

**G**eología del espacio, geología espacial o geología planetaria son términos híbridos recientes, cuyo uso actualmente es muy común entre los geólogos, y sirven para designar aquellos estudios sobre rocas y minerales extra-terrestres, así como conceptos, técnicas y fenómenos del espacio que se relacionan con el estudio de la Tierra. Durante la III Conferencia Latinoamericana de Geofísica Espacial se acordó por consenso general, denominar "geofísica espacial" a la ciencia que estudia en forma completa y profunda el espacio circun-terrestre, el medio interplanetario, las envolturas de planetas y cometas, y la variabilidad solar y sus efectos sobre la Tierra. Numerosos grupos científicos latinoamericanos realizan estudios con instrumentos emplazados en la superficie y

geología y geofísica espacial en las siguientes instituciones: Instituto de Astronomía, Instituto de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Geofísica e Instituto de Geología.

#### EL PROYECTO APOLO

Cuando Neil A. Armstrong y Edwin Aldrin, Jr., plantaron las botas de sus trajes espaciales en la superficie lunar, hace 26 años, no sólo iban a coleccionar rocas y polvo lunar: en ese momento realizaron el sueño milenar del hombre de conquistar el espacio. En su jornada de 380 000 kilómetros en el vacío total y bajo temperaturas extremas, los astronautas llevaban consigo las incógnitas de cientos de geocientíficos, cuyas jornadas se habían iniciado décadas atrás. En los cuatro aluni-

Luna. La información y las experiencias del Proyecto Apolo, desde luego, no modificaron de inmediato nuestro conocimiento e ideas sobre el satélite. Tomó varios años analizar las muestras de roca y la información geofísica recibida, comparar los resultados de las investigaciones pasadas y formular nuevas teorías, ahora más razonables y acordes con la nueva información adquirida. Los datos e investigaciones realizados no fueron adecuadamente evaluados y difundidos sino hasta 1984, doce años después de la última misión a la Luna (Apolo 17). Fue en la reunión de Kona, en Hawai, donde se expusieron dentro de un contexto interdisciplinario todos los logros, teorías y conceptos generados en las nueve misiones espaciales que conformaron el Proyecto Apolo, y donde por vez primera se llegó a

## ¿HAY VIDA EN MARTE?

## COMETAS, ASTEROIDES Y CRÁTERES DE IMPACTO

Jerjes Pantoja - Alor

en satélites, así como en globos y cohetes sonda, cuyos resultados son objeto de reconocimiento internacional.

De hecho, como disciplina científica la geología espacial tiene una larga trayectoria, que se inició con la recolección y estudio de los meteoritos, el análisis químico de los fragmentos y de la geomorfología y características físicas de los cráteres de impacto causados por ellos. Sin embargo, su auge es reciente; y toma fuerza a mediados de los cincuenta a raíz de la realización de diferentes investigaciones auspiciadas por la NASA, que culminaron con el Proyecto Apolo, y han continuado con la sofisticada información proporcionada por varias sondas enviadas a diferentes cuerpos del Sistema Solar. En la Universidad Nacional Autónoma de México se realizan investigaciones de

