

ELISA SIMÓ SOLER
ELOY PEÑA ASENSIO
(Coordinación)

DEFENSA PLANETARIA

AUTORÍA:

ALBA SORIANO ARNAZ
ALBERT RIMOLA
ALBERTO CORONEL TARANCÓN
ANNA GARCIA HOM
CATIA FÁRIA
ELISA SIMÓ SOLER
ELISA CELIA GONZÁLEZ FERREIRO
ELOY PEÑA ASENSIO
JORDI SOLÉ I OLLÉ
JOSÉ IGNACIO ROBLES SÁNCHEZ
JOSEP MARIA TRIGO-RODRÍGUEZ
JUAN MANUEL DE FARAMIÑÁN GILBERT
JUAN MIGUEL SÁNCHEZ LOZANO
JULIA DE LEÓN
NADJEJDA VICENTE CABAÑAS
RAMON J. MOLES PLAZA

Dykinson, S. L.

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con Cedro a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 917021970/932720407.

Este libro ha sido sometido a evaluación por parte de nuestro Consejo Editorial
Para mayor información, véase www.dykinson.com/quienes_somos

© Copyright by
Los autores
Madrid, 2023

Editorial DYKINSON, S.L. Meléndez Valdés, 61 - 28015 Madrid
Teléfono (+34) 91 544 28 46 - (+34) 91 544 28 69
e-mail: info@dykinson.com
<http://www.dykinson.es>
<http://www.dykinson.com>

ISBN: 978-84-1122-441-3
Depósito Legal: M-31318-2023
DOI: 10.14679/2271

ISBN electrónico: 978-84-1170-831-9

Maquetación:
german.balaguer@gmail.com

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA AMENAZA DE IMPACTO CÓSMICO

ELOY PEÑA ASENSIO¹

Investigador Predoctoral, Universitat Autònoma de Barcelona e Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)

JOSEP MARIA TRIGO-RODRÍGUEZ²

Científico Titular, Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) e Institut d'Estudis Espacials de Catalunya

JULIA DE LEÓN³

Investigadora Distinguida, Instituto de Astrofísica de Canarias

ALBERT RIMOLA⁴

Profesor Interino, Universitat Autònoma de Barcelona

DOI: 10.14679/2273

Sumario. 1. OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA: ORIGEN Y PROPIEDADES. 1.1. Asteroides. 1.2. Cometas. 2. REGISTRO HISTÓRICO DE IMPACTOS CÓSMICOS. 2.1. Chicxulub. 2.2. Cráter Barringer. 2.3. Tunguska. 2.4. Shoemaker-Levy 9. 2.5. Cheliábinsk. 3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE IMPACTO. 4. DESCUBRIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE OBJETOS

¹ Graduado en Ingeniería Aeroespacial por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Máster en Ciencia y Tecnología Aeroespacial por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y Máster en Astrofísica y Cosmología por la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Es investigador predoctoral contratado por esta última universidad realizando su tesis sobre cuerpos pequeños del sistema solar.

² Licenciado en Física por la Universidad de Valencia en 1997, se doctoró en Física Teórica (Astrofísica) en 2002. En 2003 realizó un postdoctorado en el Instituto de Geofísica y Física Planetaria de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA). En 2009 obtuvo su plaza de Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE, CSIC). Su investigación se centra en la formación de cuerpos menores del sistema solar primitivo (cometas y asteroides), el estudio de sus fragmentos en el espacio (polvo, meteoroides) y el análisis y caracterización de meteoritos.

³ Doctora en Astrofísica por la Universidad de La Laguna (Canarias). Su campo de especialización es la composición de los asteroides, en concreto los que se acercan a la Tierra y muy especialmente los que pueden ser visitados por sondas espaciales. Es parte del equipo científico de las misiones de NASA OSIRIS-REx y DART, y responsable científica del instrumento HyperScout-H a bordo de la misión de defensa planetaria Hera de la ESA. Trabaja como Investigadora Distinguida en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

⁴ Doctor en Química Teórica y Computacional (2007) por la *Universitat Autònoma de Barcelona* (UAB). Profesor agregado del Dept. Química de la UAB. La investigación actual del Dr. Rimola se centra en estudiar fenómenos de superficies de los granos de polvo interestelar mediante simulaciones mecanocuánticas, con el que ha liderado proyectos a nivel nacional como intrnacional.

POTENCIALMENTE PELIGROSOS. 5. ESTRATEGIAS DE DEFENSA: ¿DESTRUIR O DESVIAR? 5.1. Técnicas de mitigación. 5.2. Las misiones DART y Hera. 6. CONCLUSIONES.

1. OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA: ORIGEN Y PROPIEDADES

El universo comenzó hace 13.800 millones de años con una abrupta expansión que continúa hoy en día. Durante los instantes iniciales, tras una fase de altísima densidad y temperatura, se sintetizaron los átomos más sencillos y abundantes, principalmente hidrógeno y helio. Se conformaron gigantescas nubes de gas y polvo que empezaron a colapsar debido a las interacciones electrostáticas y la atracción gravitatoria local inducida por las zonas más densas, naciendo así la primera generación estelar (**Weinberg 1978; Greene 2020**). Gracias a los procesos de fusión nuclear⁵, las estrellas formaron en su interior elementos más pesados que esparcirían⁶ al seno de las galaxias al finalizar su ciclo de vida favoreciendo el nacimiento de nuevas generaciones de estrellas (**Fernández-Soto 2020**).

El contenido químico de nuestra galaxia, la Vía Láctea, ha evolucionado significativamente como consecuencia de la muerte de estrellas previas al Sol. Durante el colapso gradual de la nebulosa que dio origen a nuestro Sol, se formó una estructura aplanada con un sentido de giro preferente⁷ conocida como disco protoplanetario, que ya contenía las cantidades necesarias de elementos para producir materiales sólidos, como rocas, hielos y materia orgánica (**Trigo-Rodríguez 2001, 2012**). La Figura 1 muestra el ciclo nebular de formación de estrellas y planetas.

Con el paso del tiempo el viento solar dispersó parte del gas de su entorno y la temperatura disminuyó bruscamente, lo que permitió que se condensaran diminutos granos de polvo de metal y roca. Estas partículas fueron coalesciendo⁸ en aglomerados cada vez más grandes hasta formar los asteroides y cometas (**Jones 2007**). La evolución del disco se regía por procesos estocásticos⁹ con impactos entre esos primeros cuerpos que, tras decenas de millones de años, crearon los embriones planetarios que finalmente dieron origen a los planetas. Hace unos 3.800 millones de años, gracias a una combinación idónea de composición, distancia al Sol, presencia de campo magnético y órbita e inclinación del eje de rotación estables, proliferaron, en al menos uno de ellos, la Tierra, los primeros organismos vivos (**Mochón 2018**).

⁵ A la creación de elementos químicos mediante reacciones de fusión nuclear en el interior de las estrellas se le denomina nucleosíntesis estelar.

⁶ Por medio del viento solar o al final de la etapa evolutiva de las estrellas con una potente explosión conocida como supernova.

⁷ Los planetas del sistema solar orbitan alrededor del Sol en el sentido contrario a las agujas del reloj (visto desde el polo norte del Sol) debido a la forma en la que colapsó nuestra nebulosa.

⁸ La coalescencia es el proceso por el cual dos o más partículas se aglutinan al hacer contacto para formar un único cuerpo mayor.

⁹ Un sistema se considera estocástico cuando es intrínsecamente no determinista, es decir, de naturaleza azarosa.

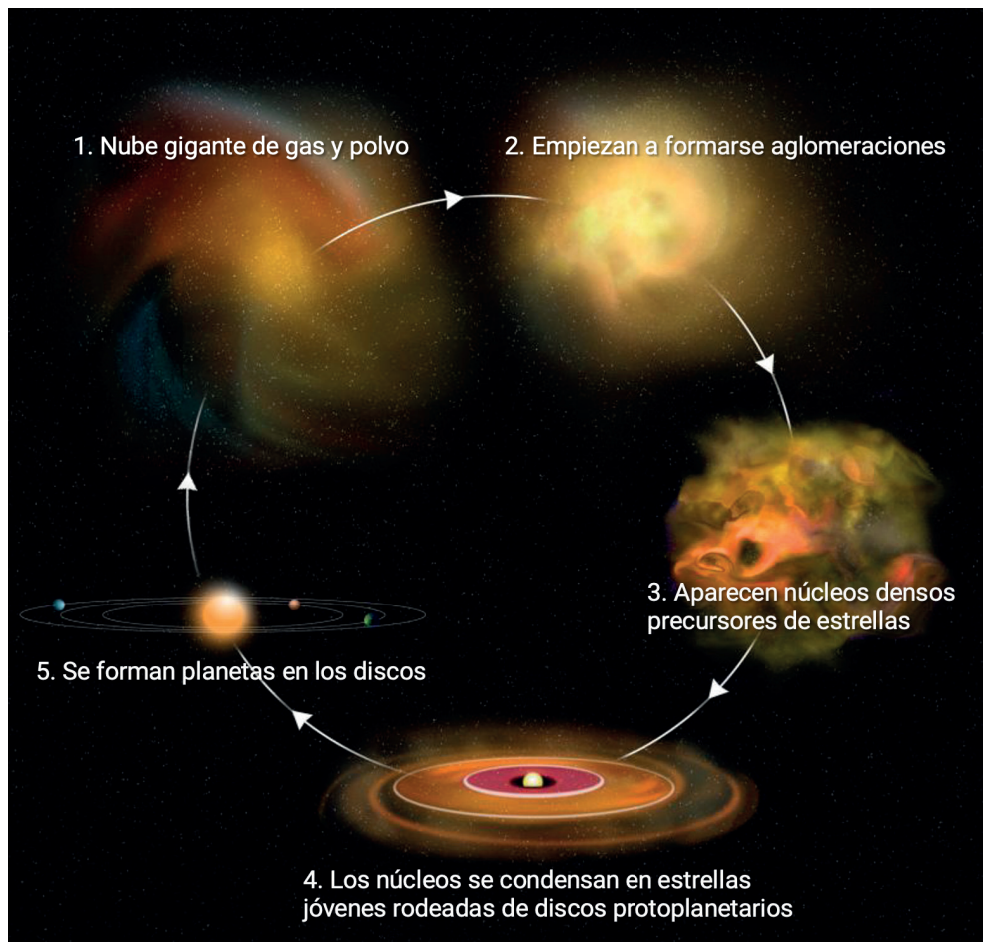


Figura 1. Ciclo nebular de formación de estrellas y planetas a partir de nubes de polvo y gas.
Adaptada de Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF.

Los asteroides son restos de esa fase primigenia de nuestro sistema solar iniciada hace unos 4.600 millones de años, bloques de formación que no fueron acretados¹⁰ ni por los planetas ni por el Sol. Son cuerpos rocosos que orbitan nuestra estrella y presentan tamaños relativamente pequeños, desde 1 metro hasta 1.000 km de diámetro según la definición establecida por la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés). En las zonas más exteriores del sistema solar, donde la radiación solar incidió menos y, por tanto, la temperatura era más baja, nacieron los cometas: bolas de nieve cósmicas formadas por volátiles¹¹ capturados en forma de hielo, polvo fino

¹⁰ Acretar es el proceso de acreción, que es definido como el crecimiento por adición de materia.

