



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta de una nueva definición del término meteoroides

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

P R E S E N T A:

Martín Covarrubias Saavedra



**DIRECTORA DE TESIS:
Dra. María Guadalupe Cordero Tercero
2021
Ciudad Universitaria, CD. MX. 2021**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1.-Datos del alumno.

Covarrubias
Saavedra
Martín
462 318 00 61
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
086521033

2.-Datos del asesor.

Dra.
Cordero
Tercero
María Guadalupe

3.-Datos del sinodal 1

Dra.
Maravilla
Meza
María Dolores

4.-Datos del sinodal 2

Dra.(c)
Lara
Cruz
Patricia

5.-Datos del sinodal 3

Dra.
Reyes
Salas
Adela Margarita

6.-Datos del sinodal 4

M en C
Conejo
Patiño
Sonia

7.-Datos del trabajo escrito

Propuesta de una nueva definición del término meteoroides
81
2021

Propuesta de una nueva definición del término meteoroides

Índice

portada	1
HOJA DE DATOS DEL JURADO	2
Índice	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
Introducción	8
Parte I	10
Antecedentes	10
Capítulo 1	11
Cometas	11
1.1. Características físicas	11
1.2. Evolución de los cometas	12
1.2.1 Coma del cometa	12
1.2.2. Colas del cometa	13
1.2.3. Jets	13
1.2.4. Fragmentación	14
1.3. Etapa final de los cometas	15
1.4. Origen y características de sus órbitas	15

1.4.1. Cinturón de Kuiper (KBO)	15
1.4.2. Nube de Oört	16
1.5. Clasificación cometaria	17
1.5.1. Cometas de periodo corto	17
1.5.2. Cometas de periodo largo	18
1.5.3. Cometas y asteroides	18
Capítulo 2	20
Asteroides	20
2.1. Parámetros Físicos	20
2.2. Los primeros descubrimientos	21
2.3. Origen del cinturón de asteroides	23
2.4. Características de los asteroides	23
2.5. Brillo y albedo de un asteroide	25
2.6. Clasificación de asteroides	26
2.7 Parámetro de Tisserand	27
Capítulo 3	29
Distribución de los NEAs	29
3.1. Asteroides Apolo	31
3.2. Asteroides Atón	31
3.3. Asteroides Amor	31
3.4. Asteroides Atira	32
3.5. Importancia del estudio de los NEOs	32
Parte II	34
Meteoroides y su definición	34
Capítulo 4	35
Meteoroide	35

4.1. Revisión de las definiciones de los términos asteroide y meteoroides	35
4.2. Crítica a la definición actual y a las propuestas de definición de los términos asteroide y meteoroides	41
Capítulo 5	42
Propuestas de definición del término meteoroides	42
5.1. Energía cinética	42
5.1.1 Cálculo de la energía cinética del objeto a partir del infrasonido producido.	44
5.1.2 Determinación de la energía cinética de un meteoroides, asteroide o material cometario a partir de la eficiencia óptica medida por sensores ópticos en satélites en órbita.	53
5.2 Efecto Yarkovsky	56
5.3 Efecto YORP	60
5.4 Riesgo de impacto	62
5.4.1 Determinación de la composición de los diferentes tipos taxonómicos de asteroides y la relación con su albedo.	63
5.4.2 Completez de la muestra de NEAs y probabilidad de impacto	66
5.5. Discusión	72
Capítulo 6	84
Conclusiones	84
Referencias	86
Referencias bibliográficas	86
Referencias electrónicas	89

Índice de figuras

Figura		Página
1.1	Cometa Giacobini- Zinner.	11
1.2	En esta imagen se aprecian las dos colas de un cometa.	12
1.3	Gas y jets del núcleo del cometa 103 P/ Hartley.	13
1.4	La imagen muestra un esquema del cinturón de Kuiper y de la Nube de Oort.	15
1.5	Ubicación en el sistema solar de la Nube de Oort.	16
2.1	Fotografía de los asteroides Matilde, Gaspra e Ida.	24
3.1	Clasificación de NEOs de acuerdo con sus parámetros orbitales.	29
5.1	Bólidos detectados de 1994 a 2013.	42
5.2	Estaciones de la red de monitoreo de infrasonido del Sistema Internacional de Monitoreo (IMS).	43
5.3	Comparación de la energía de infrasonido producido por explosiones nucleares.	46
5.4	La imagen muestra una unidad de detección de infrasonido IS 39, Palau, 2 de Julio del 2005.	47
5.5	Diagrama de algunos fenómenos que ocurren debido a la interacción de un objeto cósmico con la atmósfera.	48
5.6	En esta gráfica se muestra la frecuencia acumulada de la energía de impacto para 691 de los 767 eventos publicados en la página de la NASA	50
5.7	Energía de bólidos determinada por dos distintos métodos y su correlación.	51
5.8	Frecuencia y energía de bólidos.	54
5.9	Frecuencia de la caída de objetos cósmicos.	55
5.10	Efecto Yarkovsky diurno y estacional.	58
5.11	Efecto Yarkovsky diurno.	59
5.12	Asteroide esférico con dos cuñas desalineadas.	60

5.13	Relación entre la frecuencia acumulada y la magnitud absoluta de los NEAs.	66
5.14	Relación entre el logaritmo de la frecuencia acumulada y la magnitud absoluta de los NEAs en el intervalo de completez.	67
5.15	Escala de Turín.	76
5.16	Descripción de la Escala de Turín.	77

Índice de tablas

Tabla	Página
2.1. Comparación de las distancias medidas y las predichas por la Ley de Titius-Bode	21
2.2. Diámetro, densidad y masa de algunos asteroides	23
5.1. Datos utilizados por Brown y colaboradores (2002) para determinar una ecuación para calcular la eficiencia óptica de los bólidos	52
5.2. Porcentaje de masa distribuida en cada zona del cinturón de asteroides	64
5.3. Tiempo probable de impacto con la Tierra de un cuerpo asteroidal de igual o mayor tamaño a un diámetro dado.	70
5.4. Objetos detectados por la NASA con posibilidad de impactar con la Tierra en los próximos años.	74
5.5. Esta tabla resume las diferentes propuestas de definición del término meteoroides, comenzando por la definición actual de la IAU, así como las ventajas y desventajas de estas.	80

Introducción

La ciencia se construye sobre conceptos bien definidos, por esa razón, el objetivo de este trabajo es proponer una nueva definición del término meteoroides pues consideramos que su definición y uso presenta muchas ambigüedades. La primera definición del término fue propuesta por H. A. Newton en 1864; básicamente, la define como un cuerpo pequeño, generalmente sólido, que se mueve en el espacio y que, al chocar con la atmósfera de la Tierra, es capaz de producir un meteoro debido a la pérdida de velocidad causada por la interacción del objeto cósmico con la atmósfera. La definición del término meteoroides está ligada a la definición del término asteroide, la cual fue propuesta por Sir William Herschel en 1802. Su nombre significa “parecido a una estrella” pues seguía viéndose como un punto luminoso aún a través del mejor telescopio de la época. Los asteroides son los principales objetos vinculados a los meteoroides. A lo largo del tiempo, la definición de meteoroides se ha ido ajustando en función del desarrollo de nuevas tecnologías que permiten ver objetos cada vez más pequeños en el espacio. Una de las primeras definiciones asoció el término meteoroides con un cuerpo con un diámetro de hasta 100 metros, que era el límite inferior del tamaño de los objetos que se podían observar al momento de proponer el término. Este límite ha ido disminuyendo gradualmente. Actualmente se considera que la definición aplica a cuerpos menores a un metro de diámetro y es posible que en los próximos años el límite de observación esté muy por debajo de ese valor. El punto de ese cambio en el límite superior que debe tener un objeto para ser llamado meteoroides (o el límite inferior de un objeto para que sea considerado un asteroide) varía pues está ligado a la capacidad de los telescopios para observarlos: mejores telescopios implican observaciones de objetos cada vez más pequeños.

En los primeros dos capítulos de este trabajo se hace una recopilación de algunas características de los objetos que se piensa son los precursores de meteoroides: cometas en el capítulo 1 y asteroides en el capítulo 2. En el capítulo 3 se analiza el origen de los objetos cercanos a la Tierra (NEOs -Near Earth Objects- por sus siglas en inglés).

En el capítulo 4 se hace una revisión de las distintas definiciones del término meteoroides que se han propuesto a través del tiempo hasta la definición actual de la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés).

En el capítulo 5 se analizan algunas propuestas, propias y de otros autores contemporáneos, sobre una nueva definición de meteoroides con base en características de los objetos y no del instrumento de observación.

Finalmente, en el capítulo 6, a partir de los resultados de los capítulos previos, llegamos a una conclusión y a una propuesta para una nueva definición del término *meteoroides*.

Parte I

Antecedentes

Capítulo 1

Cometas

A lo largo de la historia de la humanidad, los cometas han sido vistos como señales de malos augurios, tales como la aparición de pestes, muerte de reyes, guerras, etc. No fue sino hasta el siglo XVI que estos cuerpos se empezaron a considerar objetos de estudio. Tycho Brahe, al realizar mediciones de la paralaje del gran cometa de 1577, observó tres características importantes: que los cometas están fuera de la atmósfera de la Tierra, que su coma es semejante en tamaño al de la Tierra, y que la cola siempre apunta en dirección contraria al Sol (Cordero et al., 2013).

La Ley de la Gravitación Universal de Sir Isaac Newton permitió a Edmund Halley predecir, en 1705, que el cometa que se observó en 1456, 1531, 1607 y 1682 volvería a ser visible en 1758 (Faure y Mensing, 2007). La comprensión de la naturaleza de los cometas produjo un cambio gradual en la concepción de estos objetos: de ser señales nefastas a ser objetos de estudio y fuentes de información sobre el origen y características del sistema solar (Ridpath, 1985).

El término cometa deriva del griego (κομήτης) que significa “estrella de pelo largo”. Un núcleo cometario es un cuerpo pequeño, de unos cuantos kilómetros de diámetro, formado por silicatos y materiales volátiles, que cuando se acerca a menos de 5 ua del Sol (1ua=1 unidad astronómica= 1.496×10^8 km), sus volátiles comienzan a sublimarse produciendo una coma y generalmente dos colas.

1.1. Características físicas

Los cometas se componen de un núcleo, la coma y las colas. La parte sólida, que corresponde al núcleo del cometa, está formada principalmente de una mezcla de roca, polvo, agua y algunos gases congelados, tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano y amoníaco, entre otros. El núcleo también contiene una variedad de compuestos

orgánicos; por ejemplo, metanol, etanol y formaldehído. Adicionalmente, existe evidencia de la existencia de hidrocarburos y aminoácidos (Davis et al., 2002).

1.2. Evolución de los cometas

1.2.1 Coma del cometa

Al sublimarse, los materiales volátiles del núcleo cometario forman una nube de partículas a su alrededor. A esta atmósfera se le conoce como coma o cabellera. La coma está formada principalmente de vapor de agua y partículas de polvo y, como ya se mencionó, se empieza a formar cuando el núcleo cometario se encuentra a una distancia del Sol de alrededor de 5 ua (unidades astronómicas). Su tamaño puede llegar a ser del orden de 10^5 de kilómetros. Conforme el cometa se acerca más al Sol, las partículas de polvo reflejan la luz. Gradualmente, la coma disminuye al ser arrastrada por efecto del viento solar transformándose de manera gradual en las colas del cometa (Fig. 1.1) (Davis et al., 2002).



Figura 1.1. Cometa Giacobini- Zinner mostrando claramente la coma del cometa y una incipiente cola. Fuente: <http://solarsystem.nasa.gov/multimedia>

1.2.2. Colas del cometa

Conforme el cometa se va acercando al sol, la radiación y el viento solar arrastran las partículas de polvo y las moléculas de materiales volátiles sublimados lejos del núcleo, produciendo, de esta manera, las colas del cometa (Fig. 1.2). Las partículas de gas son más fácilmente ionizadas y afectadas por el campo magnético del Sol, provocando una separación entre la cola producida por partículas de polvo y la producida por las moléculas de materiales volátiles (Davis et al. 2002).



Figura 1.2. En esta imagen se aprecian las dos colas de un cometa. Fuente: NASA Ames ResearchCenter/K.NASA:
http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=903
http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/Comet_Parts.jpg.

1.2.3. Jets

Los núcleos cometarios están cubiertos por cortezas o costras, las cuales pueden ser más o menos activas y pueden cubrir hasta el 90% o más de la superficie del núcleo. El material de la costra es muy inerte, es decir, no se sublima tan fácilmente, esto puede ser la causa de que algunos cometas sean completamente inactivos (Davis et al. 2002). Las imágenes de alta resolución del cometa Borelly sugieren que la costra puede estar formada por depósitos de material que no fue arrojado a velocidades de escape o mayores, por lo que

volvieron a descender sobre la superficie del núcleo cometario formando la costra. El calentamiento desigual del núcleo cometario puede ocasionar la salida de gases en zonas activas en forma de chorros, también conocidos como jets (Fig. 1.3.) (Davis et al. 2002).

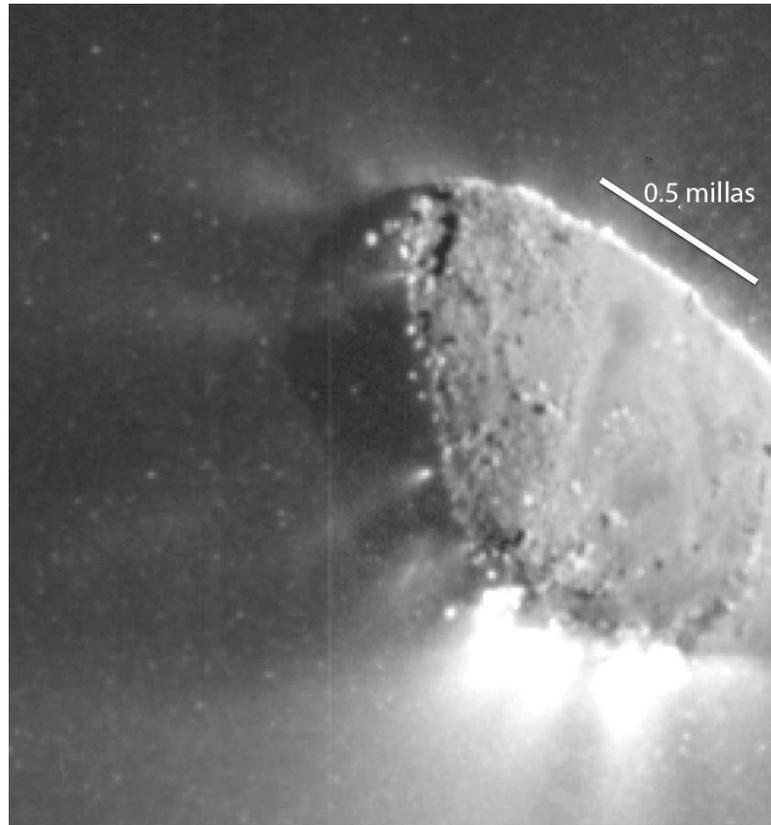


Figura 1.3. Gas y jets del núcleo del cometa 103 P/ Hartley. Fuente: NASA, JPL-Caltech, UMD, EPOXI Mission <http://antwrrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap101123.html>.

1.2.4. Fragmentación

Los cometas pueden presentar procesos de fragmentación. Los cometas llegan a dividirse en dos o más fragmentos (hasta en docenas de partes) y al menos un 5% de los cometas activos sufre fragmentación (Boehnhardt, 2002). La fragmentación afecta la vida de los cometas. Los cometas de la familia de Júpiter pueden llegar a fragmentarse en cientos o miles de partes. En ocasiones, el proceso de fragmentación es producido por fuerzas de marea, ocasionadas por encuentros cercanos con planetas; por ejemplo, el caso del cometa

Schoemaker-Levy 9, el cual en un encuentro cercano con Júpiter se fragmentó en 21 partes (Davis et al., 2002).

En algunos casos se desconoce el proceso que provocó la fragmentación, por ejemplo, S4 Linear, Hale Bopp, Wilson, Kohoutek, West e Ikeya-Seki, se fragmentaron aun cuando se encontraban lejos de Júpiter y del Sol. Los procesos de fragmentación despiertan mucho interés debido a la relación que existe entre la fragmentación y las lluvias de meteoros, las cuales se producen cuando la órbita de la Tierra atraviesa zonas en las cuales existen partículas desprendidas de los cometas, y que son atraídas por el campo gravitacional de la Tierra. Estas partículas, al interactuar con la atmósfera, producen meteoros (Davis et al. 2002), conocidos comúnmente como lluvias de estrella.

1.3. Etapa final de los cometas

De acuerdo con Davis y colaboradores (2002), la vida activa de los cometas puede cesar debido a tres factores:

1. Si el cometa está formado únicamente por materiales volátiles, al sublimar la totalidad de ellos, el cometa se extingue.
2. Al desintegrarse el núcleo en fragmentos más pequeños, terminan como partículas de polvo en el sistema solar.
3. Al expulsar los volátiles que hay en su corteza se convierte en un cometa inactivo. En ese estado puede permanecer latente de manera indefinida.

1.4. Origen y características de sus órbitas

Los cometas activos provienen principalmente de dos reservorios, el cinturón de Kuiper y la nube de Oort. Aunque su existencia inicialmente fuera sólo una hipótesis, el mejoramiento en las técnicas y equipamiento en telescopios permitió observar, en 1992, el primer objeto del cinturón de Kuiper (Davis et al. 2002).

1.4.1. Cinturón de Kuiper (KBO)

Su origen fue propuesto por Edgeworth en 1949 y en 1951 por Kuiper, quienes postularon la existencia de desechos más allá de la órbita de Neptuno (Fig. 1.4). Esta región consta de un disco de cuerpos dispersos que se encuentra a una distancia de entre 30 y 50 ua,

y se calcula que tiene un ancho de 30° con respecto al plano de la eclíptica. Es posible que sean restos de la formación del Sistema Solar (Kavelaars et al. 2009).

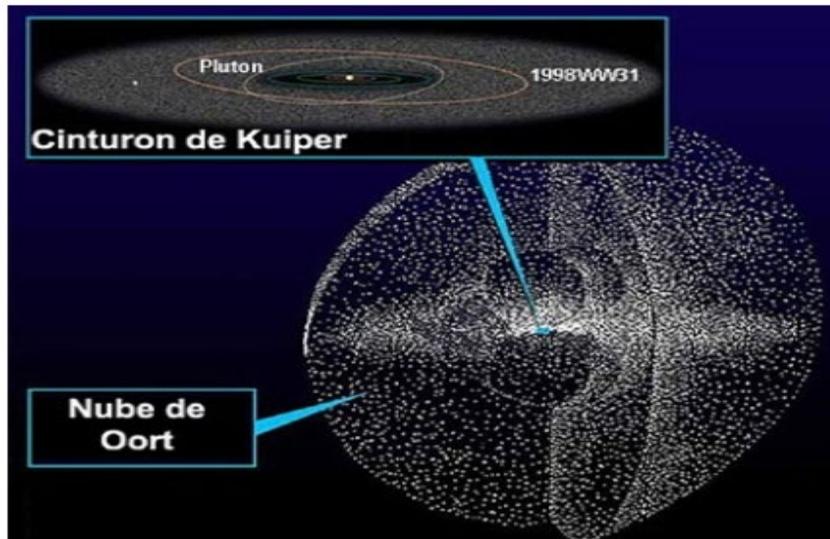


Figura 1.4. La imagen muestra un esquema del cinturón de Kuiper y de la Nube de Oort-.
Fuente: D. K. Yeomans; JPL, NASA.

Un aspecto interesante del cinturón de Kuiper es la gran cantidad de objetos grandes que contiene. Ejemplo de ello es Plutón (diámetro 2370 km) además de su satélite mayor, Caronte (diámetro 1207 km). Actualmente se conocen seis objetos con diámetros de alrededor de 1000 km, también se sabe que el cinturón de Kuiper contiene más cuerpos grandes que el cinturón principal de asteroides (Davis et al., 2002). El número de objetos calculados de entre 1 y 600 km, en esta región, es del orden de 10^5 (Cordero et al., 2013).

1.4.2. Nube de Oort

La nube de Oort es otro lugar del cual se sabe que provienen algunos cometas de periodo largo. Aun cuando no ha sido observada, su existencia fue propuesta por el astrónomo holandés Jan Oort en 1950; aunque ya en 1932, Ernst Öpik también había sugerido su existencia. La nube de Oort comienza a una distancia de entre 2000 y 5000 ua y se extiende más allá de las 50,000 ua. La región se subdivide en una región externa, de forma esférica, de entre 20,000 y 50,000 ua y una región interna a la que también se le da el nombre de nube de Hills, que se encuentra a una distancia de entre 2,000 y 20,000 ua (Fig. 1.5). Se cree que

podiera estar formada por restos que fueron expulsados del sistema solar durante la formación de los planetas gigantes (Davis et al. 2002; Morbidelli, 2008). Con todo rigor, el sistema solar termina en el extremo exterior de la nube de Oort.

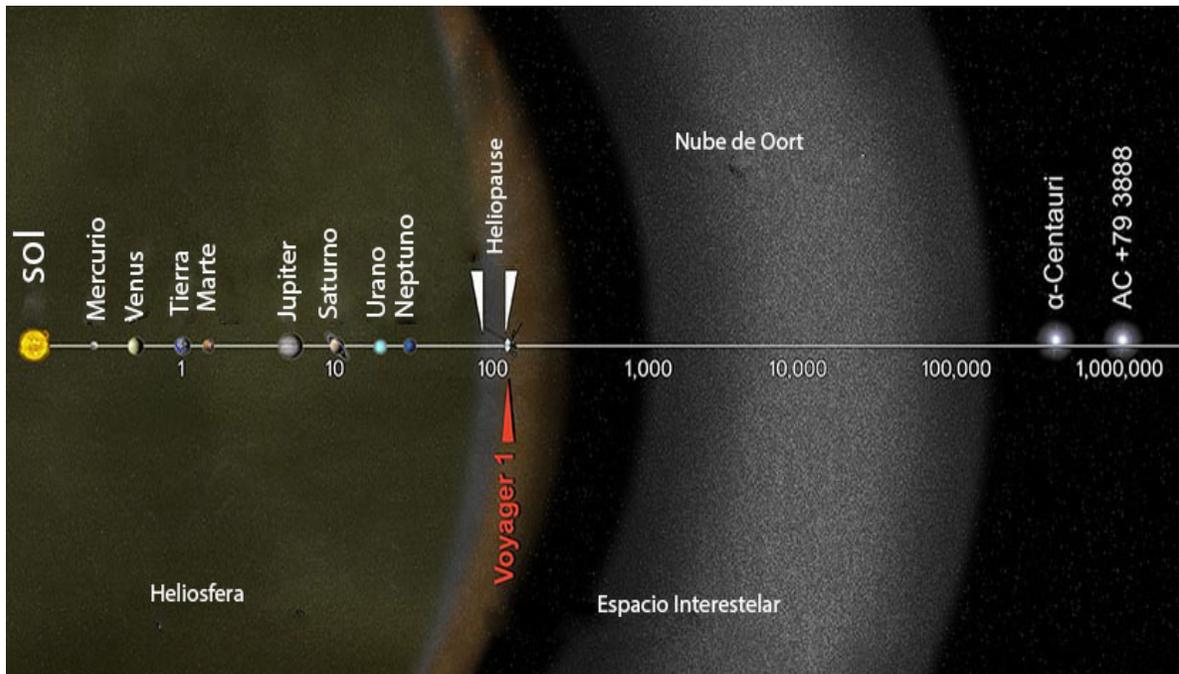


Figura 1.5. Ubicación en el sistema solar de la Nube de Oort. Fuente: http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=903<http://solarsystem.nasa>

1.5. Clasificación cometaria

Los cometas se clasifican tradicionalmente, con base en el periodo de su órbita, en cometas de periodo corto y cometas de periodo largo.

