad de cuatro a uno de que golpeen océanos, mares o incluso grandes depósitos de agua internos, por lo tanto, un tsunami u olas de agua similares a un tsunami pueden ser generadas por un impacto de asteroide. Los trabajos de investigadores como el Dr. Sean Gulick, la Dra. Joanna Morgan, el Dr. Gary Kinsland y el Dr. David Kring, permitieron descubrir evidencia del tsunami monumental provocado por el impacto de Chicxulub. Después de analizar núcleos de más de 100 sitios en todo el mundo y crear modelos digitales comprendieron que, diez minutos después del impacto, olas monstruosas de 1.6 km de altura se movieron hasta unos 220 km del punto cero, las cuales barrieron completamente la región del actual golfo de México en todas direcciones.



Fig.8: Tsunami por impacto. Captura de la serie Universo.

Los tsunamis por impactos oceánicos pueden ser significativos para asteroides con un diámetro entre 200 m a 1 km (Hills et al., 1994). La altura de ola en aguas profundas resultante y la distribución esperada de aceleración a lo largo de la costa depende de muchos factores: el tamaño del impactor y su composición, velocidad y ángulo de colisión, así como la particularidad del sitio de impacto. Incluso para un conjunto concreto de estos parámetros, todavía las investigaciones arrojan resultados muy inciertos acerca de la altura esperada de un tsunami generado por un evento de este tipo. Organizaciones científicas como Los Alamos National Laboratory han desarrollado modelos computacionales avanzados para simular impactos en océanos y sus consecuencias.

Efectos globales de grandes impactos

➤ Pulso térmico en el retorno de la lluvia de material eyectado

La consecuencia global más inmediata de un impacto muy grande es la lluvia de eyección, que dura horas después del impacto. Partículas eyectadas condensadas de la masa fundida y el penacho de vapor vuelven a entrar en la atmósfera de toda la tierra y liberan una gran cantidad de energía calorífica en la atmósfera superior, este calor fue, en el caso de Chicxulub, lo suficientemente intenso como para producir el inicio de incendios forestales globales (Wolbach et al., 1988) y quemar directamente animales protegidos (Melosh et al., 1990).

➤ Carga de polvo de la atmósfera

Desde el primer artículo de Álvarez sobre la extinción K-T (1980), la carga de polvo en la atmósfera a raíz de un gran impacto ha sido un mecanismo de extinción favorito. A pesar de que las partículas grandes de polvo se depositan rápidamente en la atmósfera, el polvo submicrométrico puede permanecer suspendido durante años. Este polvo puede impedir que la radiación solar llegue a la superficie, lo que podría llevar a períodos prolongados de temperaturas bajo cero y la muerte de las plantas fotosintéticas.

➤ Inyección de gases climáticamente activos

Además de levantar una supuesta nube de polvo, el impacto de Chicxulub vaporizó grandes masas de sedimentos ricos en azufre (Brett, 1992); (Sigurdsson et al., 1992), que posteriormente se debieron condensar como aerosoles de H_2SO_4 en la atmósfera superior (Toon et al., 1997).

Esto habría provocado que las temperaturas en la superficie cayeran en picado durante varios años (Pierazzo et al., 2003) e iniciar un episodio de intensa lluvia ácida cuando el aerosol se filtró y fue arrastrado por las lluvias troposféricas (Retallack et al., 1996); (Sigurdsson et al., 1992). La acidificación de las aguas superiores del océano parece ser actualmente el único agente capaz de explicar las extensas extinciones marinas, en contraposición a las terrestres.

Se han considerado otras adiciones nocivas a la atmósfera (Toon et al., 1997). El calentamiento por impacto de nuestra atmósfera rica en N_2 y O_2 produce gases NO_x que pueden destruir la capa de ozono y aumentar la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie. Además, al reaccionar con el vapor de agua, el NO_x crea ácido nítrico y conduce a la lluvia ácida. El agua en sí no produce gases de efecto invernadero al descomponerse por calentamiento, pero el aumento de las temperaturas globales puede desencadenar procesos indirectos en los que el agua está involucrada, liberando gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Además, **el vapor de agua** actúa como un potente gas de efecto invernadero que amplifica el calentamiento global. Los incendios crean pirotóxicas que actúan como venenos. Finalmente, parece que los impactos pueden causar el agotamiento del ozono, abriendo la atmósfera a una mayor radiación ultravioleta (Birks & Wilson, 2006).