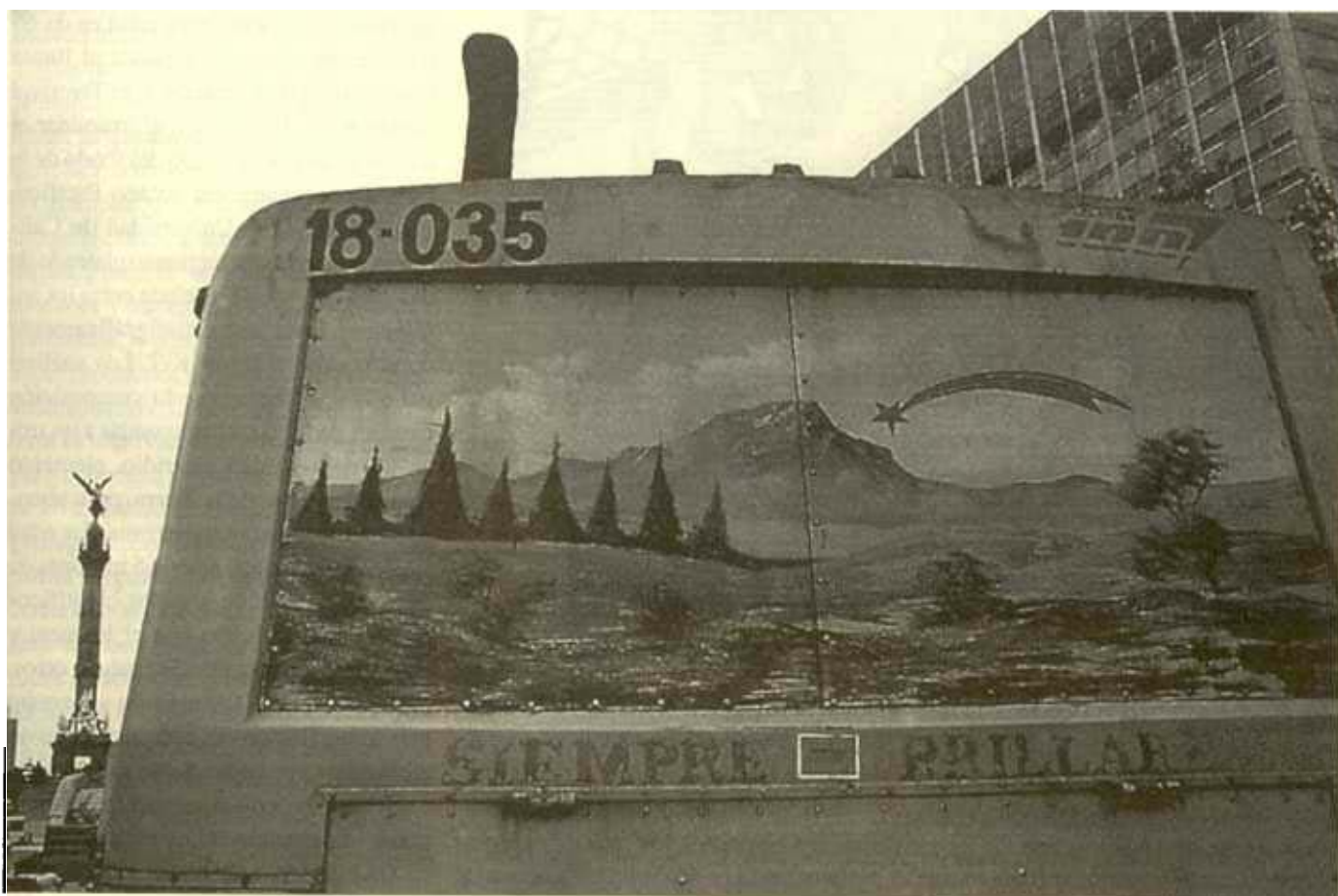
zajes siguientes, los astronautas transportaron a la Tierra más de 382 kg de rocas recolectadas en seis sitios lunares diferentes; su estudio indicó un origen violento y fascinante de nuestro satélite. Los instrumentos colocados sobre su superficie permitieron a los geofísicos conocer y reconstruir su estructura interna. Al homologar los conocimientos obtenidos en la experiencia lunar con las condiciones terrícolas se aprendió mucho del vulcanismo, plegamiento, fallamiento, intemperismo y procesos morfológicos que han afectado a la Tierra desde su formación, hace unos 4 500 millones de años. Los métodos isotópicos para la datación de rocas y minerales probaron ser una herramienta muy poderosa para conocer la historia geológica pasada de la Tierra, y lo mismo para determinar la edad geológica de la

