

CRÓNICAS DEL SISTEMA SOLAR

Francisco Anguita y Gabriel Castilla



Editado por:

ISBN: 978-84-92509-89-8 PDF

ISBN: 978-84-92509-90-4 [EPUB](#)

Antequera, 2

28041 Madrid

info@equiposirius.com

www.equiposirius.com

LA TIERRA

1 Mecanismos y evolución de la máquina Tierra

Francisco Anguita

Mientras que los griegos concibieron una ciencia esencialmente estática, construida sobre la comprensión de objetos, la ciencia occidental ha crecido centrada en el tiempo, y por ello en la comprensión de procesos. En otras palabras, tiene como metas últimas la reconstrucción de historias: del Universo, de la Tierra y los demás planetas, de la vida. Podríamos considerar la celeberrima *Historia del tiempo* de Stephen Hawking como el paradigma de esta aspiración a averiguar la evolución de un sistema (en este caso, *el sistema*), que es también la manera idónea de entender su funcionamiento.

En este intento, que llamamos ciencia, de comprender en profundidad sistemas complejos, como son un planeta o una célula, el siglo XX ha sido dominado por la metodología científica denominada *reduccionismo*, una sistemática consistente en dividir el objeto de estudio en sus partes

componentes, analizar éstas y obtener conclusiones de conjunto. El reduccionismo ha sido criticado por su incapacidad para resolver una de las grandes preguntas de la ciencia de todos los tiempos: ¿Qué es la vida? Como no basta sumar los ingredientes de una célula para obtener una célula viva, ésta tendría propiedades adicionales a las de sus componentes. Estas propiedades que surgen de la complejidad se han llamado *emergentes*, y nos dicen que, en ocasiones, el todo es algo más que la suma de sus partes. Una propuesta para superar el reduccionismo sería el llamado *perspectivismo*, que aspira a enunciar leyes isomorfas (o sea, equivalentes) que sirvan para comprender diferentes sistemas. Veremos un buen ejemplo al final de este capítulo.

A pesar de todo, el reduccionismo sigue siendo útil como primera aproximación para analizar sistemas complejos. En el caso de las Ciencias Planetarias, el enfoque reduccionista consiste en considerar los planetas como máquinas térmicas, dotadas de combustibles diversos, capaces de realizar trabajo (en el estricto sentido físico del término), y evolucionando (en general, enfriándose) a través del tiempo. Estos tres puntos son la clave para entender un planeta: el análisis de los combustibles nos llevará a estudiar la génesis de sistemas planetarios; la energía gastada resultará en la producción de objetos geológicos (cadenas de montañas, por ejemplo) que alteran el ambiente, pavimentando así el camino para la aparición de sistemas biológicos; por último, la evolución del Sistema Solar está grabada en la historia de la Tierra y sus vecinos, que los geólogos planetarios han comenzado a desentrañar a lo largo del siglo XX.

DE LOS «CARROS DE FUEGO» A LA TECTÓNICA DE PLACAS

La historia de la Tierra comenzó hace un poco más de 4.500 millones de años, cuando la gravedad contrajo las moléculas de gas y las partículas de hielo, roca y metal de una nube interestelar. Sus choques elevaron la temperatura hasta que la nube se volvió incandescente: en pocos millones de años, su centro era una estrella de la que brotaba un huracán de rayos ultravioleta y vientos estelares, que fueron limpiando los residuos de la nube. Sólo se salvaron los que para entonces se habían fundido en cuerpos mayores, que el viento del Sol ya no podía arrastrar.

En la Vía Láctea hay una importante población de soles de la misma edad que el nuestro, lo que significa que algún acontecimiento desconocido provocó en esos momentos el nacimiento sincronizado de miles de estrellas. Pero, en otro sentido, el Sol fue un «hijo único», cuando lo normal es que las estrellas pertenezcan a grupos dobles o triples. Esto depende de la velocidad de giro de la nebulosa: si ésta es elevada, la nube tiende a fragmentarse en varios centros de nucleación, cada uno de los cuales dará lugar a una estrella. Por otra parte,

tenemos pruebas de que este nacimiento fue desencadenado por una muerte cercana: una estrella anónima llegó a su fase de supernova, y la onda expansiva de ésta viajó por el espacio, comprimiendo y contaminando las nebulosas cercanas. Hemos encontrado las huellas de esta contaminación en el interior de algunos meteoritos (Figura 1.1), que contienen fragmentos en los que abundan los isótopos producidos en la explosión de supernovas

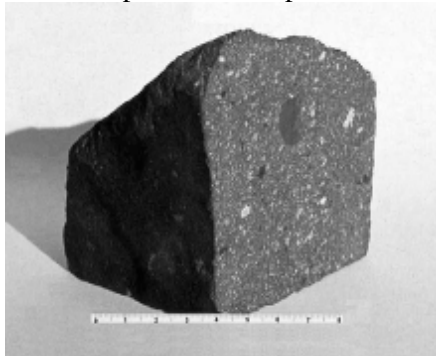


Figura 1.1

Meteorito caído en Pueblito de Allende, México, en 1968. Su edad es de 4.566 ± 2 millones de años, en el origen mismo del Sistema Solar; pero las inclusiones blancas tienen una química distinta, producto de la contaminación de la nebulosa protosolar por material expulsado de una supernova.

Mientras que en el centro de la nebulosa (la zona de mayor densidad, y por lo tanto más caliente) nacía el Sol, en los espacios próximos, todavía de altas temperaturas, se condensaron sobre todo los materiales de punto de fusión elevado, como son las rocas y el hierro, que dieron origen a la Tierra y sus vecinos. Más lejos, en la zona fría de la nube, se estabilizaron la mayoría de los gases, formándose los planetas gigantes; y en los arrabales, los restos de la nebulosa expulsados por el viento solar constituyeron un enorme cementerio helado poblado por centenares de miles de millones de cometas. En sus inicios, el Sistema Solar debió ser un gran espectáculo: una vez que el viento solar despejó las nubes de gas, el conjunto era un turbulento remolino donde billones de partículas sólidas, los *planetesimales*, giraban en torno a la estrella.

Las colisiones eran frecuentes, y aunque las velocidades relativas a las que chocaban estos embriones planetarios eran moderadas, la atracción gravitacional aceleraría a los protoplanetas justo antes de los impactos, que por ello se producirían a velocidades importantes, hasta 10 km/seg. En cuerpos grandes, los choques de este tipo son inelásticos (es decir, no hay rebote), lo que significa que toda la energía de la colisión se transforma en calor. Los cálculos

sobre energía acumulada sugieren que, a lo largo de su proceso de crecimiento, los embriones planetarios pudieron acumular suficiente calor como para fundirse. Si esto es así, los planetas crecieron como masas semisólidas de roca y metal, «carros de fuego» en los que el hierro, más denso, se habría ido hundiendo hasta el centro. Las huellas de este episodio han sido borradas por la intensa actividad geológica de nuestro planeta, pero todavía (como veremos en el capítulo 4) pueden leerse en ese museo del Sistema Solar que es la Luna.

Uno de los datos más sorprendentes que hemos aprendido sobre la Tierra es que el motor de la actividad geológica aún se alimenta en buena parte con el calor generado en esos turbulentos orígenes. Protegido del enfriamiento por una capa de roca de casi 3.000 km de espesor, el núcleo terrestre continúa estando a altas temperaturas, unos 5.000°C en el centro, y 3.300°C en el borde. En los más de 4.000 millones de años transcurridos desde su formación, tan sólo el 5% de esta masa de hierro y níquel se ha solidificado; sigue siendo por tanto un enorme depósito de energía en el corazón del planeta, una energía complementada por la que liberan los isótopos radiactivos de uranio, torio y potasio concentrados sobre todo en la corteza debido a su tendencia a formar compuestos de baja densidad.

La figura 1.2 ayuda a visualizar la actividad del planeta. Tanto el núcleo metálico como el manto rocoso están en convección: las zonas calientes se expanden, y al perder densidad ascienden; luego se enfrían y vuelven a descender. Si este movimiento puede producirse a pesar de que la Tierra (salvo el núcleo externo) se halla en estado sólido, ello se debe a las elevadas presiones del interior, unos cuatro millones de atmósferas en su centro, que hacen que los materiales se comporten como fluidos¹. El flujo de la zona rocosa profunda (el manto) se transmite a la capa superior rígida (litosfera), cuyas partes (placas litosféricas, 1.3) forman un rompecabezas, pero uno cuyas piezas varían de forma y de lugar con el tiempo: crecen, se rompen, se sueldan, son destruidas. Las interacciones entre las placas litosféricas constituyen la base de la Geología actual. Éstos son los principales conceptos de la *tectónica de placas*:

- Los *puntos calientes*. Son columnas de material a alta temperatura que, calentado por el núcleo, surge desde la base del manto. Cuando este material llega cerca de la superficie, se funde² y provoca *vulcanismo*.

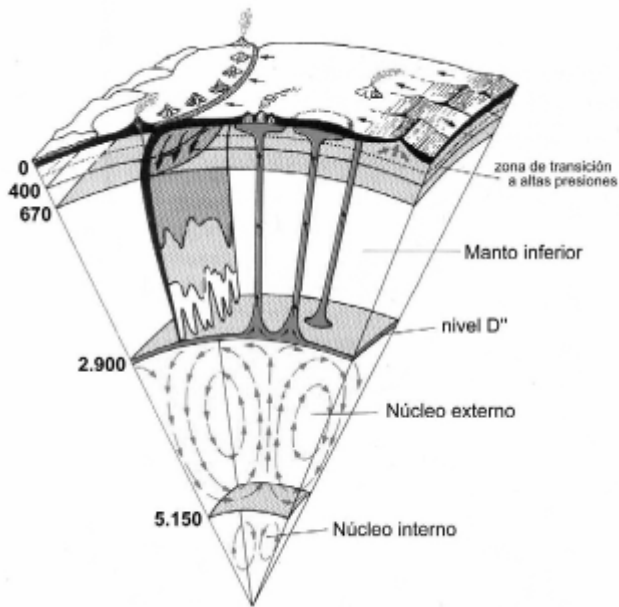


Figura 1.2

La actividad geológica. Todo el planeta está en convección. Columnas de material caliente suben desde el núcleo a través de todo el manto, y material frío baja hasta el núcleo desde la superficie.