¹¹ Los volátiles son el grupo de elementos y compuestos químicos que pueden evaporarse fácilmente. Los que no se vaporizan con tanta facilidad se denominan sustancias refractarias.

y materia orgánica que también orbitan el Sol, pero con periodos orbitales en general mucho mayores que los de los asteroides. Estos objetos frágiles, constituidos por lo que se denominan «hielos sucios» (**Whipple 1950**), pueden superar varias decenas de kilómetros de radio.

Además de asteroides y cometas el espacio exterior cercano a la Tierra contiene un gran número de objetos sólidos de distintos tamaños. Los más pequeños (partículas de polvo interplanetario de escala micrométrica), que con gran diferencia son los más abundantes, chocan continuamente con nuestro planeta. También son los que menos peligro suponen, ya que se desintegran en la atmósfera o se depositan en la superficie en forma de polvo. Aunque el espacio interplanetario está aparentemente vacío lo cierto es que nuestra vecindad cósmica está repleta de pequeños objetos moviéndose a grandísimas velocidades. La muestra más evidente son los meteoros, conocidos vulgarmente como estrellas fugaces, un fenómeno luminoso producido por la ablación¹² de material extraterrestre al impactar contra la atmósfera a hipervelocidad (entre 40.000 y 260.000 km/h) (**Trigo-Rodríguez 2022**).

Prácticamente todos los objetos de mayor tamaño que llegan a la superficie de la Tierra como meteoritos pierden gran parte de su masa durante el frenado atmosférico y alcanzan la superficie como pequeñas rocas incapaces de poner en peligro la vida a una escala significativa. Como consecuencia de las continuas colisiones ocurridas a lo largo de la historia de nuestro sistema planetario hay muchos más objetos pequeños que grandes, por lo que la probabilidad de impacto disminuye exponencialmente al aumentar el diámetro. Por fortuna para la vida, los impactos catastróficos son mucho menos habituales que la colisión de partículas. Solo los proyectiles más grandes, aquellos objetos procedentes del espacio que chocan contra la Tierra con muy poca frecuencia, suponen un peligro potencial para los seres humanos y posiblemente para toda la vida del planeta.

A simple vista podemos intuir el torturado historial de impactos que acompaña a nuestro satélite natural. La superficie maltratada de la Luna nos da una idea de lo violento que puede ser el entorno cósmico cercano. La cara lunar visible está cubierta por cráteres de impacto, cicatrices orográficas fruto de la colisión de objetos sólidos. ¿Por qué nuestra vecina y compañera ha sido tan castigada? ¿Acaso el universo conspira para que la vida en la Tierra pueda prosperar? La realidad es que nuestro planeta ha sufrido más impactos que la Luna por el mero hecho de ser más grande y masivo.

Sin embargo, existen algunas diferencias: i) la mayor parte de la superficie terrestre no es rocosa sino líquida por lo que pocas colisiones han sido capaces de dejar registros evidentes, ii) el calor almacenado en el interior de la Tierra ha mantenido ciclos incesantes de actividad geológica donde el vulcanismo y la tectónica de placas que regeneran la superficie han enmascarado los cráteres de impacto, iii) la presencia de la atmósfera terrestre ejerce un papel de escudo protector desintegrando los asteroides y cometas de decenas de metros de diámetro que intersectan nuestro camino a velocidades hipersónicas.

¹² Fenómeno físico de pérdida de masa de un objeto por fundido, vaporización y pulverización debido a la fricción sufrida con la atmósfera a alta velocidad.

La Tierra ha sufrido y sufre, incluso más que la Luna, la ininterrumpida acometida de proyectiles cósmicos sujetos al azar implícito de la mecánica celeste. La primera tarea es entonces identificar qué puede exponer a nuestro planeta a una amenaza de colisión catastrófica. Estos cuerpos potencialmente peligrosos son pequeños objetos¹³ (en comparación con las estrellas o planetas), o fragmentos de los mismos fruto de procesos de disrupción¹⁴, cuyas órbitas alrededor del Sol los acercan eventualmente a nuestro planeta.

1.1. Asteroides

Los asteroides son mayoritariamente cuerpos rocosos que orbitan alrededor del Sol. Su nombre procede del griego *asteroeidēs* que significa «como una estrella». Suelen estar formados por los mismos materiales que los planetas interiores (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), aunque existen suficientes variaciones en su composición como para clasificarlos en dos grandes categorías (**DeMeo y Carry 2013**):

- Los asteroides tipo C (la «C» proviene de *carbonaceous*), similares en composición a los meteoritos condritas carbonáceas, son ricos en carbono y están formados por silicatos hidratados (arcillas) y compuestos orgánicos. Estos cúmulos de escombros prístinos presentan superficies oscuras (reflejan muy poco la luz del Sol) y son los más comunes.
- Los asteroides tipo S (la «S» procede de *stony*), pétreos o rocosos, se componen mayoritariamente de silicatos, así como de pequeñas cantidades de níquel y hierro. Casi una quinta parte de los asteroides pertenecen a esta categoría.

Además, existen otros grupos, como los asteroides tipo M (o metálicos) que están formados por níquel y hierro, o los tipo V (por el asteroide Vesta), o basálticos, conformados casi en su totalidad por un tipo concreto de silicatos, los piroxenos. Tanto los asteroides tipo M como los tipo V son muestras del núcleo y de la corteza de objetos de mayor tamaño que sufrieron procesos de diferenciación¹⁵ y posterior fragmentación (exponiendo su núcleo) debido a grandes colisiones.

En la composición de los asteroides no diferenciados, los tipo C y tipo S, se encuentran materiales anteriores a la formación de los planetas. Gracias a su reducido diámetro, estos objetos permitieron que el calor primigenio escapara al espacio sin alterar de manera sustancial su composición. Como resultado, han permanecido prácticamente inalterados desde su formación, vagando en solitario durante miles de

¹³ Los denominados «cuerpos pequeños del sistema solar» son objetos que orbitan el Sol que no se clasifican como planeta, planeta enano, o satélite natural. El término fue definido por primera vez en 2006 por la Unión Astronómica Internacional (UAI o IAU en inglés).

¹⁴ A consecuencia de colisiones con otros objetos o por el tirón gravitatorio producido por un cuerpo masivo en un encuentro cercano, los asteroides y cometas experimentan procesos de fragmentación conocidos como disrupción. Así mismo, los cometas, debido a su composición, pueden sublimar sus gases en un paso cercano al Sol provocando la separación y eyección de fragmentos.

¹⁵ La diferenciación es el proceso de separación de los componentes de un cuerpo como resultado de su evolución química y física al desarrollar capas de composición distinta.

millones de años. Son auténticos fósiles espaciales que encapsulan información sobre los componentes iniciales de nuestra nebulosa solar y del entorno galáctico en el que se formó nuestra estrella.

La mayoría de estos cuerpos sólidos orbita en el Cinturón de Asteroides¹⁶ situado entre Marte y Júpiter. Hasta la fecha se han identificado más de un millón de objetos en este cinturón, si bien se estima que puede contener hasta cien millones de asteroides mayores de 100 m (**Holsapple 2022**). Existen otros grupos, como los asteroides troyanos de Júpiter, que coorbitan junto con el planeta alrededor del Sol, o los denominados Objetos Cercanos a la Tierra (OCT o NEO en inglés) cuyas órbitas los acercan a la vecindad terrestre (a menos de 150 millones de kilómetros). Estos asteroides próximos a nuestro planeta pueden ser clasificados a su vez en tres grandes grupos de acuerdo con sus órbitas: Apolo, Atenas y Amor. Los dos primeros grupos tienen órbitas que cruzan la de la Tierra, mientras que el tercero solo se aproxima, pero no la cruza. Existe un cuarto grupo, los Atiras, cuyas órbitas están contenidas (son «interiores») en la órbita terrestre.

En la Figura 2 se muestra una imagen ilustrativa de los tres grupos principales de asteroides clasificados atendiendo a sus órbitas, así como el Cinturón Principal de Asteroides.

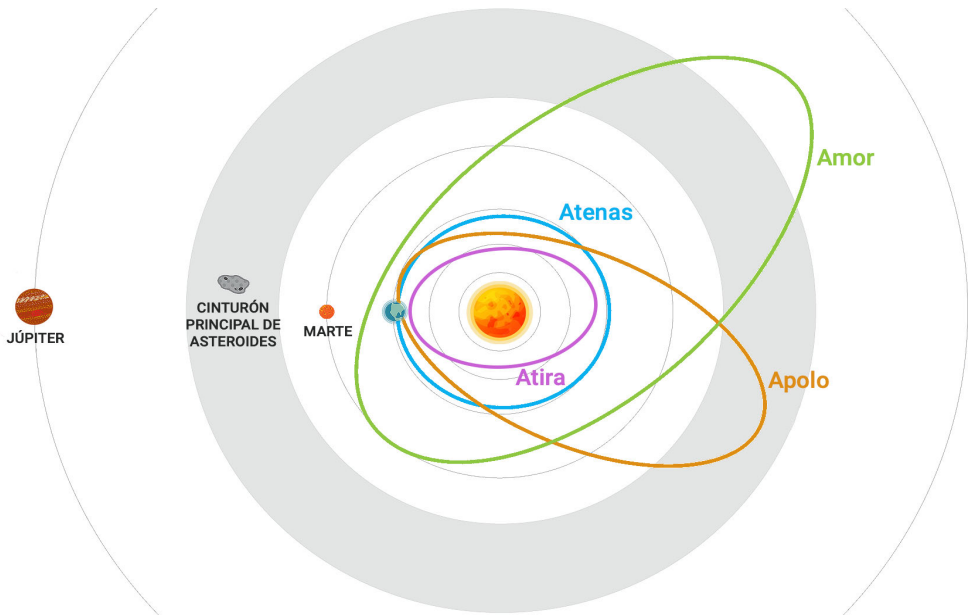


Figura 2. Grupos principales de asteroides cercanos a la Tierra según sus órbitas, junto con el Cinturón Principal de Asteroides ubicado entre Marte y Júpiter. Figura adaptada de la Sociedad Astronómica de Lahore.

¹⁶ El Cinturón de Asteroides es una región del sistema solar en forma de toroide situada aproximadamente entre las órbitas de Marte y Júpiter a una distancia dos veces y media la que separa la Tierra del Sol. Contiene un gran número de cuerpos sólidos con forma irregular y de diversos tamaños. También se denomina Cinturón Principal de asteroides o Cinturón Principal.