un consenso sobre el origen de la Luna. Antes de la reunión, se debatían tres hipótesis clásicas sobre su formación: a) hipótesis de la captura, b) hipótesis del proceso de fisión, y c) hipótesis de planeta doble. Actualmente, la mayoría de los científicos aceptan la idea propuesta hace 50 años por Reginald A. Daly, geólogo de la Universidad de Harvard, quien sugirió que nuestro satélite se formó por el impacto sesgado de un asteroide u objeto del tamaño de un planeta. Esta idea fue retomada por Hartmann y Phyllyps del Instituto de Ciencias Planetarias, en Tucson, quienes con base en los estudios de las rocas de la Luna, realizados en Kona, dieron viabilidad a esta teoría. Ahí se llegó también a la conclusión de que los minerales de la Luna son extremadamente anhidros ( sin agua), lo que se explica debido a la incalculable can-

tividad de calor que se originó durante la colisión del asteroide con la Tierra y que dio origen a nuestro satélite. Los minerales refractarios enriquecieron la composición de los magmas lunares en mayor proporción que los de la Tierra. Las rocas de la Tierra y las de la Luna tienen la misma composición de oxígeno isotópico debido a que el asteroide impactante y la Tierra se formaron en la misma región evolutiva del Sistema Solar.

cados en cierto grado. Una envoltura gigante de magma, de varios cientos de kilómetros de espesor, debajo de una delgada corteza parece haber envuelto al cuerpo celeste, que después ayudó a diferenciar al manto del núcleo. Armstrong y Aldrin retornaron con muestras de basalto rico en titanio, mineral existente en la Tierra pero no tan abundante como en la Luna. La superficie está formada por suelo o regolita consistente en escombros rocosos, el cual en

en 1960, cuando estudiaba el posgrado en la Universidad de Arizona, en Tucson; el profesor de geología nos pidió interpretar una fotografía aérea con un cráter de 3.8 km de diámetro en el centro. Los estudiantes pensamos que se trataba de una caldera volcánica o depresión producto de la erosión de un cuerpo intrusivo, emplazado en terreno metamórfico. Resultó ser un cráter de impacto meteorítico localizado en el Algonkin Park, cerca de Brent,



Paolo Gasparini, 1995

Una de las primeras respuestas que fueron contestadas a partir del Proyecto Apolo fue la edad de la Luna, cercana a los 4 500 millones de años, calculada por métodos isotópicos y que es casi igual a la de las rocas más antiguas de la Tierra. El estudio de las rocas también indicó que, hasta hace unos 2 000 millones de años, nuestro satélite había sido un cuerpo geológicamente activo. Las características y rasgos físicos lunares parecen haber sido modifi-

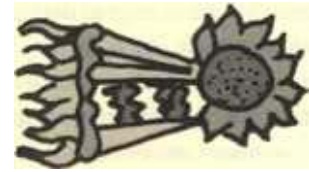
algunos lugares alcanza hasta 20 m de espesor y que es producto de los numerosos impactos meteoríticos. Dentro de este material se observan fragmentos blancos feldespáticos, y las rocas tienen por lo general una composición anortosítica.

#### CRÁTERES DE IMPACTO METEORÍTICO

La primera experiencia con cráteres de impacto la tuvo el autor de este artículo

en Ontario, Canadá. Mi segunda experiencia la tuve al año siguiente cuando visité el *Meteor Crater*, en el norte de Arizona.

La literatura geológica cita numerosas estructuras originadas por impactos meteoríticos; sin embargo, sólo unos cuantos de los asteroides metálicos pequeños son capaces de formar un cráter. Hace unos 35 millones de años, un cometa o asteroide se estrelló en el océano sobre la costa atlántica de Estados Uni-



dos, determinando la forma de lo que es hoy la Bahía de Chesapeake; el asteroide conformó un cráter de unos 90 km de diámetro cuando la costa se encontraba a la altura de Richmond, Virginia. La energía del impacto produjo un *tsunami* (ola gigantesca) que pudo haber destruido la fauna y la flora de una extensión que llegaría hasta el Lago Erie. Si el impacto hubiera acaecido en nuestro tiempo, tal vez hubiera destruido las mayores ciudades del este de Estados Unidos. En 1908, un asteroide mayor de 100 m, formado por un conglomerado de fragmentos de roca silicatada, entró en la atmósfera y se desintegró antes de llegar a la superficie del valle Tunguska, en Siberia; la explosión fue escuchada en Londres y aunque el impacto no formó un

cráter, la explosión dejó una estela de árboles quemados y arrasados de más de 50 km de largo.

