

Impactos Meteoríticos

Jesús Martínez-Frías y Jens Ormö

Este artículo integra la principal información existente hasta el momento sobre impactos meteoríticos, considerando sus aspectos históricos, geológicos y de riesgo (probabilidad y escalas). Se hace especial énfasis en las evidencias del registro geológico terrestre y se ofrece un listado actualizado de las 171 estructuras de impacto confirmadas hasta el momento en nuestro planeta. Finalmente, se aborda la importancia del estudio de los cráteres de impacto en entornos marinos.

1. Introducción

En la antigua China de entre el 600 y 700 A.C. la tradición indicaba que la fortuna de un rey (emperador), o incluso de un general, se revelaba claramente en los “prodigios del cielo”, lo que propició que existiera una larga tradición de observación astronómica. De hecho, según Liu (2004), la primera cita histórica que relaciona los meteoritos como muestras procedentes del espacio se remonta al 24 de diciembre de 645 AC, cuando se produjo la caída de cinco fragmentos meteoríticos en Shanghai.

No obstante, en la mayor parte de los tratados científicos sobre meteoritos, es a un investigador de la Universidad de Berlín, E.F.F. Chladni, a quien se le considera el verdadero padre de esta disciplina. Hace algo más de 200 años, Chladni se atrevió a proponer que los meteoritos no se generaron en la Tierra, sino que procedían del espacio exterior. Salvo contadas excepciones como Olbers en Alemania y Howard en Gran Bretaña, la respuesta de la comunidad científica de finales del siglo XVIII fue prácticamente unánime en su contra. A pesar del vigor científico de la época, los expertos llegaron a la conclusión de que la caída de los meteoritos sobre la Tierra era imposible. Como se suele hacer cuando no se entiende algo, o no se encuentra una explicación dentro de lo establecido, la ya conocida ultra-ortodoxia de la “ciencia oficial” negó la mayor y todos los casos de caídas fueron considerados absurda ficción. Especialmente importantes por la significación del personaje fueron los comentarios de Lavoisier, quien incluso firmó un memorando en 1772 con otros científicos de la Academia de Ciencias de París que concluía de la siguiente manera:

“...Las piedras a las que se asignó un origen cósmico no son mas que corrientes rocas terrestres que han sido alcanzadas por un rayo...” “...la caída de piedras del cielo es físicamente imposible...”

Este comportamiento de no aceptación de un fenómeno de origen desconocido como real, retardó el desarrollo de la ciencia de los meteoritos. Born, otro conocido mineralogista, cuya reputación podría ser puesta en duda por culpa de una colección de meteoritos, ordenó que todos ellos fueran descartados de la colección imperial en Viena. El resultado es que estas muestras únicas se perdieron para siempre. Tuvieron que pasar casi 10 años, durante los que Chladni sufrió el descrédito y las burlas de sus colegas, hasta que Biot, un miembro de la Academia de París, corroboró sus ideas tras estudiar la caída meteorítica que tuvo lugar el 26

de abril de 1803, cerca de la torre del Aguila, en el norte de Francia. Una vez que su origen fue reconocido, los meteoritos ganaron rápidamente el interés y la popularidad de los científicos y, a finales, del siglo XIX ya existían cientos de análisis detallados sobre su composición en una euforia analítica casi sin precedentes (Martínez-Frías y Barrera, 2000).

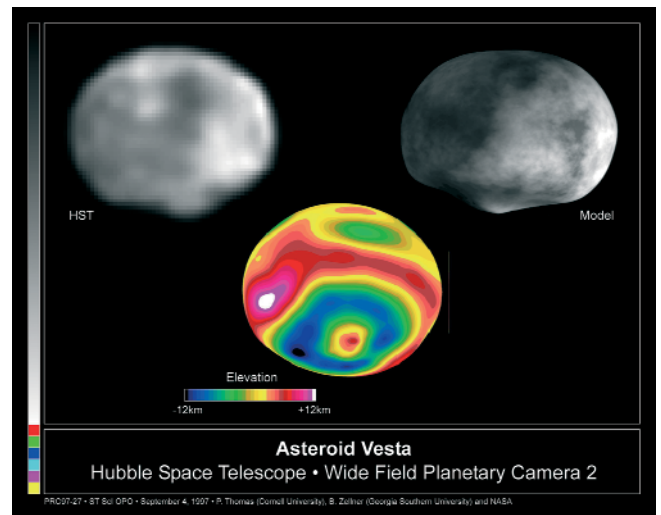


Figura 1. Imagen del asteroide Vesta tomada por el HST. El tratamiento digital de imagen permite distinguir el gigantesco cráter de impacto que posee. Este cráter gigante descubierto mide 456 kilómetros y cubre casi por completo a Vesta cuyo diámetro es de 528 kilómetros. Si la Tierra tuviera un cráter equivalente proporcionalmente hablando, llenaría el Océano Pacífico. La importancia de este descubrimiento radica en que ofrece la oportunidad de estudiar los efectos de grandes impactos en objetos pequeños. Debido a que el asteroide Vesta (<http://solarviews.com/raw/ast/vesta31.jpg>), tiene un diámetro pequeño y baja gravedad el cráter se parece a los pequeños cráteres observados en la Luna, los cuales presentan un pico central.

Básicamente, un meteorito puede definirse como un fragmento de material natural extraterrestre que alcanza la superficie de la Tierra. La mayor parte de los meteoritos son fragmentos procedentes de los asteroides, considerados sus principales cuerpos “padre”. Los asteroides (Fig. 1) son objetos rocosos y metálicos que orbitan alrededor del Sol pero que son demasiado pequeños para ser considerados como planetas. Están constituidos por el material que sobró durante la formación del Sistema Solar. Dieciséis asteroides tienen un diámetro igual o superior a 240 Km. Se han encontrado desde el interior de la órbita de la Tierra hasta más allá de la