(Strobach, 1985)

- La destrucción de litosfera. Sucede en las *zonas de subducción*, donde la litosfera oceánica se hunde a través del manto, hasta el mismo núcleo. Al descender, los minerales de la corteza son comprimidos, y su red cristalina se transforma en otra empaquetada más densamente: este aumento de densidad es, al parecer, el motor más eficaz de la subducción.

- Cadenas de montañas (*orógenos*). A causa de la fricción y la compresión, en la subducción se produce calor, y también esfuerzos de componente horizontal. Por ello, sobre las zonas de subducción la litosfera se deformará (*pliegues, fallas*), comprimiéndose y abultándose, y siendo perforada por magmas, que en parte llegarán a la superficie. Si otro continente llega a una zona de subducción, el orógeno formado se llama de colisión.

- *Dorsales oceánicas*. Son relieves submarinos donde se crea litosfera. Grandes fallas (llamadas zonas de *rift*) se abren en el fondo oceánico a

medida que las placas son arrastradas por la subducción. Por esas grietas surge del interior material fundido proveniente de puntos calientes, o bien formado a causa de la descompresión causada por la fractura.

EL «PULSO DE LA TIERRA», EL CALENDARIO AZTECA Y EL CICLO DEL SUPERCONTINENTE

Analizadas ya las fuentes de energía de la Tierra y el funcionamiento de ésta, nos queda por estudiar su historia. En este tema, la pregunta clave es si en la evolución del planeta se puede encontrar alguna pauta regular. En muchas ocasiones se ha hablado del «pulso» de la Tierra, pero éste es un concepto sospechoso, ya que casi todas las civilizaciones han descrito acontecimientos (en general, catástrofes en las que el mundo es destruido, Lámina 1.4) repetidos cíclicamente. ¿No podría ser la idea de los ciclos planetarios una versión científica de estas destrucciones periódicas? Lo que es innegable es que las ideas cíclicas se han propuesto desde el nacimiento mismo de la Geología hasta la actualidad. Como ejemplo, el ciclo de las rocas postulado por James Hutton (el «padre» de la Geología), una idea que se sigue considerando esencialmente correcta: la Tierra es como una gran recicladora de rocas, que destruye y reconstruye continuamente.

La última gran teoría cíclica sobre la Tierra es la llamada *ciclo del supercontinente*. Propuesta por vez primera en 1988, ha ido refinándose en la década final del siglo XX, y ha entrado en el XXI con buena salud. Su enunciado es muy simple: dado que circulan a través de una superficie finita, y que sus choques resultan en uniones, todos los continentes están condenados a formar agrupaciones periódicas de *supercontinentes* (o *pangeas*, la palabra de raíz griega e igual significado). Estudiando la historia de la Tierra, algunos científicos han podido reconstruir supercontinentes hace 200, 650, 1.100 y (quizá) 1.800 millones de años. ¿Significa esto una periodicidad supercontinental, con intervalos de 500 a 700 Ma? Puede ser, aunque es cierto que sobre cuatro casos no se pueden construir grandes estadísticas.

Otros rasgos que en teoría acompañan a los supercontinentes son: *regresiones*, descensos importantes del nivel del mar (las pangeas se forman mediante colisiones, en las que los continentes se comprimen, luego el mar tendrá mayor superficie y menos profundidad), empobrecimiento biológico (un supercontinente contiene menos nichos ecológicos que muchos continentes dispersos), y glaciaciones (por la continentalización del clima). La figura 1.5 muestra que, en efecto, la diversidad de la biosfera se ha reducido en los dos últimos supercontinentes, aunque es imposible apreciar si esto ha sucedido más veces, ya que la vida anterior a 600 Ma es escasa y muy poco variada. En cuanto a las glaciaciones, el registro es mucho más complicado. La última

pangea coincide en efecto con una glaciación, pero hay otros dos periodos fríos (en 450-420 Ma, y el actual desde hace 15 Ma) que no lo hacen. Además, la mayor glaciación registrada (850-580 Ma) coincide sólo al final con un supercontinente, que no parece que haya tenido nada que ver con su aparición.

Un balance interesante, por lo tanto, pero no decisivo para esta hipótesis cíclica. Que no es la última: en 2000 se ha propuesto que el auténtico pulso de la Tierra viene marcado por avalanchas periódicas en el manto. ¿Cómo se produce tal fenómeno? Vimos antes que la subducción de la litosfera viene acompañada por la densificación de sus minerales, proceso especialmente importante a una profundidad de unos 700 km. Pero este proceso requiere energía: ¡hay que cambiar de sitio todos los átomos de todas las redes minerales de una losa de roca de 100 km de grosor! Como la litosfera está más fría que el manto que la rodea, la densificación no se produce hasta que la roca no se calienta, lo que quizá tarda millones de años. Mientras tanto, nueva litosfera subducida queda aparcada a 700 km (Figura 1.6) hasta que, al cabo de un tiempo, la densificación se produce y una enorme cascada de litosfera se derrumba hasta el núcleo.

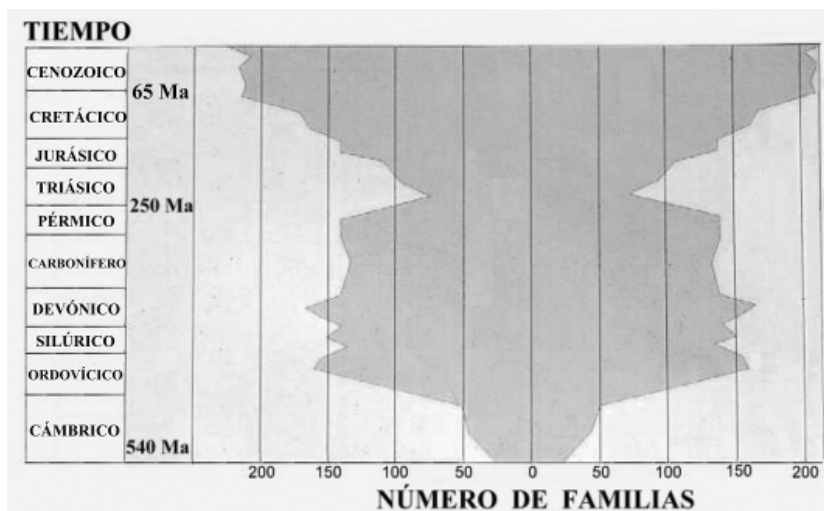


Figura 1.5

Pangeas y biosfera: la máxima diversidad biológica corresponde a los periodos de dispersión continental, mientras que las Pangeas parecen implicar empobrecimiento.
(Valentine y Moores 1972)

Las consecuencias en superficie de tales catástrofes gravitacionales serían importantes: al llegar a la base del manto, la litosfera desaloja material a alta

temperatura, que sube como un enjambre de puntos calientes, provocando máximos de magmatismo como los que se registran en tres momentos de la historia del planeta (Figura 1.7), aparentemente en ciclos de unos 800 Ma. También parece lógico que los máximos sean cada vez menos acentuados, un reflejo de la menor energía de la convección en el manto. De hecho, en la Tierra moderna (últimos 1.000 Ma) no habría habido grandes avalanchas, aunque sí acontecimientos menores, como la denominada *superpluma* del Cretácico, un gran penacho térmico surgido del núcleo que se ha propuesto para explicar, a través de un aumento del CO₂ atmosférico, el cálido clima de este periodo.

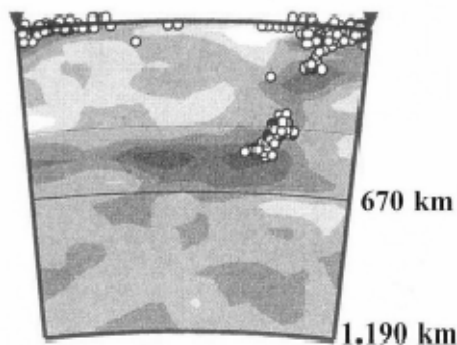


Figura 1.6

La litosfera en una zona de subducción del Océano Pacífico. Los tonos oscuros indican material frío, y viceversa. Puede verse claramente cómo la litosfera se dispone horizontalmente hacia los 670 km, lo que indica su resistencia a subducir. (Van der Hilst y Seno 1993)

CONCLUSIÓN: PLANETAS Y ESTRELLAS

Así pues, planetas y estrellas no serían en el fondo diferentes: un planeta sería la variante de alta viscosidad de un sistema confinado por la gravedad y que contiene un gran depósito de energía en su núcleo. Esta energía propulsa material caliente hacia la periferia, donde la gravedad se encarga de devolverlo hacia el centro. Incluso algunos detalles, como el colapso catastrófico de litosfera en los planetas, nos traen un eco de los colapsos gravitacionales de las estrellas que atraviesan su fase de supernova. Como pide el perspectivismo que se definió en la introducción, una ley simple (a saber: que los cuerpos densos representan equilibrios entre las energías térmica y gravitacional) nos sirve para

comprender la mayoría de los objetos del Universo, o al menos los más comunes de entre ellos: las estrellas y estos cuerpos no tan fríos que, según nuestras últimas pesquisas, podrían ser tan abundantes como aquéllas.