1.5.1. Cometas de periodo corto

Un cometa se considera de periodo corto si su periodo orbital es menor a 200 años. Usualmente orbitan en la misma dirección de los planetas y, ya que sus órbitas tienen una excentricidad importante, pueden llegar a distancias más lejanas que los planetas exteriores. Originalmente se pensó que los cometas de periodo corto provenían de la nube de Oort, los cuales, después de un encuentro cercano con Júpiter fueron atrapados en órbitas de periodo corto (Davis et al., 2002).

Si su afelio está próximo a los planetas mayores, se suelen agrupar como familias. Los cometas tipo Encke tienen periodos muy cortos, de tan solo algunos años, el periodo del cometa que da nombre a esta familia es de 3.3 años. En 1978 el astrónomo checoslovaco L. Kresav propuso la hipótesis de que el objeto de Tunguska fue un fragmento del cometa Encke. Si el periodo es menor a 30 años y la inclinación con respecto a la eclíptica menos de 30 grados, se le conoce como cometa de la familia de Júpiter. Los cometas tipo Halley tienen su afelio muy próximo a Júpiter, se cree que fueron atrapados en una órbita de periodo corto después de un encuentro cercano con este planeta (Davis et al., 2002).

Todos los cometas cercanos al Sol, y que presentan actividad cometaria, tienen periodos de vida cortos debido a diferentes procesos. Entre estos procesos están el tener una órbita inestable debido a su encuentro con los planetas y a la pérdida de volátiles en cada aproximación al Sol. Se estima que sus periodos de vida oscilan entre 10^6 y 10^7 años, antes de un encuentro cercano con un planeta que lo expulse del sistema solar, de un choque con algún planeta o de que sea desintegrado al chocar con el Sol (Davis et al., 2002).

1.5.2. Cometas de periodo largo

Los cometas de periodo largo tienen excentricidades grandes, sus periodos son iguales o mayores a 200 años y sus órbitas están aleatoriamente distribuidas. Se piensa que su origen es la nube de Oórt (Davis et al., 2002).

1.5.3. Cometas y asteroides

La población de cuerpos menores en el sistema solar incluye asteroides, cometas y objetos transneptunianos, aunque actualmente es difícil establecer con precisión a qué grupo pertenece cada objeto del sistema solar. En años recientes se ha visto que en realidad no hay un límite claro entre asteroides y cometas pues, bajo ciertas condiciones, un cuerpo puede tener características de asteroide y en otras de cometa y viceversa. Actualmente se sabe de cuerpos del cinturón principal de asteroides que se subliman presentando cierta actividad cometaria, y de objetos que presentan sólo una cola de polvo ya que no tienen volátiles (Hsieh, 2016).

Los asteroides generalmente son considerados como objetos inertes, localizados en su mayoría en el cinturón principal, entre las órbitas de Marte y Júpiter; mientras que los

cometas son cuerpos que provienen del Sistema Solar exterior más allá de la órbita de Neptuno, del cinturón de Kuiper o de la nube de Oórt (aunque también hay poco más de cien cometas en el sistema solar interior). Estos cuerpos entran en las órbitas interiores del Sistema Solar al ser perturbados en sus lugares de origen. La importancia en el estudio de los cometas radica en que éstos proporcionan pistas acerca de las características de temperatura, composición y la dinámica del sistema solar en sus etapas tempranas (Hsieh, 2016).

Hsieh (2016) enumera tres características importantes a considerar en el estudio de cometas:

1. El material congelado en los cometas es de una etapa muy primitiva y son las muestras mejor conservadas del Sistema Solar en sus primeras etapas.
2. La actividad cometaria permite obtener muestras y realizar análisis in situ o remoto, lo anterior no se puede realizar en un material inerte como el de los asteroides.
3. En su recorrido hacia el Sol, los cometas permiten el estudio de materiales que de otra forma no podría analizarse en su lugar de origen; además, al sublimarse, los materiales volátiles permiten conocer las condiciones de temperatura a la cual se lleva a cabo este proceso.

Durante las últimas décadas va en aumento el interés por cometas que no muestran actividad alguna, lo cual se da, por ejemplo, cuando se encuentran lejos del Sol, cuando se forma una costra o manto que cubre su superficie o cuando pierde sus materiales volátiles a causa de pasos sucesivos alrededor del Sol. A estos objetos se les conoce como asteroides en órbitas cometarias (Hsieh, 2016).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de cometas o cuerpos con actividad cometaria y su proceso de fragmentación es importante, entre otras cosas, por su relación con la lluvia de meteoros. El telescopio infrarrojo (IRAS) ha observado las estelas de polvo que dejan a su paso y ha encontrado que están formadas por rocas de hasta 60 cm (Davis et al., 2002). En el caso particular de este trabajo, en el cual se busca proponer una nueva definición para el término meteoroides y dado que algunos autores como Rubin y colaboradores (2009) establecen en 1 metro el límite superior del tamaño que debe tener un meteoroides, es importante mencionarlo.

Capítulo 2

Asteroides

En el siglo XVII, Kepler fue el primer astrónomo que se ocupó del problema acerca del tremendo vacío entre Marte y Júpiter; propuso que en ese espacio debería de existir un planeta aún desconocido o muchos. No fue sino hasta el siglo XIX, cuando Guiseppe Piazzi descubrió Ceres, que se empezaron a obtener respuestas. Un siglo después, ya se conocían miles de esos cuerpos que Herschel denominó asteroides. La palabra asteroide deriva del griego y significa “similar a una estrella”, el término fue acuñado por William Herschel en 1802 (Serio et al., 2002).

De acuerdo con la información que se encuentra en la página oficial de la NASA, un asteroide es un cuerpo rocoso más pequeño que un planeta, que se encuentra en órbita principalmente entre las órbitas de Marte y Júpiter, en lo que se conoce como Cinturón Principal de Asteroides. Por su parte, la Unión Astronómica Internacional (IAU, por sus siglas en inglés), en su resolución del 22 de agosto del 2006, establece que los asteroides forman parte del grupo conocido como cuerpos pequeños del sistema solar, los cuales incluyen los asteroides del sistema solar, la mayoría de los objetos transneptunianos (TNO, por sus siglas en inglés) y cometas (IAU, 2006).

Existen asteroides que van desde los pocos metros de diámetro hasta cientos de kilómetros, tal es el caso de Ceres con un diámetro de alrededor de 948 km. Aquí es importante hacer notar que en la resolución 5 de la IAU de 2006, Ceres es catalogado como planeta enano.

2.1. Parámetros Físicos

Los parámetros físicos para los asteroides no son bien conocidos, esto debido principalmente a su tamaño y a la distancia a la cual se encuentran, ya que reflejan poca luz

del Sol y es difícil observarlos. Los únicos parámetros determinados para los objetos cercanos a la Tierra son, según la NASA (<https://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>):

- Magnitud absoluta (H), la cual se usa para tener una idea aproximada de su tamaño
- Periodo de rotación
- Albedo
- Color
- Tipo espectral
- Masa y
- Densidad

Aunque cabe aclarar que no se han determinado todos estos parámetros para todos los objetos.

2.2. Los primeros descubrimientos

En 1766 Johann Daniel Titius propuso una relación numérica que, de manera aproximada, proporciona la distancia a la cual se encuentran los planetas del Sol:

$$\text{Distancia (en ua)} = 0.4 + (0.3 \times N), \text{ donde } N = 0, 1, 2, 4, 8, 16, \dots \quad (1)$$

Esta relación fue popularizada por Johan Bode director del observatorio de Berlín, razón por la cual se conoce como ley de Titius- Bode. A pesar de referirse como ley, en realidad es una relación numérica entre la distancia y el número de orden de los planetas. El impacto de dicha ley fue tal que hizo que muchos astrónomos se lanzaran a la búsqueda de más planetas. En 1781 Herschel descubrió Urano; y se confirmó la validez de dicha ley al ver que el planeta recién descubierto se encontraba a la distancia del siguiente valor proporcionado por la relación de Titius-Bode, lo cual propició la búsqueda de los posibles planetas faltantes, en especial en la región del cielo comprendida entre las órbitas de Marte y Júpiter (Serio et al., 2002) (Tabla 2.1).

En 1800, el director del observatorio de Seeberg en Gotha (ciudad perteneciente a Turingia en Alemania), el Húngaro Franz Xaver von Zach, tras meses de búsqueda sin resultados, formó lo que se conoció como la Sociedad Astronómica Unida (Vereinigte Astronomische Gesellschaft), popularmente conocida como *la policía celeste*, entre quienes

estaban Herschel y Piazzi. Este último fue quien descubrió Ceres el 1 de enero de 1801. Debido a la tardanza de Piazzi para publicar sus resultados fue difícil para los astrónomos la observación del asteroide. En septiembre, Piazzi publica todas sus observaciones con lo cual Carl Friedrich Gauss calcula una nueva órbita. Con esos cálculos, Ceres fue nuevamente observado el 7 de diciembre por el astrónomo Zach, y el 2 de enero por Heinrich Olbers (Serio et al., 2002).

Tabla 2.1. Comparación de las distancias medidas y las predichas por la Ley de Titius-Bode, obtenidas de la ecuación (1).

Planeta	N	Distancia predicha por la ley de Titius-Bode (ua)	Distancia observada (ua)
Mercurio	0	0.4	0.39
Venus	1	0.7	0.72
Tierra	2	1.0	1.00
Marte	4	1.6	1.52
Hueco	8	2.8	2.77 Ceres
Júpiter	16	5.2	5.20
Saturno	32	10.0	9.54
Urano	64	19.6	19.19
Neptuno	128	38.8	30.07
Plutón	256	77.2	39.53

Unos meses después, Olbers encontró otro cuerpo con características parecidas, pero con diferente inclinación y excentricidad, al cual bautizó con el nombre de Palas. El descubrimiento de Palas cuestionó la Ley de Titius-Bode, la cual no había sido puesta en duda. Para resolver esta situación, Olbers propuso que estos dos cuerpos eran fragmentos de un planeta mayor que no se formó o que se había fragmentado a causa de un impacto. Como resultado de esta hipótesis, Olbers sugirió la existencia de más cuerpos. La hipótesis de

Olbers fue confirmada por Harding el 1 de septiembre de 1804, al encontrar el asteroide Juno. Tres años después, Olbers encontró otro cuerpo al cual nombró Vesta. Tras los primeros descubrimientos pasarían más de cuarenta años antes de que Karl Ludwig Hencke encontrara otro objeto al que nombró Astrea. Para 1857 el número de asteroides rondaba los cincuenta y para 1868 pasaba de los 100. El 22 de diciembre de 1891, Maximilian Franz Wolf descubrió Brucía mediante la utilización de técnicas fotográficas, técnica que aceleró el descubrimiento de más objetos. Para 1923 ya se habían contabilizado más de 1000 cuerpos (Serio et al., 2002).

2.3. Origen del cinturón de asteroides

La hipótesis más aceptada sobre el cinturón de asteroides establece que, en el pasado, el cinturón estaba mucho más densamente poblado por asteroides y que debido a las fuerzas de marea de Júpiter, principalmente, se fue vaciando poco a poco.

Acerca de su formación, Lang (2003) propone principalmente dos hipótesis:

1. Los asteroides son los restos de un planeta que no se formó debido a la fuerza gravitacional de Júpiter.
2. Son los restos de un planeta que se formó y después se fue desintegrado por la fuerza gravitacional de Júpiter.

En 2017 dos investigadores de la Universidad de Burdeos, Francia, propusieron una teoría diferente acerca de la formación del cinturón de asteroides, ellos plantean la hipótesis de que el espacio donde se ubica el cinturón de asteroides comenzó como una región vacía que se fue llenando de a poco con los restos de la formación de los planetas tanto interiores como exteriores. Su razonamiento se basa en la composición de los asteroides, pues los que se encuentran cerca de los planetas interiores son del tipo S, con un contenido alto en silicatos, mientras que los que se encuentran cerca de los planetas exteriores son del tipo C, con alto contenido en carbono, lo cual es más parecido a la composición de los planetas exteriores (Raymond e Izidoro, 2017).

2.4. Características de los asteroides

La definición de la Unión Astronómica Internacional, en su 26ª asamblea del 2006, denominó a los asteroides y cometas con el término genérico de “cuerpos menores”. En

particular, los asteroides, que son cuerpos de forma irregular (Fig. 2.1), se encuentran en su mayoría (como ya se mencionó), en una zona conocida como Cinturón Principal de asteroides, la cual es una región comprendida entre las órbitas de Marte y Júpiter, formando un disco que va entre 2 y 4.2 ua (Burbine, 2017). Los tamaños del material en esa zona varían desde algunos milímetros hasta centenas de kilómetros. La mayoría de los asteroides son objetos de apenas algunos metros de diámetro, de forma irregular. La masa total de todos los asteroides se estima entre 2.8×10^{21} kg y 3.2×10^{21} kg, de la cual, más de la mitad está concentrada en cuatro de los cuerpos más grandes: Ceres con alrededor del 30% de la masa total, Vesta 9%, Pallas 7% e Higia con el 3% (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Diámetro, densidad y masa de algunos asteroides, tomado de Joseph M. Trigo y José María Madiedo (2013).

Asteroide	Diámetro (km)	Masa (kg)	Densidad media (g/cm ³)
1 Ceres	913	9.5×10^{20}	2.1
2 Pallas	523	2.4×10^{20}	2.9
4 Vesta	520	2.7×10^{20}	3.5
10 Hygea	429	1.1×10^{20}	----
511 Davida	337	1.1×10^{20}	----
704 Interamnia	333	7.0×10^{19}	----
52 Europa	312	5.2×10^{19}	----

Algunos asteroides se salen del cinturón principal debido a perturbaciones gravitacionales causadas por su interacción con los planetas y a otros fenómenos no gravitacionales, como por ejemplo los efectos YORP y Yarkovsky, ocasionando una migración constante en dirección al sol y provocando que crucen las órbitas de los planetas interiores (WWW.Minor Planet Center/asteroid classification I-dynamics).

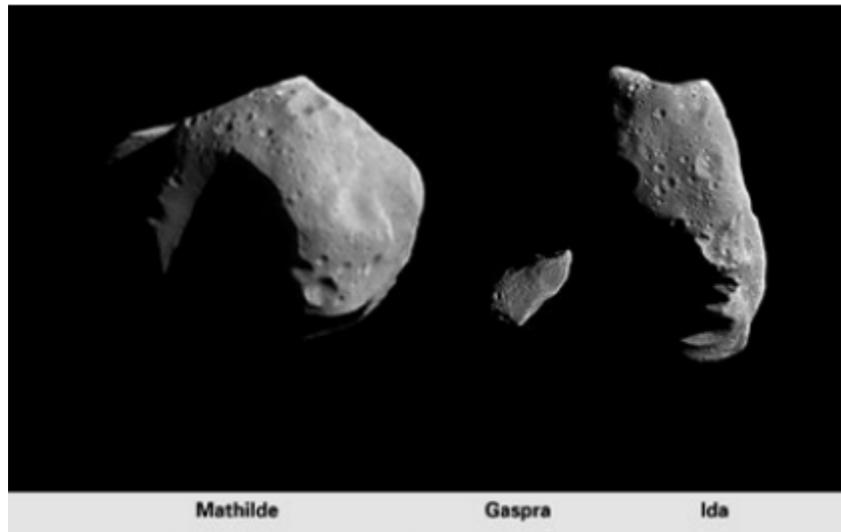


Figura 2.1. En la fotografía se muestran algunos asteroides del cinturón principal, los asteroides Matilde, Gaspra e Ida. En la fotografía se puede observar su forma irregular. Fuente: www.Minor Planet Center/asteroid

Al grupo de asteroides cuyas órbitas cruzan o están muy cerca de la órbita de la Tierra se les denomina NEAs (Near Earth Asteroids, en español: asteroides cercanos a la Tierra). Este grupo en particular lo analizaremos más adelante debido al interés que estos cuerpos tienen precisamente por su cercanía con la Tierra. Por otro lado, la abreviatura NEOs, se refiere a Near Earth Objects (Objetos cercanos a la Tierra) y agrupa tanto a asteroides como a cometas cuyas órbitas se encuentran en la cercanía de la órbita terrestre.

2.5. Brillo y albedo de un asteroide

El brillo aparente de un asteroide es una cantidad que depende del tamaño y del material del asteroide, así como de la distancia a la cual se encuentre con respecto a la Tierra. Una medida de este brillo se conoce como magnitud. Como la distancia cambia con el tiempo (debido al movimiento relativo de ambos cuerpos), la luz solar reflejada por los asteroides también cambia, razón por la cual, los astrónomos definieron una magnitud que no depende de la posición relativa, a la cual llamaron magnitud absoluta (H). Esta se define como el brillo que tendría un asteroide si se encontrara a una distancia de 1 ua tanto del Sol como de la Tierra y cuyo ángulo de fase fuera de 0° , es decir el brillo de un asteroide cuando éste esté completamente iluminado por el Sol, IAU (XXIX asamblea).

El brillo de un asteroide también depende del albedo, definido como el porcentaje de radiación que refleja una superficie con respecto a la radiación que incide sobre ella. Según Barnes-Svarney (1996), el porcentaje de luz que reflejan algunos asteroides varía entre el 4 y el 40% de la luz incidente. La proporción absorbida es posteriormente irradiada en forma de luz infrarroja, la cual provoca efectos como el YORP y el Yarkovsky (Bottke et al., 2006).

2.6. Clasificación de asteroides

Existen diferentes criterios para agrupar a los asteroides, por ejemplo, por su composición, posición con respecto al Sol, etc.

Debido a que los asteroides reflejan parte de la luz que reciben del Sol, es posible obtener información de ellos a partir del estudio del espectro electromagnético de la luz reflejada. Comparar la información obtenida de estos espectros con la obtenida de meteoritas recuperadas en la Tierra ha posibilitado establecer semejanzas entre meteoritas y asteroides (Binzel et al, 2002).

Una clasificación por Tipo Espectral basada en el estudio de los espectros de absorción y las características de la luz reflejada fue realizada en 1975 por Chapman y colaboradores, quienes elaboraron la primera clasificación de los diferentes tipos de asteroides con base en su albedo, color y características espectrales. En 1984, D. Tholen propuso una clasificación de asteroides en 14 categorías. Posteriormente, en 2002, Binzel y colaboradores ampliaron el trabajo de Tholen proponiendo 26 diferentes tipos espectrales (Binzel et al, 2002).

La taxonomía de Tholen está formada por 14 clases espectrales, cada una representada por una letra: A, B, C, E, F, G, M, P, Q, R, S, T, V y X. Esta clasificación se realizó con base en las características espectrales de 405 asteroides observados en ocho filtros que van del UV al visible (0.337 a 1.041 μm) (Burbine, 2017) Las clases espectrales abarcan los tipos S, A, D, Q, R, T, V, y los grupos C (con sus tipos B, C, F y G) y X (con sus tipos E, M y P). Las clases con más miembros son C, S y X. Las clases Q, R y V fueron creadas para clasificar a tres objetos espectralmente inusuales: 4 Vesta (tipo V), 1862 Apolo (tipo Q) y 349 Dembowska (tipo R), (Binzel et al.2002).

Los elementos del grupo C son asteroides formados principalmente de compuestos derivados del carbono, tienen una densidad media $\rho=1700\text{kg/m}^3$, un albedo medio $p_v=0.034$ y son cuerpos opacos; razón por la cual se piensa que debe de haber más asteroides de este

tipo de los que actualmente han sido descubiertos. Los asteroides del Tipo S están compuestos principalmente de silicatos con un contenido de hasta el 10% de hierro y magnesio; son moderadamente brillantes con un albedo medio $p_v = 0.115$ y una densidad media de $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ (Poveda et al., 1999). Los asteroides del Tipo M pertenecen al grupo X y son asteroides con un alto contenido metálico, principalmente hierro y níquel y tienen albedos altos (Binzel et al., 2002).

En el año 2002 S. J. Bus y R. P. Binzel desarrollaron una nueva clasificación a partir de los datos espectrales de 1447 asteroides. Para hacer esta clasificación, ellos utilizaron filtros entre 0.44 y 0.92 μm (Bus y Binzel, 2002) en cámaras CCD colocadas en los telescopios de 1.3 y 2.4 m del observatorio de Kitt Peak. El resultado de este trabajo fue la clasificación de los asteroides en 26 clases con base en sus características en el visible y el cercano infrarrojo. Las clases incluyen al complejo S (S, Sa, Sq, Sr, Sv), al complejo C (B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch), al complejo X (X, Xc, Xe, Xk, Xn), y a los tipos A, D, K, L, Ld, O, Q, R, T y V.

2.7 Parámetro de Tisserand

A finales del siglo XIX François Félix Tisserand, en su trabajo *Traité de mécanique céleste*, estableció un criterio para determinar si un cuerpo correspondía a un cometa periódico. Dicho criterio se conoce como parámetro de Tisserand, también conocido como invariante de Tisserand, y es un valor asociado al problema restringido de los tres cuerpos en mecánica celeste. Matemáticamente se representa con la ecuación:

$$T_J = \frac{a_J}{a_3} + 2 \sqrt{\frac{a_3(1 - e_3^2)}{a_J}} \cos i_3$$

donde a_J el semieje mayor de la órbita de Júpiter (5.2 ua); y a_3 , e_3 , i_3 son, respectivamente, el semieje mayor, la excentricidad y la inclinación de la órbita del tercer cuerpo. En el cálculo del parámetro de Tisserand se considera que el segundo cuerpo se mueve en una órbita circular y que la masa del tercer cuerpo es infinitesimal con relación a los otros dos cuerpos (Hsiegh, 2016).