En la historia temprana de nuestro planeta, los cometas y los asteroides hicieron posible la creación de vida debido a su integración y colisión con la Tierra. Según los científicos, parte del agua primigenia provenía de ellos y también, supuestamente, han destruido en una o varias ocasiones la mayoría de las especies que poblaban la Tierra. La idea de que una colisión meteorítica conformó los procesos evolutivos de la Tierra adquirió mayor fuerza a partir de 1980, cuando Luis y Walter Álvarez (padre e hijo) y otros colegas sugirieron que la desaparición de los dinosaurios, los rudistas y otras múltiples especies de animales y plantas se

debió al impacto de un cuerpo extraterrestre. Estos investigadores llegaron a esa conclusión basándose en la presencia de concentraciones anormales de iridio encontrado en las capas estratificadas de muchas regiones del mundo. Coincidentemente, esas capas, cuya edad es de 65 millones de años, corresponde al límite entre el periodo Cretácico y el Terciario (límite K-T). Hace poco, al examinar el núcleo de una perforación del fondo de la parte noroccidental del océano Pacífico, Frank Kyte, de la Universidad de California, encontró un fragmento plateado de una roca que yacía mezclada entre los sedimentos finos que estratigráficamente corresponden al límite K-T. Los análisis químicos revelaron que la composición química de la roca correspondía a un trozo meteorítico rico en iridio, elemento raro en las rocas de la Tierra, pero abundante en material extraterrestre. La edad isotópica de la roca indicó 65 millones de años. De inmediato algunos científicos relacionaron el hecho con el impacto y cráter meteorítico de Chicxulub; otros, más cautos, lo relacionan con un evento más generalizado de impactos y lluvia meteorítica correspondiente a esa fecha.

Sobre la superficie terrestre, de acuerdo con la información del periódico científico *GSA Today*, se conocen aproximadamente 150 cráteres de impacto meteorítico, los cuales fueron contabilizados de manera conservadora si se considera el número de cuerpos celestes que se han impactado en otros planetas de nuestro Sistema Solar. La mayor distribución de los cráteres ocurre en tres áreas: Norteamérica, Europa septentrional y Australia; sin embargo, también se registran dispersamente en Sudamérica, África y Asia. La mayoría de las estructuras tienen un promedio de edad menor de 200 millones de años, lo cual refleja los procesos geológi-

cos y efectos erosivos que afectaron a los de mayor antigüedad. El mayor de los cráteres meteoríticos del récord geológico, al menos hasta la fecha, corresponde al cráter cubierto de Chicxulub, al norte de Yucatán, que tiene un diámetro de unos 170 km. La edad del evento catastrófico que ocasionó el cráter es actualmente objeto de controversia. Según investigaciones recientes el impacto ocurrió en el Maastrichtiano tardío, y no en límite K-T, como la mayoría de la información publicada lo indica.

Los datos recabados en todo el mundo muestran, por lo general, la presencia superficial de cráteres mayores de 20 km de diámetro, lo cual se debe, según los investigadores, a una acción más activa de los procesos erosivos en estructuras menores y superficiales que a impactos profundos, o a la vez, que estos últimos están protegidos por una cubierta o capas sedimentarias. La morfología de los cráteres es relativamente variable; va de simple a compleja, dependiendo de su edad y de las condiciones climáticas de la época geológica. Los más simples tienen una forma circular de depresión cóncava, como de vasija o cuenca. Su borde y ladera exterior pueden estar cubiertos por rocas o escombros de eyección o de impacto y el interior del cráter se caracteriza por contener capas brechadas o rocas fracturadas. El ejemplo típico de estructura de cráter meteorítico es el conocido como *Meteor Crater* de Arizona, también denominado *Barringer Meteor Crater*. Constituye una estructura joven bien preservada, de 1.5 km de diámetro. En la mayoría de los cráteres la zona del borde se encuentra erosionada o removida, y el interior está cubierto de escombros.