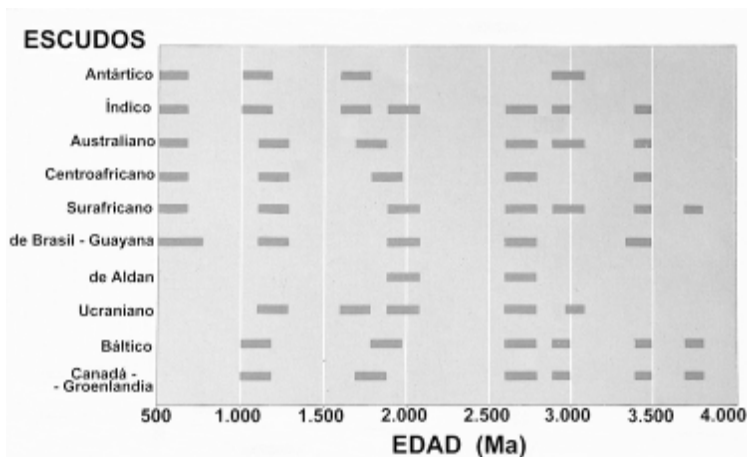


Figura 1.7

Máximos de magmatismo en la historia de la Tierra. Su agrupamiento cronológico sugiere algún tipo de periodicidad. ¿Es el «pulso» del planeta? (Condie, 1982)

2 BARRINGER, VREDEFORT, SUDBURY, CHICXULUB, AZUARA: EPÍLOGO DE CINCO BATALLAS

Francisco Anguita

BARRINGER: LOS ESFUERZOS DE UN PIONERO

En 1902, Daniel Moreau Barringer, un ingeniero de minas norteamericano, convencido de que los fragmentos de hierro que se encontraban en los alrededores de una gran depresión de 180 m de profundidad y 1.200 de diámetro situada en pleno desierto de Arizona significaban que ésta era la huella dejada por el choque de un asteroide metálico, compró la concesión para explotar el enorme yacimiento de hierro y níquel que sin duda debía de existir bajo él. Después de cuatro años de esfuerzos, durante los cuales Barringer vio como sus herramientas eran incapaces de perforar más de 200 m de la durísima roca, y sin llegar nunca a encontrar sino indicios metálicos, el ingeniero cedió, arruinado.

Sin embargo, sus muestras sobrevivieron a su empresa, y sirvieron para confirmar su intuición: los taladros extrajeron una *brecha*, es decir una roca

triturada cuyos fragmentos estaban rodeados por un cemento de *vidrio*, el material que resulta de fundir una roca; dispersas en el vidrio había abundantes esférulas metálicas, y algunos de los granos de cuarzo se habían transformado en *stishovita*³. Aplicada a esta brecha, la moderna técnica de datación llamada *termoluminiscencia*⁴ proporcionó, en 1985, la edad del choque: 49.000 ± 3.000 años. Para entonces, Daniel Barringer llevaba largo tiempo en su tumba; sin embargo, el que el ahora famoso cráter Meteor se denomine también Barringer es un tributo a la sagacidad del ingeniero, que acertó plenamente en su hipótesis. Su fracaso comercial se debió a que a principios del siglo XX existía una ignorancia total sobre la génesis y por tanto la estructura interna de los cráteres de impacto: la roca que melló los taladros de Barringer era el vidrio fundido en el impacto, un material tremendamente duro y homogéneo. Sin embargo, sus estudios abrieron el camino a otros, y actualmente Barringer es el cráter de impacto mejor estudiado del mundo.

Ahora sabemos que el *impactor* (o sea, el fragmento asteroidal que chocó contra la Tierra) medía unos 40 m, que estaba compuesto de hierro (89%) y níquel (11%), y que alcanzó el desierto de Arizona a una velocidad algo mayor de 20 km/seg viniendo desde el Sureste. La brecha taladrada por Barringer era una mezcla del material del punto de impacto y del impactor: las rocas situadas en el centro se vaporizaron, las más profundas se fundieron, y las laterales fueron trituradas (Figura 2.3), convirtiéndose en brechas que, transportadas por la formidable onda de choque, fueron expulsadas (Lámina 2.4) de la cavidad transitoria, lo que explica la dispersión de sideritos (meteoritos metálicos, Figura 2.5) hasta cerca de 20 km del cráter. Esa onda de choque generada en el punto de impacto explica que los estratos, antes horizontales, se hallen doblados hasta la vertical, e incluso invertidos (Figura 2.6).



Figura 2.2

Mapa geológico del cráter. El aspecto cuadrangular del contorno se debe a que la excavación de la cavidad progresó según las fracturas del terreno. (Shoemaker, 1975)

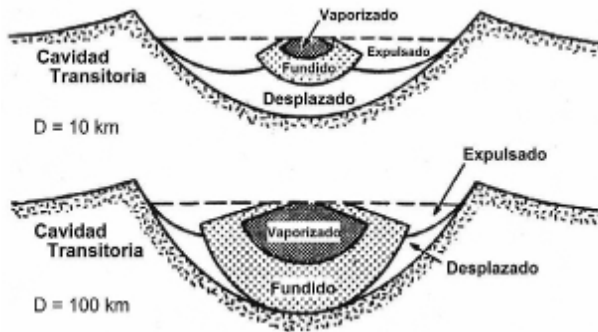


Figura 2.3 Esquemas de la excavación de la cavidad transitoria en una colisión asteroidal, con las zonas que se vaporizan y funden, o son expulsadas como eyecta. Según Melosh, en Grieve (1987).

La coincidencia entre la estructura del cráter Meteor y las producidas en explosiones nucleares subterráneas ha permitido confirmar el modelo teórico según el cual un cuerpo que llegue a la Tierra a las velocidades típicas de los asteroides (15-30 km/s) explota en la colisión: por eso los cráteres son mucho mayores (unas veinte veces) que los impactores.

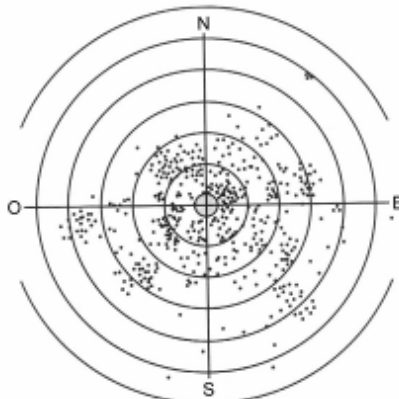


Figura 2.5

Distribución de los sideritos encontrados cerca del cráter. El círculo mayor mide 20 km de diámetro. (Shoemaker, 1975)

En cuanto a los cálculos de tamaño y trayectoria, se deducen de las cifras de la cantidad de energía liberada. La existencia de fallas inversas (que indican compresión) en los bordes norte y oeste del cráter permiten suponer una trayectoria de aproximación desde el sureste.

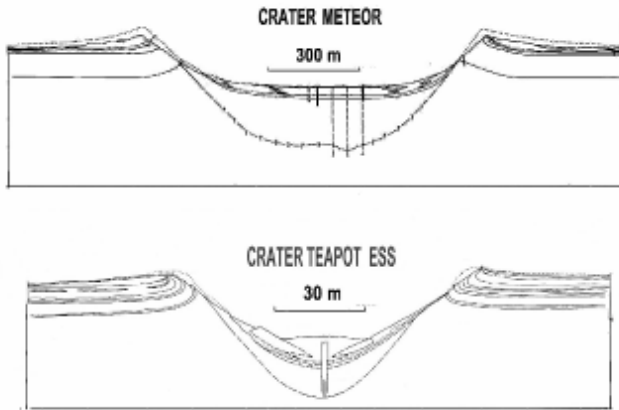


Figura 2.6

Secciones de los cráteres Barringer y Teapot Ess, una estructura de 90 m de diámetro producida en 1955 por una explosión nuclear subterránea. (Shoemaker, 1973)

Hoy, los científicos han podido reconstruir en detalle los procesos colisionales y saben que el proyectil no se entierra, sino que se pulveriza y se dispersa. Sin embargo, esta batalla ganada por la ciencia ha sido sólo la primera de las escaramuzas sobre los choques de fragmentos asteroidales contra la Tierra. Como vamos a ver, casi cada cráter de impacto reconocido lo ha sido al cabo de una dura contienda; e incluso, como en las guerras reales, los avances pueden alternarse con retrocesos.

VREDEFORT: UN PROBLEMA DE POLÍTICA

El primer proyectil lanzado por la artillería alemana sobre la ciudad de Leningrado, en los inicios de la Segunda Guerra Mundial, mató al único elefante del zoo. Medio siglo después, el geólogo norteamericano Bert King utilizó esta anécdota para ridiculizar la hipótesis de que la singular geología de la zona de Vredefort, en Suráfrica, la fuente de la mitad del oro que se produce

en el mundo, podía explicarse mediante un impacto asteroidal. La estructura consta de una elevación (el domo de Vredefort) rodeada por una cuenca sedimentaria donde el oro se encuentra impregnando estratos de edad arcaica. ¿Qué lógica tenía que en un área tan especial se hubiese producido además un acontecimiento único? Hoy sabemos que la respuesta correcta a esta pregunta era que la singularidad de la zona se debía precisamente a que aquella sufrió hace 2.000 millones de años el impacto de un asteroide de unos ocho kilómetros de diámetro. Pero para llegar a este convencimiento hubo que recorrer un largo camino.