El parámetro de Tisserand se considera un criterio dinámico para determinar si la órbita de un cuerpo corresponde a un cometa o a un asteroide. Objetos con $T_J < 3$ corresponden a cuerpos acoplados a Júpiter y son considerados como objetos con órbitas cometarias,

mientras que objetos con $T_J > 3$ se considera que no han tenido encuentros con Júpiter y que corresponden a asteroides (Hsiegh, 2016).

Históricamente el parámetro de Tisserand es considerado como la manera más simple de determinar si un objeto, con base en su órbita, es un cometa o un asteroide; además de que durante mucho tiempo se pensó en él como un valor invariable en la órbita de un cuerpo. De acuerdo con Hsiegh (2016), estudios realizados sobre dinámica planetaria han mostrado que el hecho de involucrar únicamente a las masas del Sol y de Júpiter, así como de ver a la órbita de Júpiter como circular, en realidad no reproducen en detalle la dinámica de los cuerpos planetarios por lo cual, en todo rigor, el parámetro de Tisserand no es una constante de movimiento. Hsiegh también considera que con la actual evidencia de cuerpos del cinturón principal que presentan actividad cometaria es difícil encuadrar a un cuerpo usando sólo el parámetro de Tisserand.

Hsiegh (2016) también menciona que, en estudios llevados a cabo por medio de computadoras, en los cuales se consideró la fuerza gravitacional de todos los planetas, además de otros factores no gravitacionales, como por ejemplo el efecto Yarkovsky, se pudo demostrar que el valor de Tisserand no se mantiene constante.

Capítulo 3

Distribución de los NEAs

El término Objeto Cercano a la Tierra (NEO) se le da a cualquier objeto cuya órbita tenga un perihelio $q \leq 1.3$ ua, independientemente de su origen, el cual puede ser cometario o asteroidal. Según Binzel y colaboradores (2002), la mayor parte de los NEOs tiene su origen en el cinturón principal y sólo alrededor del 2% corresponde a cometas de período corto.

La proximidad de los NEAs ha permitido desarrollar nuevas técnicas basadas en el uso de radar, las cuales se han usado para medir propiedades de su superficie y conocer su forma (Margot et al., 2015).

Su estudio también ha despertado interés debido a que existe la probabilidad de impacto de uno de estos objetos con la Tierra, lo cual puede dañar infraestructura importante para la vida (Poveda et al., 1999).

Tradicionalmente, los NEAs se dividen en grupos según sus parámetros orbitales a , q , Q (semieje mayor, distancia del perihelio y distancia del afelio, respectivamente). De acuerdo con éstos, los NEAs se agrupan de acuerdo con el asteroide tipo: "Amor", "Apolo", "Atón" y "Atira" (Fig. 3.1), (Burbine, 2017). En proyección, las órbitas de los asteroides tipos Atón y Apolo cruzan la órbita de la Tierra, mientras que las órbitas de los asteroides Amor pasan "por fuera" de la órbita de nuestro planeta. Tholen y Whitel propusieron también un nuevo grupo "Apohele" (Que en lengua hawaiana significa órbita), los elementos de este último grupo tienen sus órbitas enteramente contenidas dentro de la órbita de la Tierra ($Q < 0,983$ ua). A este grupo también se les conoce como grupo Atira (Binzel et al., 1998).

La precesión orbital, las variaciones periódicas en los elementos orbitales y las perturbaciones planetarias son suficientes para que los objetos que se encuentran en el límite de un grupo se cambien a otro (Binzel et al., 1998), tal como lo hará el asteroide Apophis el 13 de abril de 2029, cuando pase a unos 38,400 km de la Tierra (por comparación, los satélites

geoestacionarios terrestres orbitan a una altura de 35,786 km). Debido a esa perturbación, cambiará de ser un asteroide tipo Atón a un asteroide tipo Apolo (<https://cneos.jpl.nasa.gov>).

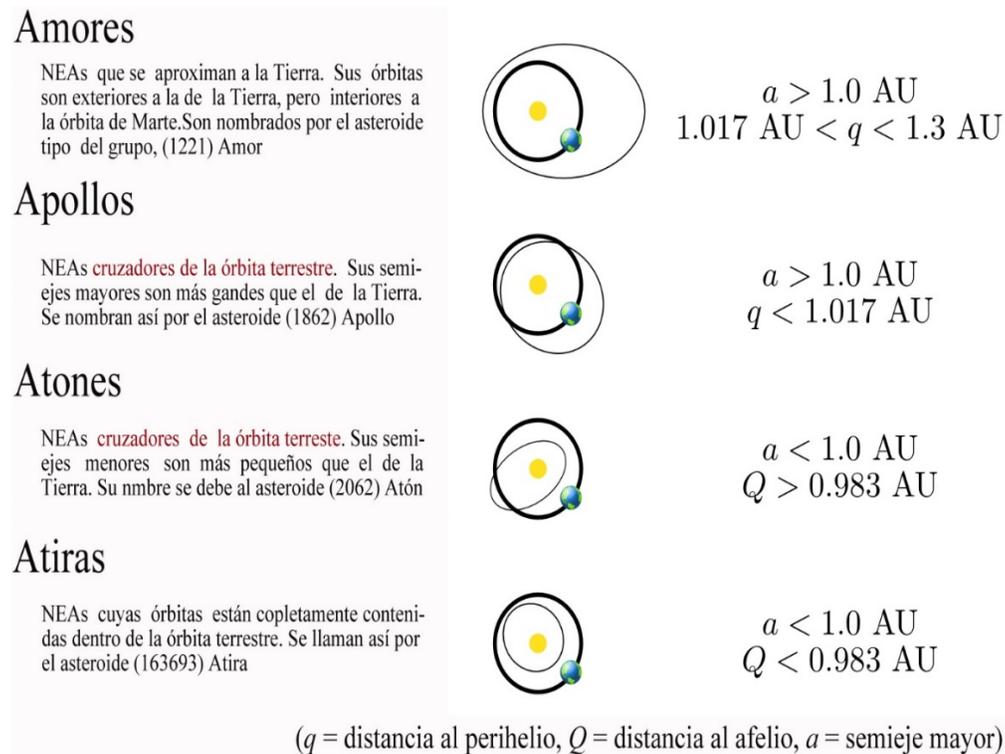


Figura 3.1. Clasificación de NEAs de acuerdo con sus parámetros orbitales. Fuente: Center for Near Earth Object Studies (CNEOS).

Milani y colaboradores (1989) realizaron un experimento numérico en computadora de la evolución orbital de 89 NEAs durante un período de tiempo equivalente a 200,000 años. De acuerdo con estos resultados, ellos proponen seis clases nuevas que llevan el nombre del objeto más conocido y representativo de cada clase: Geographos, Toro, Alinda, Kozai, Oljato y Eros. Esta clasificación es indicativa del comportamiento a largo plazo y difiere de la nomenclatura de Amor-Apolo-Atón-Atira, que se basa únicamente en los elementos orbitales.

En este trabajo consideramos la clasificación de los asteroides en "Amor", "Apolo", "Atón" o "Atira" ya que los datos que proporciona la página de la NASA mantienen esta clasificación.

3.1. Asteroides Apolo

Este grupo de asteroides tiene la característica de que su semieje mayor, a , es más grande que el de la Tierra ($a > 1$ ua) y su perihelio, q , es menor a 1 ua, por lo cual sus órbitas se cruzan, es decir existe la posibilidad de que en algún momento se produzca un impacto entre un asteroide de este grupo y la Tierra. Este grupo de asteroides toma su nombre por el objeto más conocido del grupo, el asteroide Apolo, descubierto en 1932. Hasta el 1 de noviembre del 2020 se habían descubierto 13,355 cuerpos pertenecientes a este grupo (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>).

3.2. Asteroides Atón

Este grupo de asteroides son considerados los más peligrosos para la Tierra por tener órbitas muy excéntricas, tienen una distancia promedio menor a 1 ua y un afelio, Q , mayor a 0.983 ua, por lo cual, al igual que el grupo de asteroides Apolo, también cruzan (en proyección) la órbita de la Tierra. El asteroide que da nombre a este grupo se descubrió en 1976 y se le dio el nombre de 2062 Atón. Hasta el 1 de noviembre del 2020 se han descubierto 1,828 asteroides pertenecientes a este grupo (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>).

3.3. Asteroides Amor

Este grupo de asteroides no cruza la órbita de la Tierra, por lo cual no se le considera como parte del conjunto de asteroides llamados ECAs (Earth Crossing Asteroids, por sus siglas en inglés), aunque es posible que, debido a choques, fenómenos no gravitacionales, como por ejemplo los efectos YORP y Yarkovsky, y tirones gravitacionales debidos a encuentros con los planetas del interior del sistema solar, sus órbitas pudieran llegar a cruzarse con la órbita de la Tierra. Hasta el 1 de noviembre del 2020 se han descubierto 8,947 asteroides pertenecientes a este grupo (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>). El origen de los cuerpos que cruzan la órbita de la Tierra es posiblemente el cinturón principal de asteroides, aunque también pueden ser de origen cometario (Bottke et al, 2006).

3.4. Asteroides Atira

Este tipo de asteroides lleva el nombre de Atira, el primer asteroide descubierto cuya órbita está completamente contenida dentro de la órbita de la Tierra. Fue descubierto por el programa LINEAR (Lincoln Near- Earth Asteroid Research) en 2003. Hasta el 1 de noviembre del 2020 se habían descubierto 23 objetos de este tipo.

3.5. Importancia del estudio de los NEOs

De acuerdo con el Centro de estudios de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS, por sus siglas en inglés) Hasta el 4 de noviembre del 2020 se habían descubierto 5627 objetos menores a 30 m, 7444 cuerpos cuyo diámetro esta entre 30 m y 100 m, 5748 objetos entre 100 m y 300 m, 4435 objetos entre 300 m y 1 km, así como 890 con más de 1000 m de diámetro. Los asteroides con un diámetro por arriba de los 20 m, en caso de una colisión con la Tierra, podrían ocasionar graves daños a la infraestructura, tal es el caso del objeto que estalló en la atmósfera sobre Chelyábinsk en Rusia el 15 de febrero de 2013, el cual se calculó que media alrededor de 17 m; de ahí la importancia de saber sus características como masa, órbita, etc. debido al riesgo potencial que representan estos cuerpos (Borovicka et al., 2013).

Como ya se mencionó previamente, los NEOs pueden llegar a chocar con nuestro planeta pues estos cuerpos cruzan o se acercan a la órbita de la Tierra. Tales choques podrían llegar a poner en riesgo la vida e infraestructura básica en la Tierra. Por lo anterior, diversos investigadores han estudiado la posibilidad de un impacto, así como el posible daño que ocasionaría en función de su masa y su velocidad (Shoemaker, 1986 y Poveda et al., 1999, entre otros).

Los asteroides potencialmente peligrosos PHA (Potentially Hazardous Asteroids, por sus siglas en inglés), son un subgrupo de los NEAs cuyas características son tener una distancia mínima de intersección de su órbita con la órbita de la Tierra menor a 0.05 ua (aproximadamente 19.5 veces la distancia Tierra-Luna) y una magnitud absoluta, H, menor o igual a 22. Para el 1 de octubre de 2020, se habían encontrado 2,126 asteroides potencialmente peligrosos, 157 de los cuales tienen dimensiones mayores o iguales a 1 km (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>).

Los NEOs también tienen una importancia práctica ya que, de acuerdo con la página de la NASA, podrían representar una fuente importante de minerales, algunos de los cuales

son raros en la Tierra. Además, representan destinos viables para naves espaciales, debido a que el consumo energético para llevar una nave a algunos NEOs podría ser menor que la requerida para una misión a la Luna (Binzel et al., 1998).

Parte II

Meteoroides y su definición

Capítulo 4

Meteoroide

En este capítulo se hace una revisión de las distintas definiciones del término meteoroides a través del tiempo, desde la definición de H. A. Newton en 1865 hasta la definición actual propuesta por la IAU. Al final, se presenta una crítica de la definición actual que servirá de marco para la discusión.

4.1. Revisión de las definiciones de los términos asteroide y meteoroides

Los términos meteorita, asteroide y meteoroides se han usado de manera indistinta por personas tanto fuera como dentro de la academia, lo que hace necesario definir con precisión estos términos. Las primeras definiciones se establecieron a partir de la propuesta de Sir William Herschel, a principios de 1802 (Martin Beech et al., 1995; Rubin et al., 2010). Herschel definió el término asteroide como un objeto con apariencia de estrella pues, aún a través de un telescopio, éstos sólo se veían como puntos luminosos (Herschel, 1802).

En 1794 el físico y músico alemán Ernst Chladni propone en su libro “Sobre el origen del hierro de Pallas y otros similares, así como los fenómenos naturales asociados a éstos” (*On the origin of the Pallas iron and other similar to it, and on some associated natural phenomena*), que las meteoritas eran de origen extraterrestre, la cual era una idea controvertida ya que en ese tiempo se pensaba que su origen era volcánico (Marvin U. B. 1996)

Posteriormente, el científico norteamericano H. A. Newton establece por primera vez la definición de meteoroides, los define como los objetos que causan una lluvia de estrellas: “Una lluvia de estrellas es producida por pequeños cuerpos (probablemente sólidos) que se mueven en sus propias órbitas alrededor del Sol o en el espacio, cuando este cuerpo entra a la atmósfera de la Tierra produce luz por la pérdida de velocidad la cual usualmente se disipa antes de alcanzar la superficie de la Tierra. El término meteoroides puede ser usado para

designar ese cuerpo sólido antes de que entre a la Tierra” (Newton, 1865). El problema con esta definición es que no precisa los límites del diámetro del objeto que interacciona con la atmósfera. Según Ceplecha y colaboradores (1998), objetos cuyos diámetros se encuentran entre 0.01 mm hasta kilómetros pueden producir meteoros, lo cual implicaría que el término meteoroides pudiera ser sinónimo de cuerpo menor. La definición tampoco limita que el objeto sea de origen natural o artificial.

Según Borovicka (2016), hace unos 30 años, los términos meteoroides y asteroides se empleaban para designar objetos de tamaños diferentes; en particular objetos mayores a 100 m se consideraban asteroides ya que para la época eran los objetos más pequeños que podían ser observados a través de los telescopios. Objetos de menor tamaño eran considerados meteoroides. En 1990 se descubrió el asteroide 1990 UN con $H=23$ lo que implica un tamaño aproximado de 100 m; este objeto era el más pequeño observado hasta ese momento por lo que el límite inferior del tamaño de un asteroide se colocó en esos 100 m; por otro lado, hasta donde sabemos, no existe ningún registro histórico de la entrada de un objeto de más de 100 m (de hecho, de no más de 60 m- 80 m, que es el tamaño del objeto asociado con el evento de Tunguska). En el 2008 se pudo detectar un objeto con magnitud absoluta fotográfica, H , de 33.2 lo que implica que el objeto tiene un tamaño entre 0.6 y 1.31 m, por lo que, siguiendo la idea anterior de que los meteoroides son aquellos objetos cuyos tamaños no pueden ser detectados a través de telescopios, los meteoroides serían actualmente objetos de menos de un metro como propone Rubin (2010). De hecho, para el 2016 había catalogados solamente 8 objetos con $H > 31$ lo que corresponde a objetos del orden de 2 m de acuerdo con JPL Small-Body Database.

Es curioso cómo la definición de los términos meteoroides y asteroides, con base en su tamaño, ha ido cambiando con el tiempo. Históricamente, los términos están relacionados con el método de observación: asteroide es un cuerpo que asemeja una estrella al ser observada con un telescopio, mientras que el término meteoroides se refiere a cuerpos que causan meteoros en la atmósfera. Borovicka (2016) señala acertadamente de que estos términos han dependido del método de observación y del contexto. En resumen, en las últimas décadas, el límite para distinguir a un asteroide o fragmento cometario de un meteoroides lo ha dado la capacidad de nuestros telescopios para detectar objetos cada vez más pequeños.

De lo anterior se puede concluir que, si se basa la definición en términos del tamaño mínimo del objeto que puede ser observado por un telescopio, la definición entonces deberá de modificarse cada vez que se mejoren los métodos de observación y detección, lo cual ha ocurrido a partir de la década de los 80's en la cual hubo un gran avance en óptica-electrónica.

En la XI asamblea de la IAU, realizada en 1961, se establecieron definiciones básicas de objetos astronómicos. Los límites para meteoroides y asteroides establecidos en esa asamblea no fueron bien definidos y ocasionaron problemas desde ese tiempo (Borovicka, 2016).

En esa asamblea se estableció que un meteoroides “es un objeto sólido que se mueve en el espacio interplanetario de un tamaño considerablemente menor que un asteroide y considerablemente mayor que un átomo o molécula”. En la definición no se establecen los límites entre meteoroides y asteroide. Otro problema con esta definición es que sólo se emplea para cuerpos que se encuentran en el espacio interplanetario, actualmente el término también se usa para objetos sólidos durante su entrada a la atmósfera de cualquier planeta (Borovicka, 2016).

De acuerdo con el trabajo de Beech y colaboradores (1996), es indispensable definir el límite en el cual un meteoroides pasa a considerarse un asteroide. En su trabajo, ellos proponen que el límite inferior para un meteoroides sea de 100 micrómetros y el máximo hasta 10 metros. El límite inferior es el valor mínimo necesario para que un cuerpo genere un meteoro al interactuar con la atmósfera terrestre; sin considerar los factores de los que depende la aparición del meteoro, tales como la velocidad, el ángulo de entrada, la composición y la densidad del material. Ya en 1981, Bronshten también propuso ese límite inferior.

El límite superior ha cambiado conforme la capacidad de detección ha mejorado. En el trabajo de Beech (1995), por ejemplo, lo establecen en 10 metros, mientras que en el trabajo de Rubin y colaboradores (2010) el límite superior se establece en 1 metro.

En la XI asamblea de la IAU también se definieron otros términos, por ejemplo, el término meteoro se definió como el fenómeno luminoso que resulta de la interacción de la atmósfera con un cuerpo sólido proveniente del espacio. La definición sólo aplica para el fenómeno luminoso, no para el objeto físico. Actualmente el término meteoro aplica no sólo

para el efecto luminoso, también se usa para otros fenómenos atmosféricos, por ejemplo, caída de lluvia, fenómenos ópticos como el arcoíris, así como ondas acústicas y de ionización detectadas por radar (Borovicka, 2016).

El término meteorita fue definido como un meteoroide que alcanzó la superficie de la Tierra sin ser completamente evaporado. Recientemente fueron encontradas meteoritas en la superficie de Marte (Rubin et al., 2010), por lo cual, Borovicka (2016) considera razonable referir como meteorita a un objeto interplanetario que ha alcanzado una superficie planetaria, después de que se ha detenido el proceso de ablación en su atmósfera.

Un bólido fue definido como un meteoro cuya luminosidad iguala o excede la brillantez del planeta Venus (Borovicka, 2016).

Más recientemente se hizo una revisión de las definiciones anteriores llevada a cabo por un Comité nombrado por la Comisión 22 de la IAU de la cual Borovicka formó parte (Borovicka, 2016). En este comité se llegó a las siguientes definiciones:

Meteoroides: Es un objeto natural sólido de un tamaño entre 30 micrómetros y un metro, que se mueve en o desde el espacio interplanetario.

Meteorita: Objeto sólido natural que sobrevive la fase de meteoro a través de una atmósfera gaseosa sin que sea completamente evaporado.

Asteroide: es un objeto sólido de diámetro mayor a 1 m y más pequeño que un planeta enano, moviéndose o viniendo del espacio interplanetario y que no muestra actividad, es decir que no libera gas, polvo o fragmentos.

Cometa: es un objeto sólido de un diámetro mayor a un metro y más pequeño que un planeta enano, moviéndose o viniendo del espacio interplanetario y que muestra actividad, es decir que libera gas, polvo o fragmentos.

Polvo: es un sólido finamente dividido, con partículas en general más pequeñas que un meteoroides, moviéndose o viniendo del espacio interplanetario.

Meteoro: es la luz y el fenómeno asociado (calor, onda de choque, ionización), resultado de la entrada de un objeto sólido, proveniente del espacio, en una atmósfera gaseosa.

Borovicka (2016) propone también una serie de observaciones a las definiciones anteriores. Para la definición de meteoro, él dice que:

- El fenómeno puede ser causado por un meteoroides, asteroide, cometa o por una partícula que tenga la velocidad, la masa y el ángulo apropiado de entrada a la atmósfera de un planeta.

- Pueden ocurrir en un planeta o satélite, en los cuales exista suficiente densidad en su atmósfera para evaporar, al menos parcialmente, parte del objeto.
- El fenómeno causado por meteoroides evaporados en la cercanía del Sol no será considerado meteoro, esto debido a que el mecanismo de evaporación es diferente.
- A la radiación producida por el impacto directo de un meteoroides sobre la superficie de un cuerpo sin atmósfera no se le llamará meteoro sino destello de impacto.
- A un meteoro cuya magnitud sea menor o igual -4 se le podrá llamar bólido o bola de fuego (*fireball*).
- A un meteoro de magnitud menor o igual a -17 se le podrá llamar superbólido.

Para la definición de meteoroides propone la siguiente observación:

- En el contexto de la observación de meteoros, un cuerpo que cause un meteoro será llamado meteoroides independientemente de su tamaño.

Para la definición de asteroide propone lo siguiente:

- En el contexto de la observación de asteroides, un objeto observado telescópicamente y que tenga apariencia de asteroide, será llamado asteroide independientemente de su tamaño.

Para la definición de polvo estelar propone:

- El polvo que se observa en el Sistema Solar, por ejemplo, las nubes de polvo zodiacal incluyendo las bandas de polvo zodiacal y las estelas de polvo cometario, contienen partículas grandes que al ser referidas de manera individual se les podrá llamar meteoroides.
- A las partículas pequeñas que, al entrar en atmósferas planetarias, se calienten por abajo del punto de fusión sedimentándose sobre la superficie del planeta sin ser mayormente afectadas, o cuando sean recogidas en la atmósfera, serán llamadas partículas de polvo interplanetarias (Interplanetary dust particle, IDPs).
- A los pequeños remanentes de meteoroides (típicamente del orden de micras) que sufrieron ablación, se les llamará polvo de meteorita. Estas partículas pueden ser observadas como estelas de polvo, por ejemplo, al paso de un meteoroides.