La energía liberada por un impacto meteorítico puede ser enorme. La energía cinética se calcula usando la fórmula  $\frac{1}{2}mv^2$ , en la cual  $m$  es la masa del objeto y  $v$  es la velocidad del objeto. Si suponemos un peso específico de  $3 \text{ g/cm}^3$ , que es el normal de un meteorito pétreo, y una velocidad de entrada de 20 km/seg, un

cuerpo celeste con dimensión de 1 km de largo colisionaría en la superficie de la Tierra con un impacto equivalente a más de 10 000 millones de toneladas de TNT. Esto equivale a cientos de millones de veces la energía liberada por la bomba que causó la destrucción de Hiroshima.

Aproximadamente 40% de los impactos meteoríticos han sido fechados isotópicamente, utilizando los vidrios o material fundido por el impacto. Los métodos isotópicos más comúnmente usados son el de K/Ar y  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ . En muy pocos casos las edades han sido obtenidas de zircones (método uranio-plomo). Algunos se han fechado bioestratigráficamente, como es el caso del cráter de Chicxulub en la costa norte de Yucatán. Los lodos calcáreos que rellenan la brecha dolomítica producto del impacto, datados por medio de foraminíferos (organismos microscópicos), tienen una edad maastrichtiana tardía (aproximadamente 70 millones de años).

### *Según algunos científicos, en la historia temprana de nuestro planeta, los cometas y los asteroides hicieron posible el surgimiento de la vida.*

picamente, utilizando los vidrios o material fundido por el impacto. Los métodos isotópicos más comúnmente usados son el de K/Ar y  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ . En muy pocos casos las edades han sido obtenidas de zircones (método uranio-plomo). Algunos se han fechado bioestratigráficamente, como es el caso del cráter de Chicxulub en la costa norte de Yucatán. Los lodos calcáreos que rellenan la brecha dolomítica producto del impacto, datados por medio de foraminíferos (organismos microscópicos), tienen una edad maastrichtiana tardía (aproximadamente 70 millones de años).

#### ¿DE DÓNDE PROVIENEN LOS COMETAS Y ASTEROIDES?

Los cometas son uno de los más fascinantes espectáculos que nos brinda el cielo, a pesar de ser los cuerpos más pequeños del Sistema Solar. Constituyen minúsculos bloques de roca y hielo que flotan en el espacio sideral. Por lo general se descubre

un promedio de 15 cometas al año, unos nuevos y otros de trayectoria periódica conocida y calculada. Cuando sus trayectorias los conducen cerca del Sol a los cometas les aparece una cola brillante, que se debe a la reflexión de la luz solar sobre el polvo y a las partículas de hielo que son alineadas por el viento solar. Las colas de algunos alcanzan grandes distancias, la actual cola del Halley se ha calculado en unos 50 millones de kilómetros. El fenómeno ocurre por la acción combinada del viento solar y la radiación que ioniza los gases y los hace brillar. La cola de los cometas se hace más grande a medida que se acercan al Sol y vuelve a reducirse hasta desaparecer al alejarse de éste.

El más célebre de los cometas que nos visitan con periodicidad es el cometa Halley, que fue descubierto por el astrónomo inglés Edmundo Halley (1656-1742), quien confirmó que los cometas aparecidos en 1531, 1607 y 1682 eran en realidad el mismo, además, predijo su aparición en 1759.

En 1950, Jan H. Oort, profesor de astronomía de la Universidad de Leiden, en Holanda, calculó que un número conocido de cometas alcanza su punto más lejano del Sol a una distancia muy lejana. Sus notas lo llevaron a establecer que existía una difusa nube de cometas y asteroides a unas 50 000 o más unidades astronómicas (una unidad astronómica corresponde a la distancia entre la Tierra y el Sol). Esta nube distante formaba una coraza esférica, que contenía probablemente más de 1 013 cuerpos meteoríticos que envolvían al Sistema Solar. Los cometas y asteroides de esta nube se encuentran débilmente unidos al Sol y muy propensos a ser perturbados por eventos que ocurren dentro del Sistema Solar.