En los años 40, casi todos los geólogos estaban convencidos de que los cráteres lunares eran estructuras volcánicas. Forma parte de las curiosidades de la historia de las Ciencias de la Tierra que tuviese que ser Robert Dietz, un especialista en Geología Marina con experiencia en batiscafos (por definición, el científico menos indicado para escrutar los cielos) uno de los primeros⁵ que, contra la teoría dominante, propusiese que nuestro satélite estaba marcado por las huellas de miles de impactos asteroidales. Lo cierto es que, en 1950, los impactos seguían siendo rarezas: en la Tierra sólo se habían admitido once. En 1959, Dietz propuso criterios de campo para identificar cráteres de impacto, y predijo que algunas de estas estructuras serían localizadas en Vredefort.

Sólo dos años más tarde, los geólogos sudrafricanos encontraron *conos astillados* (unas estructuras con esa forma y 10 a 20 centímetros de largo) donde Dietz predijo, pero ello no hizo cambiar el signo de la lucha. Había dos factores que se oponían con fuerza al relevo de las ideas: por una parte, las poderosas Escuelas de Minas de SudrÁfrica llevaban un siglo estudiando Vredefort como una estructura geológica convencional, formada por enfriamiento en profundidad de una masa de magma, y no estaban dispuestas a abandonar esta tradición por unas pequeñas estructuras cónicas. En segundo lugar, la fanática política racista de los gobiernos sudrafricanos había contribuido a aislar a los científicos de este país, haciéndoles menos permeables a las nuevas corrientes científicas.

Las pruebas siguieron acumulándose: primero fueron fracturas microscópicas en granos de cuarzo, que implican presiones mínimas de 100.000 atmósferas; luego, stishovita. Pero los geólogos sudrafricanos encontraban explicaciones para todo. Los rasgos que denotaban alta presión se explicaron como resultantes de una «criptoexplosión», una explosión en profundidad. Cuando el bando pro-impacto argumentó que no había precedentes actuales de tal fenómeno, replicaron (con razón) que tampoco los había de colisiones de asteroides contra la Tierra. En 1987, una Conferencia internacional sobre Vredefort terminó en tablas, con cada facción atrincherada en sus posiciones previas. Y así habrían seguido de no ser porque el estudio de

los impactos experimentó un avance significativo en los años 90, como consecuencia del debate sobre la extinción de los dinosaurios. Los geoquímicos habían saltado al ruedo de las discusiones sobre impactos, y ello desequilibró definitivamente la batalla. En 1996, Christian Koeberl, de la Universidad de Viena, midió la cantidad de osmio, un elemento metálico similar al platino que es muy escaso en la Tierra pero está relativamente concentrado en los asteroides. Los valores eran imposibles si no había habido una mezcla de las rocas de la zona con material extraterrestre. Se había encontrado lo que los científicos anglosajones denominan *smoking gun*, la pistola humeante, la prueba definitiva del impacto.

Ya nadie discute sobre el origen de Vredefort; por el contrario, esta estructura de impacto, la más antigua conservada hasta hoy, ha servido de modelo a otras descubiertas después. En las décadas del debate se aprendió mucho sobre el domo, y también sobre impactos en general. Pero queda un tema por aclarar, y no es del todo trivial: ¿Hasta qué punto el enorme yacimiento de oro es una consecuencia del impacto? El oro es anterior al choque, y por lo tanto no vino con el asteroide; sin embargo, al crear una zona hundida, la cuenca de impacto, el asteroide fue el causante de que los sedimentos que contienen el oro se librasen de la erosión (que ataca más a las rocas elevadas). Además, al chocar, un impactor de esas dimensiones libera una cantidad gigantesca de energía, lo que ha dejado su huella en Vredefort: a raíz del impacto, toda la zona muestra una intensísima actividad hidrotermal, y estos fluidos calientes seguramente transportaron el oro hacia las grietas de las rocas rotas por el choque, generando filones.

SUDBURY: EL CRÁTER EN FORMA DE HOJA

La zona de Sudbury, en el sur de Canadá, alberga la mayor mina de níquel del mundo. En 1962, nuestro amigo Robert Dietz propuso que esta estructura no era de origen terrestre, sino que se había formado a causa de la colisión contra la Tierra, hace 1.850 millones de años, de un asteroide de unos 14 kilómetros de diámetro. Este caso era, si cabe, más dudoso que el de Vredefort, porque Sudbury no es una estructura circular, sino que tiene una forma compleja, de 59 x 27 km. Uno de los árbitros de la revista a la que envió su manuscrito le contestó: «Si quiere usted publicar esta estupidez, adelante». Siguió un debate que se prolongó durante años; pero, como en el caso de Vredefort, la acumulación de datos terminó por ser abrumadora. En los alrededores de la estructura había una gran cantidad de *megabrechas* (brechas con bloques de gran tamaño), formando a veces diques; también conos astillados y microfracturas en cuarzos. En cuanto a la extraña forma del cráter

(o, más bien, de su parte central, ya que la estructura completa, antes de que la erosión la redujese, pudo tener más de 200 km de diámetro), sería consecuencia de una orogenia, que hace unos 1.000 millones de años comprimió toda la zona desde el sureste.

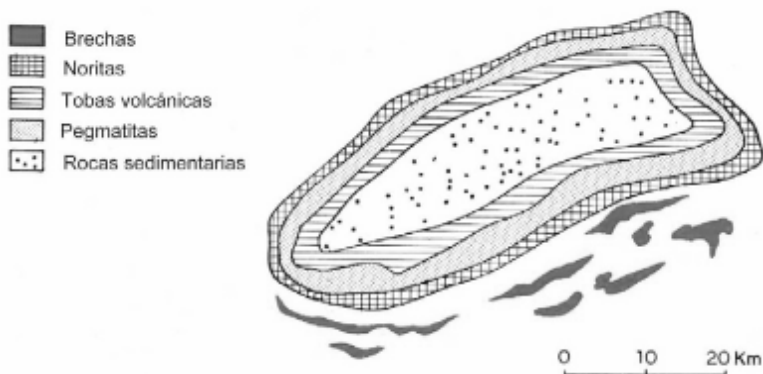


Figura 2.8

Esquema geológico de la estructura de Sudbury; su diámetro mayor mide 140 km. (Dietz 1965)

CHICXULUB: EL CRÁTER DE LOS DETECTIVES

Desde mitad del siglo XIX, los primeros paleontólogos habían descubierto que las faunas de las eras Secundaria y Terciaria diferían profundamente. Como lo que hoy llamamos extinciones masivas era un concepto considerado poco científico (ya que recordaba a leyendas míticas como el Diluvio Universal), se pensó que los fósiles «que faltaban» aparecerían más adelante. Pero no fue así, y en el siglo XX la extinción del final del Cretácico (como se llama la última parte de la Era Secundaria) fue reconocida como una de las cinco grandes mortandades que ha sufrido la biosfera terrestre.

En 1977, un grupo de científicos norteamericanos dirigidos por el Nobel de Física Luis Álvarez encontró que la cantidad de iridio (un metal del grupo del platino que se halla en asteroides pero es muy raro en la Tierra) que contenían los sedimentos del final del Cretácico era demasiado elevado para poder explicarse mediante la caída de micrometeoritos. Por lo tanto propuso que en aquella época (hace 65 Ma) tuvo que caer un asteroide de unos diez kilómetros de diámetro, que habría producido un cráter de entre 180 y 200 kilómetros de diámetro, es decir, el mayor del planeta. En 65 millones de años, el cráter podría haber subducido, o haber sido cubierto de sedimentos.

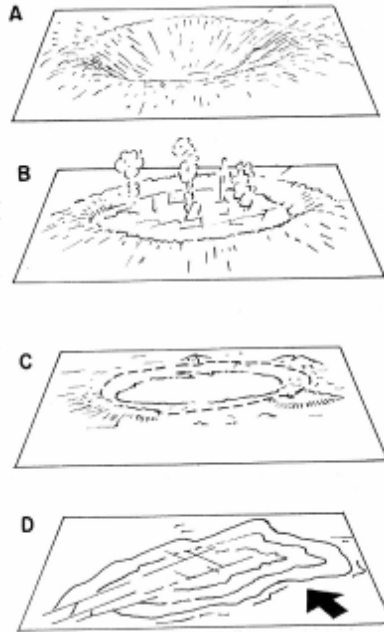


Figura 2.11
Origen de la estructura de Sudbury. (Dietz, 1964)

En un impacto de esta envergadura, parte de los gases y partículas fundidas y sólidas generadas alcanzan la estratosfera y se colocan en órbita; la mayoría del material, sin embargo, es proyectado en trayectorias balísticas y caerá como una lluvia de misiles ardientes por todo el planeta; por último, el material expulsado del borde del cráter avanzará a ras de suelo a lo largo de centenares de kilómetros como un telón de roca triturada. En caso de que el impacto hubiese sido sobre el mar, se generarían *tsunamis* (olas formadas por una conmoción oceánica que arrasan las costas con muros de agua) de varios kilómetros de altura. Pero la causa más probable de la extinción serían los gases y el polvo que llegasen a la estratosfera, donde permanecerían durante meses, velando la luz solar. Algunos modelos meteorológicos preveían una oscuridad total durante uno a dos meses, y luz insuficiente para la fotosíntesis a lo largo de un año, lo que provocaría una caída de las temperaturas de unos 20°C durante meses. Las consecuencias biológicas serían importantes: tanto las plantas como el fitoplancton entrarían en crisis, arrastrando a los animales herbívoros y al zooplancton y,

en el siguiente escalón de la cadena alimentaria, a los carnívoros terrestres y marinos.