Para la definición de meteorita:

- Un meteoroides en la atmósfera será una meteorita después de que la ablación cese y comience su vuelo oscuro.
- Una meteorita menor a 1 mm puede ser llamada micrometeorita. Una micrometeorita no tiene la misma estructura que una meteorita fresca (interior intacto y con costra de fusión).
- Objetos extraños que están sobre la superficie de cuerpos sin atmósfera no serán llamadas meteoritas (es decir, no hay meteorita sin meteorio).

Humo meteórico (meteoric smoke):

- El tamaño del humo meteórico (Meteoritic smoke particles, MSPs) está por debajo de 100 nm.

Borovicka (2016) también propone un uso dual del mismo objeto: asteroide/meteoroides. El término puede ser elegido de acuerdo con el contexto, lo cual es una práctica común usada para otros términos, por ejemplo, asteroide/cometa o asteroide/planeta enano en el caso de Ceres, lo cual no causa problemas. En caso de ser necesaria una definición más precisa, ésta debe de ser establecida.

Las definiciones de Borovicka, así como las precisiones de éstas, fueron presentadas en la XXIX reunión de la Unión Astronómica Internacional (IAU), para su discusión. De ahí se aprobaron por consenso las siguientes definiciones:

“Meteorio: es la luz asociada con el fenómeno físico (calor, ionización, choque), resultado de la alta velocidad de entrada de un objeto sólido del espacio en una atmósfera gaseosa.”

“Meteoroides: es un objeto sólido de origen natural cuyo diámetro está entre 30 μm y 1 m de diámetro que se mueve en o desde el espacio interplanetario.”

“Polvo interplanetario: es material finamente dividido, con partículas generalmente más pequeñas que meteoroides moviéndose o viniendo del espacio interplanetario.”

“Meteorita: es un objeto sólido de origen natural que sobrevivió la fase de meteorio en una atmósfera gaseosa sin ser completamente evaporado.”

“Humo meteórico (*meteoric smoke*): es un sólido que se ha condensado en una atmósfera gaseosa a partir de material evaporado durante la fase de meteorio.”

4.2. Crítica a la definición actual y a las propuestas de definición de los términos asteroide y meteoroides

De acuerdo con lo anterior, la definición del término meteoroides ha evolucionado en función de la capacidad de observación de objetos que se encuentren fuera de la atmósfera terrestre, por lo cual, conforme los avances en instrumentación óptica permitan ver objetos cada vez más pequeños va a llegar el momento en el cual sea absurdo emplear un término específico para nombrar objetos que estén en un intervalo de tamaños tan pequeño, de hecho, el límite actual de 1 m ya es bastante debatible.

Consideramos que la propuesta de Borovicka de proponer una definición de acuerdo con la necesidad o contexto no es adecuada pues en ciencia es importante definir bien los procesos y los objetos. Por lo anterior, una posibilidad sería desaparecer el término o buscar una definición que sea útil. En el siguiente capítulo vamos a proponer algunas posibles definiciones del término meteoroides más relacionadas con las propiedades físicas del objeto y no con los métodos de observación.

Capítulo 5

Propuestas de definición del término meteoroides

5.1. Energía cinética

Todos los cuerpos del sistema solar, independientemente de que los podamos observar o no, tienen una cierta cantidad de energía cinética que está en función de su masa y de su velocidad. Si no consideramos la atmósfera, la velocidad de impacto de un objeto cósmico con la superficie terrestre puede tener valores entre 11 km/s y 72 km/s. La transformación de la energía cinética de un meteoroides o cuerpo menor en otras formas de energía como luz, calor y emisión de otras ondas del espectro electromagnético se deben a su interacción con la atmósfera. La luz y el sonido pueden ser usados para inferir la masa, órbita y composición química del meteoroides (Edwards et al.,2006). En algunas ocasiones es posible recuperar parte(s) del cuerpo después de que impacta la superficie de la Tierra, a estas sobrevivientes se les conoce como meteoritas.

Como la energía cinética es una propiedad del objeto, independientemente del observador, consideramos que una posible definición del término meteoroides puede ser una que esté relacionada con esta energía; la cual se aplicaría para cuerpos que ingresen a la atmósfera de la Tierra o a la atmósfera de otro planeta.

En el día es muy poco probable que podamos observar un objeto de menos de unos pocos metros que ingrese a la atmósfera de la Tierra, a menos que nos caiga encima. De noche, estos objetos son observables sólo a través de los meteoros que generan.

Existen diferentes técnicas para observar meteoros tales como fotografías, videos y testigos ocasionales.

En el portal de la NASA hay datos de bólidos registrados entre marzo de 1988 y febrero del 2019, estos datos incluyen la energía calculada y la velocidad de entrada, entre otros, así como la localización de la zona sobre la Tierra donde se produjo el fenómeno. La figura 5.1 esquematiza la ocurrencia de los bólidos de 1994 a 2013.

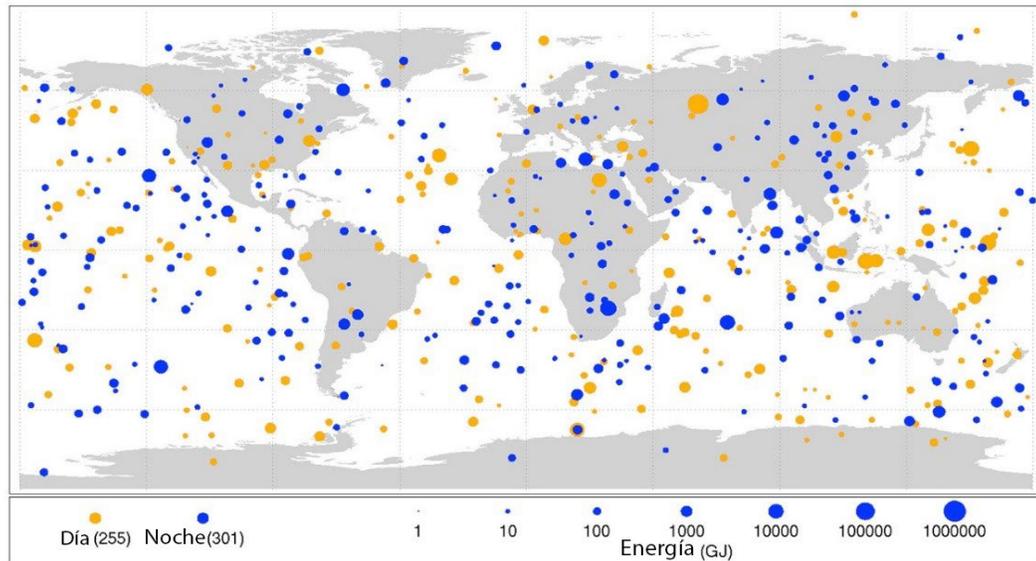


Figura 5.1. Bóolidos detectados de 1994 a 2013. Los círculos en color amarillo corresponden a impactos durante el día, los círculos de color azul corresponden a impactos durante la noche. El tamaño de los círculos es proporcional al tamaño de la energía del objeto (posiblemente relacionada con objetos entre 1 m y 29 m). Si consideramos que 10^3 GJ es igual a 0.24 kt de TNT, 10^4 GJ equivalen a 2.4 kt, 10^5 GJ es igual a 24 kt y 10^6 GJ son 239 kt. Considerando que la energía de una bomba nuclear como la que estalló sobre Hiroshima y Nagasaki fue del orden de 15 kt, tendremos una idea de las energías representadas en esta figura. Fuente: <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-espaciales>.

En los últimos años se ha desarrollado la detección del paso de objetos cósmicos a través de la atmósfera terrestre mediante infrasonido y la luz producida por la interacción de dichos objetos con la atmósfera. Para ello se ha utilizado, entre otros detectores, la red del sistema de monitoreo instalada para prevenir violaciones al tratado de no proliferación de armas nucleares (Fig. 5.2). Es a partir de los datos de esta red, Brown y colaboradores (2002) desarrollaron un método para calcular la energía cinética de un objeto a partir de la eficiencia lumínica del meteoro detectado por satélites en órbita. En ese trabajo evaluaron la parte de la energía cinética que se transforma en luz para obtener una relación empírica y, a partir de ésta, calcular la energía del meteoróide. Por otro lado, en el 2006, Edwards y colaboradores utilizaron los datos de infrasonido para calcular la energía cinética del objeto. En este capítulo

se analizan los dos métodos: el de Brown y colaboradores (2002) y el trabajo de Edwards y colaboradores (2006).

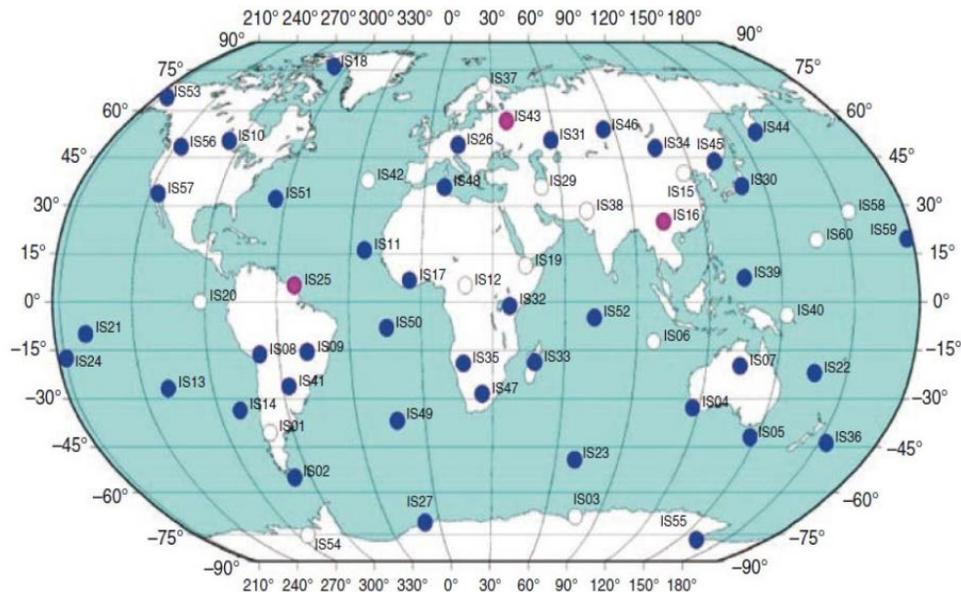


Figura 5.2. Estaciones de la red de monitoreo de infrasonido del Sistema Internacional de Monitoreo (IMS). Los puntos azules corresponden a instalaciones en operación y los rojos se encuentran en construcción, los puntos blancos corresponden a futuras instalaciones Fuente: <https://www.ctbto.org>, 2018.

5.1.1 Cálculo de la energía cinética del objeto a partir del infrasonido producido.

El infrasonido está por debajo del rango de audición humano el cual es del orden de 20 Hz. Una característica de estas frecuencias es su baja atenuación en la atmósfera, lo cual permite que la onda viaje miles de kilómetros (Edwards et al.,2006). Los objetos cósmicos con tamaños entre 10 cm y 10 m son fuentes naturales de infrasonido.

Un cuerpo planetario puede ser una fuente de infrasonido por dos mecanismos:

1. Por el paso del objeto a velocidad hipersónica a través de la atmósfera.
2. Por su fragmentación en la atmósfera.

En el trabajo de Edwards y colaboradores (2006), se busca, a partir de los datos estadísticos de registros del infrasonido producido por objetos cósmicos, inferir relaciones empíricas entre la energía de la fuente (meteoroides, asteroides o material cometario) y la medición de infrasonido. De acuerdo con este trabajo, existen diferentes modelos teóricos para calcular la energía cinética del objeto, por ejemplo, el trabajo de Golitzyn y coautores (1977); y posterior a éste el de Ceplecha y colaboradores (1998), así como el trabajo de Shumilov y coautores (2003). El problema con estos modelos teóricos es la gran cantidad de variables que generalmente no son conocidas, tales como la densidad del cuerpo, la altura y duración del bólido y la eficiencia acústica, entre otras. Por lo anterior, los valores de energía cinética obtenida difieren mucho de lo que se ha estimado a partir del análisis de datos de explosiones nucleares u otro tipo de explosivos.

Como un método alternativo, Edwards y colaboradores (2006) encontraron que es posible relacionar la energía del infrasonido producida en una explosión, por ejemplo, nuclear, con la energía del infrasonido producido por la interacción de un cuerpo pequeño con la atmósfera. Para ello, Edwards y colaboradores (2006), hacen uso de relaciones empíricas obtenidas a partir de curvas de calibración que se obtuvieron de mediciones de infrasonido durante detonaciones nucleares. Durante la explosión se analiza el alcance, la eficiencia y el periodo de la onda de infrasonido producida. Estas pruebas y su análisis fueron realizadas por el Centro de Aplicaciones Técnicas de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América (US Air Force Technical Applications Center, AFTAC por sus siglas en inglés).

Las ecuaciones empíricas que obtuvieron Edwards y colaboradores (2006), relacionan la energía de la fuente con el periodo máximo de la onda observado en la señal. La señal obtenida presenta una envolvente, a la cual se le calcula su amplitud y su periodo, este último es el que se conoce como periodo máximo de la onda. Las relaciones que encontraron son:

$$\log(E_s/2) = 3.34\log(P) - 2.58, \quad \text{para } E_s/2 \leq 100\text{kt} \quad (1a)$$

$$\log(E_s/2) = 4.14\log(P) - 3.61, \quad \text{para } E_s/2 \geq 40\text{kt} \quad (1b)$$

donde P es el periodo a máxima amplitud para la señal, medido en segundos y E_s es la energía de la fuente medida en kt de TNT (Ceplecha et al., 1998).

Debido a que las ecuaciones fueron obtenidas a partir de detonaciones nucleares, el factor $\frac{1}{2}$ se debe a que, en promedio, la mitad de la energía de la detonación corresponde a radiación, por lo cual no produce un efecto en la onda de choque ni en la señal de infrasonido (Glasstone, 1977).

Existen relaciones similares empleadas para calcular la energía cinética de los objetos en función de la distancia a la fuente. Una de ellas fue obtenida a partir de datos recopilados en pruebas nucleares producidas por los franceses (Blanc et al., 1997):

$$\log E_s = 2 \log P + 3.52 \log R - 10.62 \quad (2)$$

en donde R es la distancia del punto donde ocurrió la explosión al detector y P y E_s se definen como en las ecuaciones 1(a) y 1(b).

Aun cuando en ambos casos las ecuaciones se obtuvieron de los datos recabados de explosiones nucleares, al momento de calcular la energía de la fuente, estas ecuaciones presentan discrepancias significativas en los resultados obtenidos casi por un factor de 10 (Fig. 5.3) (Edwards et al., 2006).

Davison y Whitaker, encontraron a partir de pruebas con explosivos ANFO (derivados del petróleo más nitrato de amonio) una ecuación que se ajusta mejor a los datos obtenidos de las observaciones de la explosión:

$$\log E_s = 1.55 \log P_c + 2 \log R - 8.45 \quad (3)$$

donde P_c es la presión ajustada debido al viento en la zona de la explosión y R es la distancia, en kilómetros, de la fuente al receptor.

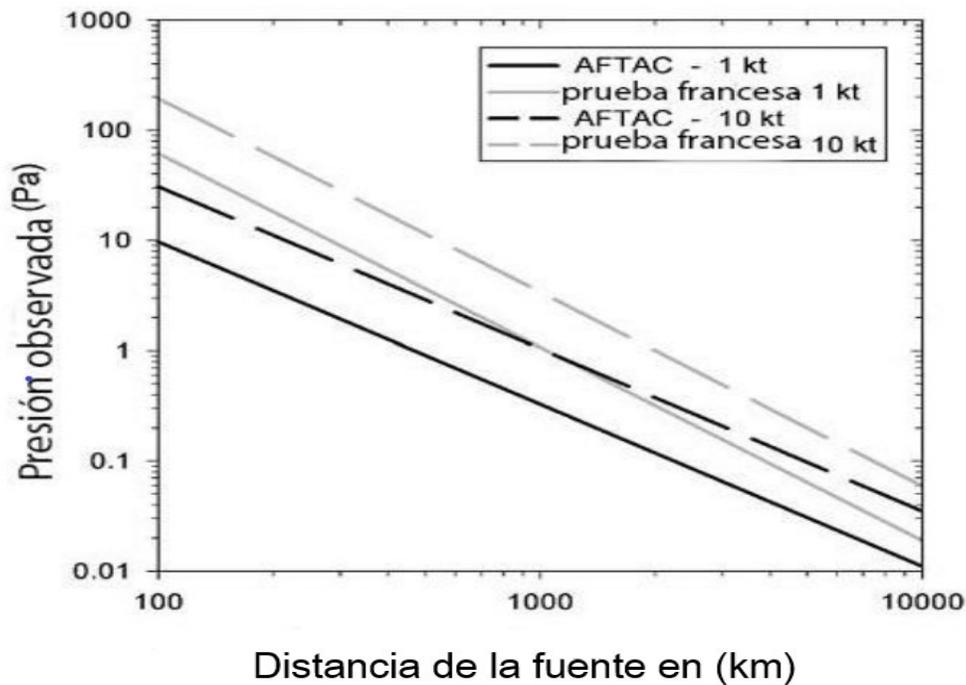


Figura 5.3. Comparación de la energía de infrasonido producido por explosiones nucleares calculada a partir de las ecuaciones obtenidas por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y por las Fuerzas Armadas de Francia (Edwards et al., 2006).

Posteriormente, Whitaker (1995), encontró una ecuación más general a partir de resultados obtenidos por el departamento de infrasonido del laboratorio de Los Álamos. La ecuación se ajusta mejor a los datos obtenidos de explosiones por diferentes tipos de explosivos del tipo ANFO:

$$\log E_s = 1.47 \log P_c + 2 \log R - 4.96 \quad (4)$$

donde P_c es la presión ajustada debido al viento en la zona de la explosión, esto implica que el viento, según su dirección, afecta el resultado obtenido. La presión se mide en todos los casos en Pascales, la distancia R se mide en km y la energía de la fuente E_s , en kilotones (kt) de TNT (Edwards et al., 2006).

5.1.1.1 Obtención de datos de infrasonido.

Los sensores ópticos, en el espectro visible e infrarrojo, localizados en satélites, así como la red de sensores de infrasonido (Figs. 5.2 y 5.4), son operados por el departamento de defensa y el departamento de energía DoD y DoE de EUA (Department of Defense y Department of Energy, respectivamente).



Figura 5.4. La imagen muestra una unidad de detección de infrasonido IS 39, Palau, 2 de Julio del 2005. Tomado de <https://www.ctbto.org>

Estos sensores registran de manera sistemática la localización y duración del evento, así como una estimación de la energía liberada por cuerpos planetarios a su paso por la atmósfera terrestre (Brown et al., 2002).

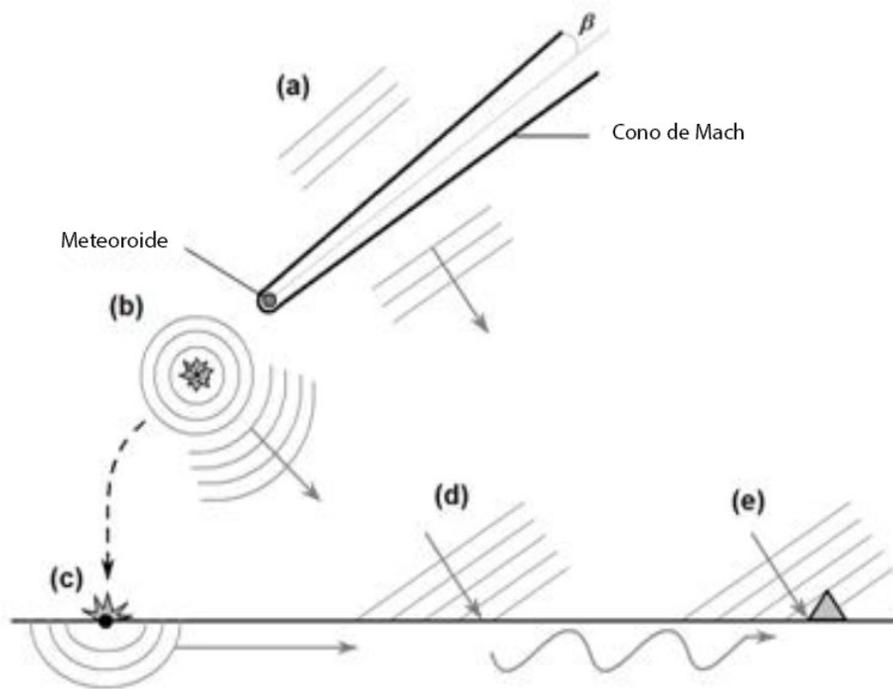


Figura 5.5. Diagrama de algunos fenómenos que ocurren debido a la interacción de un objeto cósmico con la atmósfera. Se observa la formación de ondas de infrasonido, así como los mecanismos de formación de ondas sísmicas. (a) generación de ondas de choque e infrasonido al ingresar a la atmósfera, (b) generación de ondas de choque durante la fragmentación del meteorite, (c) formación de ondas sísmicas durante el choque del objeto con el suelo, (d) formación de ondas sísmicas precursoras y (e) acoplamiento de la onda de choque con las ondas superficiales en la estación detectora de ondas sísmicas e infrasonido (Tapia et al., 2013).

Una vez que se tiene la ubicación geográfica del evento, se calcula el tiempo de arribo de la onda asociada, para lo cual se considera una velocidad promedio de entre 0.285 y 0.310 km/s, si el evento se produjo en la estratósfera, y de 0.220 a 0.260 km/s si éste se produjo en la termósfera (Cepolecha et al., 1998). La velocidad promedio de propagación de la onda se define como el cociente de la distancia de la zona de la explosión al sensor, entre el tiempo que tarda la onda en recorrer esa distancia; para ello se traza un círculo que tiene como centro el punto de la explosión y de radio la distancia entre ese punto y el sensor. El tiempo considerado es lo que tarda la señal en recorrer esa distancia. El radio es medido en kilómetros y el tiempo se mide en segundos (Fig. 5.5), (Edwards et al., 2006).

En el trabajo elaborado por Edwards y colaboradores (2006) se analizaron 31 bólidos detectados simultáneamente por sensores ópticos y de infrasonido, algunos de ellos fueron detectados en múltiples estaciones de detección de infrasonido distribuidas en todo el planeta. Para calcular la energía de cada bólido, utilizan la relación entre la energía óptica observada por el satélite y la eficiencia de la radiación obtenida por Brown y colaboradores (2002):

$$\tau_I = 0.1212E_{opt}^{0.115} \quad (5)$$

en donde τ_I es la eficiencia lumínica y E_{opt} es la energía, en kilotonnes de TNT (1 kt= 4.185×10^{12} J), observada por el satélite.