1.2. Cometas

Los cometas son conglomerados de gases congelados (principalmente agua, CO y CO₂), rocas y polvo sobrantes de la formación de nuestro sistema planetario¹⁷. La mayor parte se encuentra en las afueras del sistema solar donde la radiación del Sol no es tan agresiva y el agua puede permanecer en estado sólido. Algunos provienen de un amplio disco poblado de cuerpos helados, situado más allá de la órbita de Neptuno llamado Cinturón de Edgeworth-Kuiper o cinturón transneptuniano (**Fernández 2020**). Este tipo de cometas puede sufrir perturbaciones en su movimiento y ver reducidas sus órbitas acercándose al interior del sistema solar, pasando a denominarse cometas de la familia de Júpiter (o JFC por sus siglas en inglés) y suelen tener periodos orbitales de menos de 20 años. Otros cometas, conocidos como de periodo largo (superior a 200 años), provienen de la Nube de Oort¹⁸, una esfera en el borde exterior del sistema solar que está miles de veces más lejos del Sol que el Cinturón de Edgeworth-Kuiper. Finalmente, existen cometas procedentes de la región externa de la Nube de Oort que tardan mucho más en orbitar alrededor del Sol, pudiendo necesitar millones de años para completar una sola revolución a nuestra estrella. La Figura 3 muestra una ilustración de la escala de tamaños del Cinturón Principal, el Cinturón de Edgeworth-Kuiper y la Nube de Oort en el sistema solar.

Los cometas no son tan grandes como los asteroides (en promedio tienen unos 10 km de diámetro), se encuentran a mayores distancias y poseen superficies muy oscuras, por lo que son difíciles de detectar. Debido a sus largos periodos orbitales suelen ser descubiertos durante su acercamiento al sistema solar interior por ser el momento en que se vuelven más brillantes: cuando un cometa se acerca al Sol, los hielos que lo componen se subliman¹⁹ y forman, junto con las partículas de polvo²⁰ arrastradas, una brillante atmósfera denominada coma, que orbita localmente alrededor del núcleo del cometa.

¹⁷ La misión Stardust de la NASA fue la primera en recoger muestras de un cometa, 81P/Wild 2, que pudieron analizarse en nuestros laboratorios e indicaron por vez primera que algunos cometas podrían tener materiales expulsados por el Sol en sus fases tempranas de formación (**Brownlee et al. 2006; Trigo-Rodríguez 2008**).

¹⁸ La Nube de Oort es una predicción teórica de la región más exterior del sistema solar y la población de pequeños objetos helados que la componen. Aunque se han presentado múltiples evidencias de su existencia, nunca se ha observado directamente. El borde exterior está tan alejado del Sol (a unos 3 años luz) que está más cerca de Alpha Centauri (la estrella más próxima al Sol) que de la Tierra.

¹⁹ Proceso por el que una sustancia pasa súbitamente de estado sólido a gaseoso.

²⁰ Esas partículas son agregados débilmente unidos por hielos y materia orgánica por lo que al ser expuestos a la radiación solar se van pulverizando hasta las dimensiones micrométricas, contribuyendo a reflejar la luz del Sol.

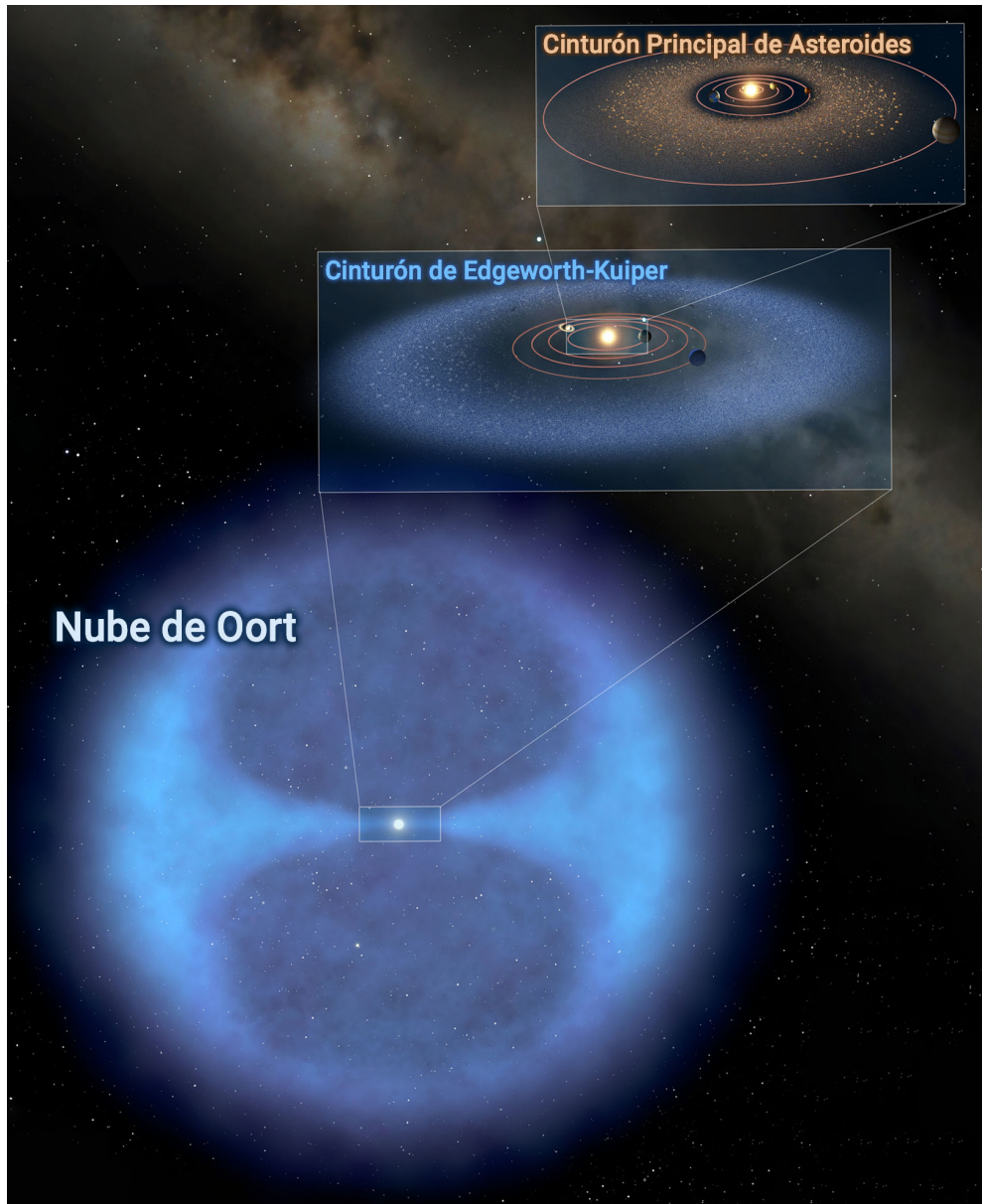


Figura 3. Ilustración del sistema solar con la Nube de Oort, el Cinturón de Edgeworth-Kuiper y el Cinturón Principal de Asteroides. Adaptada de Getty Images.



Figura 4. Arriba: Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp), fotografiado el 14 de marzo de 1997. Crédito: ESO/E. Slawik. Abajo: Imagen del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko tomada el 31 de enero de 2015 por la sonda Rosetta a una distancia de 28 km. Crédito: ESA/Rosetta/NAVCAM.

A medida que el polvo y el gas de la coma se expanden en el espacio, el cometa forma dos colas, una denominada iónica, compuesta por moléculas y radicales ionizados, y otra conocida como cola de polvo, producidas por la presión de la luz solar que incide sobre sus diminutas partículas micrométricas. La cola de iones se forma a partir de los gases volátiles de la coma, ionizados por los fotones ultravioletas del Sol y arrastrados por el viento solar. Apunta casi exactamente en dirección opuesta al Sol y brilla con un color azulado debido a la presencia de iones CO^+ (Rodgers et al. 2004). La cola de polvo sigue la dirección opuesta al movimiento del cometa y forma una larga estructura curvada que suele ser de color amarillento. Precisamente estas colas son las que dieron lugar a su nombre: la palabra cometa procede del griego *kometes*, que significa «de pelo largo». La Figura 4 muestra al cometa Hale-Bopp de 60 km de diámetro con sus dos colas visibles a simple vista en 1997 y el cometa de 4 km 67P/Churyumov-Gerasimenko fotografiado por la sonda espacial Rosetta de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Una de las características de las órbitas de los cometas es que son muy excéntricas, lo que implica que cuando están lejos del Sol su movimiento es lento, pero se aceleran drásticamente conforme se adentran hacia el centro del sistema solar (hasta 2 o 3 veces la velocidad típica de los asteroides). Que sean difícilmente observables al provenir de los confines del sistema solar y que al pasar cerca de la Tierra tengan velocidades extremadamente altas, confiere a los cometas su fama de «destruidores de mundos».

Algunos cometas, aunque en mucha menor medida que los asteroides, también son clasificados como OCT, ya que tienen órbitas que les acercan eventualmente a la Tierra. Actualmente, existen un total de 118 cometas de este tipo, es decir, apenas un 0,4% del total.

La mayor parte de lo que sabemos sobre los asteroides y los núcleos cometarios procede de las observaciones realizadas de forma remota con telescopios (tanto terrestres como espaciales), utilizando instrumentos denominados espectrógrafos²¹. Dado que solo tenemos acceso a la luz reflejada en la superficie de estos objetos, resulta muy difícil obtener información acerca de la estructura interna de los mismos que es crucial para predecir cómo se comportarían en caso de impacto. El análisis de los meteoritos en el laboratorio nos permite conocer propiedades típicas del interior de estos cuerpos, como la densidad. Sin embargo, solo podemos «asignar» densidades a los asteroides en función de la mayor o menor similitud de sus espectros con los de los meteoritos, por lo que es un método con mucha incertidumbre. Afortunadamente, este paradigma está cambiando con el envío de misiones espaciales (como Pioneer 10, Stardust, Hayabusa,

²¹ El espectrómetro óptico o espectroscopio es un instrumento capaz de analizar diferentes longitudes de onda de la radiación electromagnética. Cada elemento o molécula al emitir o absorber fotones energéticos produce un espectro particular que puede ser identificado gracias a este dispositivo. Esto permite analizar la composición de las colas de los cometas cuando son atravesadas por un haz de luz y de las superficies de asteroides y núcleos cometarios a partir de la luz reflejada en ellas.

Hayabusa 2, Rosetta, Deep Impact, OSIRIS-REx, Lucy, etc.)²² tanto para el análisis *in situ* como para el retorno de muestras vírgenes de material.

2. REGISTRO HISTÓRICO DE IMPACTOS CÓSMICOS

Los impactos entre cuerpos celestes no solamente no son una rareza, sino que son condición *sine qua non* para la formación de los sistemas planetarios y, por ende, de la vida. La teoría del gran impacto (**Hartman y Davis 1974; Canup 2004**) afirma que la existencia de la Luna se debe a una gigantesca colisión de un protoplaneta del tamaño de Marte, Tea, con una joven Tierra en los albores de su historia. La Luna cumple un papel importante en el desarrollo de la vida al estabilizar la inclinación de la Tierra sobre su eje contribuyendo a mantener el clima. Asimismo, se ha propuesto que los impactos de cometas y asteroides hidratados trajeron el agua a la Tierra y se ha sugerido que los orígenes de la vida pudieron haberse visto inducidos por la colisión de objetos contra la superficie terrestre que transportaban minerales catalíticos e incluso compuestos orgánicos (**Rotelli et al. 2016**).

Esta visión de la historia de la Tierra surgió hace relativamente poco tiempo debido, sobre todo, a la falta de observaciones directas y a la dificultad de reconocer los signos de un impacto terrestre a causa de la erosión y la meteorización²³. Hasta los años sesenta, fruto de la encomiable labor desarrollada por el geólogo Eugene Shoemaker, se pensaba que la formación de cráteres era exclusivamente el resultado del vulcanismo.