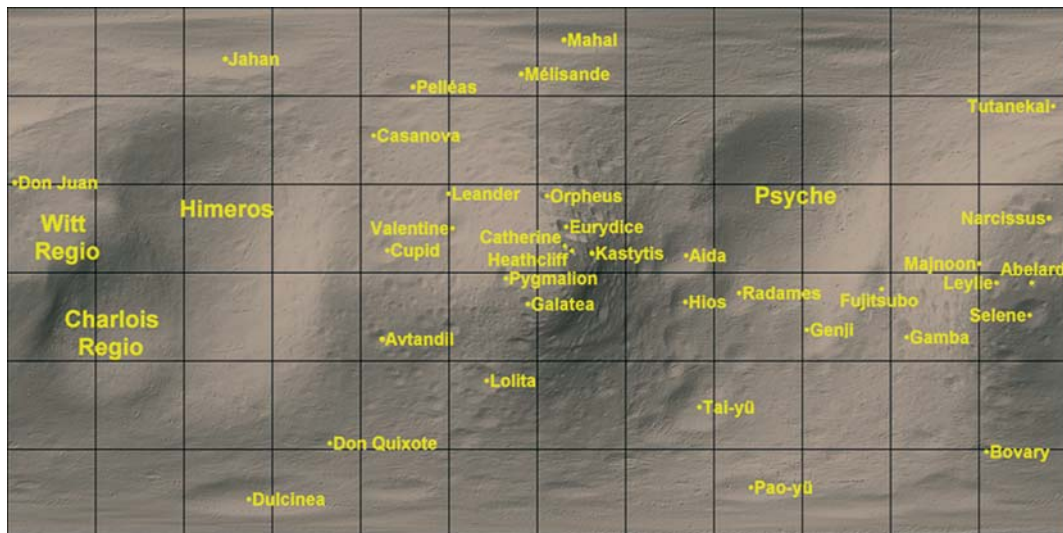


Figura 2. Mapa del asteroide Eros (<http://solarviews.com/cap/eros/erosmap.htm>). La denominación del cráter Dulcinea fue propuesta por uno de los autores del presente artículo con el apoyo del Ilustre Colegio oficial de Geólogos al Grupo de Trabajo de Nomenclatura de Sistemas Planetarios (WGPSN) de la Unión Astronómica Internacional (<http://tierra.rediris.es/merge/dulcinea.html>). La sonda NEAR Shoemaker se posó sobre la superficie del asteroide Eros, de unos 33x13x13 km, en febrero de 2001, tras cinco años de viaje. El cráter “Dulcinea” se encuentra a 71.1°S y 272°W y tiene un diámetro de 1,4 Km. Una de las características que hacen de Eros un cuerpo singular son precisamente sus cráteres cuadrados” cuya morfología se ha interpretado por el control de la onda de impacto por fallas y fracturas.

órbita de Saturno. La mayoría, sin embargo, están dentro del cinturón principal que existe entre las órbitas de Marte y Júpiter. Varios autores han sugerido que son los restos de un planeta que fue destruido por una gran colisión hace mucho tiempo. Sin embargo, es más probable que los asteroides sean el material que no llegó nunca a acrecionar para formar un planeta. De hecho, si se estima la masa total de todos los asteroides y se concentra en un solo objeto, este tendría menos de 1,500 kilómetros de diámetro. Los asteroides de mayor tamaño y más representativos son: Ceres, con un diámetro de unos 1.030 Km., y Palas y Vesta, con diámetros de unos 450 Km. Aproximadamente 200 asteroides tienen diámetros de más de 100 Km., y existen miles de asteroides más pequeños. Como ya se ha indicado, la masa total de todos los asteroides del Sistema Solar es mucho menor que la masa de la Luna. Los cuerpos más grandes son más o menos esféricos, pero los que tienen diámetros menores de 160 Km. suelen presentar formas alargadas e irregulares. Quizá, en un principio, existieran unas pocas docenas de asteroides que posteriormente se fragmentaron en colisiones mutuas hasta producir el número actual. Un extraño asteroide del grupo Apolo, Faetón, de unos 5 Km. de ancho, se acerca al Sol más que cualquier otro asteroide conocido (20,9 millones de Km). También se le relaciona con el regreso anual de la corriente de meteoros de Géminis.

Hoy sabemos que los impactos meteoríticos constituyen, probablemente, los episodios geológicos más extendidos en el sistema solar. Y su estudio tiene multitud de implicaciones relacionadas con aspectos muy diversos, desde los propios procesos de propia acreción planetaria a la búsqueda de vida en Marte. Nuestro planeta está en interacción constante con el espacio exterior. Y la frecuencia con que los meteoritos alcanzan nuestro planeta decrece según aumenta el tamaño de los “impactores”. Así, por ejemplo, se ha estimado que las partículas microscópicas de polvo cósmico caen en una proporción de alrededor de 150 toneladas/día y que aproxima-

damente 500 meteoritos mayores de 0,5 kg caen a la Tierra cada año, aunque solamente 4 son observados (en zonas pobladas) ya que la mayor parte se precipitan al mar. (ver <http://planpro.jpl.nasa.gov/mrsrch3.html>). De hecho, de acuerdo con Branch (2004), en su revisión de todos los casos conocidos de meteoritos que han impactado contra seres humanos, animales y objetos hechos por el hombre, se han listado 102 casos documentados desde 1800 a la actualidad (2004).

Las colisiones contra nuestro planeta han jugado un papel relevante en el modelado de la evolución planetaria. Unos pocos ejemplos: el calor generado por los impactos se supone que contribuyó a la desgasificación y deshidratación de la temprana corteza terrestre rica en volátiles, favoreciendo así la formación de las primitivas atmósfera e hidrosfera; grandes impactos pueden haber participado en la ruptura de determinadas áreas corticales, contribuyendo a la apertura de las zonas de rifts oceánicos y posiblemente a la formación de corteza continental anómala como es el caso de Islandia; los anillos y las zonas elevadas centrales de varias estructuras de impacto en depósitos sedimentarios han servido de reservorios de petróleo y gas susceptibles de ser explotados y también de grandes mineralizaciones de cobre-níquel como la Cuenca de Sudbury en Canadá, que están relacionados con el gigantesco impacto que tuvo lugar en el Precámbrico; los impactos en la primitiva Tierra, particularmente por cometas, pueden haber aportado los compuestos orgánicos necesarios para el comienzo y evolución de la vida; un número importante de extinciones de plantas y animales a través de toda la historia geológica de nuestro planeta están ligadas a efectos globales resultantes, entre otras causas, de grandes impactos meteoríticos. Los cráteres también son indicadores de la “energía” de un cuerpo planetario. Así la Luna, sin actividad geológica, no dispone de energía suficiente para remodelar su superficie por lo que permanece intensamente craterizada. Por el contrario, nuestro planeta ha sido capaz, gra-