Una vez que la eficiencia de la radiación es obtenida, la energía cinética del objeto es calculada directamente a partir de la energía observada por el satélite, por medio de la ecuación:

$$E_s = E_{opt} / \tau_I \quad (6)$$

de donde la energía cinética del cuerpo, E_s , está dada en kt de TNT. Una vez que se calcula la energía del bólido se compara con los valores obtenidos por las otras estaciones de monitoreo de infrasonido.

Edwards y colaboradores (2006) establecen condiciones para poder tener un marco de comparación que sirva para determinar la energía liberada por otros eventos, para lo cual consideran que la fuente de la onda de infrasonido es producida por una fuente puntual lo cual es válido si:

1. El material asteroidal o cometario se fragmenta súbitamente en la atmósfera y,
2. La distancia entre la fuente y el receptor (rango), sea mayor que la traza del bólido, lo cual generalmente se cumple, ya que la distancia de separación entre las estaciones de infrasonido es generalmente del orden de 1000 km y la traza de un bólido raramente supera esa longitud.

También hacen la observación de que la mayoría de los bólidos detectados tienen energías iguales o menores a 1 kt (Fig.5.6).

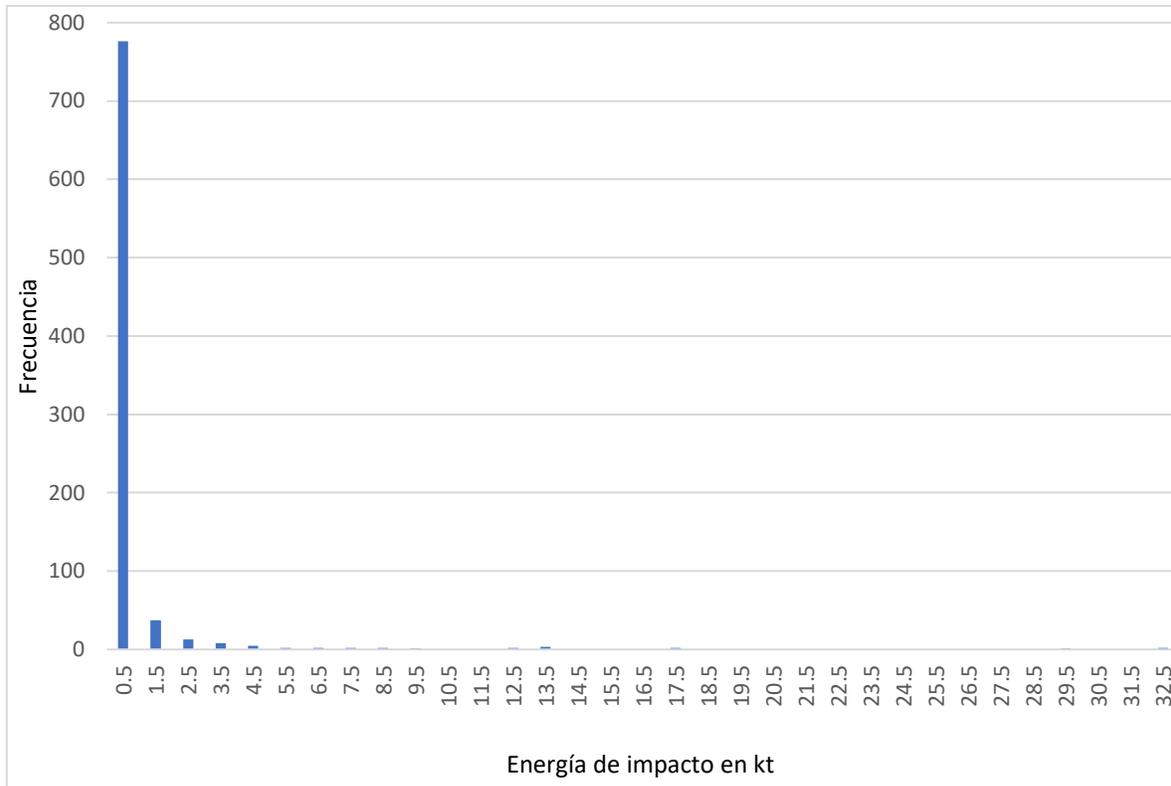


Figura 5.6. En esta gráfica se muestra la frecuencia de la energía de impacto para 858 de los 861 eventos publicados en la página de la NASA (febrero 4 del 2021), el 90% de los datos están por debajo de 1kt. (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>).

Dentro de la región inmediata a donde se produce la liberación de energía (explosión) la onda es altamente no lineal (onda de choque). Para describir esta región se considera a la zona de la explosión como una fuente puntual localizada a una cierta altura con una presión p_0 . Después de la explosión, la energía liberada (E_s) se distribuye en una esfera de radio R_B tal que

$$R_B = \left[\frac{3E_s}{4\pi p_0} \right]^{1/3} \quad (7)$$

Esta zona se conoce como la zona de explosión y es en la cual la onda de choque produce una sobrepresión no lineal. Más allá de esta zona la onda se propaga de manera lineal, es decir, la onda deja de ser una onda de choque. Como la sobrepresión inicial y el periodo fundamental de la onda dependen del valor de R_B , el factor de escalamiento depende

de la potencia $1/3$ (ec. 7). Este exponente aparece en explosiones de tipo puntual (Edwards et al., 2006).

La mayoría de la energía acústica producida por los cuerpos pequeños en su paso por la atmósfera se produce en una sección pequeña al final de la trayectoria luminosa y cuando el objeto ha llegado a zonas densas de la atmósfera; por lo cual, al ser observado el bólido desde lejos, se le puede considerar como una fuente puntual que es el caso de los bólidos analizados por Edwards y colaboradores (2006).

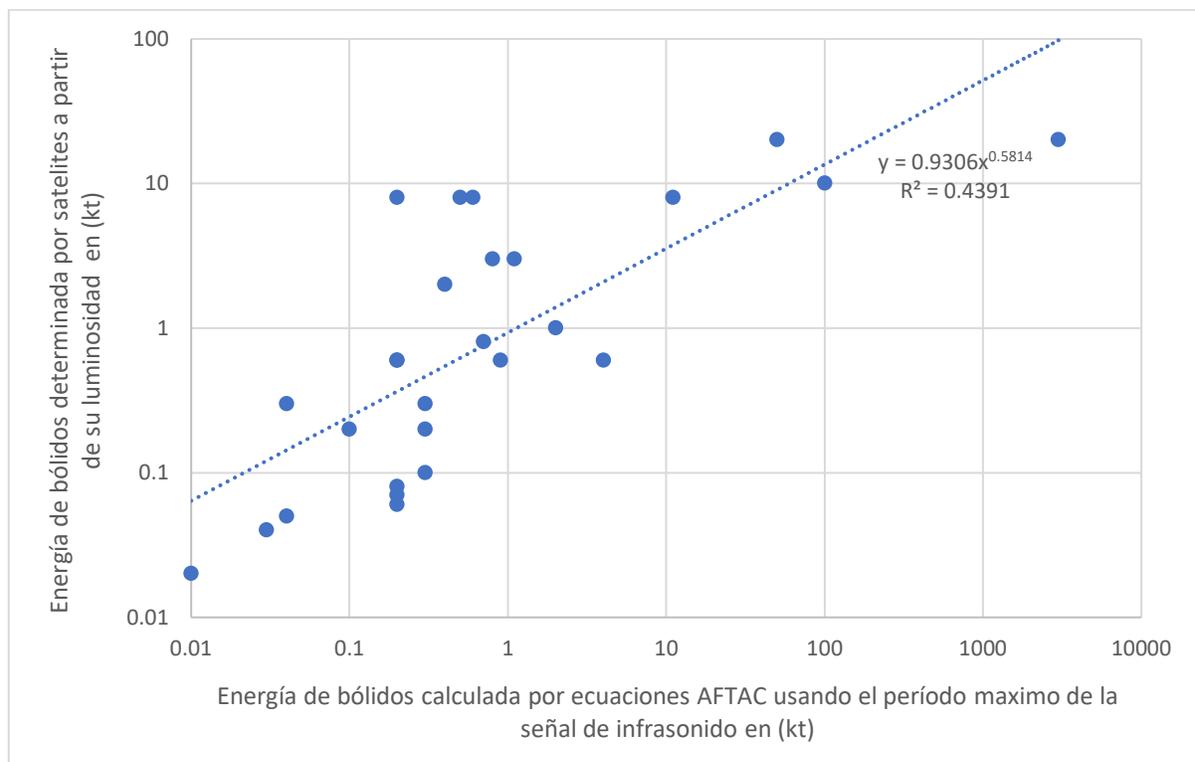


Figura 5.7. Energía de bólidos liberada por meteoroides al ingresar en la atmósfera. La gráfica compara la energía calculada de bólidos usando las ecuaciones desarrolladas por AFTAC y la energía óptica en (kt), calculada por satélites, la línea punteada corresponde a la línea de tendencia (Edwards et al., 2006).

Aunque el método desarrollado por Edwards y colaboradores permite calcular con precisión la energía de los cuerpos que interaccionan con la atmósfera, el número de datos disponibles es muy limitado, esto debido a la dificultad de las estaciones de infrasonido para

detectar los eventos asociados a un bólido. Conforme el número de datos recopilados vaya en aumento el método tomará relevancia (Fig. 5.7).

5.1.2 Determinación de la energía cinética de un meteoroido, asteroide o material cometario a partir de la eficiencia óptica medida por sensores ópticos en satélites en órbita.

El trabajo realizado por Brown y colaboradores (2002), se basa en la detección y medición de la eficiencia óptica medida a partir de datos obtenidos por los satélites militares; los cuales tienen la función de detectar explosiones nucleares en la Tierra y otros objetivos de tipo militar. Estos satélites son operados por los departamentos de energía y de defensa de los Estados Unidos de América.

Tabla 5.1. Datos utilizados por Brown y colaboradores (2002) para determinar una ecuación para calcular la eficiencia óptica de los bólidos.

Fecha	Tiempo (UT)	Localización (latitud, longitud)	Energía óptica (kt)	Energía calibrada (kt)	Método de detección
25/7/02	15:58	29°S, 47°E	0.060	0.060±0.020	Infrasonido
6/6/02	04:28	34°N, 21°E	0.908	25.77±2.16	Infrasonido
9/3/02	01:20	7°N, 147°W	0.053	1.05±0.79	Infrasonido
23/4/01	06:12	28°N, 134°W	1.100	0.63±0.33	Infrasonido
25/8/00	01:12	15°, 106°W	0.337	2.35±1.24	Infrasonido
6/5/00	11:52	50°N, 18°E	0.006	0.09± 0.04	Infrasonido/meteoritas
18/2/00	09:26	1°S, 109°E	0.860	3.89 ± 0.73	Infrasonido
18/1/00	16:43	60°N, 135°W	0.263	1.66 ± 0.70	Infrasonido/meteoritas/vel
16/8/99	05:18	35°N, 107°W	0.009	0.18 ± 0.03	Infrasonido
9/10/97	18:47	32°, 106°W	0.045	0.29	Infrasonido
15/6/94	00:03	46°, 73°W	0.003	0.03 ± 0.01	Meteorita/vel.
7/5/91	23:04	50°N, 15°E	0.012	0.19	Fotog. /vel.
-----	-----	-----	0.0007	0.0164	Fotog. /vel.

El trabajo busca encontrar una relación empírica para la eficiencia óptica (τ_1) de 300 meteoros detectados en un periodo de 8.5 años, particularmente para aquellas mediciones para las cuales se conoce la energía determinada por otros métodos, por ejemplo, a través de infrasonido. Estos datos fueron utilizados para deducir una ecuación que fue usada para calibrar la eficiencia óptica. El número de datos para los cuales se conoce la energía por métodos diferentes es de 13, los cuales se muestran en la Tabla 5.1.

Brown y colaboradores (2002) encuentran la relación empírica:

$$\tau_1 = (0.1212 \pm 0.0043)E_{\text{opt}}^{0.115 \pm 0.075} \quad (8)$$

en donde E_{opt} es la energía, en kilotones de TNT, observada por el satélite, la radiación se considera que es la de un cuerpo negro a 6000 K. Es a partir de esta ecuación que la NASA determina la energía de meteoros detectados desde abril de 1988 a febrero del 2019, los cuales se muestran en la figura 5.8. En este trabajo usamos esos datos para, a partir de ellos, poder establecer una definición de meteoroides en términos de su energía cinética; también calculamos el radio de los meteoroides que tienen esas energías.

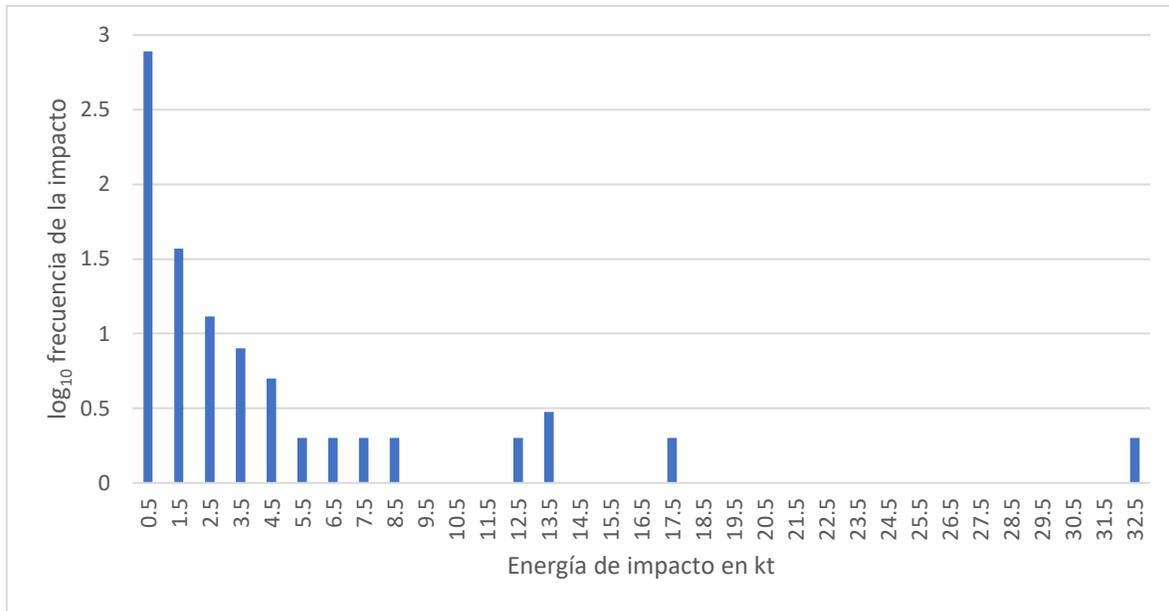


Figura 5.8. Logaritmo base 10 de la frecuencia de la energía de bólidos (en kt). La gráfica muestra la frecuencia de 861 bólidos y su energía equivalente en kt. Los datos se encuentran disponibles en la página de la NASA y abarcan el periodo comprendido entre el 15 de abril de 1988 y el 4 de febrero del 2021. (<http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>).

A partir de la figura 5.8 se observa que el 98.0% de los valores de energía cinética de los objetos cósmicos que entran a la atmósfera de la Tierra están por debajo de 7.3 kt que corresponde con una energía aproximada de 3.055×10^{13} J, por lo cual nuestra primera propuesta sería llamar “meteoroides” a un cuerpo de naturaleza asteroidal o cometaria cuya energía cinética sea menor a 7.3 kt. Si consideramos que dichos meteoroides son esféricos y que su densidad promedio es de $3,000 \text{ kg/m}^3$ (el cual corresponde a la densidad promedio entre condritas ordinarias $-3,400 \text{ kg/m}^3$ - y condritas carbonáceas, o carbonosas, $-2,600 \text{ kg/m}^3$ -), con una velocidad de entrada promedio de 20.3 km/s (Brown et al., 2002), entonces, esas energías corresponden a objetos con radios menores o iguales a 2.28 metros (lo redondearemos a 2.3 m) (Fig. 5.9).

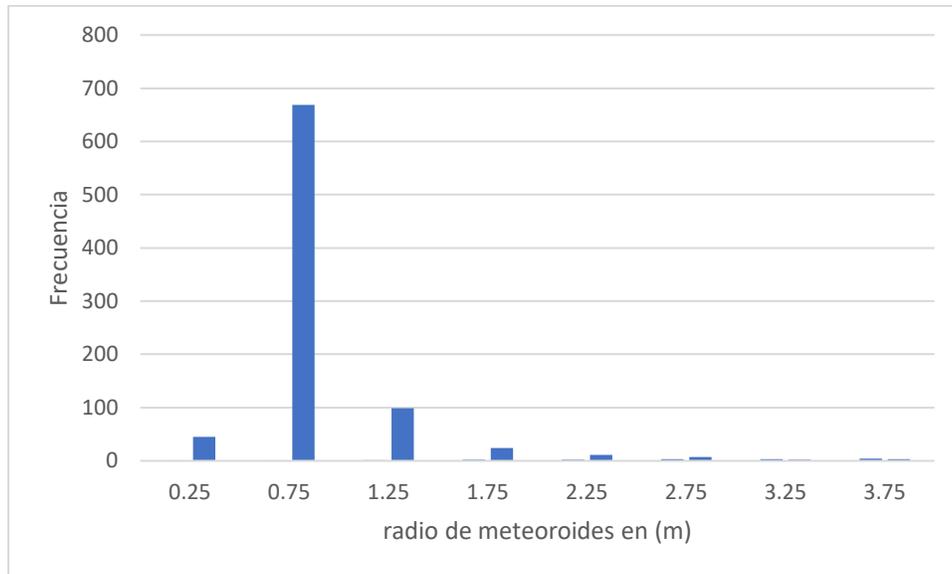


Figura 5.9. Frecuencia de meteoroides. La gráfica muestra el radio de los meteoroides calculados a partir de los datos de su energía cinética; considerando cuerpos esféricos con una densidad de $3,000 \text{ kg/m}^3$ y una velocidad de entrada de 20.3 km/s .

5.2 Efecto Yarkovsky

De acuerdo con varios investigadores, por ejemplo, Bottke (2005); Margot (2006) y Vokrouhlicky (2006). entre otros, el efecto Yarkovsky y el efecto YORP son algunas de las principales causas por las cuales algunos cuerpos del cinturón principal terminan en órbitas que pueden llegar a cruzar las de los planetas interiores y en algunos casos terminarán chocando con la atmósfera de la Tierra, de ahí el motivo de estudiar ambos efectos de manera breve en este trabajo de tesis.

Hasta mediados del siglo XX se creía que el movimiento de los asteroides estaba enteramente dominado por las fuerzas gravitacionales producidas por los cuerpos que conforman el sistema solar, así como por los ocasionales choques que ocurren entre ellos (Bottke, 2006).

En el año 1951, el astrónomo estoniano Ernst J. Opik recordó haber leído un escrito del Ingeniero Ivan Osipovich Yarkovsky quien, en un pequeño artículo, explicaba la importancia de la radiación solar en el movimiento de rotación de cuerpos pequeños como los asteroides, así como de cambios en sus órbitas (Bottke et al., 2005). Posteriormente, el

astrónomo ruso Radzieskii retomó la idea mientras que, en los Estados Unidos de América, el astrónomo Paddak (1969, 1973) y O'Keefe (1976), entre otros, demostraron los efectos y cambios producidos por la radiación solar en los movimientos de asteroides, así como la importancia que tienen esos cambios para llevar cuerpos pequeños, menores a 40 km, del cinturón de asteroides hacia órbitas internas del sistema solar. Se calcula que existen alrededor de un millón de objetos con diámetros mayores a 1 km, la mayoría de ellos ubicados en el cinturón principal de asteroides y que podrían ser afectados por la radiación solar (Bottke, 2006). Por otro lado, hasta el 27 de noviembre del 2020, había registrados 24,402 asteroides cercanos a la Tierra, de los cuales se calcula que solamente el 1% impactará con nuestro planeta, el resto impactará principalmente contra el Sol o será enviado hacia un encuentro con Júpiter (Bottke et al., 2006).

Por el trabajo de Bottke (2006) y de algunos otros astrónomos como Grieve y Schoemaker (1997), se piensa que ha existido una tasa constante de Objetos Cercanos a la Tierra en los últimos 3,000 millones de años, lo cual significa que debe de existir un mecanismo que surte de nuevos asteroides al sistema solar interior. Hasta antes de aceptarse el efecto YORP, se pensaba que el mecanismo que mantenía constante el número de NEAs era el de impactos entre asteroides, que enviaban “pedazos” de asteroide hacia el sistema solar interior, o bien un mecanismo de tipo gravitacional tal como la resonancia con Marte y Júpiter. Por otro lado, Bottke (1997) y Vokrouhlicky y colaboradores (2001) entre otros, piensan que estos mecanismos por sí solos no son suficientes para explicar la tasa constante de NEAs, por lo cual consideran al efecto Yarkovsky y al efecto YORP como una explicación plausible del mecanismo de reabastecimiento de NEAs.

El efecto Yarkovsky y el efecto YORP son producidos por la interacción de la radiación del Sol con la superficie irregular de los asteroides, es decir por fuerzas producidas por la radiación térmica, la cual provoca cambios en el semieje mayor de la órbita, así como en el momento angular de asteroides menores a 40 km; aunque, según Rubincam (1999), sólo afectan a cuerpos menores a 10 km. Las modificaciones sufridas debido a estas fuerzas dependen de la rotación y oblicuidad del objeto, así como de la composición del asteroide (Bottke et al, 2006).

La idea básica propuesta por Yarkovsky supone que el asteroide es esférico y que su órbita es circular alrededor del Sol, si tomamos el eje de rotación del asteroide como normal

al plano de su órbita, el Sol siempre ilumina el ecuador del asteroide, en este caso la parte iluminada irradia parte de la radiación recibida hacia el espacio, generalmente en el infrarrojo, a menos que el asteroide se encuentre muy cerca del Sol (Bottke et al., 2006).