Los primeros registros de caídas de meteoritos datan del año 861, en Nogata, ciudad de Fukuoka (Japón). Un gran resplandor fue reportado por diferentes testigos visuales un 19 de mayo. A la mañana siguiente, habitantes de la zona recuperaron el meteorito en un agujero producido por el impacto. Esta piedra espacial se ha conservado en el santuario sintoísta de Suga Jinja, cuya fecha (7 de abril del tercer año de Jogan, es decir, 19 de mayo de 861 en el calendario juliano) está escrita en la caja de madera que la contiene, siendo considerada la caída de meteorito avistada más antigua de la historia (**Shima et al. 1983**).

Incluso durante la Ilustración, era difícil asimilar que pudieran caer rocas del cielo o que repentinamente se iluminase una noche oscura, configurando cierta áurea mística en torno al fenómeno meteórico. En la época precientífica, cuando las opiniones sobre la mayoría de los temas se basaban en creencias religiosas, la idea de que ciertas rocas pudieran proceder del espacio exterior estaba directamente descartada por la sencilla razón de que las rocas son terrestres y el firmamento es celestial, por lo que

²² Los esfuerzos de retorno de muestras a los laboratorios constituyen un avance sin precedentes en la comprensión de estos objetos. Las misiones de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) Hayabusa y Hayabusa 2 han traído material de la superficie de dos asteroides muy diferentes, Itokawa (tipo S) y Ryugu (tipo C). Gracias a ambas misiones sabemos que los materiales del regolito que conforman sus superficies poseen propiedades esencialmente idénticas a las de los meteoritos que llegan a la Tierra (**Nakamura et al. 2011; Noguchi et al. 2022**).

²³ La meteorización es la descomposición de rocas, suelos y minerales por la interacción con el agua, la atmósfera y los organismos biológicos.

no podía haber ninguna conexión entre ambas esferas. Aunque esa era la opinión establecida por los eruditos cristianos medievales, su origen se remonta a la Antigua Grecia. El filósofo Aristóteles sostenía que no existen cuerpos pequeños más allá de la Luna siendo la Tierra el origen de todas las rocas y que, si parecían caer del cielo, era porque habían sido transportadas por fenómenos meteorológicos. A principios del siglo XIX, tras la revolución francesa, el físico Jean-Baptiste Biot recopiló una serie de declaraciones de personas que observaron la caída de material procedente del espacio exterior, iniciando el debate científico sobre el origen extraterrestre de las rocas caídas del cielo (**Llorca 2004**).

El reconocimiento del peligro de impacto cósmico se remonta, al menos, a los científicos ingleses Isaac Newton y Edmond Halley con sus trabajos sobre el Gran Cometa de 1680 donde demostraron que su órbita cruzaba la de la Tierra, aunque el cometa fue descubierto por el astrónomo alemán Gottfried Kirch. Tuvo una repercusión notable en la época como lo atestiguan los escritos y pinturas que inspiró, llegando a realizarse monedas conmemorativas en el siglo XVII.

Desde entonces, los registros de estos acontecimientos han experimentado un constante aumento. A continuación, exploraremos algunos de los eventos de impacto más representativos, los que han dejado una profunda huella tanto en las sociedades modernas como en la comunidad científica.

2.1. Chicxulub

El interés moderno por las amenazas cósmicas se reavivó en la década de los ochenta, cuando el físico experimental estadounidense Luis Walter Álvarez laureado con el premio Nobel en 1968, junto con su hijo el geólogo Walter Álvarez y un equipo científico, presentaron pruebas de que el impacto de un gran objeto fue el responsable de la extinción masiva de finales del Cretácico (hace 66 millones de años), en la que perecieron la inmensa mayoría de dinosaurios no aviares y gran parte de la vida marina (**Álvarez et al. 1980**). Este evento es un cronohorizonte geológico conocido como el límite Cretácico-Paleógeno (K-Pg), anteriormente denominado Cretácico-Terciario (K-T). Observaron que el núcleo de rocas asociadas a esta época presentaba una fina capa que separaba estos dos períodos con una concentración particularmente alta de iridio, el metal más pesado. Debido a la elevada densidad de este elemento, la cantidad inicialmente presente en la Tierra se hundió hacia el interior en el proceso de diferenciación de la misma, mientras que el iridio que encontramos en las capas externas tiene su origen en la deposición gradual de material meteorítico procedente del espacio. Este pico de iridio en el límite K-Pg era equiparable al volumen de un objeto de composición asteroidal de más de 10 km de diámetro (**Schulte et al. 2010**).

Diversos equipos científicos han identificado el lugar exacto del impacto, el cráter de Chicxulub, frente a la península de Yucatán en el Golfo de México, que coincide con una colisión de un proyectil de dichas características (**Hildebrand et al. 1991**). También se han encontrado indicios de que impactos catastróficos similares pudieron haber desencadenado otras extinciones masivas. Además de causar una devastación inmediata

local junto a los consiguientes terremotos, incendios y tsunamis, las colisiones de grandes objetos pueden perturbar el medio ambiente de la Tierra a nivel global al eyectar gran cantidad de material a la atmósfera (ver Figura 5), ocasionando una disminución drástica de la cantidad de luz solar que llega a la superficie y, por tanto, un descenso prolongado de temperaturas que provocaría la pérdida de la vida vegetal y, con ello, la interrupción del ciclo de regeneración de oxígeno y producción de nutrientes básicos.

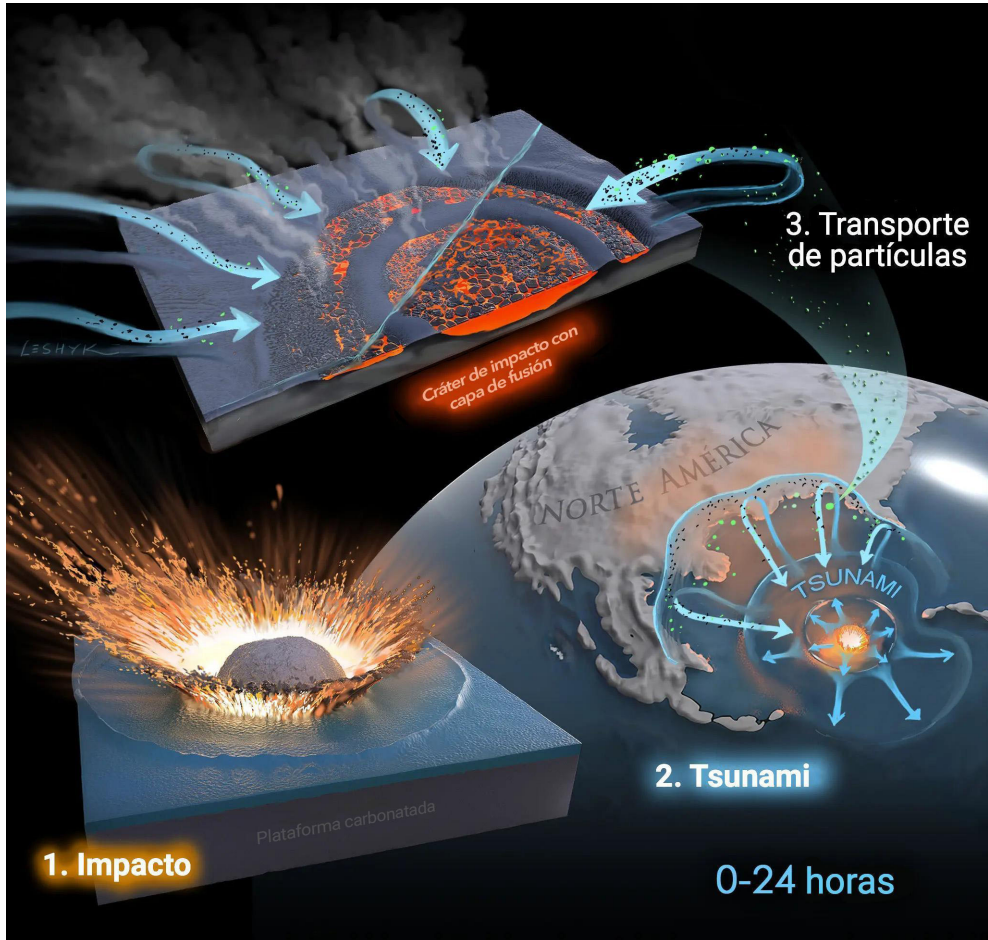


Figura 5. Ilustración de algunos de los fenómenos físicos ocurridos en el primer día tras el impacto de Chicxulub. Adaptada de Victor O. Leshyk/GEOLGY/GSA.

2.2. Cráter Barringer

Los impactos terrestres relativamente grandes como el que produjo hace 50.000 años el cráter Barringer, conocido localmente como *Meteor crater*, al noreste de Flagstaff (Arizona), son poco frecuentes (Kring 2007). Si relacionamos el diámetro del asteroide

metálico (42 m) y el cráter que produjo (1,2 km) podemos imaginar la capacidad destructiva que poseen los impactos a grandes velocidades (Figura 6). El cráter Barringer se atribuyó a una explosión volcánica prehistórica, del mismo modo que los cráteres de la superficie de la Luna se explicaron inicialmente de manera similar.

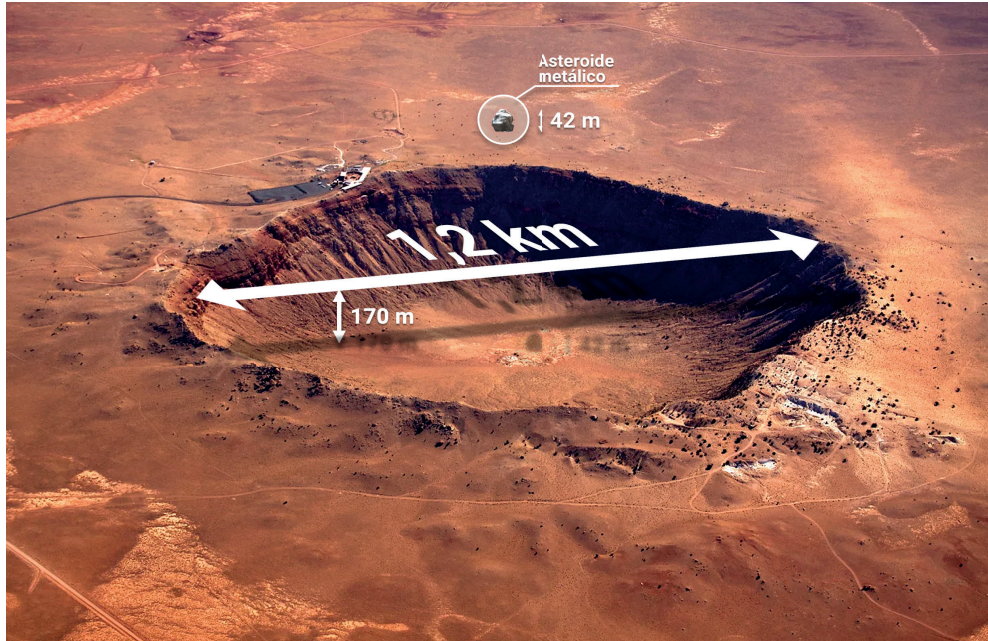


Figura 6. Vista aérea del cráter Barringer en Arizona. Se incluye en la imagen una ilustración del posible asteroide metálico que lo produjo. Adaptada de Chris Saultit.