El metano es un elemento importante a tener en cuenta sobre el impacto global provocado por estos fenómenos. Clatratos de metano subyacen en grandes áreas de los sedimentos en las plataformas continentales. Sí son perturbados por deslizamientos de tierra submarinos de grandes dimensiones provocados por sacudidas sísmicas, una gran cantidad de metano podría ser liberada repentinamente a la atmósfera y esto tal vez explique los grandes cambios en las proporciones de isótopos de carbono a través del límite K-T (Day & Maslin, 2005).

➤ Efectos indirectos de extinción biológica

Aunque se han investigado una gran cantidad de posibles efectos de un gran impacto, hasta la fecha, ninguna de las consecuencias físicas o químicas ha sido capaz de explicar las perturbaciones de más larga data aparente en el registro geológico. Los cambios isotópicos del carbono y oxígeno aparentemente persistieron durante milenios después del evento de impacto. La única causa plausible de estos efectos duraderos son las propias extinciones biológicas.

Mitigación.

Hay dos acercamientos genéricos a la mitigación de los peligros de impacto (fig. 9) estos son:

- Cambio orbital activo o destrucción del cuerpo impactor.
- Mitigación pasiva tradicional del desastre natural basada en "todos los peligros presentes" con protocolos de evacuación, refugio, respuesta y recuperación de la defensa civil.

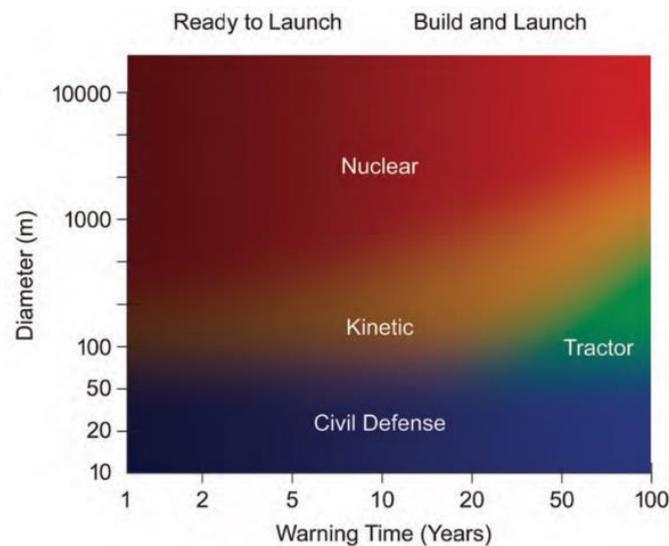


Fig.9: Régimen de aplicabilidad primaria de algunos tipos de estrategias de mitigación ante posible impacto de asteroide o cometa Naukas.

Entre las estrategias de mitigación se encuentran:

- Desvío del impactor con una explosión (convencional o nuclear). La explosión puede ser a cierta distancia, sobre la superficie o bajo ella.
- Otras formas de desvío de su trayectoria de choque con la Tierra pudieran ser:
 - Chocar con otro cuerpo de alta energía cinética (impactor cinético)
 - Tractor gravitacional
 - Método de “Ion Beam Shepherd” (UPM)
 - Método de impacto de la luz láser
 - Vela solar para que el viento solar lo desplace de su curso

La destrucción total del impactor es una opción casi inviable por las enormes energías necesarias para una destrucción catastrófica y los riesgos que implicaría la generación de una población de nuevos pequeños impactores en órbitas similares al original.

Se favorecen las opciones de deflexión del asteroide a una órbita no colisionante (fig. 10). Las acciones a tomar dependerán fuertemente del intervalo de tiempo que habría entre la caracterización del asteroide potencialmente impactor y el momento del impacto. Cuanto más grande sea este intervalo es menor la energía necesaria para la deflexión.