Al abandonar el asteroide, los fotones infrarrojos producen un momento, $P=E/c$, donde P es el momento del fotón, E su energía y c la velocidad de la luz. La parte que recibe la luz solar emite más radiación que la parte a la sombra, lo que produce una fuerza neta sobre el asteroide que modifica su órbita. Esta fuerza, aunque pequeña, produce un efecto que es acumulativo. Aunado a lo anterior, la inercia térmica del material provoca que una fracción de la energía absorbida por el material sea liberada de manera paulatina en la parte del cuerpo que está a la sombra. La suma de los dos efectos produce una resultante cuya dirección dependerá de la dirección de rotación del asteroide. Si la rotación es en sentido de la órbita del cuerpo, (rotación prógrada), la fuerza neta resultante provocará un incremento en el eje mayor de la órbita del asteroide, alejándolo gradualmente del sol, en caso contrario, si el sentido de rotación es en dirección contraria (rotación retrógrada), a la dirección de movimiento del cuerpo a lo largo de su órbita, el empuje debido a la radiación que escapa provocará una órbita en espiral provocando que el asteroide se mueva en dirección al sol. A esto se le conoce como efecto Yarkovsky diurno (Figs. 5.10(a) y 5.11), (Bottke et al., 2006).

Existe también lo que se conoce como efecto Yarkovsky estacional. En este caso se considera que el eje de rotación es perpendicular a su plano orbital. En estas condiciones, ambos hemisferios reciben una radiación solar que varía a lo largo del año. Esto produce pequeñas perturbaciones cuya consecuencia es la disminución gradual del semieje de la órbita del asteroide (Fig. 5.10(b)) (Bottke et al., 2006).

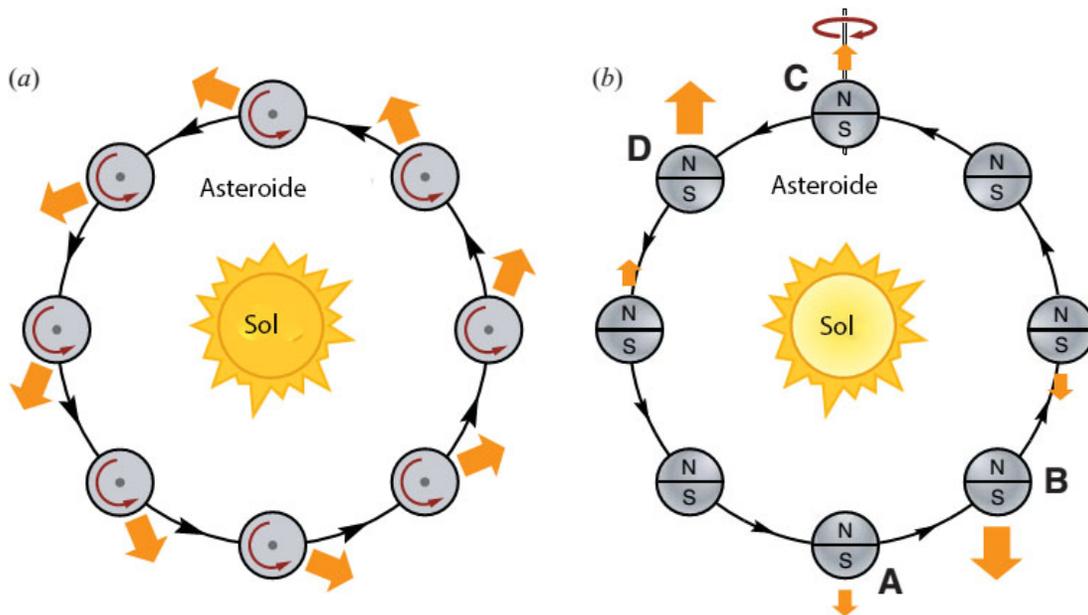


Figura. 5.10. (a) La figura muestra el efecto Yarkovsky diurno, en este caso el eje de rotación es perpendicular a la órbita del asteroide y la dirección de rotación es en el mismo sentido que la órbita del asteroide. Las flechas indican el empuje que experimenta el asteroide, en este caso la órbita del asteroide será una espiral hacia afuera provocando que se aleje del sol, en el caso que el sentido de rotación sea en dirección contraria a la órbita el resultado será una espiral que lo moverá en dirección al Sol, (b) la figura muestra el efecto estacional sobre un asteroide, en este caso el eje de rotación está en el plano orbital lo cual provoca un calentamiento de los hemisferios norte y sur lo que a su vez provoca un empuje neto en la dirección de su eje de rotación. Debido a la inercia térmica el máximo empuje se presenta en las posiciones B y D de la figura lo cual provoca que el asteroide se mueva en espiral hacia el Sol (Bottke et al.2006).

A diferencia del efecto diurno, el efecto estacional no depende de la dirección de rotación del asteroide, el efecto estacional depende de la proximidad del cuerpo al Sol, así como también de la inclinación del eje de rotación. Si el eje es perpendicular al plano de la órbita, el efecto desaparece (Bottke et al., 2006).

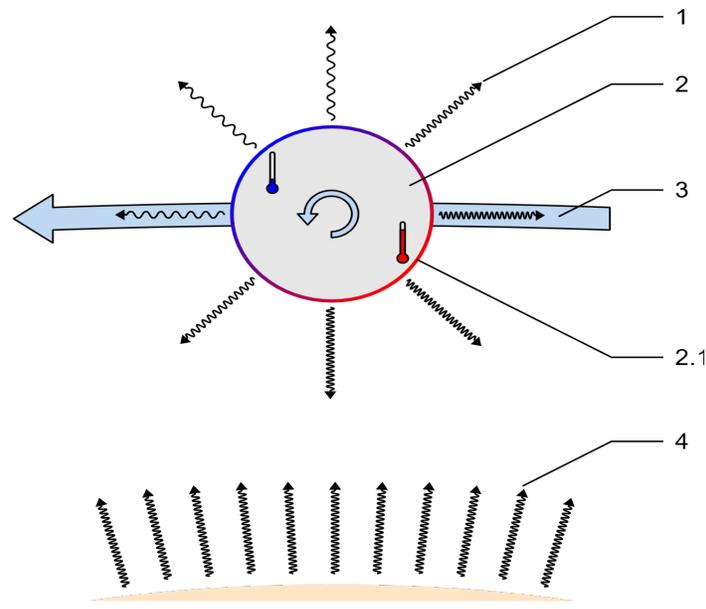


Figura 5.11. Efecto Yarkovsky diario 1.-Radiación desde la superficie del asteroide, 2.- Dirección de rotación del asteroide (antihorario), 2.1.- Posición de tarde, 3.- Dirección de la órbita del asteroide, 4.- Radiación solar. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4314576>.

5.3 Efecto YORP

Como se mencionó anteriormente, el efecto Yarkovsky y el efecto YORP tienen un mismo origen que es la reflexión y reemisión de la luz que llega a la superficie de un asteroide, la cual provoca un empuje muy pequeño pero acumulado a lo largo del tiempo. Este empuje puede ocasionar cambios en la rotación, oblicuidad y órbita de cuerpos pequeños del sistema solar. Según Rubincam (2000), aunque las colisiones entre asteroides pueden cambiar el eje de rotación de los objetos involucrados en el choque, el efecto YORP es el proceso más importante por el cual un asteroide reorienta su eje de rotación.

En el 2004, Rubincam utilizó un programa de computadora para modelar el efecto YORP. Para ello utilizó un asteroide de prueba esférico con dos cuñas fijas sobre su ecuador (Fig. 5.12). El asteroide se encontraba rotando y era un objeto Lambertiano (es decir que es un cuerpo cuya superficie refleja la misma cantidad de energía en todas direcciones). Lo que Rubincam encontró es que la energía que sale de manera perpendicular de la superficie del cuerpo no produce un empuje neto, no así las cuñas, las cuales, al no estar alineadas

simétricamente producen un empuje sobre el objeto, afectando tanto su velocidad de rotación como su oblicuidad. También encontró que si el cuerpo es simétrico no se presenta ninguna fuerza resultante.

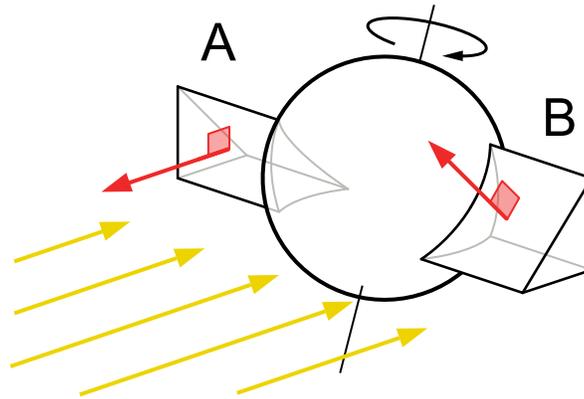


Figura 5.12. Asteroide esférico con dos cuñas desalineadas. La imagen muestra la energía que llega al asteroide y la radiación reemitida por las cuñas. La energía radiada por la cuña A es de la misma magnitud que la de la cuña B, pero al no ser paralelas producen un efecto neto en la rotación del cuerpo. Imagen tomada de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57923242>.

Según Bottke (2006), el efecto YORP puede modificar la oblicuidad de un asteroide de manera gradual de tal forma que el eje de rotación podría, en un momento dado, cambiar de signo y el cuerpo estaría rotando “de cabeza”. Este proceso se repetiría gradualmente evitando de esta manera que el asteroide se fragmente debido a una disminución en la tasa de rotación, a este proceso Bottke y colaboradores (2006) le nombran ciclo YORP.

Según el trabajo de Margot y colaboradores (2015), desde el sobrevuelo de la nave Galileo al asteroide Ida y el descubrimiento de su satélite Dactilo en 1993, el número detectado de asteroides binarios cercanos a la Tierra ha aumentado al cuádruple en la última década y al doble en los pertenecientes al cinturón principal de asteroides. De acuerdo con su trabajo, la posible explicación de la relativamente alta existencia de sistemas múltiples es que asteroides menores a 20 km se fisianan debido al efecto YORP (Luc-Margot, 2015; Bottke, 2006). En el caso de sistemas múltiples de asteroides con más de 20 km su formación se debe a colisiones.

El estudio de sistemas múltiples posibilita investigar propiedades y procesos que sería difícil de probar de otra manera, por ejemplo, la de determinar densidades y masas de otros cuerpos de características físicas similares. Algunos datos que se obtienen de su estudio son propiedades físicas, mecánicas y térmicas, así como la composición de la estructura interna, procesos de formación, acreción y evolución. Su estudio también permite calcular de manera confiable la masa y densidad de los cuerpos que forman parte del sistema múltiple (Margot, 2015).

Con excepción de los asteroides dobles síncronos (asteroides cuyo periodo de rotación es igual al periodo de traslación alrededor del cuerpo mayor, por lo cual, visto desde el cuerpo mayor, el asteroide más pequeño siempre presenta la misma cara tal como ocurre en el sistema Tierra – Luna), en todos los asteroides binarios conocidos, el asteroide primario, que es el cuerpo mayor de un sistema múltiple, rota muy rápidamente, apenas por debajo del punto crítico de disrupción. Esta característica no es propia de un sistema formado por un impacto catastrófico o por un sistema que atrape más objetos a través de interacción gravitatoria, por lo cual se consideran sistemas formados por fisión vía efecto YORP (Margot, 2015).

A partir de lo anterior proponemos que otra definición del término meteoroides sería que es todo cuerpo que presente el efecto YORP o en términos del efecto Yarkovsky a cualquier cuerpo que presente o sea afectado por el efecto Yarkovsky.

5.4 Riesgo de impacto

Como ya se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de que un cuerpo con la suficiente masa para ocasionar un daño global impacte la Tierra, por lo cual diferentes investigadores han calculado la probabilidad de que eso ocurra, por ejemplo, Schoemaker (1986) y Poveda y colaboradores (1999) entre otros. En esta sección analizamos el trabajo de Poveda y colaboradores (1999) en el cual se emplearon los 497 datos disponibles en el momento en el que se realizó el trabajo. Para el análisis de esta sección usamos los datos disponibles en la página de la NASA hasta el 31 de mayo, del 2020, fecha en la que estaban registrados 12,630 asteroides cercanos a la Tierra.

5.4.1 Determinación de la composición de los diferentes tipos taxonómicos de asteroides y la relación con su albedo.

La distribución de los asteroides que componen el cinturón principal ha sido objeto de numerosos estudios que abarcan desde conocer su número hasta tratar de entender su composición y evolución dinámica. En el presente trabajo, la importancia del cinturón principal estriba en que, de acuerdo con diferentes investigaciones, el origen de los NEAs está en el cinturón principal.

Los estudios realizados a través del tiempo se han enfocado en las características físicas de los asteroides tales como el número, masa, volumen, composición y ubicación de los objetos que conforman el cinturón principal. Otra característica estudiada ha sido el albedo, el cual se define como el porcentaje de la cantidad de luz reflejada por la superficie de un cuerpo respecto de la radiación incidente. Desde los años 80's se realizaron estudios espectrales y de la cantidad de luz reflejada por los asteroides, entre los que se encuentran los trabajos de Tholen (1984), Zellner y colaboradores (1985), Barucci y colaboradores (1987), Xu y colaboradores (1995), Bus y Binzel (2002), Lazzaro y colaboradores (2004) y DeMeo y Carry (2013).

De acuerdo con el trabajo de DeMeo y Carry (2013), en los trabajos previos, los resultados obtenidos presentan sesgos en la información, particularmente en la determinación del albedo, debido a que en las muestras están sobrerrepresentados los objetos más grandes o los más cercanos o brillantes pues éstos son más fáciles de detectar. En el trabajo desarrollado por DeMeo y Carry (2013), los autores analizaron los datos del catálogo de Objetos Móviles de Sloan Digital Sky Survey (SDSS), el cual es un proyecto de investigación del espacio iniciado en el año 2000, que consiste en tomar imágenes en el espectro visible y su corrimiento al rojo, a través de un telescopio de 2.5 m de diámetro, de ángulo amplio, ubicado en el observatorio de Apache Point en Nuevo México, EE. UU.

Para su trabajo, ellos analizaron los datos de más de 100,000 asteroides en cinco bandas fotométricas en el espectro visible. Estas bandas proporcionaron suficiente información para clasificar estos objetos taxonómicamente y, a partir de esta clasificación, corregir el sesgo de trabajos previos.

De acuerdo con DeMeo y Carry (2013), los anteriores trabajos sobre los tipos taxonómicos de asteroides se hicieron en función de la distancia, es decir su ubicación en el

cinturón principal o en las diferentes familias existentes. El problema con esto es que, a objetos de dos tamaños diferentes, 15 km y 500 km, por ejemplo, localizados a la misma distancia del Sol, se les agrupaba en la misma clasificación sin considerar sus propiedades intrínsecas, lo cual provoca errores en la estimación de la cantidad de material de cada clase, al darle la misma ponderación a cuerpos que difieren por un factor de dos en su diámetro y por seis ordenes de magnitud en su volumen. Otro argumento por el cual ellos deciden clasificar los asteroides con base en su masa y no en su número es, por ejemplo, el caso particular de Ceres cuya masa aproximada de 9×10^{20} kg, equivale a aproximadamente 1/3 de la masa total del cinturón de asteroides (30×10^{20} kg), por lo cual, si sólo se contabilizan los asteroides en términos numéricos, el peso de Ceres es de uno, pero si se contabiliza en términos de masa, equivale a un tercio del total. Además, de acuerdo con estos autores, por cada n cuerpos de diámetro D existen $10n$ cuerpos de la mitad de ese diámetro. Por lo anterior, ellos consideran que la mejor manera de analizar los asteroides es en términos de su masa.

DeMeo y Carry (2013) encontraron pequeñas diferencias en los porcentajes de las diferentes clases taxonómicas en relación a los trabajos previos, por ejemplo, hallaron una cantidad mayor de asteroides de la clase S en la familia de los Eos (el nombre de esta familia proviene del asteroide 221 Eos), también encontraron que algunos grupos taxonómicos habían sido clasificados de forma errónea, por ejemplo, el caso de los asteroides Hungaria para los cuales los autores encontraron que la mayoría de fragmentos pequeños ($H > 13$) habían sido catalogados como asteroides tipo C cuando en realidad son asteroides tipo E. Para el análisis de los datos dividieron el cinturón principal en tres regiones: la interna (la más cercana al sol, a 2 UA), la parte media (de 2.5 a 2.8 UA) y la parte externa (de 2.8 a 3.3 UA).

El resultado obtenido por DeMeo y Carry (2013), a partir del análisis de los trabajos previos y de los obtenidos a partir de los datos del telescopio SDSS (siglas para Sloan Digital Sky Survey), fue determinar el número esperado de asteroides que debería existir en cada intervalo de tamaño. Los autores lograron determinar la completez para las diferentes divisiones que realizaron en el cinturón principal (interno, medio y externo). Según esto, para el intervalo de magnitud absoluta comprendida entre 15 y 16 calcularon una completez del 100% en la parte interna, un 85% en la parte central y de un 60% en la parte externa. Los autores consideraron que para las familias Cibele, Hilda y Troianos; el grado de

incertidumbre en los datos era demasiado alto, además de representar un porcentaje muy pequeño de la masa total de los asteroides existentes, por lo cual no fueron considerados en las conclusiones.

DeMeo y Carry (2013) excluyeron objetos cercanos a la Tierra, cometas, centauros, objetos transneptunianos y cualquier otro objeto fuera de las zonas mencionadas. Uno de los resultados obtenidos es que los asteroides tipos S y C se alternan en capas en el cinturón de asteroides, dominando por número en todo el cinturón. También determinaron una masa total en el cinturón principal de 2.7×10^{21} kg lo cual está de acuerdo con resultados previos (ver por ejemplo Kuchynka et al., 2013; quienes determinaron una masa de 3.0×10^{21} kg). Otro resultado fue que, si eliminamos los cuatro cuerpos más masivos, las clases más masivas son C, P, S, B y M en orden decreciente. La masa de la clase C es seis veces la masa de la clase S, con Ceres e Hygeia eliminados, los tipos S son aproximadamente 1/6 y los tipos C 1/3 de su masa total combinada. En trabajos previos (Mothé-Diniz et al., 2003), se encontró que los tipos S están distribuidos de manera uniforme en el cinturón principal. DeMeo y Carry (2013) hallaron que un tercio de la masa de todos los tipos S está en el cinturón interno, la mitad está en el medio y el 15% de la masa está en el cinturón externo (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2. La masa total de cada zona es igual al 100%, en algunas zonas solamente se contabilizaron menos de 20 objetos de cada clase. Existe cierta incertidumbre para algunos tipos taxonómicos: A en todas las zonas, tipo B en Hildas, tipo C en Troyanos, los tipos D, K, L y S en Cibeles, los tipos V en la parte media y externa del cinturón principal y de los tipos X en la zona de Troyanos, DeMeo y Carry (2013).

Zona	A	B	C	D	K	L	S	V	E	M	P	Total
Hungaros	7	0	21	1	5	7	9	0	50	0	0	100
Interna	0	<1	6	<1	1	1	21	69	<1	1	<1	100
Media	<1	15	70	<1	1	1	8	0	<1	1	4	100
Externa	<1	13	52	1	2	1	5	0	<1	10	15	100
Cibeles	0	<1	13	2	<1	<1	1	0	0	<1	84	100
Hildas	0	0	14	15	0	<1	0	0	0	1	71	100
Troyanos	0	0	2	67	0	<1	0	0	0	4	26	100

¿Por qué es importante este resultado para el presente trabajo de tesis? La composición de cada cuerpo se estableció en las primeras etapas de la formación del sistema

solar cuando el número de asteroides aumentó debido a las colisiones entre sí. La evolución posterior del sistema solar pudo haber cambiado sus posiciones y reducido considerablemente su número (DeMeo y Carry, 2013). La dificultad actual para determinar con precisión si un objeto es de una clase taxonómica en particular es causada, en buena medida, por la dificultad para observarlos, esto se debe a diversos factores, entre ellos su tamaño y composición los cuales determinan la cantidad de luz que un cuerpo puede reflejar, es decir, su albedo. Los asteroides clasificados como clase taxonómica C tienen un albedo bajo, entre 0.03 y 0.09, mientras que los objetos clasificados como S tienen albedos entre 0.10 y 0.22, por lo cual son más fáciles de detectar. Los estudios de completitud se basan en el número de objetos que han sido observados para poder determinar, entre otras cosas, el número de objetos que falta por observar; su utilidad es, entre otras, determinar el riesgo de impacto de alguno de estos cuerpos con la superficie de la Tierra. Otro punto interesante es que la NASA propone la obtención de minerales de esos objetos. Por lo anterior, los estudios de completitud proporcionan una información valiosa respecto al número esperado de asteroides aún no descubiertos y su posible importancia económica.

En este trabajo de tesis se retoma el estudio de completitud realizado por Poveda y colaboradores (1999) y su consideración de que la proporción de objetos en las cercanías de la Tierra es de 70% de asteroides tipo S y 30% del tipo C; la cual coincide en cierta medida con el cálculo de la masa total presente en el cinturón principal realizado por DeMeo y Carry (2013). Lo anterior supone que los porcentajes de objetos tipo S y C es la misma para los NEAs que para el cinturón principal.

5.4.2 Completitud de la muestra de NEAs y probabilidad de impacto

La función de distribución de los diámetros de los NEAs permite conocer el proceso evolutivo que han experimentado los asteroides del cinturón principal y su posterior movilización hacia órbitas que cruzan la órbita de la Tierra. También es a partir de esa función que se puede determinar, entre otras cosas, la intensidad de la energía liberada en caso de un impacto con la Tierra, así como la frecuencia de esos impactos (Poveda et al., 1999). Según los datos de NEAs proporcionados por la NASA, hasta el 31 de agosto del 2020 se conocían 14758 NEAs de los cuales solo se conoce el diámetro de 899. Ese sesgo se debe

a la distancia y al tamaño de los asteroides, de ahí la importancia de deducir de manera estadística algunos datos.