Hasta 1903-1905 no se identificó correctamente el cráter Barringer como cráter de impacto, y en 1963 las investigaciones de Eugene Merle Shoemaker demostraron de forma concluyente esta hipótesis (**Shoemaker 1963**). Los hallazgos de la exploración espacial de finales del siglo XX y el trabajo de científicos como Shoemaker evidenciaron que la craterización por impacto es, con diferencia, el proceso geológico más extendido en los cuerpos sólidos del sistema solar. Todos presentan cráteres y no hay razón para creer que la Tierra se hubiera librado de algún modo del bombardeo espacial.

2.3. Tunguska

El último impacto registrado con efectos devastadores ocurrió cerca del río Tunguska (sierra siberiana) el 30 de junio de 1908, cuando un objeto de unos 70 metros destruyó 80 millones de árboles instantáneamente con una energía equivalente a 12 megatones de TNT (energía similar a las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki), que hubiera ocasionado decenas de miles de víctimas de haber ocurrido en un área metropolitana. A pesar de que el evento tuvo lugar en la taiga, una zona despoblada, se

reportaron al menos tres personas fallecidas. Las primeras expediciones no encontraron restos de meteoritos por lo que se sugirió que podría haberse tratado de un cometa, ya que debido a su fragilidad pueden desintegrarse en la atmósfera sin producir grandes fragmentos ni cráteres. Sin embargo, un siglo más tarde, nuevos estudios científicos han podido identificar los restos microscópicos remanentes del evento (**Longo et al. 1994; Kvasnytsya et al. 2013**), reforzando la hipótesis del impacto por un objeto asteroidal, si bien su naturaleza cometaria sigue siendo debatida.

Los informes de quienes presenciaron el acontecimiento de Tunguska ayudaron a esbozar una imagen de lo ocurrido. Cuando la bola de fuego²⁴ surcó el cielo generó una onda expansiva y un incremento súbito de la temperatura, aniquilando a todos los seres vivos de la zona, un gran bosque de 2.150 km² que quedó completamente arrasado. Las fotografías de la Figura 7 revelan el alcance y la fuerza del evento, mostrando árboles abatidos y quemados apuntando radialmente hacia el centro del impacto.



Figura 7. Árboles derribados por la explosión de Tunguska. Fotografías de la expedición de 1927 de la Academia Soviética de Ciencias dirigida por Leonid Kulik.

La gran explosión producida se pudo registrar en toda Asia y Europa, incluso fueron detectadas ondas de aire por estaciones sísmicas de América del Norte. La onda de impacto fue equivalente a un terremoto de magnitud 5,0 en la escala de Richter. También, la inyección de polvo en suspensión fue descrita hasta meses después del evento. Se considera que es el mayor evento de este tipo registrado en la historia.

2.4. Shoemaker-Levy 9

El cometa Shoemaker-Levy 9 fue descubierto por Carolyn Shoemaker, Gene Shoemaker y David Levy en una fotografía tomada el 18 de marzo de 1993 con el telescopio Schmidt de 0,4 metros en el Monte Palomar, California. Cuando se descubrió, ya se había desgarrado en más de 20 pedazos que orbitaban alrededor de Júpiter con periodos de dos años. Observaciones adicionales revelaron que el cometa se había

²⁴ Comúnmente a un meteoro muy brillante se le denomina bola de fuego, aunque esta fase luminica es en realidad plasma y gases ionizados.

acercado a Júpiter en julio de 1992 y se había fragmentado debido a las poderosas fuerzas gravitatorias del planeta (**Fortov et al. 1996**).

La desintegración de un cometa en múltiples fragmentos no es en hecho común, y observar un cometa capturado en órbita alrededor de Júpiter es aún más inusual, pero lo más insólito fue descubrir que los fragmentos iban a estrellarse contra Júpiter. Los observatorios de todo el mundo estaban en posición de presenciar –por primera vez en la historia– una colisión entre dos cuerpos del sistema solar. Los sucesivos impactos se produjeron en un periodo de 6 días en julio de 1994 y fueron registrados con múltiples instrumentos y desde diferentes localizaciones.

Los fragmentos chocaron contra Júpiter con la fuerza de 300 millones de bombas atómicas, produciendo enormes penachos²⁵ de entre 2.000 y 3.000 kilómetros de altura y calentando la atmósfera hasta temperaturas que alcanzaron los 40.000 grados Celsius. Shoemaker-Levy 9 dejó cicatrices oscuras y anilladas que finalmente se acabaron desvaneciendo por los vientos existentes en la atmósfera del planeta (Figura 8).

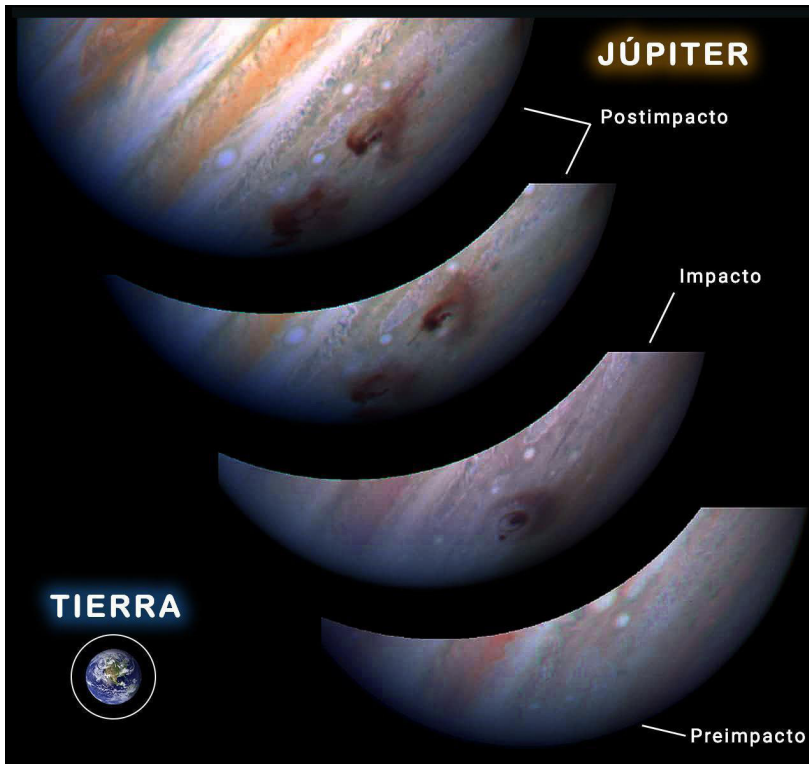


Figura 8. Mosaico de imágenes Júpiter tomadas por el telescopio espacial Hubble tras el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 con la Tierra a escala para comparación. Adaptada de R. Evans, J. Trauger, H. Hammel y el HST Comet Science Team (NASA).

²⁵ Penacho o pluma es una nube de polvo (similar a la coma de un cometa) producida por la excavación de un cráter o por la sublimación de materiales volátiles durante una colisión.

2.5. Cheliábinsk

En febrero de 2013, una roca de unos 20 metros pasó desapercibida para todos los observatorios del mundo impactando en la ciudad rusa de Cheliábinsk ante miles de personas que presenciaron el evento (la Figura 9 muestra una fotografía casual de la estela persistente que originó). La propia onda expansiva y la energía que irradió ocasionaron 1.600 personas heridas. El asteroide de 13.000 toneladas entró en la atmósfera a 69.000 km/h produciendo un brillo mayor que el del Sol al liberar 440 kilotonnes de TNT (**Borovička et al. 2013; Brown et al. 2013**). No pudo ser detectado previamente al impacto, ya que su procedencia coincidía con la posición del Sol, haciendo imposible a los telescopios observar adecuadamente esa zona del cielo.

La mayor parte de los meteoritos generados por este evento fueron fácilmente encontrados gracias a que cayeron en las inmediaciones y en el propio lago Chebarkul dejando, el mayor de ellos, un gran agujero en su superficie helada. Se pudieron recuperar 6 toneladas de material, siendo el mayor meteorito de 650 kg aproximadamente²⁶.



Figura 9. Nube de vapor persistente dejada por el asteroide que impactó en Cheliábinsk.

Crédito: M. Ahmetvaleev.

3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE IMPACTO

La IAU, junto con la Spaceguard Foundation y otras organizaciones, celebraron en junio de 1999 una reunión en la ciudad de Turín (Italia) para tratar el peligro de colisión de asteroides. Uno de los resultados de este encuentro fue la denominada Escala de Turín, una métrica para describir el riesgo de impacto de asteroides y cometas que funcionó como un llamamiento a la cooperación internacional y a la financiación de iniciativas de vigilancia del cielo (**Binzel 2000**). El propósito era establecer un sistema análogo a la escala de Richter para terremotos. Unos años más tarde, en 2002, se propuso una nueva métrica que además tenía en cuenta el tiempo previo de alerta, la Escala de

²⁶ El análisis de varios de estos meteoritos en el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE, CSIC), ha proporcionado información muy valiosa de cara a desarrollar técnicas de defensa contra asteroides (**Moyano-Cambero et al. 2017**).

Palermo (**Chesley et al. 2002**). Ambas se usan actualmente ya que ofrecen información complementaria: la escala de Turín estima principalmente el riesgo en función de la energía cinética del objeto (proporcional a su tamaño y velocidad) y la probabilidad de impacto²⁷, mientras que la escala de Palermo lo hace en función del tiempo restante para la colisión y el riesgo de impacto de objetos de una población aleatoria (contabiliza la probabilidad de que un impacto de otro objeto mayor ocurra antes).

La escala de Turín utiliza un código de colores subdividido del 1 al 10 (Figura 10), y fue diseñada con la finalidad de ser fácilmente interpretable por el gran público: (i) blanco, cuando no hay riesgo de impacto, (ii) verde, para objetos generalmente recién descubiertos que pasan cerca de la Tierra pero sin riesgo de impacto aparente, (iii) amarillo, si merece la atención de la comunidad astronómica para profundizar en su estudio, típicamente con un 1% de probabilidades de colisión y capacidad de provocar un daño local, (iv) naranja, cuando supone una amenaza importante pero con gran incertidumbre, pudiendo ser objetos grandes que en un tiempo de un siglo supondrían una catástrofe global y (v) rojo, si la colisión es certera y las consecuencias pudieran ser devastadoras a escala planetaria. Esta métrica es muy útil para la comunicación del riesgo, lo que conlleva, por el contrario, que a nivel técnico no ofrezca gran detalle. Por otro lado, la escala de Palermo asignaría un valor de 0.0 a un objeto si su probabilidad de colisión con la Tierra es similar a la de uno aleatorio con la misma o mayor energía de impacto. De esta manera, -1 indicaría que un impacto de un objeto aleatorio es diez veces menos probable y +1 diez veces más probable.