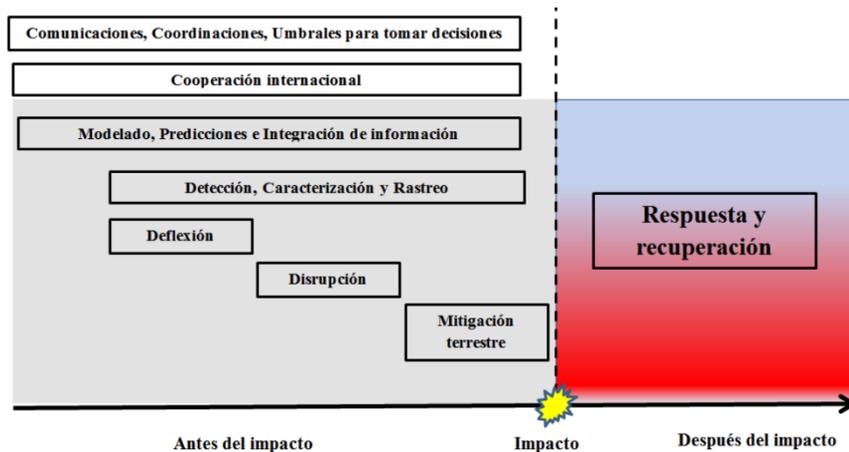


Fig.10: Fases potenciales de operaciones en un panorama de amenaza de impacto con asteroides y cometas. NASA

Las opciones que involucran el uso de tecnología nuclear presentan riesgos que podrían ser comparables al propio impacto del asteroide, aunque puede ser la única opción en una situación determinada.

Existen varias alternativas no nucleares que han sido propuestas y estudiadas para desviar asteroides en intervalos de tiempo de previsión largos (meses a años). Estas técnicas se basan en métodos cinéticos, gravitatorios, de arrastre o de alteración superficial. A continuación, se describen algunas de las propuestas más destacadas y los trabajos o estudios relacionados con estas alternativas:

1. Impacto Cinético:

- Descripción: Consiste en lanzar una nave espacial masiva a alta velocidad para chocar con el asteroide y alterar su trayectoria.
- Ejemplo: La misión DART (Double Asteroid Redirection Test) de la NASA, que impactó con éxito el asteroide Dimorphos en septiembre de 2022, es un ejemplo práctico de esta técnica.
- Trabajos Relacionados:
 - Estudios de la NASA y la ESA (Agencia Espacial Europea) sobre misiones de impacto cinético.
 - Investigaciones publicadas en revistas como Planetary and Space Science y Acta Astronáutica.

2. Tractor Gravitatorio:

- Descripción: Una nave espacial se coloca cerca del asteroide y utiliza su fuerza gravitatoria para alterar gradualmente la trayectoria del asteroide.
- Ventaja: No requiere contacto físico con el asteroide, lo que lo hace adecuado para objetos frágiles o de composición desconocida.
- Trabajos Relacionados:
 - Estudios de la NASA y el JPL (Jet Propulsion Laboratory) sobre el uso de tractores gravitatorios.
 - Investigaciones publicadas en The Planetary Science Journal y Icarus.

3. Haz de Iones o Láser:

- Descripción: Se utiliza un haz de iones o un láser para vaporizar material de la superficie del asteroide, creando un empuje que altera su trayectoria.
- Ventaja: Puede ser aplicado a distancia y es escalable según el tamaño del asteroide.
- Trabajos Relacionados:
 - Investigaciones del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y la Universidad de Strathclyde (Reino Unido).
 - Estudios publicados en Advances in Space Research y Journal of Spacecraft and Rockets.

4. Pintura o Recubrimiento Superficial:

- Descripción: Se cubre parte del asteroide con un material reflectante o absorbente para alterar su balance térmico y aprovechar el efecto Yarkovsky (un cambio en la órbita debido a la emisión térmica asimétrica).
- Ventaja: Es una técnica de bajo costo y no requiere contacto físico directo.
- Trabajos Relacionados:
 - Investigaciones de la Universidad de Colorado y el Instituto de Ciencias Planetarias.
 - Estudios publicados en *Nature Astronomy* y *The Astrophysical Journal*.