Casi un año después del descubrimiento de Oort, en 1951, G. P. Kuper, del Observatorio de la Universidad de Chicago, calculó que otro cinturón de cometas y asteroides debería existir justamente entre Marte y Neptuno. Después de una persistente búsqueda la teoría fue confirmada en 1992 por D. C. Jewitt y Jane Luu, de la Universidad de Hawai, quienes descubrieron el primero de estos cuerpos. Hasta

Meteorito descubierto en Suecia en 1870





José Guadalupe Posada. El fin del mundo

ahora más de 31 asteroides han sido descubiertos, además, se establece que Plutón con su órbita elíptica poco usual, es el mayor de los cuerpos de este cinturón. Por su cercanía a Neptuno, los cuerpos del cinturón de Kuiper no son desestabilizados por estrellas rivales y muy raramente se introducen al interior del Sistema Solar.

### ¿HAY VIDA EN OTROS PLANETAS?

En 1961 se dieron a conocer las primeras noticias científicas sobre la existencia de formas primitivas de vida provenientes del espacio exterior. Investigadores franceses que habían estudiado un meteorito caído en Orgueil, Francia, revelaron la presencia de hidrocarburos complejos y de algunas estructuras que semejaban "bacterias fosilizadas" dentro de la roca meteorítica. Las reseñas que se hicieron de este descubrimiento en algunas revistas científicas lo aclamaron como "la primera evidencia física de formas de vida fuera

de nuestro planeta". Posteriormente, de acuerdo con investigaciones "determinantes" consideraron al material descubierto como contaminación de polen descompuesto y ceniza de horno o chimenea.

Hace unos meses apareció en la revista *Science* una nota científica que ha causado gran controversia: David S. McKay de la National Aeronautics and Space Administration Johnson Space Center, junto con otros ocho colegas encontró en el meteorito ALH84001 evidencias convincentes de la existencia de vida en las primeras etapas evolutivas de Marte. De acuerdo con estos estudios, el meteorito está constituido de la misma materia a partir de la que se formó Marte, hace aproximadamente 4 500 millones de años que es la misma de la formación de la Tierra, la Luna y otros planetas del Sistema Solar. El meteorito fue desprendido por el impacto de un gran asteroide contra el planeta rojo, hace aproximadamente 16 mi-

llones de años, lo que ocasionó una gran cantidad de escombros de roca marciana, y del asteroide, que aún vagan por el espacio. El meteorito ALH84001 fue capturado por la gravedad de la Tierra y cayó en los hielos de la Antártida hace unos 10 u 20 mil años, en donde fue descubierto en 1984.

McKay y sus colaboradores construyeron su teoría de la vida en Marte bajo tres líneas de investigación: la primera, la existencia de pequeñas burbujas, no mayores de un punto, que se encuentran en las paredes de las fracturas y rayaduras profundas que brotan de la corteza brillante del meteorito. Estas burbujas o rosetas carbonatas tienen núcleos ricos en manganeso, rodeados por capas de carbonato de hierro. La segunda línea de evidencia se enfoca en el descubrimiento de compuestos orgánicos llamados "hidrocarburos aromáticos policíclicos" que se encuentran dentro de éstos y rodean a los carbonatos de hierro. Para Richard N. Zare,

químico de la Universidad de Stanford, estas mezclas de hidrocarburos ligeros pueden ser el producto de "algo que alguna vez estuvo vivo". La tercera línea de soporte proviene de las observaciones en el microscopio electrónico, de unos pequeños cristales de magnetita y sulfuros de hierro, embebidos en los espacios donde el carbonato fue disuelto, presumiblemente por algún ácido.

Las tres líneas de soporte para la existencia de vida en Marte han tenido fuertes y fundamentadas críticas de la comunidad científica internacional; sin embargo, para otros, las evidencias analizadas conducen a la posibilidad de la existencia de vida bacteriana alrededor de los planetas de al menos 10 estrellas de nuestro sistema galáctico. De lo que sí debemos estar seguros es de que la controversia perdurará por mucho tiempo.