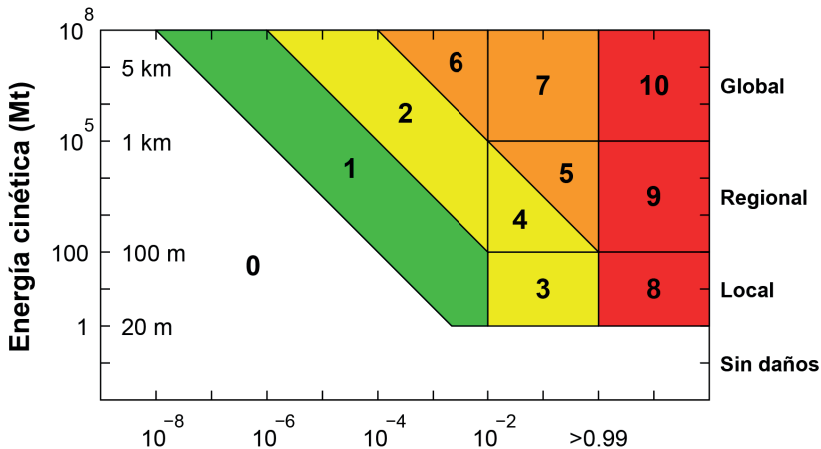


Figura 10. Escala de Turín con las diferentes clasificaciones según el daño causado. Se muestra la probabilidad de impacto en función de la energía cinética y el diámetro aproximado para un asteroide típico. Adaptada de **Binzel (2000)**.

²⁷ La probabilidad de impacto se determina prediciendo el movimiento del objeto con base en a las observaciones de su trayectoria previa. Su movimiento estará definido por unos parámetros con unas incertidumbres asociadas. Se construye entonces una población de clones que representa el rango de error de su órbita, siendo la probabilidad de impacto proporcional al número de clones que colisionan con la Tierra.

En la actualidad se han descubierto aproximadamente 30.000 objetos en órbitas cercanas a la Tierra, OCT, conformados por asteroides y cometas de periodo corto de más de un metro de diámetro. Se catalogan como Objetos Potencialmente Peligrosos (OPP o PHOs por sus siglas en inglés) si su tamaño supera los 140 metros y se acercan a la Tierra a menos de 20 veces la distancia Tierra-Luna (unos 7,5 millones de km), existiendo actualmente alrededor de 2.000 OPP, aunque ninguno con posibilidades de impacto en el próximo siglo. Hay 160 OPP con diámetro superior a un kilómetro que podrían causar más de mil millones de muertes si colisionaran con nuestro planeta.

Se estima que la energía liberada por un impacto de este tipo de objetos oscila entre un megatón y mil millones de megatonnes, es decir, entre 70 y 70 mil millones de veces la energía de la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima en 1945. Los objetos menores de 50 metros difícilmente causarían daños en la superficie terrestre, sin embargo, los mayores podrían salvar la protección natural que nos ofrece nuestra atmósfera y generar estallidos atmosféricos o, incluso, excavar cráteres (**Trigo Rodríguez 2022**). La frecuencia de impacto de un objeto como el de Tunguska se encuentra entre 250 y 500 años, mientras que un evento capaz de provocar una extinción masiva se estima que ocurre de media cada 100 millones de años. Sin embargo, estos datos son solo aproximaciones estadísticas. Cualquier localización de la Tierra tiene, a grandes rasgos, la misma probabilidad de recibir el impacto de un cuerpo celeste, siendo además el ángulo de impacto completamente aleatorio, por lo que el valor promedio es de 45 grados. La Tabla 1 muestra las posibles víctimas ocasionadas por un impacto en función de su diámetro y ocurrencia.

Tabla 1. Frecuencias de impacto y víctimas estimadas en función del tamaño del objeto (NASA 2007).

Evento	Diámetro	Víctimas	Frecuencia
Grandes bólidos	< 50 m	0	Anual
Tunguska	> 50 m	5.000	250-500 años
Daño regional	> 140 m	50.000	5.000 años
Daño regional alto	> 300 m	0.5 M	25.000 años
Daño global bajo	> 600 m	5 M	70.000 años
Daño global medio	> 1 km	1.000 M	1 M años
Daño global alto	> 5 km	2.000 M	6 M años
Extinción masiva	> 10 km	6.000 M	100 M años

Debido a la naturaleza estocástica de estos fenómenos podríamos enfrentarnos a un evento de estas características en cualquier momento, estando el planeta continuamente expuesto al azar de esta violencia cósmica a la que nos somete nuestro vecindario solar.

4. DESCUBRIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DE OBJETOS POTENCIALMENTE PELIGROSOS

Se estima que anualmente llegan a la Tierra 40.000 toneladas de material espacial generando alrededor de 17.600 meteoritos, de los cuales se han recuperado 50.000

ejemplares a lo largo de la historia (**Peucker-Ehrenbrink y Schmitz 2001; Evatt et al. 2020**). Desde 1955 la Base de Datos de Impactos Terrestres ha sido mantenida y actualizada por el Observatorio Dominion y, posteriormente, por la Universidad de Nuevo Brunswick en Canadá, siendo contabilizados 190 cráteres o estructuras de impacto hasta el día de hoy.

En 1898 se descubrió el primer asteroide cercano a la Tierra y no fue hasta 1932 que se identificó el primero que cruzaba la órbita terrestre. En esa misma década fueron aumentando los descubrimientos y cada vez se hacía más evidente la naturaleza rocosa de estos objetos y su relación con los meteoritos.

El interés político llegó tras la publicación del libro *Cosmic Catastrophes* de Chapman y Morrison en 1989 y la comparecencia del segundo autor en la audiencia de la Cámara de Representantes de Estados Unidos el 26 de junio de ese mismo año. La atención siguió aumentando con la publicación de un documento donde el *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (AIAA) describía con detalle la amenaza de los OCT y reclamaba que se invirtiera en la detección de estos objetos, así como en las opciones de deflexión (desvío) y destrucción de los mismos.

A finales de la década de 1980 se estableció un nuevo paradigma sobre el peligro de impacto cuando las técnicas avanzadas de búsqueda telescópica identificaron asteroides que se aproximaban a la Tierra a distancias comparables a las de la Luna. Estos descubrimientos fueron noticia e inspiraron al Congreso de Estados Unidos a solicitar a la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) que examinase la amenaza de impacto cósmico y los métodos de mitigación. Esto condujo a la definición del Spaceguard Survey para defender a nuestro planeta de amenazas de impacto, aprobado formalmente en 1998. La NASA declaró que el objetivo oficial de su programa era la detección del 90% de la población de objetos cercanos a la Tierra mayores de 1 kilómetro en una década.

A partir de este momento, los instrumentos y esfuerzos dedicados a esta cuestión fueron proliferando gracias al aumento de la inversión en sistemas de observación de OPP (**Schmidt 2018**). En 1993 comenzó el programa LONEOS (*Lowell Observatory Near-Earth-Object Search*) en Flagstaff, Arizona. Un equipo del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL por sus siglas en inglés) llegó a un acuerdo en 1996 para utilizar el telescopio GEODSS de Hawái, propiedad de las Fuerzas Aéreas estadounidenses, para desarrollar el programa de vigilancia conocido como NEAT (*Near-Earth Asteroid Tracking*). Uno de los programas de seguimiento más exitosos hasta la fecha ha sido LINEAR (*Lincoln Near-Earth Asteroid Research*), una iniciativa del Laboratorio Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), financiada por el Departamento de Defensa de Estados Unidos y la NASA a finales de 1997 que desempeñó un papel fundamental en la consecución de los objetivos marcados por la NASA. Curiosamente, programas de seguimiento con menos recursos como el del Observatorio Astronómico de Mallorca (OAM) en España también fueron capaces de descubrir miles de asteroides gracias a la monitorización rutinaria del firmamento.

En el año 2000, el gobierno británico creó un grupo de trabajo sobre los objetos cercanos a la Tierra potencialmente peligrosos que dio lugar a la creación de la primera organización gubernamental dedicada exclusivamente a estudiar el peligro de impacto, el *Near Earth Objects Information Centre*. Más recientemente, a medida que el Spaceguard Survey se acercaba a su objetivo, la NASA encargó a un nuevo grupo (*NEO Science Definition Team*, SDT) que asesorara sobre las posibilidades de ampliar las búsquedas de OCT a tamaños más pequeños.

Con el paso de los años surgieron otros programas de gran relevancia como el *Catalina Sky Surveys* (CSS), el Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*), el NEOWISE para descubrir asteroides y cometas utilizando el telescopio espacial *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) o la iniciativa *Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects* (Gaia-FUN-SSO).

En 2020, se conocían unos 900 OCT de al menos 1 kilómetro de diámetro y se estima que solo se ha descubierto un tercio de los objetos capaces de ocasionar daños de nivel regional en la Tierra. Los objetivos actualizados de la NASA a este respecto aspiran a catalogar todos los asteroides y cometas cercanos a nuestro planeta de más de 140 metros.

El interés por parte de la comunidad científica en la vigilancia de OPP sigue creciendo como atestigua la futura misión espacial NEO Surveyor dedicada en exclusiva a descubrir objetos de esta categoría para 2028. Así mismo se creó en 2013 la *International Asteroid Warning Network* (IAWN) como resultado de las recomendaciones aprobadas por la ONU para crear un grupo internacional de organizaciones involucradas en la detección, seguimiento y caracterización de los OCT que dé una respuesta global ante una amenaza de impacto.

Actualmente, la NASA mantiene operativo el sistema Sentry, un sistema de monitorización de colisiones altamente automatizado que escanea continuamente el catálogo de asteroides más actualizado en busca de posibles impactos contra la Tierra en los próximos 100 años. Cada vez que se detecta una alerta, se analiza y los resultados se publican inmediatamente en la plataforma online del Centro de Estudios de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS). En su página web se puede encontrar la evolución del número total de asteroides próximos a la Tierra en función del año de descubrimiento y de su tamaño, la cual está adquiriendo progresivamente una tendencia exponencial gracias a los últimos esfuerzos realizados, como se observa en la Figura 11.

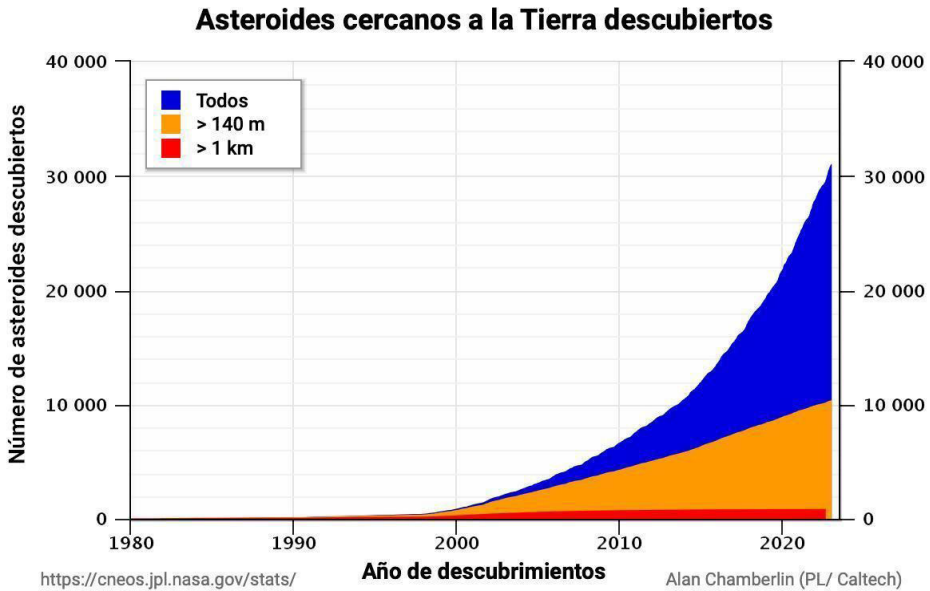


Figura 11. Número total de asteroides cercanos a la Tierra en función del año de descubrimiento. Crédito: CNEOS/NASA.