Según Poveda y colaboradores (1999), la función de distribución acumulada de los diámetros de los NEAs, $N(\geq d)$, se puede obtener a partir de una función exponencial que representa la magnitud absoluta de los asteroides, la cual tiene la forma:

$$N(\leq H) \approx e^{\alpha H} \tag{9}$$

Siguiendo el mismo método de Poveda y colaboradores (1999), analizamos los 14758 datos mencionados (Figuras 5.13 y 5.14), de ahí se observa que la muestra está completa en el intervalo $14.4 \leq H \leq 18.4$ (tamaños aproximados entre 703 m y 4.4 km considerando un $p_v = 0.155$), y que la ecuación de la recta en este intervalo es:

$$\ln(N(\leq H)) = .8747H - 8.5441 \tag{10}$$

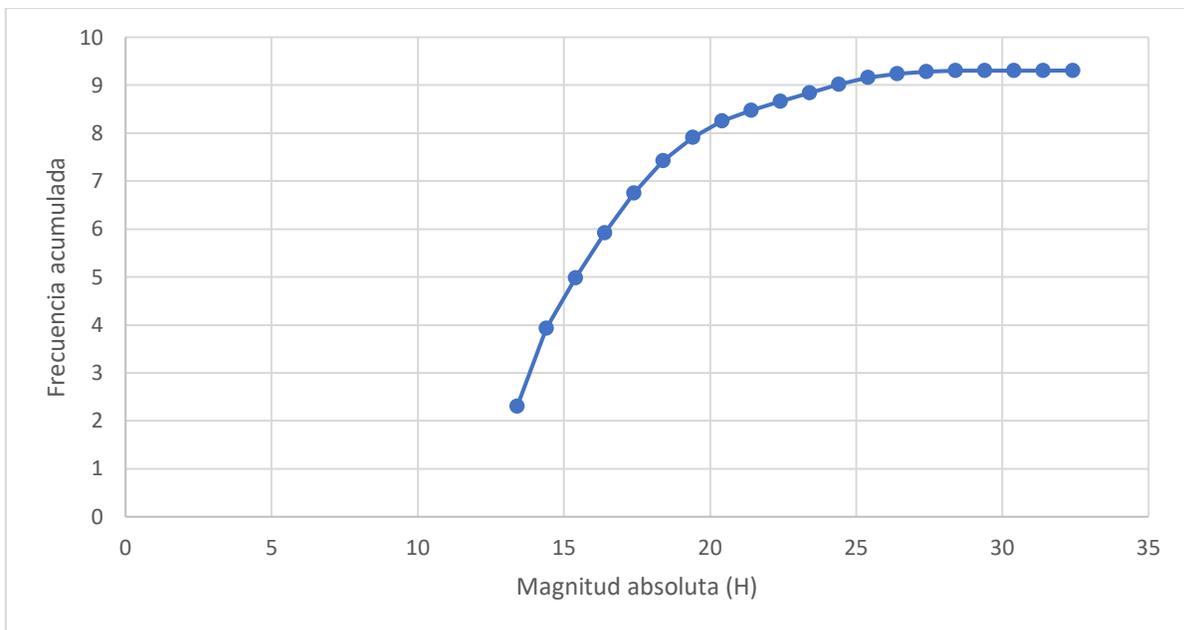


Figura 5.13. Relación entre la frecuencia acumulada y la magnitud absoluta de los NEAs. Los datos para construir esta gráfica fueron tomados de <http://cneos.jpl.nasa.gov/stats/total.html>.

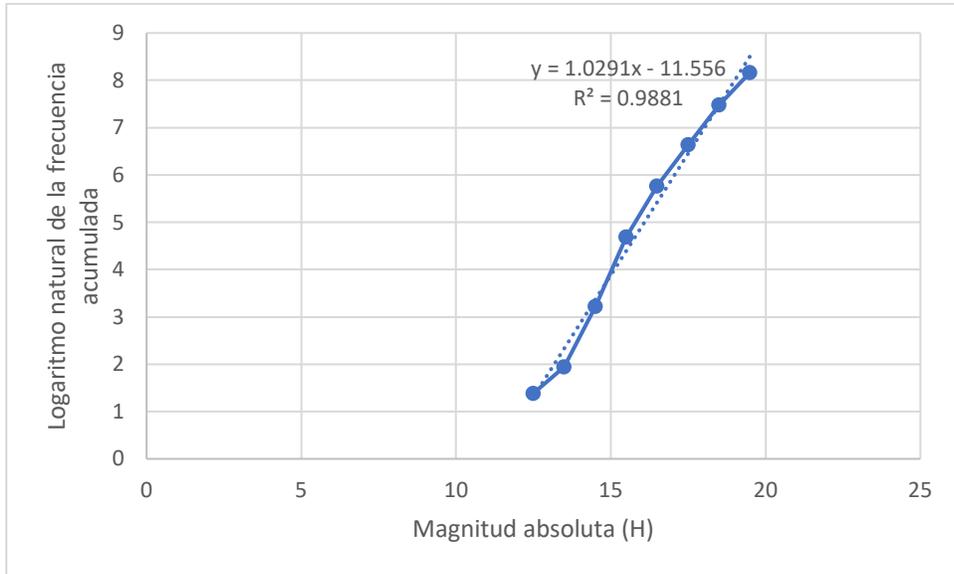


Figura 5.14. Relación entre el logaritmo natural de la frecuencia acumulada y la magnitud absoluta de los NEAs en el intervalo de completéz.

Sustituyendo (10) en (9), tenemos que

$$N(\leq H) \approx e^{1.0291H - 11.556} \quad (11)$$

haciendo

$$A = e^{-11.556}$$

tenemos que:

$$N(\leq H) \approx Ae^{1.0291H} \quad (10)$$

Usando una densidad y un albedo adecuados, en este caso se consideró un albedo de 0.151 que corresponde a asteroides del tipo S (por ser los más abundantes en los NEOs), y una densidad promedio de 2400 kg/m^3 (Poveda et al., 1996). A partir de esta ecuación es posible determinar la función de distribución de diámetros para los asteroides cercanos a la

Tierra. Para ello usamos la ecuación de Shoemaker (1986), la cual relaciona el diámetro, el albedo y la magnitud absoluta:

$$H = 30.61 - 5 \log d - 2.5 \log p_v \quad (12)$$

donde p_v es el albedo. Sustituyendo en (10) tenemos que:

$$N(\geq d) \approx A e^{1.0291(30.61 - 5 \log d - 2.5 \log p_v)} \quad (13)$$

de donde:

$$N(\geq d) = 3.6737 \times 10^9 d^{-2.2344} \quad (14)$$

Al igual que el momento en el cual Poveda y colaboradores realizaron su trabajo (1999), actualmente tampoco es posible determinar la proporción de asteroides tipo S o C, por lo cual Poveda y colaboradores (1999) consideran los siguientes casos:

- I. 50% de asteroides tipo S y 50% de tipo C
- II. 70% de asteroides tipo C y 30% del tipo S
- III. 70% de asteroides tipo S y 30% del tipo C

Con base en estas tres suposiciones, Poveda y colaboradores (1999) encuentran la función de distribución de diámetros de los asteroides cercanos a la Tierra.

Para el siguiente análisis se utiliza únicamente el valor del punto (III), ya que los asteroides tipo S representan alrededor del 70% de los asteroides que se encuentran a una distancia de 2.2 UA del Sol.

Siguiendo el trabajo de Poveda y coautores, se tiene que

$$N_{S+C}(d) = (1+\lambda) N(d) = (1+\lambda) B d^{-2.2344} \quad (15)$$

en donde haciendo

$$B = (1+\lambda) 3.6737 \times 10^9$$

$$\lambda = 0.3 / 0.7 = 0.428$$

$$B = (1+0.428) 3.6737 \times 10^9 = 6.6.794 \times 10^9$$

se obtiene que

$$N_{S+C}(d) = 6.6.794 \times 10^9 d^{-2.23} \quad (16)$$

Esta ecuación es la función de distribución de los NEAs, de acuerdo con ella, el número de NEAs con diámetros mayores o iguales a 1 km es de 1363, hasta el 25 de junio de 2020 el CNEOS de la NASA reporta 901 cuerpos de más de un kilómetro.

Resulta muy importante saber cuántos asteroides de diámetro igual o mayor a un kilómetro existen, así como su ubicación, debido a que, de presentarse un impacto de uno de ellos con la Tierra, habría repercusiones globales catastróficas.

Schoemaker (1990), estimó que la probabilidad media en el número de impactos por año con objetos cercanos a la Tierra es de $p = 4.2 \times 10^{-9} \text{ año}^{-1}$. A partir de ese dato, Poveda y colaboradores determinan la probabilidad de impacto anual usando la expresión:

$$F(\geq d) = p \int_d^{\infty} B d^{-\frac{7}{2}} d d = \frac{2}{5} p B d^{-\frac{5}{2}} \quad (17)$$

donde $B = 1.34 \times 10^{11}$, 9.57×10^{10} y 2.23×10^{11} para los casos I, II y III respectivamente.

Con la ecuación (17) Poveda y colaboradores (1999) calcularon la probabilidad de impacto para asteroides de diferentes diámetros, los valores calculados se muestran en la Tabla 5.3.

Aplicando la última ecuación, podemos calcular el número de impactos por año para ciertos diámetros de asteroides, tabla 5.3.

Si consideramos el límite superior para un meteoróide el de 1 m de diámetro (de acuerdo con la definición actual de la IAU), entonces tendríamos una frecuencia anual de impactos promedio de 15.56 con un tiempo medio entre impactos de 0.0427 años.

Tabla 5.3. Tiempo probable de impacto con la Tierra de un cuerpo asteroidal de igual o mayor tamaño a un diámetro dado. Comparación de los resultados de Poveda y colaboradores (1999) con los obtenidos en este trabajo.

Poveda y colaboradores (1999)				Presente trabajo			Evento Asociado
Diámetro de asteroides en (m)	50% tipo C 50% tipo S (años)	70%, tipo S 30% tipo C (años)	30% tipo S 70% Tipo C (años)	50% tipo C 50% tipo S (años)	70%, tipo S 30% tipo C (años)	30% tipo S 70% Tipo C (años)	
1	4.44×10^{-3}	6.23×10^3	2.67×10^{-3}	6.1×10^{-3}	8.55×10^{-3}	3.66×10^{-3}	Tunguska k/T limite
2.3	_____	_____	_____	2.22×10^{-2}	1.21×10^{-2}	5.1×10^{-3}	
10	1.41	1.97	8.44×10^{-1}	2.04	2.85	12.2×10^{-1}	
60	1.24×10^2	1.74×10^2	7.44×10^1	1.71×10^2	2.39×10^2	1.02×10^2	
100	4.44×10^2	6.23×10^2	2.67×10^2	6.12×10^2	8.55×10^2	3.66×10^2	
1000	1.41×10^5	1.97×10^5	8.44×10^4	1.937×10^5	2.708×10^5	11.58×10^4	
10,000	4.44×10^7	2.23×10^7	6.67×10^7	6.122×10^7	8.5×10^7	3.66×10^7	
15,000	1.22×10^8	1.72×10^8	7.35×10^7	1.686×10^8	2.357×10^8	10.08×10^7	

A partir de estos resultados es posible definir el término meteoroides en función de la probabilidad de impacto utilizando la estadística de la probabilidad de que un cuerpo de cierto diámetro choque con la Tierra. En este caso se podría tomar como referencia un tiempo similar al empleado para definir a los asteroides potencialmente peligrosos: 100 a 200 años aproximadamente. Este tiempo es similar al tiempo en el que, según nuestros cálculos, puede ocurrir un evento tipo Tunguska. Dicho evento causó una destrucción que, de haber caído sobre una ciudad, pudo haber causado un desastre considerable (Farinella, et al., 2001). Otra posibilidad sería considerar como meteoroides a los cuerpos que en la figura 5.14 presentan completitud, lo cual nos llevaría posiblemente a una definición que depende de la capacidad de observación, ya que conforme se vayan descubriendo nuevos cuerpos la zona de completitud cambiaría. En la sección 5.5. se discuten las posibles definiciones.

5.5. Discusión

El objetivo del presente trabajo fue proponer una nueva definición para el término “meteoroides”. Lo primero que se hizo fue revisar las diferentes definiciones para este término desde su aparición en el año 1865 hasta nuestros días, considerando los cambios que se han tenido a lo largo del tiempo. Posteriormente se analizaron algunos de los fenómenos físicos relacionados con este tipo de objetos y, a partir de esta información, se propusieron varias definiciones.

En esta sección se resumen las propuestas para la definición del término *meteoroides* a partir de los fenómenos estudiados en este capítulo. En la tabla 5.5 se presentan de manera resumida lo que a nuestra consideración son las ventajas y desventajas de proponer dichas definiciones y en la parte final proponemos una definición que consideramos la más adecuada para definir este término.

Definición del término meteoroides a partir de su energía cinética

Como ya se mencionó en la sección 5.1.1 y 5.1.2, actualmente es posible calcular la energía cinética de un cuerpo que ingresa a la atmósfera de la Tierra, ya sea a partir del

infrasonido generado o por la energía luminosa producida por un objeto debida a su interacción con la atmósfera.

En el caso de la energía cinética calculada a partir del infrasonido producido por un objeto a su paso por la atmósfera, lo que encontramos durante el desarrollo de esta tesis es que no hay muchos datos disponibles, de hecho, uno de los principales trabajos al respecto (Edwards et al., 2006), sólo utiliza un total de 31 eventos registrados durante el periodo de agosto 3 de 1963 (en un evento registrado en la isla Príncipe Edward), hasta el 2002 (ver sección 5.1.2). Una posible explicación para esto es que las estaciones de monitoreo, aun cuando son numerosas (hasta el 2018 eran alrededor de 40), fueron perdiendo relevancia con la aparición de los satélites artificiales.

En el caso de la eficiencia óptica producida por un cuerpo que se quema a su paso por la atmósfera encontramos que hasta el 27 de mayo del 2020 se habían registrado 834 bólidos. A partir de estos datos, se obtuvo que el 98 % de estos eventos se deben a objetos menores a 2.5 m de radio, razón por la cual proponemos a este valor como el límite superior que debe tener un objeto de naturaleza asteroidal para ser llamado meteoroides (ver sección 5.1.2).

Definición del término meteoroides en función del efecto Yarkovsky.

Como se vio en la sección 5.2, el efecto Yarkovsky es un mecanismo por medio del cual cuerpos del cinturón principal migran a órbitas en el Sistema Solar interior, poniendo a algunos de ellos en órbitas cercanas a la Tierra. El efecto se produce cuando un cuerpo es calentado por la luz solar provocando que su superficie reemita radiación de baja frecuencia, provocando con esto que el cuerpo se acerque o se aleje del Sol, dependiendo de su cercanía a éste, de su masa, ángulo de inclinación de su eje de rotación y composición, entre otros factores. Existe cierto consenso con respecto al diámetro que debe tener un cuerpo para experimentar este efecto. Bottke y colaboradores (2006), por ejemplo, sitúan este diámetro en un intervalo entre los 10 cm y los 40 km; para cuerpos por debajo del límite inferior, la luz solar calienta el cuerpo por completo por lo cual no se presenta este efecto. Para cuerpos mayores a 40 km el efecto es muy débil y no se produce una modificación en su órbita.

A partir de lo anterior, nuestra propuesta de definición es que cualquier cuerpo que presente cambios en su trayectoria debido a este fenómeno sea considerado un meteoroides.

Esta definición significaría todo un cambio en la definición actual, ya que como se vio en la sección 4.1 las definiciones actuales sitúan el límite superior de la definición en un metro.

Es importante remarcar que los límites anteriores no son considerados por Bottke y colaboradores (2006) como una posible definición del término meteoroides.

Definición en términos del efecto YORP

El efecto YORP es similar al efecto Yarkovsky, sólo que el primero considera la rotación de un cuerpo de forma irregular. Existen evidencias que permiten establecer con cierto grado de precisión el tamaño de los objetos que presentan este efecto, por ejemplo, Carbognani (2017) lo sitúa entre 10 cm y 20 km; por lo cual una posible definición sería establecer que un cuerpo es un meteoroides si su velocidad de rotación cambia debido al efecto YORP y se podría también decir que cuerpos entre 10 cm y 20 km son meteoroides, cuerpos por arriba de ese valor serían asteroides; por debajo de este valor serían considerados como centimeteoroides y por debajo de las 30 micras de diámetro micrometeoroides.

Definición en término de una probabilidad de impacto

El intento de definir el término meteoroides en función de la probabilidad de impacto presenta varias interrogantes: ¿de qué tamaño debe de ser el cuerpo? ¿depende de la composición química? ¿Se debe considerar un intervalo de tiempo?

En este sentido, proponemos que la definición debe ser lo más sencilla posible y estar en términos del daño que puede ocasionar a la vida e infraestructura de la Tierra. Ésta también debería estar en función del tiempo de vida de una persona o incluso de una civilización, pues lo que muestran los registros de cráteres de impacto en otros planetas es que las colisiones son un proceso presente a lo largo de la historia del sistema solar y es sólo cuestión de tiempo para que vuelva a ocurrir otro choque de un asteroide grande con la Tierra, lo que no sabemos es si será en 100 años o en 100 millones de años.

El evento “impresionante” más reciente fue el de Chelyábinsk, Rusia, en el 2013. Se calcula que el objeto que lo causó tenía un diámetro de alrededor de 17 m y que, de acuerdo con la agencia internacional para la prohibición de pruebas nucleares, CTBTO, por sus siglas en inglés, liberó en la atmósfera una energía de alrededor de 500 kt.

Actualmente, la NASA tiene catalogados 21 objetos con probabilidades de impactar con la Tierra en los próximos años. La Tabla 5.4 muestra los datos de estos objetos los cuales se actualizan conforme se determinan sus órbitas con más precisión. En la tabla se puede observar que hay 15 objetos de más de 15 m con probabilidad de impactar con la Tierra en los próximos 50 años. También hay un objeto de 14 m con una posibilidad de impacto en los próximos 32 a 99 años.

Tabla 5.4. Objetos detectados por la NASA con posibilidad de impactar con la Tierra en los próximos años. En la primera columna aparece la denominación del objeto, en la segunda el intervalo de tiempo estimado en el cual puede ocurrir el impacto, en la tercera el diámetro aproximado del cuerpo; en la cuarta y quinta columnas está el valor de estos cuerpos en las escalas de Palermo y de Turín respectivamente. Tomado de CNEOs, JPL NASA

Designación del objeto	Años probables del impacto	Diámetro del objeto (km)	Escala de Palermo	Escala de Turín
29075 (1950 DA)	2880	1.3	-1.42	
101955 Bennu (1999 RQ36)	2175-2199	0.49	-2.3	
99942 Apophis (2004 MN4)	2060-2105	0.37	-2.88	0
(2000 SG344)	2069-2113	0.037	-3.21	0
(2009 JF1)	2022-2022	0.013	-2.88	0
(2007 FT3)	2024-2116	0.34	-3.55	0
(2020 PG6)	2029-2048	0.013	-3.13	0
(2008 JL3)	2027-2119	0.029	-3.24	0
(2010 RF12)	2095-2119	0.007	-3.33	0
(2005 QK76)	2030-2107	0.031	-3.59	0
(2018 VP1)	2020-2025	0.002	-3.57	0
(1994 GK)	2051-2067	0.048	-3.63	0
(2005 ED224)	2023-2064	0.054	-3.64	0
(2008 UB7)	2048-2100	0.058	-4.3	0
(2000 SB45)	2074-2113	0.046	-4.22	0
(2017 US)	2085-2111	0.021	-4.03	0
(2012 HG2)	2052-2119	0.014	-4.26	0
(2012 QD8)	2042-2105	0.081	-3.9	0
(2007 DX40)	2030-2111	0.04	-4.22	0
(2008 EX5)	2061-2090	0.059	-4.14	0
(2013 VW13)	2071-2084	0.019	-4.07	0

Teniendo en mente lo anterior, es decir, el tamaño de los objetos que pueden chocar con la Tierra en los próximos 100 años y el tamaño de objetos que sabemos son capaces de provocar daños en Tierra (Chelyábinsk o Tunguska), proponemos que un meteoróide sea aquel cuerpo de naturaleza asteroidal o cometaria de menos de 15 m tal que no represente un riesgo para la población durante los próximos 100 años. De acuerdo con lo calculado en la sección 5.4.2 el tiempo medio entre impactos para un objeto de este tamaño es de casi 4 años.

Escala de Palermo

Una variante a esta definición sería la de incluir la probabilidad de impacto en función de la Escala de Palermo. De acuerdo con la página CNEOs de la NASA, en esta escala se clasifican y se consideran los efectos de un posible impacto entre un cuerpo planetario y la Tierra, en una escala logarítmica base 10. La escala de Palermo calcula el riesgo potencial del choque de un asteroide o núcleo cometario con la Tierra. Los valores obtenidos representan la probabilidad que tiene un objeto con una energía cinética dada de chocar con la Tierra en los próximos “n” años. Al riesgo promedio también se le conoce como riesgo o ruido de fondo y es el flujo habitual de cuerpos que impactan la Tierra. En esta escala, un valor -2 indica que el evento es solo 1% más probable de ocurrir que un evento aleatorio que se produzca en los años para los cuales se calculó la escala de Palermo de ese objeto. Valores menores a -2 corresponden a objetos que no representan un riesgo para la Tierra. Un valor de 0 significa que el objeto tiene tanta probabilidad de impacto como los objetos que habitualmente caen a la atmósfera terrestre. Valores entre -2 y 0 corresponden a objetos que no merecen atención y seguimiento. Un valor +2 indica que un objeto tiene una probabilidad 100 veces mayor que el riesgo medio.

Los valores en la escala de Palermo, PS, están dados por la expresión:

$$PS = \log_{10} R$$

en donde R, el riesgo relativo, está dado por:

$$R = P_1 / (f_B \times DT)$$

aquí, P_I es la probabilidad de impacto, DT es el tiempo hasta el evento potencial, medido en años, y f_B es la frecuencia anual de impactos con una energía E (en megatonnes de TNT)

$$f_B = 0.03 \times E^{-4/5}$$

A partir de lo anterior podemos entonces definir como meteoróide a cualquier cuerpo cuyo valor en la Escala de Palermo sea menor o igual a -2, es decir, un objeto que no represente un riesgo para los seres humanos. Nótese que la definición es independiente del diámetro del cuerpo, es decir, un meteoróide se define por el daño que pueda o no hacer y no por su tamaño. En este sentido, un objeto de 1 km puede ser un meteoróide, pero no uno de 50 m si este último está en ruta de colisión con la Tierra.

Definición en términos de la escala de Turín

La escala de Turín fue creada por Richard Binzel en 1995, y adoptada en 1999 en Turín Italia durante una conferencia de la Unión Astronómica Internacional. En 2005, Binzel y colaboradores presentaron una nueva versión, que es la que se considera para establecer nuestra definición.