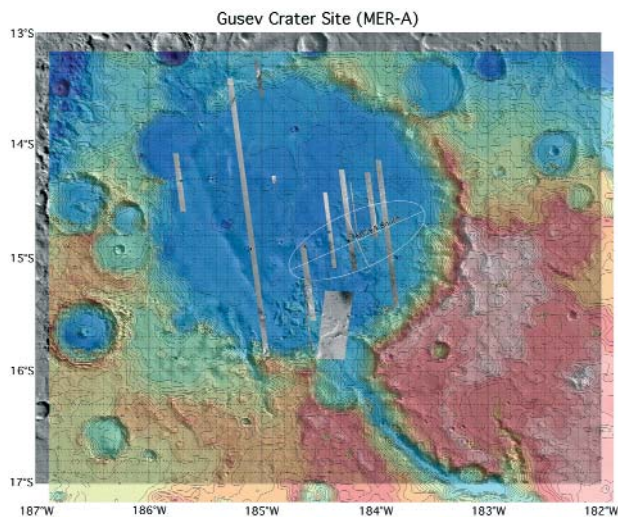


Figura 3. Cráter Gusev en Marte. El Spirit “amartizó” en el interior de este cráter de impacto meteorítico marciano, 15 grados al sur del Ecuador de Marte. Este lugar fue elegido por la NASA por ser de gran interés científico: es un cráter gigantesco de unos 160 km de diámetro, donde se cree que alguna vez pudo haber existido un lago.

cias a la actividad geodinámica interna y externa, de modificar sus rasgos corticales, por lo que muchísimas estructuras colisionares han desaparecido. Por último, decir que algunos cráteres (de impacto) en Marte (ej. cráter Gusev) (Fig. 3) constituyen zonas privilegiadas de exploración geológica y astrobiológica. No es casualidad que el robot Spirit haya “amartizado” precisamente en esta zona.

Por término medio, una vez cada pocos cientos de años la Tierra es alcanzada por un objeto de unos 70 metros de diámetro; cada diez mil años nos golpea un objeto de unos 200 metros, y cada millón de años se produce el impacto de un cuerpo de más de 2 km de diámetro. Por último, cada 100 millones de años tiene lugar una catástrofe como la que sucedió, en el límite K-T, cuando se produjo el choque de un cuerpo de unos 10 km de diámetro o más contra nuestro planeta, al que se ha responsabilizado de la gigantesca estructura de impacto de Chicxulub, en el Golfo de México.

Teniendo en cuenta que los meteoritos pueden alcanzar la Tierra con velocidades de más de 70 km/s, la energía cinética del impactor puede ser de 620.000 cal/g. La reducción de la energía cinética y potencial del meteorito durante su descenso suele ir acompañada de un incremento de la energía térmica del aire de alrededor, parte de la cual se transfiere a la superficie del meteorito. Esta fracción depende de la forma y velocidad de caída y de la altitud en que se encuentra el impactor. El calor se transmite del aire caliente al cuerpo por conducción y convección e incrementa su temperatura superficial que puede ser estimada en 273°K (0°C) cuando llega del espacio. El meteorito está frío cuando impacta contra el suelo y no se conocen casos, hasta el momento, de meteoritos que nada más caer no puedan mantenerse entre las manos. Si toda la energía cinética del meteorito se transformara en energía térmica, éste podría vaporizarse en su totalidad. Además de esta vaporización debida a la transformación de energía cinética en térmica, también se estima que durante su entrada en la atmósfera se pierde aproximadamente entre 1 y 4 mm por segundo de material. Esto signifi-

ca, para velocidades de entrada de unos 10 km/s, que la pérdida puede, dependiendo evidentemente de su tamaño, alcanzar hasta el 100% del meteorito. Todas estas consideraciones son cruciales antes de abordar la investigación geológica de los resultados de los impactos. El primer cráter en la Tierra que fue ampliamente aceptado como de tipo meteorítico, no sin dificultades, fue el “Barringer Meteor Crater” alrededor del cual se encontraron fragmentos meteoritos.

En la actualidad, se han identificado alrededor de 170 estructuras de impacto (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>), con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros (Fig. 4). En España no existen estructuras confirmadas de impacto (Cortes *et al.* 2002) y hasta el momento, la única capa del registro sedimentario de España para la cual se ha demostrado de forma inequívoca su relación con un impacto meteorítico es la capa de arcilla del límite Cretácico-Terciario (Díaz *et al.* 2002).



Figura 4. Estructura de impacto de Aorounga, Chad, África 19° 6' N, 19° 15' E - <http://neo.jpl.nasa.gov/images/chad.html>. Diámetro del reborde: 17 km - Antigüedad: 200 millones de años. El impacto de un asteroide o cometa hace dos centenares de millones de años dejó cicatrices en el paisaje que siguen siendo visibles a través de esta imagen espacial de radar de una zona del desierto del Sahara, en el norte de Chad. El cráter original fue enterrado por los sedimentos, que se erosionaron parcialmente, dejando ver su aspecto en forma de anillo. Las bandas oscuras son depósitos de arena llevada por el viento que migró desde los valles cortados por miles de años de erosión. La banda oscura que se observa en la parte superior de la imagen sería una porción de un supuesto segundo cráter.

Otros resultados verificables en el registro geológico, además de la formación de cráteres de impacto, implican: 1) la generación de nuevas fases minerales, como polimorfos de alta presión (ej. coesita), debidos a la transformación de minerales preexistentes en las denominadas “target rocks” (rocas afectadas por el impacto), 2) la formación de auténticas rocas de impacto “impact melts”, que reciben distintas denominaciones (impactitas, suevitas...), 3) la existencia de anomalías (Muñoz-Espadas *et al.*, 2003) en determinados elementos comunes en los meteoritos y escasos en la corteza, como por ejemplo el iridio, 4) la presencia de gases atrapados en el interior de fulerenos cuya signatura isotópica es extraterrestre, 5) el desarrollo de texturas de impacto a micro

(PDF: “Planar Deformation Features”) y meso y macroescala (“shatter cones”) y 6) muchos otros criterios geodinámicos.