Pronto se confirmó que el nivel rico en iridio era universal: hoy existen cerca de 200 máximos de iridio analizados. Pero el estrato-límite era una caja de sorpresas: acompañando al iridio se hallaron *tectitas* (esférulas de 1 mm de diámetro semejantes a las «gotas» de vidrio producidas en los impactos). Algunas contenían minerales ricos en níquel que sólo se podían formar en el tránsito atmosférico de un meteorito. Acompañándolos, había granos de cuarzo con microfracturas, y ocasionalmente también stishovita. Por último, mezclada con la arcilla se encontró entre 1 y 2% de materia carbonosa, claramente terrestre, que se interpretó como hollín procedente de incendios. La extrapolación de la cantidad de hollín sugirió que entre un 10% y un 25% de la superficie del planeta podía haber ardido.

Pero estas evidencias dejaban sin resolver el tema principal: ¿Dónde estaba el cráter? Varios candidatos fueron rechazados por no dar la talla, y la cosa no pintaba muy bien, porque un cráter de 200 kilómetros no se encuentra todos los días: de hecho, hasta ese momento no se había encontrado ninguno tan grande. Una salida a este atolladero era que el cráter estuviese cubierto por el mar, y enmascarado por sedimentos; el problema es que los cuarzos son minerales típicos de rocas continentales, como el granito. En 1978, dos geofísicos que realizaban prospecciones petrolíferas en el Golfo de México descubrieron, mitad en tierra y mitad sumergida, pero en los dos casos cubierta por más de mil metros de sedimentos, una gran estructura circular en la costa de la Península de Yucatán. En 1981 anunciaron su descubrimiento en un congreso, sugiriendo varias posibilidades de explicación, entre ellas un cráter de impacto; pero el secreto que siempre guardan las compañías petrolíferas sobre sus datos les impidió ser muy precisos. Sin embargo, un periodista local que escuchó la idea estaba al tanto del debate sobre la extinción de los dinosaurios, y convirtió la reseña en una gran pregunta: ¿Y si el cráter tan buscado estuviese precisamente en México? Pero la idea pareció puro sensacionalismo, y la historia se olvidó.

Años después, Alan Hildebrand, un geólogo de la Universidad de Arizona, llegó a Haití buscando el nivel con iridio. Encontró que el estrato con *tectitas* y cuarzos de impacto no tenía uno o dos centímetros de grosor como en el resto del mundo, sino medio metro. Hildebrand concluyó que el impacto tenía que haberse producido en el área del Caribe. Alguien le comentó sobre la gran estructura circular, y le informó de que una empresa petrolera había hecho profundos sondeos en la zona: quizá en los *testigos* (los cilindros de roca que se extraen de los sondeos) hubiese datos interesantes. Desgraciadamente, el almacén que contenía las muestras se había incendiado, y los *testigos* se habían

perdido. Además, el área no había ofrecido indicios de petróleo, por lo que no volverían a hacerse sondeos. Hildebrand dio el tema por acabado y regresó a Estados Unidos. La casualidad intervino: en 1990, en otro congreso, trabó una conversación casual con el viejo periodista, que había investigado por su cuenta y sabía que, antes del incendio, se habían enviado algunas muestras a un geólogo de Nueva Orleans. Esta vez sí hubo suerte: cuando Hildebrand pudo ver las muestras, supo que había encontrado lo que todo el mundo andaba buscando hacía más de diez años. En el límite entre el Secundario y el Terciario, la roca era una brecha, bajo la cual había una gran masa de vidrio, que se pudo datar en $64,98 \pm 0,05$ millones de años, precisamente la edad del límite entre las dos eras.

Los investigadores dieron al cráter el nombre de Chicxulub (el de un pequeño pueblo de pescadores en la costa de Yucatán) que, con sus 180 kilómetros de diámetro, era la prueba de que una gran catástrofe había cerrado la Era Secundaria.

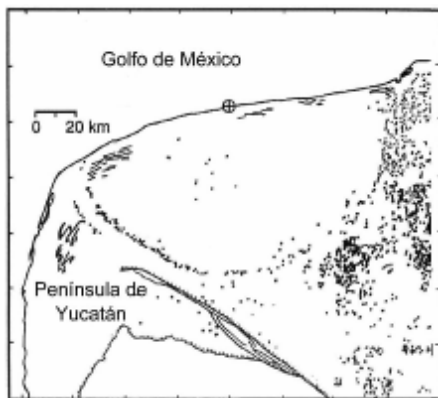


Figura 2.13

La huella del impacto de Chicxulub. Las fracturas circulares generadas por el impacto han sido lugares de disolución preferente de las rocas calizas de la zona, dando lugar a cenotes, depresiones circulares formadas por disolución. El círculo señala el lugar del impacto. (Pope y otros, 1996)

A principios de los años 80, un paleontólogo alemán que buscaba fósiles en la provincia de Zaragoza advirtió algunas rocas que le recordaron a otras del cráter de impacto de Ries, en su país. Comunicó sus sospechas a un colega geofísico, Kord Ernstson, quien comenzó investigaciones en la zona, donde dirigió diez Tesis de Licenciatura y una Tesis Doctoral, y en 1985 publicó sus

conclusiones: en su opinión, tanto los datos de campo como los geofísicos y mineralógicos apoyaban la hipótesis de que hace 30 millones de años, un asteroide de 1 km de diámetro cayó en una zona cercana al pueblo de Azuara. Hasta 400 m de sedimentos depositados después habrían rellenado la depresión, que por lo tanto no tiene expresión topográfica (Figura 2.14). Como principales datos de campo, aportaba la existencia de megabrecha, algunas rellenando diques (Lámina 2.16), y también depósitos de eyecta situados en zonas elevada, difíciles de explicar en una geología «normal». A escala mineralógica, la existencia de vidrio en una zona sin ningún tipo de magmatismo reciente, y microfracturas en cuarzo. Por último, una detallada campaña geofísica sirvió a Ernstson para construir secciones gravimétricas muy similares a las de otros cráteres de impacto.

Este cúmulo aparentemente abrumador de pruebas no impidió que, como ha sucedido en tantos otros casos de posibles cráteres de impactos, la polémica estallase. Otros geólogos buscaron explicaciones alternativas a cada uno de los rasgos interpretados como claves del impacto, y lo consiguieron en algunos casos: parte de los datos de campo podían interpretarse mediante procesos geológicos «normales». Sin embargo, hasta la fecha no se han presentado interpretaciones distintas para las microfracturas ni para las anomalías gravimétricas; mientras eso no suceda, tendremos que admitir la existencia de un gran cráter de impacto en España.



Figura 2.14

Imagen de satélite de la zona de Azuara: el cráter está delimitado por las zonas arqueadas cerca del centro, ahora ocupados por sedimentos posteriores al impacto.



Figura 2.17

Bloques interpretados por Kord Ernstson (a la derecha en la foto) como eyecta en la Sierra de la Pelarda, una elevación regional situada en el borde de la supuesta estructura. La pregunta de Ernstson: ¿De dónde vienen estos bloques, situados muy por encima del resto de los relieves de la zona?

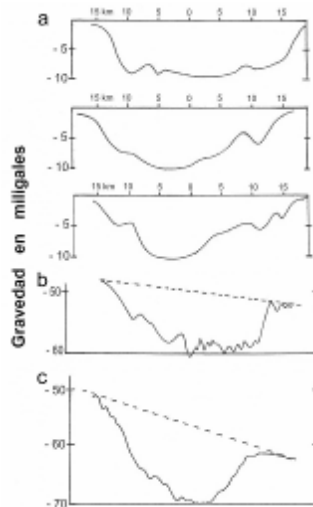


Figura 2.19

Tres secciones gravimétricas de la estructura de Azuara (a) en comparación con dos cráteres gemelos (Clearwater A y B) en Canadá (b, c). (Ernstson 1985)

EPÍLOGO

Actualmente hay unos 170 cráteres de impacto reconocidos en todo el mundo; y cada año, gracias a la generalización de las imágenes de satélite, se descubren cuatro o cinco nuevos. Cada vez hay menos resistencia a admitir la influencia exterior en la geología terrestre, pero este rechazo no ha desaparecido, como se ve con claridad al revisar los debates que forman este capítulo; controversias motivadas por la inercia a abandonar las interpretaciones familiares por otras más inciertas. Una actitud conservadora que, aunque no debiera, afecta a los científicos, humanos al fin y al cabo.

3 METEORITOS EN LA ANTÁRTIDA:

UNA CRÓNICA DEL CINTURÓN DE ASTEROIDES

Francisco Anguita

En 1912, la expedición del australiano Sir Douglas Mawson halló un meteorito en Tierra Adelia, una remota zona del continente antártico. Hoy, unos 15.000 de los 18.000 meteoritos que se hallan en los museos de todo el mundo han sido encontrados en la Antártida. ¿Cuál es la causa de esta asombrosa concentración de rocas de alto valor científico, y qué nos dicen éstas sobre el Sistema Solar? A finales de 1991 me incorporé a un equipo Ansmet (los cazadores estadounidenses de meteoritos), para comenzar a vislumbrar las respuestas. El resultado fue una maravillosa aventura científica desarrollada en el medio físico más duro que existe en el planeta.

Localizar un meteorito no es difícil en la Antártida: el 90% del continente está cubierto de hielo, sobre el que los meteoritos destacan nítidamente. La detección se complica si estamos cerca de alguna de las escasas rocas; éstas son erosionadas por los feroces vientos antárticos, cubriendo los alrededores con fragmentos que se confundirán con los posibles meteoritos. En estos casos, la búsqueda puede requerir examinar las piedras, una por una, durante horas.