5. Arrastre con Red o Malla:

- Descripción: Se despliega una red o malla grande alrededor del asteroide para aumentar su arrastre atmosférico o solar, alterando su órbita.
- Ventaja: Útil para asteroides pequeños o de baja densidad.
- Trabajos Relacionados:
 - Propuestas de la ESA y la Agencia Espacial Japonesa (JAXA).
 - Investigaciones publicadas en *Acta Astronautica* y *Space Engineering*.

6. Motor de Empuje Adherido:

- Descripción: Se ancla un motor o sistema de propulsión a la superficie del asteroide para empujarlo gradualmente.
- Ventaja: Proporciona un control preciso sobre la desviación.
- Trabajos Relacionados:
 - Estudios de la NASA y empresas privadas como SpaceX.
 - Investigaciones publicadas en *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.

7. Explosivos Convencionales:

- Descripción: Se detonan explosivos cerca o en la superficie del asteroide para alterar su trayectoria.
- Ventaja: Puede ser efectivo para asteroides pequeños o medianos.
- Trabajos Relacionados:
 - Investigaciones del Laboratorio Nacional de Los Álamos y el Instituto de Investigación Southwest.
 - Estudios publicados en *Journal of Spacecraft and Rockets*.

8. Ablación con Espejos Solares:

- Descripción: Se utilizan espejos gigantes para concentrar la luz solar en la superficie del asteroide, vaporizando material y creando un empuje.
- Ventaja: No requiere combustible y es escalable.
- Trabajos Relacionados:
 - Propuestas de la ESA y la Universidad de Glasgow.
 - Investigaciones publicadas en *Acta Astronáutica* y *Solar Energy*.

Estas alternativas no nucleares ofrecen opciones viables para la desviación de asteroides, especialmente en escenarios con tiempos de previsión largos (meses a años). Cada técnica tiene sus ventajas y limitaciones, y la elección depende del tamaño, composición y órbita del asteroide. La investigación en este campo continúa avanzando, con contribuciones de agencias espaciales, universidades y organizaciones científicas de todo el mundo.

Un impacto de asteroide no es un huracán, un terremoto o una erupción volcánica, pero puede tener efectos destructivos y afectaciones, en muchos casos semejantes a estas catástrofes y estas consecuencias pueden interactuar entre sí dando lugar a un panorama de desastre mucho más complejo.

La interconexión de los peligros y el efecto en cascada de un panorama de impacto de asteroide o cometa en general, es desplazado en espacio o tiempo al moverse desde el centro del círculo de impacto. Los procesos múltiples de retroalimentación ocurrirán con una alta probabilidad de manera local, regional y global (fig. 11). A menudo el momento de peligro se desencadena por lluvias o por otros acontecimientos. En el diagrama se muestra, la fauna silvestre envenenada o la muerte de los cultivos que a su vez impactará las comunidades humanas al reducir la seguridad alimentaria, la disposición del agua potable, y tendrá también un gran impacto económico.