De acuerdo con Hughes (2000), la pauta a la que la superficie de la Tierra está siendo craterizada (tasa de craterización) puede medirse analizando los tamaños y edades de los cráteres que se encuentran en ciertas áreas estables del planeta. Sobre un rango de $2.5 < D < 100$ km, se muestra que el número $N(D)$ de cráteres que se originan por unidad de tiempo mayores que D no sigue una relación simple de la forma $N(D) \propto D^\alpha$, donde la potencia “ α ” es aproximadamente 2.0. Este mismo autor indica que la tasa de craterización actual para la Tierra es tal que los cráteres de diámetros mayores de 3, 8, 20, 40 y 100 km. se forman cada 160 ka, 300 ka, 740 ka, 2.8 Ma y 17 Ma respectivamente. Wetherill y Shoemaker (1982) en su trabajo clásico sobre la colisión de objetos observables astronómicamente contra la Tierra evalúan la propuesta inicial de Shoemaker (1977) y Shoemaker *et al.* (1979) que plantean la posible existencia de una relación de escala para los cráteres de impacto que sugiere que su tamaño es básicamente función de la masa, densidad y velocidad del impactor.

Para determinar el riesgo que representa un asteroide, el “Sentry” se basa en la denominada “Escala de Torino”, una especie de “Escala Richter” para categorizar el riesgo de impacto contra la Tierra asociado con asteroides y cometas recién descubiertos. La primera versión de la Escala de Torino fue creada por el Prof. Richard P. Binzel (MIT) en 1995 y presentada oficialmente en junio de 1999 en la Conferencia sobre NEOs, en Torino (Italia). Esta escala se basa en un código según el cual los números 0 y 1 representan “riesgo nulo”, y el 10 “peligro total”. Todos los asteroides de la lista actual están en el cero de la escala... salvo algunas excepciones, como por ejemplo el asteroide 2002 CU11. Actualmente sus posibilidades de impactar contra la Tierra son de 1 en 100.000, y la fecha en la que alcanzaría su máxima peligrosidad es el 31 de agosto de 2049. Otros dos asteroides a tener en cuenta también en este sentido son el PHA 2002NT7 para el que se ha estimado un riesgo de colisión contra nuestro planeta para el 1 de febrero de 2019, con una probabilidad de impacto de 1 entre 250.000 y el 1950DA, con probabilidad estimada de colisión contra la Tierra de 1 entre 300 para el año 2880.

La probabilidad de impacto en una localidad dada se estima como:

$$P = P(D) * AD / AE,$$

donde $P(D)$ es la probabilidad de impacto de un asteroide de diámetro D en algún lugar de la Tierra, AD es el área de destrucción debida al impacto y AE es el área total de la superficie terrestre (incluyendo los océanos).

Aplicando esta fórmula al evento de Tunguska y asumiendo un intervalo medio entre los impactos terrestres de un siglo, la probabilidad anual de una localidad dada dentro del área de devastación es:

$$P_{\text{(anual)}} = 0.01 * 2000 / 5.1^8 = 4^{-8} \text{ a aprox. 1 en 25 millones.}$$

Todavía más reciente que la Escala de Torino es la “Escala Técnica de Palermo (ETP)” (Fig. 5), mucho más adecuada que la primera ya que: a) considera el valor de la E_e (energía esperada) según $E_e = E \cdot P$, donde E es simple-

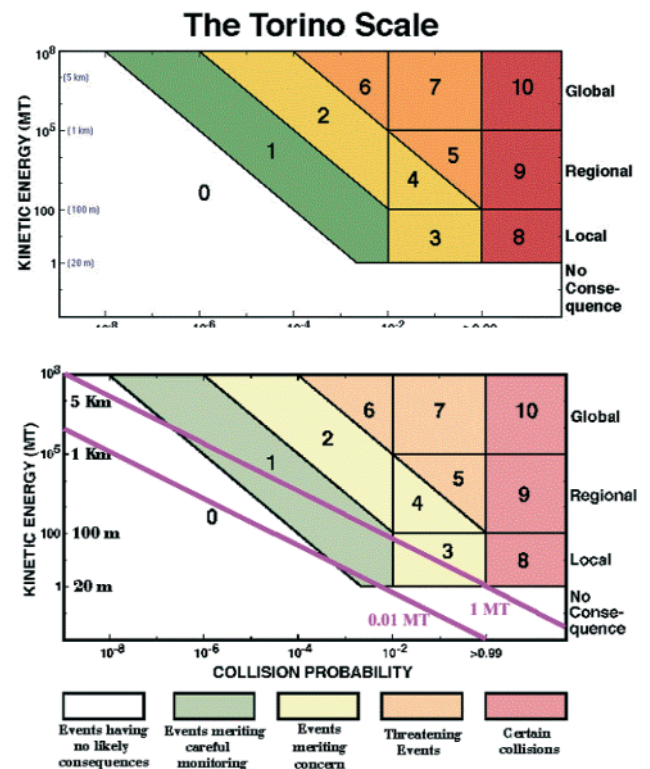


Figura 5. La Escala de Torino es la “Escala Richter” para categorizar el riesgo de impacto contra la Tierra asociado con asteroides y cometas recientemente descubiertos. La primera versión de la Escala de Torino fue creada por el Prof. Richard P. Binzel (MIT) en 1995. Oficialmente se presentó en junio de 1999 en la Conferencia sobre NEOs, en Torino (Italia). Escala Técnica de Palermo. $E_e = E \cdot P$ (Energía esperada igual a Energía del impacto por la probabilidad de impacto) E es simplemente la energía originada por la colisión, que puede definirse como la energía cinética del cuerpo. P es la probabilidad de impacto y se calcula con simulaciones numéricas. La ETP es más adecuada ya que: En la ET no se tiene en cuenta la longitud del tiempo antes del impacto y la ET asigna un valor cero a los impactos < 1 MT.

mente la energía originada por la colisión, que puede definirse como la energía cinética del cuerpo y P es la probabilidad de impacto calculada con simulaciones numéricas, y b) tiene en cuenta el tiempo antes del impacto, valor que en la Escala de Torino se asigna como cero para impactos < 1 MT.