Pero, ¿por qué hay más meteoritos en la Antártida que en el resto del planeta? ¿Es que el continente blanco (un mero 10% de la superficie continental) ejerce alguna atracción especial sobre estos fragmentos que llegan desde el cinturón de asteroides, a 420 millones de kilómetros de distancia? Por supuesto que no: en cada kilómetro cuadrado de la Antártida, igual que en el

resto de la Tierra, cae un meteorito cada millón de años. Lo que sucede es que la Antártida es tan seca como un desierto: sus bajísimas temperaturas hacen que el agua líquida sea casi siempre inestable allí. Y sin agua líquida, las rocas (o los meteoritos) no pueden alterarse, por lo que permanecen intactos durante cientos de miles de años. Por el contrario, si un meteorito cae en un continente de clima menos extremo, se alterará y será irreconocible en unos pocos miles de años, que es la edad máxima de los meteoritos no antárticos que llegan a nuestros museos. La Antártida funciona pues como una especie de frigorífico de rocas. Y estas condiciones son también interesantes para los exobiólogos, ya que cualquier material extraterrestre hallado en la Antártida tiene una probabilidad menor de estar contaminado por organismos terrestres que en cualquier otro lugar del mundo (sin embargo, la posibilidad existe, como el estudio del meteorito ALH84001 ha demostrado).

Como sucede tantas veces en la historia de los descubrimientos, en el principio fue la casualidad. En 1961, geólogos rusos encontraron dos fragmentos de sideritos cerca de su base antártica de Novolazarevskaja. Ocho años después, un grupo de geólogos japoneses que estudiaba el flujo de hielo en las Montañas Yamato halló nueve meteoritos. Al recibir las muestras, Takeshi Nagata, un especialista en meteoritos del Instituto Nacional de Investigaciones Polares, en Tokyo, reflexionó sobre esta concentración desmesurada y encontró una explicación teórica: los meteoritos quedarían enterrados en el hielo, y aflorarían cuando éste fuese erosionado por el viento, al remontar un escarpe. Habría que buscarlos, por lo tanto, «hielo arriba» de los obstáculos. Nagata convenció a la dirección de las Expediciones Científicas Antárticas Japonesas (JARE) para que financiase una expedición con el objetivo expreso de buscar meteoritos. Y en 1974 volvió de las Montañas Yamato con un cargamento de 663 meteoritos.

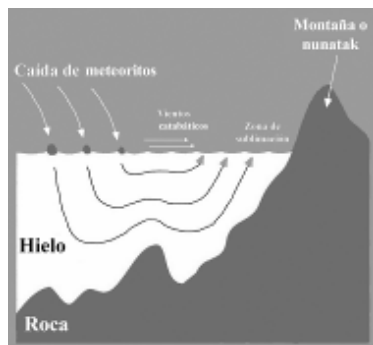


Figura 3.3 Mecanismo de concentración de los meteoritos, siempre «hielo arriba» de un obstáculo. (Whillans y Cassidy 1980)

La espectacular confirmación de las ideas de Nagata atrajo el interés de los especialistas estadounidenses, que le invitaron a organizar expediciones conjuntas. Las dos primeras no tuvieron mucho éxito, pero la tercera, en 1978, volvió de Allan Hills, en Tierra Victoria, con 307 meteoritos. A partir de ese año, bajo las siglas Jare y Ansmet (Antarctic Search for Meteorites, o Búsqueda de Meteoritos Antárticos) respectivamente, japoneses y estadounidenses vuelven, ya por separado, a buscar meteoritos en cada verano antártico. Y desde 1991, un grupo de especialistas europeos ha organizado sus propias campañas (Euromet) de búsqueda. El resultado de este esfuerzo ha sido la enorme suma de meteoritos ya citada, que ha revolucionado una especialidad en la que, hasta ahora, el material de estudio valía su peso en oro.

Teniendo en cuenta el mecanismo de concentración de los meteoritos, la búsqueda se centra en las cadenas de montañas que separan el casquete helado del mar. Las expediciones japonesas han explorado dos cadenas periféricas, las Montañas Yamato y Sor Rondane, mientras que europeos y estadounidenses han trabajado en las Montañas Transantárticas, que cruzan el continente de parte a parte y lo dividen en Antártida Oriental y Occidental (Figura 3.4). Euromet ha explorado las Montañas Frontier, en Tierra Victoria, y el programa estadounidense ha estado centrado en Allan Hills, un excepcional campo de meteoritos también en Tierra Victoria; pero alternando esta zona bien conocida con lugares más remotos de la cadena transantártica. Tuve la suerte de incorporarme al programa Ansmet en una de esas campañas de exploración.

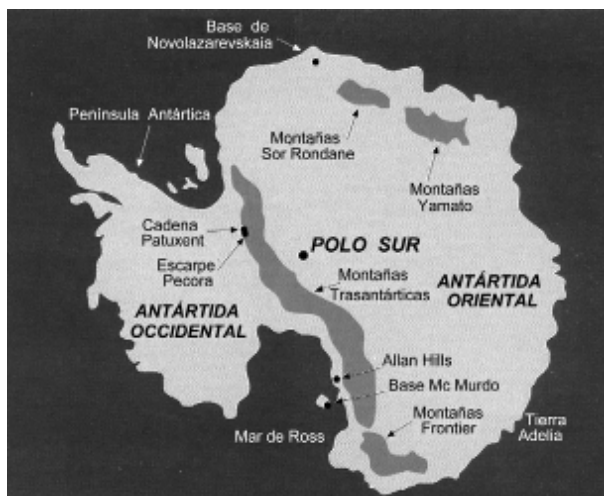


Figura 3.4 Mapa de la Antártida, con la situación de las localidades mencionadas en el texto.

EL ESCARPE PECORA Y LA CADENA PATUXENT

La placa que avisa al visitante de que ha llegado al Polo Sur geográfico indica también el espesor de hielo: más de 2.700 metros. El Polo está situado en la Antártida Oriental, y no es el lugar de máximo espesor del casquete glaciar, que en otros puntos llega a superar los 4 kilómetros. Esta masa de hielo desborda las Montañas Transantárticas formando enormes corrientes al lado de las cuales los glaciares alpinos, e incluso los himaláyicos, parecen pigmeos. Por eso, de la cadena de montañas sólo se ven en algunas zonas picos aislados.

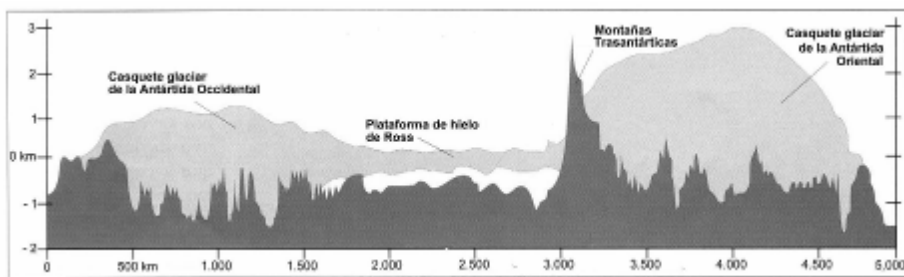


Figura 3.5

*Sección del hielo antártico, mucho más grueso en la Antártida Oriental.
(Whillans y Cassidy 1980)*

Dos de éstos, situados a unos 400 kilómetros del Polo Sur, son el escarpe Pecora y la Cadena Patuxent: los dos son zonas muy alejadas de las bases, sólo al alcance del aparato logístico de la Marina estadounidense, cuyos aviones Hercules y Galaxy, operando desde la base de McMurdo, en la costa del Mar de Ross, pueden alcanzar cualquier punto del continente. Hasta el momento, sólo una expedición de reconocimiento, en los años 60, había alcanzado Patuxent: incorporarme a Ansmet 91-92 me garantizaba, además de las respuestas científicas, ver lugares que probablemente nadie había visto antes.

El 11 de diciembre de 1991, mi diario registró una frase que resume bien el esplendor de las Montañas Transantárticas: habíamos subido a una colina desde la que divisamos la llanura de hielo brillando al sol, con unos nunataks (montañas que sobresalen del hielo) en la lejanía. Había dos líneas de montañas: las más próximas eran negras, de rocas muy replegadas marcadas por la nieve; las más lejanas estaban casi sumergidas, dominadas en el horizonte por la gran cúpula de hielo que parecía querer devorarlas. Pensé: «Sobrecogedor».

Pete Wasilewski, un científico de la NASA especialista en campos magnéticos en meteoritos, notó mi arrobo y me dijo sonriendo: «Almost the same as in Madrid!» (¡Casi igual que Madrid!). Los paisajes sobrecogedores fueron la recompensa estética: los 606 meteoritos muestreados (Lámina 3.7) constituyeron la cosecha científica, obtenida a costa de casi mil kilómetros de viaje, a veces a temperaturas efectivas inferiores a 30° bajo cero.

Aunque algunas campañas en Allan Hills han producido más de mil meteoritos, Ansmet 91-92 batió, con 220 kg, el récord de peso de meteoritos recuperados. Los ejemplares más interesantes fueron siete condritas carbonáceas (meteoritos ricos en compuestos de carbono), cinco sideritos, cuatro siderolitos y 13 atípicos, incluyendo un ejemplar verde de 8 kg, con aspecto de roca ígnea (o sea, procedente del enfriamiento de un magma, Lámina 3.8), y que los expertos pensaron en un principio que podría provenir del planeta Marte, uniéndose así a la docena de meteoritos marcianos (dos de ellos hallados en la Antártida) que conocemos. No fue así, aunque la gran roca verde que Pete encontró (y que se parecía terriblemente a la kryptonita de los comics de Superman) resultó ser un meteorito muy extraño, fundido en algún encontronazo producido en el cinturón de asteroides hace miles de millones de años.