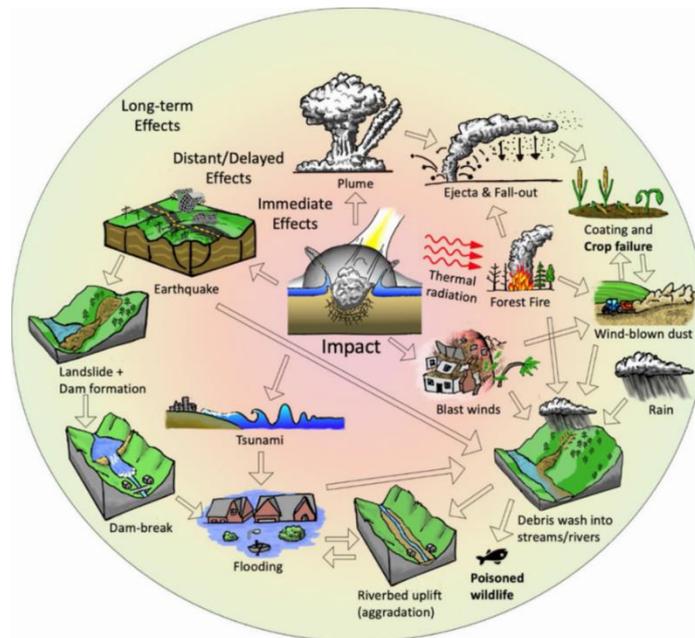


Fig.11: Efecto en cascada de un gran impacto. Natural Hazards.

Por todo lo anterior las medidas de mitigación terrestre deben ser cuidadosamente diseñadas, planificadas y ejecutadas por especialistas con apoyo de toda la sociedad.

3. Conclusiones

Los impactos de asteroides y cometas son eventos de baja probabilidad, pero de alto impacto, cuyas consecuencias podrían ser catastróficas para la vida en la Tierra. Aunque se han logrado avances significativos en la detección y mitigación de estos objetos, aún queda mucho por hacer. La combinación de tecnología avanzada, cooperación internacional y educación pública será clave para proteger a nuestro planeta de esta amenaza cósmica. La defensa planetaria no es solo una responsabilidad científica, sino un imperativo global que requiere acción inmediata y continua. Podemos asumir como conclusiones de lo anteriormente enunciado las siguientes:

1. Impacto de Asteroides y Cometas como Amenaza Global:

- Los impactos de asteroides y cometas representan una de las amenazas naturales más devastadoras para la Tierra, con consecuencias que pueden variar desde destrucción localizada hasta efectos globales, como cambios climáticos abruptos, extinciones masivas y alteraciones en los ecosistemas.
- Eventos históricos, como el impacto de Chicxulub hace 66 millones de años, demuestran el potencial catastrófico de estos fenómenos, subrayando la necesidad de tomar medidas proactivas para prevenir futuros impactos.

2. Consecuencias Multidimensionales:

- Los efectos de un impacto dependen de factores como el tamaño, la velocidad, la composición del objeto y el lugar de impacto. Las consecuencias incluyen:
 - Efectos inmediatos: Ondas de choque, tsunamis, incendios y terremotos.
 - Efectos a largo plazo: Invierno nuclear, alteraciones climáticas, colapso de la agricultura y desestabilización de la sociedad.
- Estos escenarios resaltan la importancia de desarrollar estrategias de mitigación y preparación para minimizar los daños.

3. Medidas de Mitigación:
 - Se han propuesto y estudiado diversas técnicas para desviar o destruir objetos cercanos a la Tierra (NEOs), incluyendo métodos cinéticos, tractores gravitatorios, explosivos no nucleares y técnicas de alteración superficial.
 - La misión DART (Double Asteroid Redirection Test) de la NASA ha demostrado la viabilidad del impacto cinético, marcando un hito en la defensa planetaria.
 - Otras alternativas, como el uso de láseres, espejos solares o sistemas de arrastre, ofrecen opciones prometedoras para escenarios con tiempos de previsión largos.
4. Importancia de la Detección Temprana:
 - La detección y el monitoreo de NEOs son fundamentales para garantizar una respuesta efectiva. Programas como el Catalina Sky Survey, Pan-STARRS y NEOWISE han mejorado significativamente la capacidad de identificar objetos potencialmente peligrosos.
 - Sin embargo, aún existen desafíos, como la detección de objetos pequeños o de baja reflectividad, que requieren avances tecnológicos y colaboración internacional.
5. Colaboración Internacional y Educación:
 - La defensa planetaria es un esfuerzo global que requiere la cooperación de agencias espaciales, gobiernos, científicos y la sociedad civil. Organizaciones como la IAU (International Astronomical Union) y la ONU han establecido marcos para coordinar estos esfuerzos.
 - La educación y concienciación pública son igualmente importantes para fomentar una cultura de preparación y resiliencia ante posibles impactos.
6. Futuro de la Defensa Planetaria:
 - A medida que avanzan las tecnologías espaciales y las capacidades de modelado, se espera que las estrategias de mitigación sean más precisas y efectivas.
 - Misiones futuras, como Hera de la ESA, proporcionarán datos valiosos para mejorar las técnicas de desviación y preparación.
 - La inversión en investigación y desarrollo es crucial para garantizar que la humanidad esté preparada para enfrentar esta amenaza.