Cráteres de impacto en entornos marinos

Durante la mayor parte de la historia geológica de nuestro planeta, más de las dos terceras partes de la superficie terrestre han estado cubiertas por lagos, mares y océanos. Como consecuencia, la misma proporción de objetos cósmicos que impactan sobre la Tierra lo hacen sobre agua. Si las aguas son suficientemente poco profundas en relación al diámetro del objeto, el impacto provoca la formación de un cráter en el “fondo”. Este cráter puede mantener su forma en el tiempo y dar a conocer “características físicas” particulares especiales, causadas por el agua en la superficie del impacto. Este tipo de cráteres de impacto marinos puede proporcionar información relevante sobre el “entorno” en el momento de la colisión, incluso mucho tiempo después de la desaparición de las aguas en que se formaron.

De todos los cráteres de impacto reconocidos en el mundo hasta el momento, más del 10% están asociados a

impactos en entornos marinos. Esta cifra aumentará muy posiblemente a medida que aumenten los conocimientos sobre la geología y características físicas de este tipo de cráteres (Ormö and Lindström, 2000; Tsikalas *et al.*, 1999), y a medida que se produzcan nuevos descubrimientos de cráteres actualmente ocultos bajo capas de sedimentos (p.e. el tipo de estructura Peerless, U.S.A., descrito por Comstock *et al.* 2004). Algunos de los cráteres se encuentran todavía cubiertos por el mar en que se formaron, mientras que otros, con el paso del tiempo, han visto desaparecer las aguas y hoy en día *se presentan en la superficie...*

Las mismas fluctuaciones del mar pueden, sin embargo, sumergir cráteres que se formaron en tierra. Por lo tanto, es importante distinguir entre cráteres que se presentan actualmente en entornos marinos, y cráteres procedentes de un impacto en un entorno marino que no se conserva como tal en la actualidad. Durante algún tiempo, el término “cráter marino” fue empleado en publicaciones específicas para designar ambas situaciones. Sin embargo, con objeto de concretar que un determinado cráter se formó a partir de un impacto en agua, Ormö y Lindström (2000) introdujeron el término inglés “marine-target cráter”. Existen otras terminologías como, por ejemplo, “wet target cráter” o “seafloor cráter”. Todos los cráteres bajo la denominación “marine-target” encontrados hasta la fecha se formaron en mares epicontinentales con profundidades costeras someras a profundas. Un mar epicontinental es aquel que cubre la corteza continental (terrestre). Por lo tanto, la superficie del impacto consistía normalmente de agua y sedimentos con diferente grado de consolidación. El área cubierta por las aguas relativamente poco profundas, ha fluctuado a lo largo de la historia del planeta. Durante algunos periodos la distribución de los mares epicontinentales ha sido mayor de lo que vemos en la actualidad (p.e. durante el Ordovícico).

Las características de los cráteres de impacto marinos se han analizado y obtenido por medio de perforaciones, toma de muestras y diversos métodos geofísicos (cf. Ormö and Lindström, 2000). Los efectos de sedimentación que siguen al impacto han cubierto por completo o enmascarado la topografía de casi todos los cráteres de impacto marinos conocidos sobre la tierra. Ello dificulta su identificación ya que no existen huellas sobre la superficie. En la mayoría de los casos el cráter queda oculto hasta que comienzan a ser visibles los efectos de la erosión posterior (ej. cráter Lockne). Muchos de los cráteres sólo son visibles por medio de datos geofísicos o de perforaciones. Por otro lado, una ventaja que proporcionan los sedimentos que cubren el cráter es el hecho de ofrecer protección contra la erosión una vez que el fondo marino queda expuesto a la superficie. Ello ha permitido que este tipo de cráteres sean de los mejores conservados.

Los océanos, con una profundidad promedio superior a los 4 km, impiden que los impactos de menor tamaño, pero más frecuentes, lleguen a excavar el fondo marino. Los impactos de mucho mayor tamaño necesarios para impactar contra el fondo son “escasos”. Este hecho, combinado con la “edad” de la corteza oceánica (<180 Ma), constituye la principal causa por la que sea raro encontrar estos cráteres en los océanos. A pesar de ello, las nuevas técnicas para el *mapping* del fondo de los océanos contribuirán seguramente al descubrimiento de nuevos cráteres.

El cráter marino más conocido es Chicxulub en México (Hildebrand *et al.*, 1991). Se piensa que fue el causante de la extinción de los dinosaurios y de más del 50% de especies terrestres y marinas al final del Cretácico. Este cráter tiene más de 200 km de diámetro, sin embargo la profundidad del agua no superaba los 100 m en el momento del impacto (Pierazzo and Crawford, 1997; Morgan *et al.*, 1997). En la actualidad parte del cráter está cubierto por el Golfo de Méjico. En un impacto de estas magnitudes el agua juega únicamente un papel secundario en la excavación del cráter, aunque puede producirse una modificación del cráter. Con profundidades de aguas relativamente mayores la influencia del agua en la morfología y geología del cráter es más es mayor. Por ejemplo, provocan la creación de formas concéntricas: un cráter de mayor profundidad insertado en otro cráter exterior menos profundo, así como depósitos de ejecta retrabajados por el agua en su movimiento de retroceso. Sin embargo, en aguas de profundidades mayores, no se forma un cráter en el fondo. El único evento conocido de estas características esta en Chile (Eltalin) (Gersonde *et al.*, 1997). La explosión tuvo lugar en el agua, causando únicamente una ligera excavación del fondo.

Los resultados de estudios de cráteres de impacto que han tenido lugar sobre la tierra han proporcionado importantes conocimientos sobre los procesos implicados en un impacto marino, pero parte de su interés está también orientado a la reconstrucción de paleoambientes planetarios y estimación de propiedades superficiales. Marte es un cuerpo planetario de nuestro sistema solar donde los océanos y mares o lagos pueden haber existido durante largos periodos de tiempo. Ormö *et al.* (2004) presentaron un estudio sobre las posibilidades de encontrar cráteres de impacto marino en Marte. La existencia de dichos cráteres apoyaría la tesis de la existencia de fases lacustres y marinas en la historia del planeta y constituye la base para futuros estudios sobre la profundidad del agua y la cobertura areal de paleolagos y océanos.

Agradecimientos

La investigación sobre cráteres de impacto forma parte de las líneas de trabajo impulsadas por el Centro de Astrobiología.