La localización precisa de los meteoritos (que llevamos a cabo con un sistema de posicionamiento por satélite) permitió confirmar el modelo de Nagata en sus líneas generales, aunque no en los detalles. Por ejemplo, en el escarpe Pecora, la zona de máxima concentración de meteoritos, Kink Basin, estaba no hielo arriba de la montaña, sino hielo abajo, cosa no explicada por el modelo general, aunque sí por alguna de sus variantes (Figura 3.9). Tampoco es sencillo explicar la causa de la elevada concentración en el escarpe Pecora (490 ejemplares recuperados), en contraste con su escasez en la cadena Patuxent (sólo 22 muestras), que sin embargo tiene cotas más elevadas, y es por ello una mejor trampa teórica. Los modelos locales de concentración de meteoritos se están refinando continuamente: por ejemplo, la última hipótesis para explicar la gran densidad de hallazgos en Allan Hills se basa en que el hielo debe levantarse casi verticalmente para superar un escarpe oculto (Figura 3.10); esto implica su erosión masiva, y por tanto una gran concentración de meteoritos.



Figura 3.9
Concentración de meteoritos en Kink Basin: el hielo desborda lateralmente el nunatak y deposita los meteoritos tras él.
(Delisle y Siever 1991)

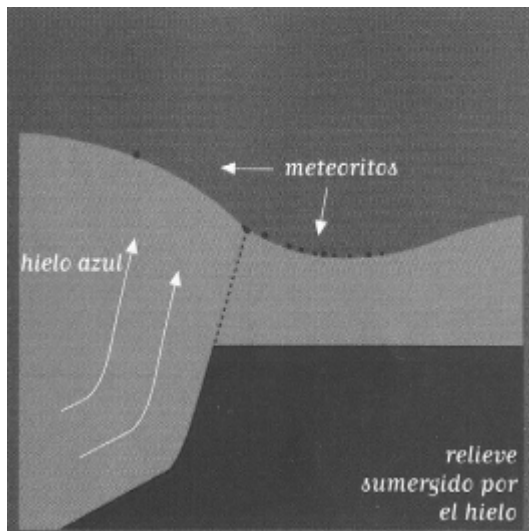


Figura 3.10
Concentración de meteoritos en Allan Hills: el hielo se eleva casi en vertical para superar un obstáculo y es erosionado de forma masiva. (Delisle y Siever, 1991)

HISTORIAS DE ASTEROIDES

En octubre de 1991, la sonda espacial Galileo nos sirvió, como aperitivo de las maravillas que más tarde iba a descubrir en el sistema de Júpiter, la imagen próxima del primer asteroide. Como se esperaba, estos cuerpos están cubiertos de cráteres (Lámina 3.11), testimonio de las frecuentes colisiones que deben producirse en el poblado cinturón de asteroides. Cada colisión, pero especialmente las mayores, arrancará de los asteroides material que viajará en direcciones impredecibles. Si lo hace hacia el interior del Sistema Solar, existe la posibilidad de que estos fragmentos de asteroide choquen con la Tierra. Llamaremos *meteoros* a los fenómenos causados por su paso a hipervelocidad a través de la atmósfera terrestre, y *meteoritos* a los materiales procedentes de un asteroide (raras veces, de la Luna o un planeta) que han sobrevivido al paso por la atmósfera.

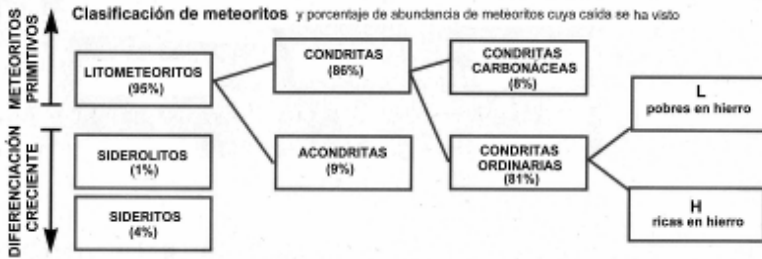


Tabla 3.1 Clasificación de los meteoritos.

Hemos aprendido mucho sobre los asteroides a través de los meteoritos. La composición de éstos es siempre similar a la de alguno de los asteroides (que se conoce por espectroscopía, o sea por la luz que reflejan). Sin embargo, nuestra ignorancia sobre la dinámica del cinturón de asteroides es casi total: ¿A qué ritmo se producen las colisiones? ¿Cuánto tardan los fragmentos en caer a la Tierra? ¿Por qué algunas composiciones (por ejemplo, la de las condritas carbonáceas) son muy comunes en los asteroides y muy raras en los meteoritos? Esta última pregunta lleva a algunas dudas más generales ¿Hasta qué punto los meteoritos que atesoramos son una muestra representativa del cinturón de asteroides? ¿No podrían, por el contrario, representar tan sólo lluvias de fragmentos producidos en unas pocas colisiones recientes?

Las edades y las frecuencias de los meteoritos nos permiten reconstruir la historia reciente de los asteroides. Desde que uno de éstos colisiona, sus fragmentos quedan expuestos a los rayos cósmicos (partículas atómicas cargadas,

en general de procedencia solar). Éstos inciden sobre los fragmentos, convirtiendo algunos de sus átomos en isótopos radiactivos (carbono 14, aluminio 26, cloro 36,...). A partir del momento en que el fragmento llega a la Tierra, la atmósfera le sirve de escudo contra los rayos cósmicos, con lo cual los isótopos radiactivos no sólo dejan de formarse, sino que se descomponen, y lo hacen a velocidades diferentes. Al cabo de un tiempo, la comparación entre las cantidades residuales de estos isótopos nos permitirá saber el tiempo que el fragmento pasó en el espacio (la llamada *edad de exposición*) y también el que ha pasado en la Tierra (*edad terrestre*). Algunos isótopos, como el helio 3 o el neón 22, sólo se producen en la superficie de los fragmentos: su abundancia indicaría que las rocas viajeras eran de pequeño tamaño.

La comparación de las edades terrestres de distintos grupos de meteoritos antárticos nos permite conclusiones interesantes. La mayoría de las condritas antárticas ricas en hierro lleva en la Tierra menos de 100.000 años, mientras que las pobres en hierro han caído a un ritmo continuo durante los últimos 600.000 años. La interpretación más simple de este hecho es que estamos muestreando los restos de la colisión y fragmentación recientes de un asteroide condritico rico en hierro: un accidente de tráfico cuyos ecos han llegado a más de 400 millones de kilómetros de distancia. Pero, ¿cuándo ocurrió este accidente? La edad de exposición de la mayoría de las condritas antárticas ricas en hierro nos lo dice nítidamente: hace 8 millones de años. La elevada concentración de helio 3 y neón 22 nos permite completar el cuadro: un tren de pequeños fragmentos viajando lentamente desde el cinturón de asteroides hacia la Tierra, a la manera puesta de moda hace unos años por el cometa Shoemaker-Levy. Algunas enigmáticas condritas férricas antárticas con edades de exposición superiores a 20 millones de años nos hablan de accidentes aún más lejanos en el tiempo: no sabemos si del mismo asteroide o de otro de igual composición.

Por lo tanto, los meteoritos recogidos en un momento determinado no tienen por qué ser representativos de la composición del cinturón de asteroides, sino tan sólo de las últimas colisiones. Y aquí es donde se pone de relieve la importancia del depósito frigorífico de meteoritos que es la Antártida: sólo con meteoritos de edades terrestres elevadas podemos aspirar a obtener un retrato estadístico de los acontecimientos sucedidos en el cinturón de asteroides durante un tiempo significativo.

EL FUTURO

Como siempre sucede en Ciencia, los espectaculares hallazgos antárticos han provocado no sólo avances, sino también un cúmulo de nuevas preguntas. Por ejemplo:

- ¿Por qué no existen trampas de meteoritos en Groenlandia, donde las circunstancias (concentración, localización y conservación) parecen las mismas que en la Antártida? Algunos glaciólogos argumentan que los casquetes árticos no han sido muy estables, pero esto también podría decirse de los antárticos¹.
- Cuando se recorre de nuevo, al cabo de los años, un sector de hielo ya rastreado, nunca dejan de encontrarse nuevos meteoritos. Un caso espectacular: Euromet 90 encontró 49 nuevos meteoritos en una zona escrutada (¿concienzudamente?) hacía solo seis años. Unos 5 centímetros de hielo se erosionan cada año: ¿Suficiente para explicar los nuevos hallazgos? Si es así, el tesoro es realmente inagotable.
- La antigüedad del casquete antártico es de unos 14 millones de años. ¿Por qué no hemos encontrado meteoritos con edades terrestres superiores a un millón de años? Quizá no hemos buscado en los lugares adecuados. Los especialistas han elucubrado sobre la existencia de acumulaciones fósiles de meteoritos, quizá hoy cubiertas de nieve. Si alguna vez las encontramos, toda la historia reciente del cinturón de asteroides quedará revelada de golpe ante nuestros ojos... y habrá que construir nuevos museos que alberguen el nuevo tesoro científico hecho de escombros del Sistema Solar².

4 EL ORIGEN DE LA LUNA:

ACTUALIDAD DE UNA POLÉMICA CLÁSICA

Gabriel Castilla, Francisco Anguita

Los aficionados a buscar el lado ideológico de la ciencia no han dejado de subrayar que los *Principia* de Newton, publicados un siglo antes de la Revolución Francesa, constituyen la obra culminante del Absolutismo. Y ciertamente, el gran triunfo de Sir Isaac no consistió sólo en explicar los caminos de los planetas, sino también en introducir orden y jerarquía en un cuadro antes confuso. Prueba de ello fueron las frecuentes alusiones al papel «real» del Sol, con los planetas como previsibles cortesanos. Este Sistema Solar de minué podía ser muy reconfortante para los ilustrados de finales del siglo XVII, pero estaba muy lejos de la compleja realidad, mucho más semejante a los cataclismos revolucionarios que estaban a punto de trastornar a Europa. Hoy (reflejando quizá también una sociedad inestable) concebimos el Sistema Solar como algo caótico, donde hasta los acontecimientos más inconcebibles

pueden haberse producido, especialmente al comienzo de su evolución. Esto es especialmente cierto en lo que se refiere al origen de la Luna; sin embargo, la hipótesis según la cual nuestro satélite nació a consecuencia de un impacto de dimensiones planetarias no recibió un respaldo masivo hasta 1984.