### ¿CUÁNDO SERÁ EL PRÓXIMO IMPACTO?

Los científicos que estudian el espacio frecuentemente se hacen entre ellos la siguiente pregunta: ¿cuándo seremos alcanzados por un asteroide? Algunos rehúsan tomar el hecho seriamente; otros, como Tom Gehrels, de la Universidad de Arizona, consideran que el riesgo de morir de un impacto de dicha naturaleza es mayor de lo que la gente piensa. Sin embargo, aunque el impacto de un cuerpo mayúsculo es improbable (ocurren cada 10 o 100 millones de años), la energía que ello liberaría sería de tal magnitud que destruiría a nuestra actual sociedad y prácticamente a la mayor parte del entorno biótico (animales y plantas) que nos rodea.

Después de lo reseñado, la pregunta es concreta: ¿cuáles son las posibilidades de que la Tierra sufra el impacto de un cometa o un asteroide? La respuesta se encuentra en el dominio de la astronomía planetaria y ahí se buscó su resolución. Para ello, al inicio de la década de los setenta, una gran cámara fotográfica de 46 cm de diámetro fue instalada en el Observatorio de Monte Palomar, en California, y fue asignada a dos equipos de investi-

gadores: uno, dirigido por E. Helin, del Jet Propulsion Laboratory, y el otro por Eugene y Carolyn S. Shoemaker del U.S. Geological Survey. Aprovechando los avances cibernéticos y tecnológicos, a mediados de la década de los ochenta, el Steward Observatory en Kitt Peak, cerca de Tucson, instaló un telescopio de 90 cm de diámetro, que fue manejado por T. Gehrels, R. Jedicke, J. V. Scott y varios estudiantes de la Universidad de Arizona pertenecientes al programa *Spacewatch*. Estos guardianes del espacio lograron descubrir una gran cantidad de pequeños asteroides del rango de los 10 km de largo, a los cuales llamaron "Arjonas"; ade-

más, en una noche llegaron a detectar más de 600 aerolitos.

Para estimar la probabilidad de que un objeto extraterrestre choque contra la Tierra, primero es necesario clasificarlos de acuerdo con su tamaño. Los observables más pequeños, que miden menos de unas cuantas decenas de metros, raramente cruzan la atmósfera terrestre; la fricción con el aire los vaporiza antes de que lleguen a la superficie. Los asteroides mayores de 100 m constituyen un verdadero peligro. Se considera que unos 100 000 son los que se introducen en el Sistema Solar alejándose de la órbita de Marte y acercándose a la Tierra. ☪



#### Jerjes Pantoja-Alor

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

#### Agradecimientos

El autor agradece al ingeniero Arturo Gómez Caballero, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por sus atinadas sugerencias y por la revisión preliminar del manuscrito.

#### Bibliografía

- Gibbs, W.W. y Powell, C. S. 1996. Bugs in the data?: The controversy over Martian life is just beginning. *Scientific American* 275 (4): 12-14.
- Gehrels T. 1996. Collisions with Comets and Asteroids.

*Scientific American* 274 (3): 34-39.

- Lipschutz, M. E. y E. Anders, 1960. *The record in the meteorites IV. Origin of diamonds in iron meteorites*. The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies. The University of Chicago, EFINS-60.
- Pecora, W. T. 1960. Coesite, Craters and Spacial Geology: *Geotimes* 5 (2): 16-19.
- Pérez de Tejada H. y J.F. Valdés, 1991. *De planetas, cometas y naves espaciales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, cuadernos, núm. 5.
- Taylor, J. G. 1994. The scientific legacy of Apollo. *Scientific American* 271 (271): 26-33.
- Valdés, J. F. 1991. Geofísica Espacial- III Conferencia Latinoamericana de Geofísica Espacial. *GEOS. Boletín de la Unión Geofísica Mexicana* 14 (2): 13-14.