Referencias

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208(4448), 1095-1108. <https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- Birks, J. W., & Wilson, K. L. (2006). Mechanism and Elimination of a Water Vapor Interference in the Measurement of Ozone by UV Absorbance. *Environmental Science & Technology*, 40(20), 6361-6367. <https://doi.org/10.1021/es052590c>
- Brett, R. (1992). *Anhydrite: A Lethal Target Rock at the Chicxulub Impact Site*. 23, 157. Lunar and Planetary Science Conference.
- Day, S., & Maslin, M. (2005). Linking large impacts, gas hydrates, and carbon isotope excursions through widespread sediment liquefaction and continental slope failure: The example of the K-T boundary event. En T. Kenkmann, F. Hörz, & A. Deutsch, *Large Meteorite Impacts III*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2384-1.239>
- Hills, J. G., Nemchinov, I. V., Popov, S. P., & Teterev, A. V. (1994). Tsunami generated by small asteroid impacts. En *Hazards due to Comets and Asteroids* (pp. 479-533). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44518531>
- Melosh, H. J. (1989). Impact cratering: A geologic process. En *New York: Oxford University Press ; Oxford: Clarendon Press*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1989icgp.book.....M>

- Melosh, H. J., Schneider, N. M., Zahnle, K. J., & Latham, D. (1990). Ignition of global wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, *343*(6255), 251-254. <https://doi.org/10.1038/343251a0>
- Pierazzo, E., Hahmann, A. N., & Sloan, L. C. (2003). Chicxulub and Climate: Radiative Perturbations of Impact-Produced S-Bearing Gases. *Astrobiology*, *3*(1), 99-118. <https://doi.org/10.1089/153110703321632453>
- Retallack, G. J., Veevers, J. J., & Morante, R. (1996). Global coal gap between Permian–Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *Geological Society of America Bulletin*, *108*(2), 195-207. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<0195:GCGBPT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<0195:GCGBPT>2.3.CO;2)
- Richter, C. F. (1958). New Dimensions in Seismology: Earthquakes are characterized by geographical position, instant of occurrence, depth, and magnitude. *Science*, *128*(3317), 175-182. <https://doi.org/10.1126/science.128.3317.175>
- Sigurdsson, H., D'Hondt, S., & Carey, S. (1992). The impact of the Cretaceous/Tertiary bolide on evaporite terrane and generation of major sulfuric acid aerosol. *Earth and Planetary Science Letters*, *109*(3-4), 543-559. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90113-A](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90113-A)
- Toon, O. B., Zahnle, K., Morrison, D., Turco, R. P., & Covey, C. (1997). Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. *Reviews of Geophysics*, *35*(1), 41-78. <https://doi.org/10.1029/96RG03038>
- Wolbach, W. S., Anders, E., & Orth, C. J. (1988). *Darkness After the K-T Impact: Effects of Soot*. 673, 219. Global Catastrophes in Earth History: An Interdisciplinary Conference on Impacts, Volcanism, and Mass Mortality.

Acerca del autor:

MSc. Francisco González Veitia: Licenciado en Educación especialidad de Física y Astronomía, Master en Ciencias en la Universidad Pedagógica Enrique José Varona. Especialista del Departamento de Astronomía del Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) y Especialista del Planetario de la Habana. Profesor del curso internacional de Astronomía NASE-IAU y Profesor entrenador para las Olimpiadas internacionales de Astronomía, trabaja como redactor de la Revista Datos Astronómicos para Cuba (Revista Cubana de Astronomía). ORCID 0009-0003-0500-6532.