LAS HIPÓTESIS CLÁSICAS

Hasta esta última fecha, tres hipótesis sobre la génesis de nuestro satélite habían coexistido durante décadas sin conseguir la primacía. Tal vez la menos convincente de ellas era la *hipótesis de la captura*, propuesta por Gerstenkorn en 1955. Según este investigador, la Luna se habría formado en otra parte del Sistema Solar, siendo posteriormente capturada por la Tierra. El principal problema con el que se enfrentó esta suposición era el de explicar de forma razonable cómo la Tierra pudo frenar a un satélite que, recordemos, es el sexto en tamaño de todo el Sistema Solar y bastante mayor que Plutón. La dinámica de este proceso habría sido sumamente compleja y requeriría, según algunos modelos, que la Tierra hubiera tenido en algún momento de su historia un movimiento retrógrado. Aunque a finales de los años sesenta hubo intentos de actualización de esta hipótesis, los datos obtenidos por las misiones lunares y el conocimiento que hoy en día tenemos sobre la distribución de isótopos de oxígeno en el Sistema Solar, nos indican que la Luna debió tener su origen en una región del espacio próxima a la Tierra. Estos datos permitieron descartar la hipótesis de la captura, que puede por tanto considerarse una víctima científica del programa Apolo.

Más antigua, y aún más debatida, ha sido la *hipótesis de la fisión*, que en 1880 propuso George Darwin, un hijo del célebre naturalista. Según Darwin, la Tierra atravesó al comienzo de su formación una etapa durante la cual su rotación fue tan rápida que la duración del día llegó a ser de poco más de 2 horas. Esta elevada velocidad habría originado un ensanchamiento ecuatorial en la Tierra primigenia, y, eventualmente, la expulsión al espacio de una parte del manto terrestre. En 1960, el geoquímico australiano Alan Ringwood apoyó esta hipótesis, sugiriendo que fue la separación (diferenciación) del núcleo terrestre el proceso que, al concentrar más masa cerca del eje de rotación, provocó el incremento de la velocidad de ésta hasta provocar la expulsión. El hecho de que la órbita lunar esté inclinada unos cinco grados respecto al plano ecuatorial no se considera un inconveniente serio a esta hipótesis: cualquier impacto posterior pudo alterar esta inclinación. Sin embargo, nunca se ha presentado una explicación verosímil a la cuestión del momento angular, que puede resumirse en la pregunta: ¿Cómo pasó la Tierra de un período de rotación de 2 horas a actual de 24? ¿Dónde fue a parar tanta rotación? Ringwood ha sugerido que una densa protoatmósfera expulsada de la Tierra pudo llevarse con ella buena

parte del momento angular; pero reconoce también que su sugerencia es altamente especulativa. Sin embargo, la principal piedra de tropiezo de esta hipótesis surgió también de los datos proporcionados por las misiones Apolo: si nuestro satélite se hubiera desprendido de la Tierra, la composición de la Luna debería ser exactamente igual que la corteza y manto terrestres. Sin embargo, los datos indican que la Luna tiene unas cien veces menos elementos y compuestos volátiles (como sodio, potasio, carbono, plomo o agua) que nuestro planeta; y que, por el contrario, posee hasta un cincuenta por ciento más de elementos refractarios (titanio, bario, calcio, uranio) que la Tierra.

La tercera de las llamadas hipótesis clásicas fue propuesta por el astrónomo holandés Gerald Kuiper en el año 1954, y recibe el nombre de *hipótesis de la acreción binaria*. Su autor sugirió que el sistema Tierra-Luna se habría formado a partir de una única nube de polvo y gas, es decir, a partir de una única fracción de la nebulosa primigenia que daría lugar al Sistema Solar. En 1960, esta hipótesis fue revisada por Ruskel, quien propuso que la Luna se pudo originar como consecuencia de la *acreción* (coalescencia) de pequeñas partículas que giraban en órbita terrestre. Esta idea se conoce con el nombre de hipótesis de precipitación y es la que menos problemas ofrece desde un punto de vista dinámico; sin embargo, no explica por qué la rotación terrestre llegó a ser de veinticuatro horas, un giro más rápido que el predicho por los modelos de acumulación simple; ni tampoco explica cómo el anillo de partículas que orbitaban la Tierra pudo adquirir el suficiente momento angular para permanecer en órbita, en vez de caer sobre ella. Por otra parte, esta hipótesis tampoco puede explicar el origen de las diferencias de composición entre ambos cuerpos, ya que de haberse formado la Tierra y la Luna como consecuencia de la acreción de materiales de idénticas características, sus composiciones deberían de ser muy similares.

LA FASE CATACLÍSMICA

En 1984 se convocó en Kona (Hawai, EE.UU.) un congreso monográfico sobre el origen de la Luna. Se trataba de discutir hasta qué punto los datos obtenidos en el programa Apolo habían influido en las ideas sobre el origen de nuestro satélite. Y aunque en Kona una idea triunfó arrolladoramente, no fue una de las hipótesis clásicas, sino una cuarta, propuesta en 1975 por los planetólogos estadounidenses William K. Hartmann y Ronald Davis, que la llamaron *hipótesis de la fisión inducida*, y que hoy en día se conoce como hipótesis del Gran Impacto. Estas investigaciones se basaron en los trabajos desarrollados durante la década de los sesenta por el científico ruso Victor Safronov, padre de la idea según la cual los planetas se formaron por la

acreción de incontables planetesimales más pequeños. Curiosamente, los fundamentos de una idea semejante habían sido ya expuestos en un artículo publicado en 1946, en el que el geólogo estadounidense Reginald Daly proponía que la Luna se había formado como consecuencia del impacto contra la Tierra de un objeto de tamaño planetario. Mientras que el artículo de Daly fue totalmente ignorado en su momento, los trabajos de Safronov, poco conocidos en Occidente, fueron retomados por Hartmann y Davis.

Actualmente se acepta (a veces a regañadientes, como vimos en el Capítulo 2) que los impactos meteoríticos son un fenómeno planetario importante e incluso frecuente, pero no debemos olvidar que hasta el siglo XIX se discutía acerca de la propia existencia de los meteoritos. Para gran parte de la comunidad científica de hace cincuenta años, el hecho de que rocas del tamaño de una montaña pudieran caer del cielo era absolutamente impensable. Prueba de ello fue la gran controversia mantenida sobre el origen de las estructuras circulares que los astrónomos observaban en la superficie lunar. Hasta la década de los cincuenta, para la mayoría de los científicos, los cráteres lunares debían haber sido causados por algún tipo de vulcanismo, pero también se los llegó a explicar como ¡atolones coralinos!, o como algún efecto de la actividad de las manchas solares. Uno de los primeros en sugerir un origen meteorítico para estas estructuras fue, en 1921, el profético investigador alemán Alfred Wegener en un artículo adelantado, como toda su obra, a su tiempo: «*Die Entstehung der Mondkrater*» («El origen de los cráteres lunares»). Pero la comunidad científica continuó reacia a aceptar el origen meteorítico de las estructuras; por ejemplo, a comienzos de los años cuarenta, la revista *Popular Astronomy* rechazaba los artículos que defendían un origen meteorítico para los cráteres lunares.

Fue el reconocimiento de estructuras de impacto en la Tierra el hecho que contribuyó a cambiar, aunque gradualmente, la opinión de los científicos sobre la posibilidad de las colisiones. Uno de los pioneros en este campo fue el geólogo norteamericano Eugene Shoemaker, quien, además de estudiar algunos impactos terrestres, dirigió las investigaciones que sobre los cráteres lunares se realizaron durante el programa Apolo. La localización de cráteres de impacto no sólo en la Tierra sino también en casi todos los cuerpos del Sistema Solar fue un hecho decisivo en las reconstrucciones modernas sobre el turbulento origen de nuestro sistema planetario.

Inmediatamente después de la formación de los planetas, el Sistema Solar atravesó una fase denominada cataclísmica. William Hartmann ha reconstruido este período aplicando directamente la teoría planetesimal de Safronov, según la cual, después de la formación de los cuerpos planetarios seguía existiendo un número importante de planetesimales de gran tamaño en órbitas inestables. Las inevitables colisiones se produjeron, según los modelos dinámicos, con gran

frecuencia durante los primeros quince millones de años, y de forma mucho más espaciada después. Algunas de las consecuencias probables de esta fase colisiva fueron las variaciones catastróficas en las rotaciones planetarias (casos de Venus y Urano) y la captura de satélites (¿Fobos?, ¿Deimos?, Tritón y los jovianos J6 a J13). En cuanto a nuestro planeta, Hartmann y Davis llegaron a la conclusión de que alrededor de la Tierra deberían de haber vagado numerosos cuerpos grandes, algunos del tamaño de Marte (Figura 4.1), uno de los cuales habría chocado contra ella en algún momento de los primeros cien millones de años de su historia (Lámina 4.2). Ambos planetas estarían ya diferenciados, lo que significa que la mayor parte de sus metales habrían descendido ya a sus núcleos. Por ello, los fragmentos expulsados en la colisión procederían de sus mantos, y especialmente del del invasor (Lámina 4.3). Estos fragmentos se situaron en órbita terrestre, donde se acrecieron para formar la Luna (Figura 4.4).

Es curioso señalar que esta revolucionaria hipótesis tiene sin embargo algo de cada una de las tres clásicas: existe un intruso (aunque no fue capturado sino que colisionó); parte del material con el que se formó la