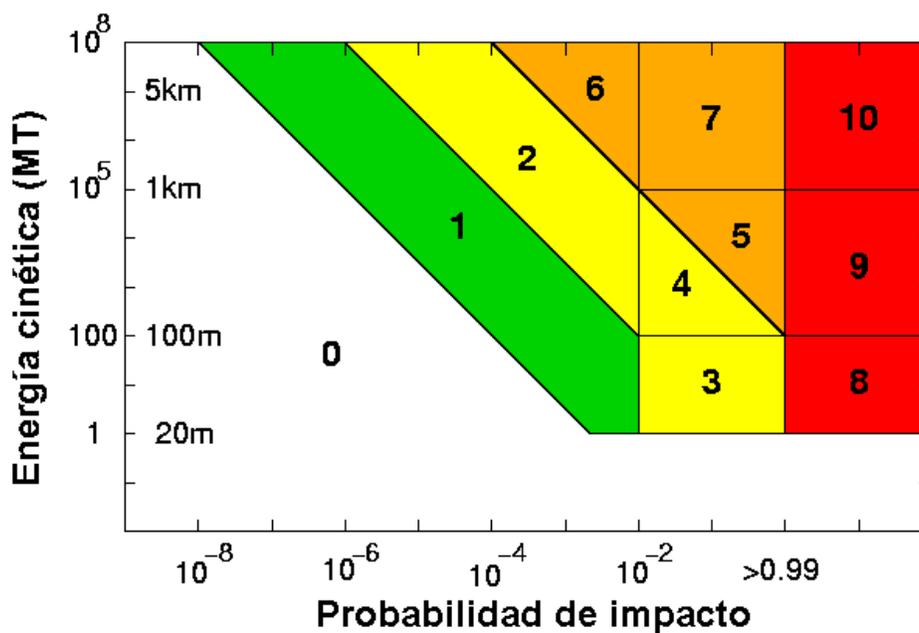


Figura 5.15. Escala de Turín. El eje horizontal establece la probabilidad de impacto, el eje vertical la energía cinética del cuerpo y su diámetro. Tomada de Binzel y colaboradores (2005).

La escala de Turín es numérica y esta graduada en valores enteros del 0 a 10, en donde cada valor describe la peligrosidad y la probabilidad de impacto. Es una escala pensada para dar a conocer la probabilidad de un impacto y el daño posible asociado al evento. Las figuras 5.15 y 5.16 muestran la escala de Turín y la descripción de sus colores, respectivamente. Las escalas de Palermo y de Turín tiene una relación entre ellas similar a las escalas de Richter y Mercalli en sismología, pues Palermo y Richter se basan en cálculos de parámetros físicos de los fenómenos, mientras que Turín y Mercalli se relacionan con los daños causados por el evento.

Zona blanca (ningún peligro)

0	La probabilidad de colisión es cero, o tan baja que es prácticamente cero. Se aplica también a objetos pequeños que se desintegran a su paso por la atmósfera, o que raramente caen a la Tierra en forma de meteorito, y sólo excepcionalmente pueden causar daños de algún tipo.
---	---

Normal Zona verde

1	Las observaciones ocasionales pueden descubrir el paso cerca de la Tierra de objetos que tienen un cierto peligro de colisión. Los cálculos y análisis realizados muestran que las probabilidades de colisión son extremadamente bajas y no merecen mucha atención y preocupación entre la gente. Con casi total probabilidad, las nuevas observaciones que se hagan llevarán a una reasignación al nivel 0.
---	--

Merecedores de atención por parte de los astrónomos (zona amarilla)

2	Colisión muy improbable de un objeto que lleva una trayectoria cercana a la Tierra. Merece la atención de los astrónomos, pero no hay motivo de preocupación por parte de la población, ya que el riesgo no es muy probable. Las nuevas observaciones pueden reasignar el riesgo al nivel 0.
3	Encuentro cercano, merecedor de atención por parte de los astrónomos. Los cálculos indican una probabilidad de colisión de hasta un 1%, capaz de causar destrucción a nivel local. Muy probablemente, las nuevas y más precisas observaciones reconduzcan el peligro al nivel 0. Será necesaria la atención del público y de las autoridades sobre todo si el riesgo de colisión está a menos de 10 años.

4	Encuentro cercano, merecedor de atención por parte de los astrónomos. Los cálculos indican una probabilidad de colisión de más de un 1%, capaz de causar devastación a nivel regional. Muy probablemente las nuevas observaciones reasignarán el nivel de peligro a 0. Será necesaria la atención del público y de las autoridades sobre todo si el riesgo de colisión está a menos de 10 años.
----------	---

Acontecimientos preocupantes (zona naranja)

5	Encuentro cercano con un objeto que supone una amenaza seria, pero todavía incierta, de devastación regional. La atención crítica de los astrónomos es necesaria para determinar si existe o no la posibilidad de un choque. Si la colisión está prevista para menos de 10 años, deben considerarse medidas gubernamentales de urgencia.
6	Encuentro cercano con un gran objeto que supone una amenaza seria, pero todavía incierta, de una catástrofe global. La atención crítica de los astrónomos es necesaria para determinar si existe o no la posibilidad de un choque. Si la colisión está prevista para menos de 30 años, deben considerarse medidas gubernamentales de urgencia.
7	Encuentro muy cercano con un gran objeto, que, si ocurriera en el mismo siglo, supondría una amenaza sin precedentes, pero todavía incierta, de catástrofe global. En estos casos, deben planificarse medidas internacionales, y especialmente la necesidad de determinar rápidamente y con la mayor certeza posible si la colisión tendrá lugar o no.

Colisión segura (zona roja)

8	La colisión es segura, y con capacidad para causar destrucción localizada si impacta en tierra o un tsunami si impacta en el mar. Tales acontecimientos se presentan de media entre una vez cada 50 años y una vez cada varios miles de años.
9	La colisión es segura, y con capacidad para causar destrucción regional sin precedentes si impacta en tierra o un tsunami devastador si lo hace en el mar. Tales acontecimientos se presentan de media entre una vez cada 10.000 años y una vez cada 100.000 años
10	La colisión es segura, y con capacidad para causar una catástrofe climática global que pueda amenazar el futuro de la civilización tal como la conocemos impacte donde impacte, en tierra o en el océano. Tales acontecimientos se presentan de media una vez cada 100.000 años o más.

Figura 5.16. Descripción de la Escala de Turín. Tomada de Binzel y colaboradores (2005).

Una definición del término meteoroide, basada en la escala de Turín, debería de considerar no solo la probabilidad de impacto, si no el daño asociado al evento. En este caso sí es necesario tomar en cuenta el diámetro del cuerpo. De nuevo, consideramos el tamaño de un objeto capaz de causar daños en la población en tiempos históricos (Chelyábinsk) y decimos que un meteoroide es un objeto de naturaleza asteroidal o cometaria con diámetro menor a 20 m (tamaño mínimo de los cuerpos en la escala de Turín con una energía asociada de 1 Mt) y que su valor en la escala de Turín sea 0 o 1. En otras palabras, un meteoroide sería un cuerpo que no representa un peligro apreciable en caso de que choque con nuestro planeta. En la tabla 5.5 se presenta un resumen de las diferentes definiciones propuestas en este trabajo, así como las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 5.5. Esta tabla resume las diferentes propuestas de definición del término meteoroides, comenzando por la definición actual de la IAU, así como las ventajas y desventajas de estas.

Criterio tomado para proponer la definición	Propuesta de definición del término meteoroides	Ventajas	Desventajas
Definición actual propuesta por la XXII asamblea de la IAU	"Es un objeto natural sólido de un tamaño entre 30 micrómetros y un metro, que se mueve en o desde el espacio interplanetario"	Establece un intervalo definido para el tamaño del objeto	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la capacidad de observación y detección • El límite inferior depende de la producción de meteoros lo cual depende a su vez de propiedades físicas del objeto no conocidas, como por ejemplo densidad, masa, etc.
Energía cinética obtenida a partir de la eficiencia óptica producida por un cuerpo que interacciona con la atmósfera	cuerpo de naturaleza asteroidal o cometaria capaz de producir un meteorito y cuya energía cinética sea menor a 7.3 kt (30.54×10^{12} J)	Existe una amplia cobertura de satélites de observación óptica alrededor del planeta, esto por el interés de monitorear pruebas nucleares	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo se puede decir que el cuerpo que interactuó con la atmósfera de la Tierra era o no un meteorito hasta el momento posterior a su entrada, es decir, no sería posible establecer que es un meteorito mientras el cuerpo esté en el espacio • La liberación de energía depende de la composición del cuerpo y de su velocidad, es decir no todos los objetos con igual diámetro liberan la misma cantidad de energía • Dependen de la sensibilidad de los equipos ópticos montados en los satélites

Criterio tomado para proponer la definición	Propuesta de definición del término meteoroides	Ventajas	Desventajas
Tamaño más probable de objetos que entran a la Tierra	Cualquier cuerpo que se encuentre entre las 30 micras y hasta 2.5 m de radio. Por arriba de este valor se denominará asteroide y por debajo de las 30 micras será considerado un micrometeoroides	<ul style="list-style-type: none"> • Nos da un límite superior fijo independientemente del instrumento de observación • Nos habla de un objeto típico que entra a la atmósfera de la Tierra y que no representa un peligro para la población 	El límite superior se obtuvo a partir de suponer una densidad promedio para estos objetos.
Efecto Yarkovsky	Se definirá como meteoroides a cualquier cuerpo que sea afectado por el efecto Yarkovsky. De acuerdo con diferentes autores, el diámetro de estos cuerpos estaría entre los 10 cm y los 40 km	Nos da un límite superior e inferior fijos independientemente del instrumento de observación	La identificación depende del albedo
Efecto YORP	Se definirá como meteoroides a cualquier cuerpo que sea afectado por el efecto YORP. De acuerdo con diferentes autores, el diámetro de estos cuerpos estaría entre los 10 cm y los 20 km	Proporciona límites inferior y superior fijos independientemente del instrumento de observación	Requiere de periodos largos de observación, en ocasiones de semanas o meses
Completez	Un meteoroides es aquel objeto más pequeño que el límite inferior del intervalo de completez de los NEAs (≈ 703 m para un albedo $p_v=0.155$) y mayor a 30 micras	Proporciona límites inferior y superior fijos	De nuevo depende del instrumento de medición y del tiempo de observación pues la completez se correrá a diámetros menores, conforme se tengan más y mejores datos

Criterio tomado para proponer la definición	Propuesta de definición del término meteoroide	Ventajas	Desventajas
Riesgo para la sociedad	Se define como meteoroide a cualquier objeto que no produzca daños a la infraestructura y a las personas. Valor 0 en la escala de Turín	Ventaja operativa: si no hace daño es un meteoroide	No hay relación con un parámetro físico del objeto porque puede ser tan pequeño como un metro o tan grande como 5 km

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo fue proponer una definición para el término meteoroide.

En la vida cotidiana, y particularmente en ciencia, es importante definir claramente palabras y conceptos. Dichas palabras y conceptos pueden ser entendidos de diferente manera dependiendo del contexto social, cultural o académico. Por ejemplo, la palabra “trabajo” tiene distintas connotaciones en un libro de texto que hable de mecánica que en un libro de economía marxista. En ambos contextos lo que se entiende por “trabajo” depende del criterio de definición. En este sentido, en este trabajo se propusieron varios criterios para definir el término, *metoroide*, cuyo significado no está bien delimitado incluso entre los científicos que habitualmente lo utilizan.

En este trabajo se propusieron varios criterios para elaborar una nueva definición del término meteoroide:

- 1.- Energía cinética
- 2.- Tamaño más probable de objetos que caen a la Tierra
- 3.- Efecto Yarkovsky
- 4.- Efecto YORP
- 5.- Completez
- 6.- Riesgo para la sociedad

Como se discutió anteriormente, consideramos que los dos primeros criterios de la lista anterior son los más adecuados para definir el termino meteoroide. De hecho, el segundo criterio se obtuvo a partir del primer criterio y de la frecuencia con la que estos objetos entran a la atmósfera de la Tierra.

Entonces, un meteoroide podría definirse de alguna de las siguientes dos maneras:

1.- Cuerpo de naturaleza asteroidal o cometaria capaz de producir un meteoro y cuya energía cinética sea menor a 7.3kt (30.54×10^{12} J).

2.- Cuerpo de naturaleza asteroidal o cometaria que se encuentre entre las 30 micras y hasta un radio de 2.5 m. Por arriba de este valor se denominará asteroide y por debajo de las 30 micras será considerado un micrometeoroide.

Como se vio en la sección 5.1.2 el tamaño propuesto en la segunda definición es una consecuencia del límite de energía mencionado en la primera definición; y en el fondo de ambas definiciones está presente la idea de considerar a los objetos más probables de impactar contra la Tierra. Aunque la NASA tiene instrumentos capaces de detectar y medir la energía cinética de los objetos que chocan con nuestro planeta no tiene la cobertura suficiente para captarlos todos y no siempre vamos a saber la energía de los objetos que entran, razón por la cual la segunda definición puede ser mejor pues contempla a los cuerpos que más comúnmente chocan con nuestro planeta y da límites definidos de sus tamaños sin importar los instrumentos de observación.

Pensamos que la discusión para encontrar una definición consensuada del término meteoroides continuará pues, como ya se discutió, depende del criterio que se elija, y éste a su vez depende de qué factores se consideren importantes y desde qué disciplina se quiera definir (ciertamente la visión de un astrónomo y de un geofísico, por ejemplo, no es la misma) y de si se van a emplear los parámetros físicos del objeto o instrumentos de observación, como se ha venido haciendo hasta el momento. Otra opción, ya mencionada anteriormente, es que simplemente desaparezca el término meteoroides y se hable de asteroides o núcleos cometarios. En cualquier caso, esperamos que el presente trabajo contribuya a la discusión.

Referencias

Referencias bibliográficas

- Barnes-Svarney P., Asteroid, Earth Destroyer or New Frontier? *Plenium Press New York and London*, 2006.
- Beech M., Steel D., On The definition of the Term Meteoroid, *astr. Soc*, 36:281-284, 1996.
- Binzel R. P., Bus J. S., Burbine T. H., Size dependence of asteroid spectral properties: SMASS results for near Earth and main belt asteroids, In *Lunar and Planetary Science XXIX*, abstract 1222, 1998.
- Binzel R. P., Bus J. S., Small Main Belt Asteroid Spectroscopy Survey: A feature-based Taxonomy, *Icarus*, 158, 2002.
- Binzel R. P., Chapman C. R., Steell D., Morrison D., Impacts and The Public Communication and the Nature of the Impact Hazard in Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids, *Cambridge University Press*, 2005.
- Blanc E., Millies L., Detection of Nuclear Explosions in the Atmosphere, *Chocs* 17:23-34, 1997.
- Borovicka J. About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms, *The Journal of the IMO* 44 (2), 2016.
- Borovička, J.; Spurný, P.; Brown, P.; Wiegert, P.; Kalenda, P.; Clark, D.; Shrubený, L. The trajectory, structure, and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature* 503 (7475): 235-237, 2013.
- Bottke William F., Vrokoulicky D., Rubincam D. P., and Nesvorny D., The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroids dynamics, *The annual review of Earth and Planetary Science*, 2006.
- Britt D. T., Lebofsky L. A., Asteroids Encyclopedia of the Solar System, *Academy Press* 585-605, 1999.
- Bronshten V. A., Physics of meteoric phenomena, *Riedell Dordrecht*, 1981.
- Brown P. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503, 238-241, 2013.
- Brown P., Spalding R.E., Revelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*, 420, 294-296, 2002.
- Burbine, T. H. Asteroids. Astronomical and geological bodies. *Cambridge University Press, Reino Unido*, 2017.
- Ceplecha Z., Borovicka, Elford G., Revelle D., Hawkes R., Porubcan V., Simek M., *Meteor Phenomena and Bodies Space Science Reviews* 84:327-471, 1998.
- Cordero M. G., Lara A., Maravilla M. D., Mendoza B. E., Valdés J. F., Velasco V. M., *Introducción a la física espacial*, UNAM, 2013.

- Davis Andrew M., Treatise of Geochemistry, vol. 1, Meteoric, Comets and Planets, *Elsevier*, 2002.
- Davidson M., Whitacker R. W., Miser's Gold LA 12074-MS, Los Alamos National Laboratory Report, pp.1-28, 1992
- Demeo F. E., Carry B. The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys, *Icarus*, **226**, 723–741, 2013.
- Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O., Estimates of meteoroid kinetic energies from observation of infrasonic airwaves. *Journal of atmospheric and solar terrestrial physics*, **68**, 1136-1160, 2006.
- Faure, G. y Mensing, T.M., *Introduction to Planetary Science*, Springer, Holanda, 2007.
- Farinella, P., L. Foschini, Ch. Froeschlé, R. Gonczi, T.J. Jopek, G. Longo y P. Michel. Probable asteroidal origin of the Tunguska Cosmic Body. *Astronomy and Astrophysics*, 377, 1081-1097, 2001.
- Fodera S. G., Manara A., Sicoli P. Giuseppe Piazzzi and the discovery of Ceres, en Asteroids III, *The University of Arizona Press.*, 2002.
- Glasstone S., Dolan P., The Effects of Nuclear Weapons, United States Department of Defense and Department of Energy, 1977.
- Golitzyn G. S., Grigor'ev G. I., Dokuchayev V. P., 1977. Generation of acoustic-gravity waves by meteor motion in the atmosphere. *Ivestiya* 13, 633-639
- Herschel W., Observations on the two lately discovered celestial bodies, *Philosophical Transactions of The Royal Society of London*, 92 213-232, 1802.
- Hoskin M., Bode's Law and the discovery of Ceres, *Astrophysics and Space Science*, **183**, 21-33, 1993.
- Hsieh H. H., Asteroid- Comet Continuum Objects in the Solar System, *Royal Society Publishing. Org.*, 2016.
- Johnson T. V. y Fanale F.P. Optical properties of carbonaceous chondrites and their relationship to asteroids, *JGR*, **78**, 8507-8518, 1973.
- Kavelaars J. J. The Canada- France Ecliptic Plane Survey L3- Data Release: The Orbital Structure of The Kuiper Belt. *The Astronomical Journal* ,**137**, 4917- 4935, 2009.
- Kuchynka P., Folkner W. N., 2013, A new approach to determining asteroid masses from planetary range measurements. *Icarus* 222 (January), 243-253
- Lang K. R., The Cambridge guide to the Solar System, *Cambridge, Reino Unido; Nueva York: Cambridge University Press*, 2003.
- Lazzaro D., Angeli C. A., Carvano J. M., Mothé-Dinis T., Duffard R., Florczak M., 2004, S3 OS2: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus* 172, November, 179-220
- Madiedo J.M., Ortiz J.L., Morales N., Cabrera-Caño J. A large Lunar impact blast on September 11th, 2013, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, DOI: 10.1093/mnras/stu083, 2014.
- Madiedo J.M., Ortiz J.L., Trigo-Rodríguez J.M., Analysis of two super bolides with a cometary origin observed over the Iberian Peninsula, *Icarus*, DOI: 10.1016/j.icarus.2014.01.031, 2014.
- Tapia M., Trigo-Rodríguez J., ¿En que se parecen un bólido y un terremoto? Procesos geofísicos asociados a las caídas de meteoritos, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 243-253, 2013.
- Margot J., Pravec P., Taylor P., Carry B., Jacobson S., Asteroid Systems: Binaries, Triples and Pairs, *astro-ph.EP*, 2015.03.31.

- Martin Beech & Duncan Steel “On the definition of the term meteoroid” *Q. J. R. astr. Soc* 36, 281-84, 1995.
- Marvin U. B., Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origin of modern meteorite, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 31, issue 5, pp 545-588, 1996.
- Milani A., Carpino M., Hahn G., Norbili A., Dynamics of planet crossing asteroids: classes of orbital behavior: Project Space guard, *Icarus* 78, 212-269, 1989.
- Millman Peter M., Meteor News_265, *National Research Council Ottawa Ontario*, 1962.
- Morbidelli A., Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs, *astro-ph*, 2008.
- Morbidelli A., W. F. Bottke Jr., Ch. Froeschlé, and P. Michel, Origin, and evolution of Near-earth Objects. En Asteroids III, Bottke W. F., A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds.), *The University of Arizona Press*, Tucson, AZ, USA, pp. 409-422, 2002.
- Newton H. A. *Am. J. Sci.* 39, 1865.
- Ortiz J.L., Aceituno F. J., Quesada J. A., Aceituno J.; Fernández M., Santos-Sanz, P., Trigo-Rodríguez J. M., Llorca J., Martín-Torres F. J., Montañés-Rodríguez P., Pallé E., Detection of sporadic impact flashes on the Moon: Implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates. *Icarus*, **184**, 319-326, 2006.
- Palma C., Comets, Penn. State University, 2017.
- Poveda A., Herrera M. A., García J. L., Curioaca K., The diameter distribution of Earth crossing asteroids, *Planetary and Space Science*, **47**, 679-685, 1999.
- Pravec P. y Harris, Fast and slow rotation de asteroids, *Icarus*, **148**, 12-20, 2000.
- Pravec P., Harris A., Kusnirak P., Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations, *Icarus*, **221**, 365–387, 2012.
- Raymond S. N. y A. Izidoro, The empty primordial asteroid belt, *Science Advances*, **3** (9), 2017.
- ReVelle D. O., Recent advances in bolide energy modeling. *Earth, Moon and Planets*, DOI 10.1007/11038-005-9064-4, 1-36, 2005.
- Ridpath I., A brief history of Halley’s Comet, Cambridge University Press, 1985.
- Rubin Alan E. and Grossmann Jeffrey N., Meteorite, and meteoroid: New comprehensive definitions, *Meteoritics and Planetary Science*, **45** (1), 114-122, 2010.
- Rubincam D. P., Radiative Spin -up and Spin-down of Small Asteroids, *Icarus* 148:2-11, 2000.
- Serio G. Fodera, Manara A., Sicoli P. Guisepppe Piazzzi and the discovery of Ceres, Asteroids III. *The University of Arizona Press.*, 2002.
- Shoemaker, Eugene M., Asteroid, and comet bombardment of the Earth, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **11**, 461-494, 1983.
- Shumilov, O. I., Kasatkina, E. A., Tereshchenko, E. D. Kulichkov, S. N., Vasiliev A. N., 2003. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 77, 115-117
- Tholen D. J., 1984 Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry. PhD. *Thesis*, Arizona Univ., Tucson.
- Trigo R. J. M., Madiedo J. M., Asteroides y cometas como cuerpos progenitores de meteoritos: su peligro de impacto con la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 213– 293, 2013.
- William F. Bottke, David Vrokoulicky, David P. Rubincam, and David Nesvorny, The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroids dynamics, *The annual review of Earth and Planetary Science*, 2006.
- Whitacker R. W., Infrasonic monitoring in proceedings of the 17th Seismic Research

Symposium on Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty, pp. 997-1000,1995.

Xu S., Binzel, R. P. Burbine, T. H., Bus, S. J., 1995 small main belt asteroid spectroscopic survey: initial results, *Icarus* 115 (May), 1-35

Referencias electrónicas

<https://cneos.jpl.nasa.gov/about/basics.html>

www.nasa.gov/mission_pages/deepimpact/media/f_ancient_prt.htm

https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi#x

<https://www.iau-aiu.net/>

<https://minorplanetcenter.net/iau/TheIndex.html>

<http://deepimpact.umd.edu/science/comets-cultures.html>