Referencias

- [1] BRANCH W. (2004). <http://www.branchmeteorites.com/metstruck.html>
- [2] COMSTOCK J. M., DIETZ R. D. AND MORROW J. R. (2004) The Peerless structure, Daniels County, northeastern Montana: A probable late Ordovician impact structure. *Meteoritics and Planetary Science* **39**, 683-692.
- [3] CORTÉS, A.L., DÍAZ-MARTÍNEZ, E., SANZ-RUBIO, E., MARTÍNEZ-FRÍAS, J. & FERNÁNDEZ, C. (2002). Cosmic impact vs. terrestrial origin of the Azuara structure (Spain): A review. *Meteoritics & Planetary Science* **37**:875-890.
- [4] DÍAZ-MARTÍNEZ, E., SANZ, E. & MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (2002). "Sedimentary record of impact events in Spain" *Geological Society of America Special Papers* **356**: 551-563.
- [5] GERSONDE R., KYTE F. T., BLEIL U., DIEKMAN B., FLORES J.A., GOHL K., GRAHL G., HAGEN R., KUHN G., SIERRO F.J., VÖLKER D., ABELMAN A. AND BOSTWICK J.A. (1997). Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean. *Nature* **390**, 357-63.
- [6] HILDEBRAND A. H., PENFIELD G. T., KRING D. A., PILKINGTON M., CAMARGO A. Z., JACOBSEN S. B. AND BOYNTON W. V. (1991). Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán peninsula, Mexico. *Geology* **19**, 867-871.

- [7] HUGHES, D.W. (2000) A new approach the the calculation of the cratering rate of the Earth over the last 125 +/- 20 Myr. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **317**: 429-437.
- [8] LIU, P. (2004) <http://www.greatwallct.com/meteorit.htm>
- [9] MARTÍNEZ-FRÍAS, J. Y BARRERA, J.L. (2000). "Duros como el granito". En Gregori, J. "Esto es imposible". Edit. Aguilar, 191-223.
- [10] MORGAN J., WARNER M., and The Chicxulub Working Group (1997) Size and morphology of the Chicxulub impact crater. *Nature* **390**, 472-6.
- [11] MUÑOZ-ESPADAS, M.J., MARTÍNEZ-FRÍAS, J. & LUNAR, R. (2003) Main geochemical signatures related to meteoritic impacts in terrestrial rocks: A review. In: Koeberl, Ch & Martínez-Ruiz, F. (edits) *Impact markers in the stratigraphic record*. Springer 65-91.
- [11] ORMÓ J. AND LINDSTRÖM M. (2000). When a cosmic impact strikes the seabed. *Geol. Mag.* **137**, 67-80.
- [12] ORMÓ J., DOHM J. M., FERRIS J. C., LEPINETTE A. AND FAIRÉN A. G. (2004) Marine-target craters on Mars? An assessment study. *Meteoritics and Planetary Science* **39**, 333-346.
- [13] PIERAZZO E., AND CRAWFORD D. A. (1997). Hydrocode simulations of Chicxulub as an oblique impact event. *LPI Contribution* **922**, 1-40.
- [14] SHOEMAKER, E.M. (1977). Astronomically observable crater-forming projectiles, In: Roddy, D.J., Pepin, R.O. y Merrill, R.B. eds. Impact and explosion cratering: Planetary and terrestrial implications. New York, Pergamon Press, 617-628.
- [15] SHOEMAKER, E.M., WILLIAMS, J.G., HELIN, E.F. Y WOLFE, R.F. (1979). Earth crossing asteroids: Orbital classes, collision rates with Earth and origin. In: Gehrels, T., ed. *Asteroids: Tucson*, University of Arizona Press, 253-282.
- [16] TSICALAS, F., GUDLAUGSSON, S.T., FALEIDE, J. I. AND ELDHOLM, O. (1999). Mjolnir structure, Barents Sea: a marine impact crater laboratory. *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.* **339**, 193-204.
- [17] WETHERILL, G.W. Y SHOEMAKER, E.M. (1982). Collision of astronomically observable bodies with the Earth. In: Silver, L.T. and Shultz, P. (Edit) *Geological Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth*. Geological Society of America, *Special Paper* **190**, 1:15.

Jesús Martínez-Frías y Jens Ormó
están en el Laboratorio de Geología Planetaria. Centro de Astrobiología (CSIC/INTA) asociado al NASA Astrobiology Institute. Madrid