5. ESTRATEGIAS DE DEFENSA: ¿DESTRUIR O DESVIAR?

En la cultura popular se ha instaurado una mirada del espacio exterior como un entorno esencialmente hostil, un medio inhóspito y plagado de amenazas para la vida humana, entre ellas, un cuerpo celeste con rumbo hacia la Tierra. La célebre cinta apocalíptica *Armageddon* ha moldeado el imaginario colectivo definiendo cómo debería responder la humanidad ante esta situación: utilizar las bombas más potentes para hacer estallar el objeto en cuestión. Sin embargo, para la comunidad científica, la destrucción de un cuerpo astronómico que se dirigiese a nuestro planeta no sería la opción preferente.

5.1. Técnicas de mitigación

La mitigación de la amenaza de impacto cósmico puede adoptar tres formas: destruir, desviar (deflectar en lenguaje técnico) o evacuar. En la práctica estas opciones serían complementarias, aunque las estrategias de evacuación quedan fuera de la perspectiva astronómica. La planificación de misiones de destrucción con artefactos explosivos conlleva, además de las tensiones entre países inherentes a la movilización de armamento pesado y nuclear, riesgos añadidos desde un punto de vista meramente técnico. Una explosión que fragmentase el objeto aumentaría el área efectiva de impacto sobre la Tierra e impediría nuevos intentos de mitigación, aunque si produjera

un gran porcentaje de fragmentos pequeños estos no podrían sobrevivir a la entrada atmosférica y se desintegrarían casi por completo antes de tocar el suelo. Si el objetivo se multiplicase en numerosos cuerpos y además se esparciera, las posibles técnicas a utilizar y su efectividad se podrían ver limitadas. Aun así, se ha realizado un gran progreso en el plano teórico para establecer la capacidad actual de utilizar dispositivos de detonación para destruir asteroides o cometas que supongan un peligro.

En los últimos años, han proliferado las propuestas de técnicas de deflexión con diferentes tecnologías, siendo algunas de ellas (**Colombo et al. 2006; Anthony y Emami 2018**):

- Impactador cinético. El método más directo y tecnológicamente viable para desviar un asteroide es estrellar una sonda espacial directamente contra él. La transferencia de momento²⁸ durante el impacto proporcionaría suficiente energía para desviar el asteroide de su rumbo de colisión con la Tierra.
- Explosión cercana. Se plantea la detonación de un dispositivo nuclear a una distancia óptima del asteroide para que la energía irradiada en la explosión alterase su movimiento.
- Espejo solar. Un dispositivo hinchable o una estructura de gran extensión que desplegase espejos para focalizar la luz del Sol en la superficie del asteroide aumentaría puntualmente la temperatura y produciría la sublimación de volátiles, generando un pequeño y constante impulso.
- Sublimación por láser. Un método de redirección similar al anterior, pero utilizando un láser para sublimar el material de la superficie.
- Eyector de masa. Un artefacto tipo catapulta capaz de lanzar desde la superficie del asteroide material excavado aplicando una reacción contraria que alterase su órbita.
- Haz de iones. Una sonda suspendida sobre el asteroide aplicaría un chorro de partículas para crear una fuerza de empuje sobre un punto establecido variando su dirección.
- Propulsión. Al acoplar unos motores a la superficie de un objeto pequeño se podría ejercer un impulso paulatino que modifique su trayectoria
- Remolcador. Una o varias sondas espaciales arrastrarían el objeto utilizando algún medio físico (arpón, red, contacto directo o incluso un imán).
- Tractor gravitatorio. Método en el que se haría uso de la atracción gravitatoria entre dos cuerpos masivos. Una sonda posicionada cerca del objetivo produciría

²⁸ El momento de un objeto es el producto de su masa y velocidad, también se le denomina cantidad de movimiento o momento lineal. El principio de conservación del momento indica que en una colisión entre dos cuerpos la cantidad de movimiento total permanece constante en el tiempo. Por lo que, si un objeto pequeño choca con otro más grande perdiendo su velocidad, esta será transferida a consecuencia de la tercera ley de Newton (acción-reacción).

un tirón sobre el mismo que, acumulado durante décadas, daría como resultado un cambio significativo de la trayectoria.

- Pintura reflectante. Aplicando una película de material a la superficie del asteroide se conseguiría alterar su albedo, es decir, la cantidad de radiación solar que refleja. Esto conllevaría que la fuerza de radiación ejercida por el Sol variase y, consecuentemente, también lo hiciera su órbita.

Alguna de estas técnicas requiere de la detección de la amenaza con años de antelación. Incluso considerando las más efectivas, actualmente no sería posible evitar el impacto de un asteroide tal y como se demostró en el simulacro de impacto realizado en la 7ª Conferencia de Defensa Planetaria (2021) de la *International Academy of Astronautics* (IAA). Se concluyó que no es materialmente factible preparar el lanzamiento de las misiones espaciales con las capacidades necesarias en un margen de 6 meses, por esta razón, se propone desarrollar bases lunares permanentes con tecnologías de mitigación a distancia y sistemas de defensa de respuesta temprana que orbiten la Luna para acelerar los tiempos de reacción ante una amenaza de impacto.

Dado el estado actual de la tecnología, la opción preferida para desviar la órbita de un OPP es el impactador cinético. Diferentes estudios han demostrado que la deflexión por impacto es más eficaz que una detonación cercana de una carga nuclear. La apuesta por este tipo de técnica se ha evidenciado con las misiones DART y Hera.

5.2. Las misiones DART y Hera

La NASA y la ESA empezaron sus planes por separado para probar estrategias de deflexión de asteroides, hasta que en 2015 establecieron una colaboración denominada AIDA (*Asteroid Impact and Deflection Assessment*) que incluía el lanzamiento de dos naves espaciales distintas que trabajarían en sinergia (**Cheng et al. 2015, 2018**): DART y Hera.

La prueba de redireccionamiento de un asteroide binario (*Double Asteroid Redirection Test* o DART), es la primera misión dedicada a probar el método de desviación de asteroides cambiando su movimiento en el espacio a través de un impacto cinético. Liderada por la Universidad John Hopkins y la NASA, fue lanzada por la empresa SpaceX en 2021 teniendo como objetivo el sistema de dos asteroides formado por Didymos (el cuerpo principal de 780 metros de diámetro) y Dimorfos (de 170 metros y 5,5 millones de toneladas que orbita a su alrededor). La sonda de 610 kg impactó de frente contra Dimorfos a una velocidad de 24.000 km/h, desacoplando previamente su nanosatélite italiano llamado LICIAcube que documentaría las consecuencias primeras de la colisión. Poniendo en perspectiva las masas se entiende que se eligiera este sistema binario para el primer ensayo: Dimorfos orbita a Didymos con un periodo de unas doce horas, por lo que un pequeño cambio en su velocidad (siendo lo esperado del orden de un centímetro por segundo) podría evaluarse con facilidad. La misión fue todo un éxito y se pudo reducir el periodo orbital en 32 minutos, tal y como midieron

observatorios de todo el mundo (Daly et al. 2023; Thomas et al. 2023). En 2026²⁹, gracias a la misión Hera (Michel et al. 2022), junto con las sondas Juventas y Milani que viajarán acopladas, se investigarán las propiedades internas de Dimorfos y medirán con gran detalle las consecuencias del impacto de DART sobre el sistema. La figura 12 muestra una infografía de ambas misiones.

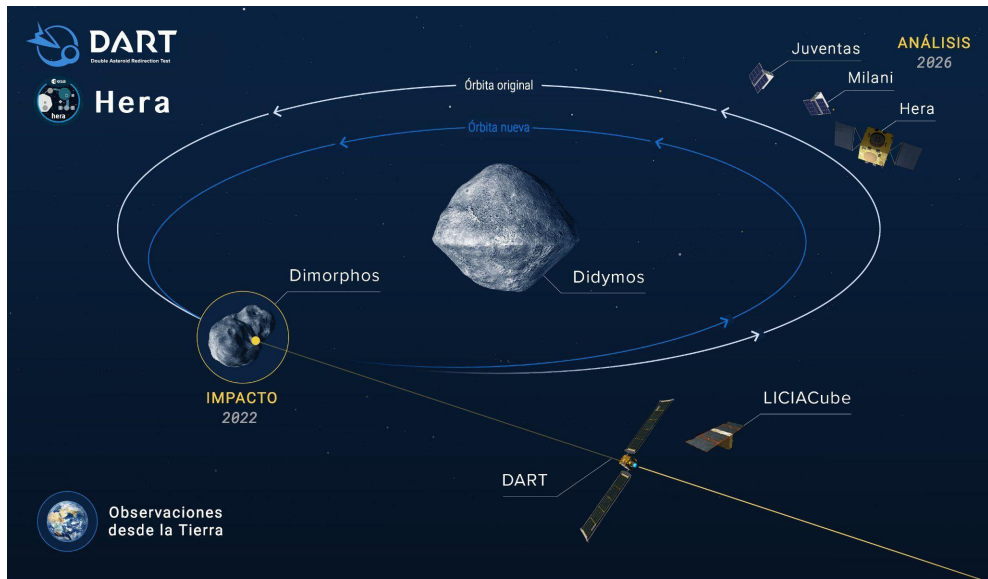


Figura 12. Infografía esquemática del impacto de la misión DART que acortó el periodo orbital de Dimorfos alrededor de Didymos y de la misión Hera que realizará el análisis posterior. Adaptada de JHUAPL y ESA.

Cabe destacar que, si bien DART es la primera misión diseñada para comprobar nuestra capacidad de desviar la órbita de un asteroide, no fue la primera sonda que impactó intencionalmente un cuerpo celeste. La misión Deep Impact (Impacto Profundo) de la NASA estrelló una sonda espacial contra el cometa Tempel 1 para estudiar su composición interior gracias a la nube de partículas generada tras la colisión (Meech et al. 2005). El impacto, junto con la nube de materiales expulsado desde el cráter resultante, produjo una ligera desviación de su órbita al cometa.

El creciente interés internacional por el desarrollo de tecnologías de defensa planetaria queda patente con el anuncio de la Administración Espacial Nacional de China (CNSA) de sus planes para realizar una prueba de redireccionamiento de un asteroide, siendo su objetivo deflectar en 2026 el asteroide 2020 PN1 de 40 metros de tamaño. Así mismo, la CNSA también declaró en abril que establecerá un sistema de alerta temprana y desarrollará un software para simular operaciones contra OCT.