Estructuras de impacto (confirmadas): 171

12 de Mayo de 2004

CRÁTER	LOCALIZACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DIÁMETRO (km)	Edad (Ma)*	EXP	SOND
Acraman	Sur Australia, Australia	S 32° 1'	E 135° 27'	90	~ 590	Y	N
Ames	Oklahoma, U.S.A.	N 36° 15'	W 98° 12'	16	470 ± 30	N	Y
Amguid	Argelia	N 26° 5'	E 4° 23'	0.45	< 0.1	Y	N
Aorounga	Chad, Africa	N 19° 6'	E 19° 15'	12.6	< 345	Y	N
Aouelloul	Mauritania	N 20° 15'	W 12° 41'	0.39	3.0 ± 0.3	Y	N
Araguainha	Brasil	S 16° 47'	W 52° 59'	40	244.40 ± 3.25	Y	N
Arkenu 1	Libia	N 22° 4'	E 23° 45'	6.8	< 140	Y	N
Arkenu 2	Libia	N 22° 4'	E 23° 45'	10	< 140	Y	N
Avak	Alaska, U.S.A.	N 71° 15'	W 156° 38'	12	> 95	N	Y
B.P. Structure	Libia	N 25° 19'	E 24° 20'	2	< 120	Y	N
Barringer	Arizona, U.S.A.	N 35° 2'	W 111° 1'	1.186	0.049 ± 0.003	Y	Y
Beaverhead	Montana, U.S.A.	N 44° 36'	W 113° 0'	60	~ 600	Y	N
Beyenchime-Salaatin	Rusia	N 71° 0'	E 121° 40'	8	40 ± 20	Y	N
Bigach	Kazakhstan	N 48° 34'	E 82° 1'	8	5 ± 3	Y	Y
Boltysk	Ukrania	N 48° 45'	E 32° 10'	24	65.17 ± 0.64	N	Y
Bosumtwi	Ghana	N 6° 30'	W 1° 25'	10.5	1.07	Y	N
Boxhole	Territorio Norte, Australia	S 22° 37'	E 135° 12'	0.17	0540 ± 0.0015	Y	N
Brent	Ontario, Canada	N 46° 5'	W 78° 29'	3.8	396 ± 20*	N	Y
Calvin	Michigan, USA	N 41° 50'	W 85° 57'	8.5	450 ± 10	N	Y
Campo Del Cielo	Argentina	S 27° 38'	W 61° 42'	0.05	< 0.004	Y	Y
Carswell	Saskatchewan, Canada	N 58° 27'	W 109° 30'	39	115 ± 10	Y	Y
Charlevoix	Quebec, Canada	N 47° 32'	W 70° 18'	54	342 ± 15*	Y	Y
Chesapeake Bay	Virginia, U.S.A.	N 37° 17'	W 76° 1'	90	35.5 ± 0.3	N	Y
Chicxulub	Yucatan, Mexico	N 21° 20'	W 89° 30'	170	64.98 ± 0.05	N	Y
Chiyli	Kazakhstan	N 49° 10'	E 57° 51'	5.5	46 ± 7	Y	Y
Chukcha	Rusia	N 75° 42'	E 97° 48'	6	< 70	Y	Y
Clearwater East	Quebec, Canada	N 56° 5'	W 74° 7'	26	290 ± 20	Y	Y
Clearwater West	Quebec, Canada	N 56° 13'	W 74° 30'	36	290 ± 20	Y	Y
Cloud Creek	Wyoming, U.S.A.	N 43° 7'	W 106° 45'	7	190 ± 30 Ma	N	Y
Connolly Basin	W Australia, Australia	S 23° 32'	E 124° 45'	9	< 60	Y	N
Couture	Quebec, Canada	N 60° 8'	W 75° 20'	8	430 ± 25	Y	N
Crawford	Australia	S 34° 43'	E 139° 2'	8.5	> 35	Y	N
Crooked Creek	Missouri, U.S.A.	N 37° 50'	W 91° 23'	7	320 ± 80	Y	N
Dalgaranga	W Australia, Australia	S 27° 38'	E 117° 17'	0.024	~ 0.27	Y	N
Decaturville	Missouri, U.S.A.	N 37° 54'	W 92° 43'	6	< 300	Y	Y
Deep Bay	Saskatchewan, Canada	N 56° 24'	W 102° 59'	13	99 ± 4	N	Y

Estructuras de impacto (confirmadas): 171

12 de Mayo de 2004

CRÁTER	LOCALIZACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DIÁMETRO (km)	Edad (Ma)*	EXP	SOND
Dellen	Suecia	N 61° 48'	E 16° 48'	19	89.0 ± 2.7	Y	N
Des Plaines	Illinois, U.S.A.	N 42° 3'	W 87° 52'	8	< 280	N	Y
Dobele	Letonia	N 56° 35'	E 23° 15'	4.5	290 ± 35	N	Y
Eagle Butte	Alberta, Canada	N 49° 42'	W 110° 30'	10	< 65	N	Y
Elbow	Saskatchewan, Canada	N 50° 59'	W 106° 43'	8	395 ± 25	N	Y
El'gygytgyn	Rusia	N 67° 30'	E 172° 5'	18	3.5 ± 0.5	Y	N
Flaxman	Australia	S 34° 37'	E 139° 4'	10	> 35	Y	N
Foelsche	Territorio Norte, Australia	S 16° 40'	E 136° 47'	6	> 545	N	N
Flynn Creek	Tennessee, U.S.A.	N 36° 17'	W 85° 40'	3.8	360 ± 20	Y	Y
Gardnos	Noruega	N 60° 39'	E 9° 0'	5	500 ± 10	Y	N
Glasford	Illinois, U.S.A.	N 40° 36'	W 89° 47'	4	< 430	N	Y
Glover Bluff	Wisconsin, U.S.A.	N 43° 58'	W 89° 32'	8	< 500	Y	Y
Goat Paddock	W Australia, Australia	S 18° 20'	E 126° 40'	5.1	< 50	Y	Y
Gosses Bluff	Territorio Norte, Australia	S 23° 49'	E 132° 19'	22	142.5 ± 0.8	Y	Y
Gow	Saskatchewan, Canada	N 56° 27'	W 104° 29'	5	< 250	Y	N
Goyder	Northern Territory, Australia	S 13° 9'	E 135° 2'	3	< 1400	Y	N
Granby	Suecia	N 58° 25'	E 14° 56'	3	~ 470	N	Y
Gusev	Rusia	N 48° 26'	E 40° 32'	3	49.0 ± 0.2	N	Y
Gweni-Fada	Chad, Africa	N 17° 25'	E 21° 45'	14	< 345	Y	N
Haughton	Nunavut, Canada	N 75° 22'	W 89° 41'	24	23 ± 1	Y	N
Haviland	Kansas, U.S.A.	N 37° 35'	W 99° 10'	0.015	< 0.001	Y	N
Henbury	Territorio Norte, Australia	S 24° 34'	E 133° 8'	0.157	.0042 ± 0.0019	Y	N
Holleford	Ontario, Canada	N 44° 28'	W 76° 38'	2.35	550 ± 100	N	Y
Ile Rouleau	Quebec, Canada	N 50° 41'	W 73° 53'	4	< 300	Y	N
Ilumetsä	Estonia	N 57° 58'	E 27° 25'	0.08	> 0.002	Y	Y
Ilyinets	Ukrania	N 49° 7'	E 29° 6'	8.5	378 ± 5*	N	Y
Iso-Naakkima	Finlandia	N 62° 11'	E 27° 9'	3	> 1000	N	Y
Jänisjärvi	Rusia	N 61° 58'	E 30° 55'	14	700 ± 5	Y	N
Kaalijärv	Estonia	N 58° 24'	E 22° 40'	0.11	0.004 ± 0.001	Y	N
Kalkkop	Sudáfrica	S 32° 43'	E 24° 34'	0.64	< 1.8	Y	Y
Kaluga	Rusia	N 54° 30'	E 36° 12'	15	380 ± 5	N	Y
Kamensk	Rusia	N 48° 21'	E 40° 30'	25	49.0 ± 0.2	N	Y
Kara	Rusia	N 69° 6'	E 64° 9'	65	70.3 ± 2.2	N	Y
Kara-Kul	Tajikistan	N 39° 1'	E 73° 27'	52	< 5	Y	N
Kärdla	Estonia	N 59° 1'	E 22° 46'	7	~ 455	N	Y
Karikkoselkä	Finlandia	N 62° 13'	E 25° 15'	1.5	< 1.88	Y	.
Karla	Rusia	N 54° 55'	E 48° 2'	10	5 ± 1	Y	Y
Kelly West	Territorio Norte, Australia	S 19° 56'	E 133° 57'	10	> 550	N	N
Kentland	Indiana, U.S.A.	N 40° 45'	W 87° 24'	13	< 97	Y	Y
Keuruselkä	Finlandia	N 62° 8'	E 24° 36'	30	< 1800	Y	N
Kgagodi	Botswana	S 22° 29'	E 27° 35'	3.5	< 180	Y	Y
Kursk	Rusia	N 51° 42'	E 36° 0'	6	250 ± 80	N	Y
La Moinerie	Quebec, Canada	N 57° 26'	W 66° 37'	8	400 ± 50	Y	N
Lappajärvi	Finlandia	N 63° 12'	E 23° 42'	23	73.3 ± 5.3	Y	Y
Lawn Hill	Queensland, Australia	S 18° 40'	E 138° 39'	18	> 515	Y	N
Liverpool	Territorio Norte, Australia	S 12° 24'	E 134° 3'	1.6	150 ± 70	Y	N
Lockne	Suecia	N 63° 0'	E 14° 49'	7.5	455	Y	Y
Logancha	Rusia	N 65° 31'	E 95° 56'	20	40 ± 20	N	N
Logoisk	Bielorusia	N 54° 12'	E 27° 48'	15	42.3 ± 1.1	N	Y
Lonar	India	N 19° 58'	E 76° 31'	1.83	0.052 ± 0.006	Y	Y
Lumparn	Finlandia	N 60° 9'	E 20° 6'	9	~ 1000	N	Y
Macha	Rusia	N 60° 6'	E 117° 35'	0.3	< 0.007	Y	N
Manicouagan	Quebec, Canada	N 51° 23'	W 68° 42'	100	214 ± 1	Y	Y
Manson	Iowa, U.S.A.	N 42° 35'	W 94° 33'	35	73.8 ± 0.3	N	Y