²⁹ La misión conjunta se vio afectada por el retraso en la aprobación del proyecto Hera y, por ello, la misión de la ESA llegará años después del impacto de la sonda DART.

Es de esperar, aunque no en un futuro próximo, que España siga este mismo camino. En 2022 se aprobó el proyecto de la nueva Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación que autoriza la creación de la Agencia Espacial Española³⁰ adscrita al Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ministerio de Defensa con un trasfondo dedicado a la seguridad nacional y, por extensión, a la defensa planetaria.

6. CONCLUSIONES

Históricamente, el estudio de catástrofes de dimensiones planetarias ha estado más asociado a una visión mítico-religiosa que a un intento de comprensión racional. Gracias a los avances de la ciencia y la tecnología en el siglo XX hemos identificado amenazas que anteriormente habían pasado inadvertidas; ahora conocemos los peligros que alberga nuestro vecindario cósmico. La defensa planetaria ya no es simplemente un tópico de la ciencia ficción sino un campo de la ciencia real, pudiendo afirmarse que el éxito de la misión DART inaugura un nuevo horizonte para la seguridad de la Tierra.

A pesar de que se hayan descubierto casi la totalidad de los OCT capaces de ocasionar una devastación global, el riesgo más preocupante reside en la población de cuerpos entre los 50 y 140 metros de diámetro debido a una combinación de alta frecuencia de impacto, daños potenciales considerables y dificultad para detectarlos con la tecnología actual.

El primer paso en la construcción de una defensa planetaria ya está en marcha: la evaluación de la amenaza de impacto se perfecciona continuamente a medida que se monitoriza el cielo con mayor precisión y se están desarrollando las tecnologías para su mitigación. Sin embargo, son necesarios más esfuerzos, cooperación y conocimientos para preparar e implementar de manera efectiva estrategias que eviten o reduzcan posibles daños. Es indispensable alcanzar una coherencia entre los actores, instrumentos y procedimientos que permita responder a las amenazas cósmicas que puedan llegar a afectar a la integridad de los sistemas terrestres.

Tanto la humanidad como todas las formas de vida viajamos por el cosmos en una nave espacial natural que puede verse dramáticamente afectada por acontecimientos sobre los que no tenemos control, pero que sí podemos prevenir. La Tierra es vulnerable y las amenazas cósmicas despiadadas y de un enorme potencial destructivo. El lenguaje de la defensa planetaria nos sitúa a todos los seres vivos en el mismo plano, ya que los objetos astronómicos no entienden de especies, razas, géneros ni fronteras. La ciencia nos dice que existen grandes cometas y asteroides aún por descubrir y que continuamente estamos recibiendo nuevos impactos. Entonces, ¿es posible que vuelva a suceder una colisión catastrófica? Ciertamente sí. La pregunta es si tendremos tiempo para prepararnos.

³⁰ A finales de 2022 el Consejo de Ministros adoptó la decisión de que la ciudad de Sevilla sea la sede de la Agencia Espacial Española.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. y Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208(4448), 1095-1108.
- Anthony, N., y Emami, M. R. (2018). Asteroid engineering: The state-of-the-art of Near-Earth Asteroids science and technology. *Progress in Aerospace Sciences*, 100, 1-17.
- Binzel, R. P. (2000). The Torino impact hazard scale. *Planetary and Space Science*, 48(4), 297-303.
- Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., Wiegert, P., Kalenda, P., Clark, D. y Shrubny, L. (2013). The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503(7475), 235-237.
- Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., ... y Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475), 238-241.
- Brownlee, D. et al. (2006). Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science*, 314, 1711-1716.
- Canup, R. M. (2004). Dynamics of Lunar Formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42, 441-475.
- Chapman, C. R., y Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, 367(6458), 33-40.
- Cheng, A. F., Atchison, J., Kantsiper, B., Rivkin, A. S., Stickle, A., Reed, C., ... y Ulamec, S. (2015). Asteroid impact and deflection assessment mission. *Acta Astronautica*, 115, 262-269.
- Cheng, A. F., Rivkin, A. S., Michel, P., Atchison, J., Barnouin, O., Benner, L., ... y Thomas, C. (2018). AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives. *Planetary and Space Science*, 157, 104-115.
- Chesley, S. R., Chodas, P. W., Milani, A., Valsecchi, G. B., y Yeomans, D. K. (2002). Quantifying the risk posed by potential Earth impacts. *Icarus*, 159(2), 423-432.
- Colombo, C., S Cuartielles, J. P., Vasile, M., y Radice, G. (2006, October). A comparative assessment of different deviation strategies for dangerous NEO. In AIAA 57th International Astronautical Congress (pp. AC-06).
- Daly, R. T., Ernst, C. M., Barnouin, O. S., Chabot, N. L., Rivkin, A. S., Cheng, A. F., ... y Zhang, Y. (2023). Successful Kinetic Impact into an Asteroid for Planetary Defense. *Nature*, 1-3.
- DeMeo, F. E. y Carry, B. (2013). The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226, 723-741.
- Evatt, G. W., Smedley, A. R. D., Joy, K. H., Hunter, L., Tey, W. H., Abrahams, I. D. y Gerrish, L. (2020). The spatial flux of Earth's meteorite falls found via Antarctic data. *Geology*, 48(7), 683-687.
- Fernández, J. A. (2020). Introduction: The Trans-Neptunian belt – Past, present, and future. En D. Prialnik, M. Antoinetta Barucci y L. Young (Eds.), *The Trans-Neptunian Solar System* (p. 1-22). Elsevier.

- Fernández-Soto, A. (2020). *Tras el Big Bang. Del origen al final del Universo*. Editorial Shackelton Books.
- Fortov, V. E., Gnedin, Y. N., Ivanov, M. F., Ivlev, A. V. y Klumov, B. A. (1996). Collision of comet Shoemaker–Levy 9 with Jupiter: what did we see. *Physics-Usppekhi*, 39(4), 363.
- Greene, B. (2020). *Hasta el final del tiempo: Mente, materia y nuestra búsqueda de significado en un universo en evolución*. Editorial Crítica.
- Hartmann, W. K. y Davis, D. R. (1974). Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 24, Issue 4, 504-515.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo Z, A., Jacobsen, S. B. y Boynton, W. V. (1991). Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 19(9), 867-871.
- Holsapple, K. A. (2022). Main belt asteroid collision histories: Cratering, ejecta, erosion, catastrophic dispersions, spins, binaries, tops, and wobblers. *Planetary and Space Science*, 219, id.105529.
- Jones, B. W. (2007). *Discovering the Solar System*, 2ª Ed. Editorial John Wiley y Sons.
- Kring, D. A. (2007). *Guidebook to the geology of barringer meteorite crater*. Arizona (aka Meteor Crater) (p. 150). Houston: Lunar and Planetary Institute.
- Kvasnytsya, V., Wirth, R., Dobrzhinetskaya, L., Matzel, J., Jacobsen, B., Hutcheon, I., Tappero, R. y Kovalyukh, M. (2013). New evidence of meteoritic origin of the Tunguska cosmic body. *Planetary and Space Science*, 84, 131-140.
- Llorca, J. (2004). *Meteoritos y cráteres: fragmentos de otros mundos que caen a la Tierra*. Editorial Milenio.
- Longo, G., Serra, R., Cecchini, S. y Galli, M. (1994). Search for microremnants of the Tunguska Cosmic Body. *Planetary and Space Science*, 42(2), 163-177.
- Meech, K. J., Ageorges, N., A'Hearn, M. F., et al. (2005). Deep Impact: Observations from a Worldwide Earth-Based Campaign. *Science*, 310(5746), 265-269.
- Michel, P., Küppers, M., Bagatin, A. C., et al. (2022). The ESA Hera Mission: Detailed Characterization of the DART Impact Outcome and of the Binary Asteroid (65803) Didymos. *Planetary Science Journal*, 3(7), id.160, 21 pp.
- Mochón, J. A. A. (2018). El origen de la vida. En J.L. Gómez Ordóñez (Coord.), *La cultura de nuestro tiempo* (pp. 67-80). Editorial Universidad de Granada.
- Moyano-Camero C.E., Pellicer E., Trigo-Rodríguez J.M., Williams I.P, Blum J., Michel P., Küppers M., Martínez-Jiménez M., Lloro I. y Sort J. (2017) Nanoindenting the Chelyabinsk Meteorite to Learn about Impact Deflection Effects in asteroids, *Astrophysical Journal*, 835, article id.157, 9 pp.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tanaka, M., et al. (2011). Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-type Asteroids and Ordinary Chondrites. *Science*, 333(6046), 1113-1116.
- Noguchi, T., Matsumoto, T., Miyake, A., et al. (2022). A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu. *Nature Astronomy*, Advanced Online Publication.
- Peucker-Ehrenbrink, B. y Schmitz, B. (Eds.). (2001). *Accretion of extraterrestrial matter throughout Earth's history*. Springer Science & Business Media.

- Rodgers, S. D., Charnley, S. B., Huebner, W. F. y Boice, D. C. (2004). Physical Processes and Chemical Reactions in Cometary Comae. En M. C. Festou, H. U. Keller y H. A. Weaver (Eds.), *Comets II* (pp. 505-522). University of Arizona Press, Tucson.
- Rotelli L., Trigo-Rodríguez J.M., Moyano-Camero C.E., Carota E., Botta L., Di Mauro E. y Saladino R. (2016). The key role of meteorites in the formation of relevant prebiotic molecules in a formamide/water environment. *Nature Scientific Reports*, 6, 38888.
- Schmidt, N. (Ed.). (2018). *Planetary defense: Global collaboration for defending earth from asteroids and comets*. Springer.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., et al. (2010). The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 327(5970), 1214-1218.
- Shima, M., Murayama, S., Okada, A., Yabuki, H. y Takaoka, N. (1984). Description, Chemical Composition and Noble Gases of the Chondrite Nogata. *Meteoritics*, 18, 87-102.
- Shoemaker, E. M. (1963). Impact Mechanics at Meteor Crater, Arizona. En G.P. Kuiper y B. Middlehurts (Eds.), *The Moon Meteorites and Comet* (p. 301). The University of Chicago Press.
- Thomas, C. A., Naidu, S. P., Scheirich, P., Moskovitz, N. A., Pravec, P., Chesley, S. R., ... y Agrusa, H. F. (2023). Orbital period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact. *Nature*, 1-3.
- Trigo-Rodríguez J.M., (2001). *El origen del Sistema Solar*. Editorial Complutense, Madrid.
- (2008). La misión Stardust: implicaciones astrofísicas de las muestras analizadas del cometa 81P/Wild 2. *Revista Iberoamericana de Física*, 4(1), 23-30.
 - (2012). *Las raíces cósmicas de la vida*. Ediciones UAB, colección El espejo y la lámpara, Servei Publicacions UAB, Bellaterra, Barcelona.
 - (2022). *La Tierra en peligro: el impacto de asteroides y cometas*. Edicions Universitat de Barcelona.
- Weinberg, S. (1978). *Los tres primeros minutos del universo; una concepción moderna del origen del universo* (No. 04; QB981, W4).
- Whipple, F. (1950). A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. *Astrophysical Journal*, 111, 375-394.