Estructuras de impacto (confirmadas): 171

12 de Mayo de 2004

CRÁTER	LOCALIZACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DIÁMETRO (km)	Edad (Ma)*	EXP	SOND
Maple Creek	Saskatchewan, Canada	N 49° 48'	W 109° 6'	6	< 75	N	Y
Marquez	Texas, U.S.A.	N 31° 17'	W 96° 18'	12.7	58 ± 2	N	Y
Middlesboro	Kentucky, U.S.A.	N 36° 37'	W 83° 44'	6	< 300	Y	Y
Mien	Suecia	N 56° 25'	E 14° 52'	9	121.0 ± 2.3	Y	Y
Mishina Gora	Rusia	N 58° 43'	E 28° 3'	4	300 ± 50	Y	Y
Mistastin	Newfoundland/Labrador, Canada	N 55° 53'	W 63° 18'	28	36.4 ± 4*	Y	N
Mizarai	Lituania	N 54° 1'	E 23° 54'	5	500 ± 20	N	Y
Mjølñir	Noruega	N 73° 48'	E 29° 40'	40	142.0 ± 2.6	N	Y
Montagnais	Nova Scotia, Canada	N 42° 53'	W 64° 13'	45	50.50 ± 0.76	N	Y
Monturaqui	Chile	S 23° 56'	W 68° 17'	0.46	< 1	Y	N
Morasko	Polonia	N 52° 29'	E 16° 54'	0.1	< 0.01	Y	N
Morokweng	Sudáfrica	S 26° 28'	E 23° 32'	70	145.0 ± 0.8	N	Y
Mount Toondina	S Australia, Australia	S 27° 57'	E 135° 22'	4	< 110	Y	N
Neugrund	Estonia	N 59° 20'	E 23° 40'	8	~ 470	N	
New Quebec	Québec, Canada	N 61° 17'	W 73° 40'	3.44	1.4 ± 0.1	Y	N
Newporte	N Dakota, U.S.A.	N 48° 58'	W 101° 58'	3.2	< 500	N	Y
Nicholson	Territorios Norte, Canada	N 62° 40'	W 102° 41'	12.5	< 400	N	N
Oasis	Libia	N 24° 35'	E 24° 24'	18	< 120	Y	N
Obolon'	Ukrania	N 49° 35'	E 32° 55'	20	169 ± 7	N	Y
Odessa	Texas, U.S.A.	N 31° 45'	W 102° 29'	0.168	< 0.05	Y	Y
Ouarkziz	Argelia	N 29° 0'	W 7° 33'	3.5	< 70	Y	N
Paasselkä	Finlandia	N 62° 2'	E 29° 5'	10	< 1800	Y	Y
Piccaninny	W Australia, Australia	S 17° 32'	E 128° 25'	7	< 360	Y	N
Pilot	Territorios Norte, Canada	N 60° 17'	W 111° 1'	6	445 ± 2	Y	N
Popigai	Rusia	N 71° 39'	E 111° 11'	100	35.7 ± 0.2	Y	Y
Presqu'île	Quebec, Canada	N 49° 43'	W 74° 48'	24	< 500	Y	N
Puchezh-Katunki	Rusia	N 56° 58'	E 43° 43'	80	167 ± 3	N	Y
Ragozinka	Rusia	N 58° 44'	E 61° 48'	9	46 ± 3	N	Y
Red Wing	N Dakota, U.S.A.	N 47° 36'	W 103° 33'	9	200 ± 25	N	Y
Riachao Ring	Brasil	S 7° 43'	W 46° 39'	4.5	< 200	Y	N
Ries	Alemania	N 48° 53'	E 10° 37'	24	15.1 ± 0.1	Y	Y
Río Cuarto	Argentina	S 32° 52'	W 64° 14'	1 by 4.5	< 0.1	Y	N
Rochechouart	Francia	N 45° 50'	E 0° 56'	23	214 ± 8	Y	N
Rock Elm	Wisconsin, U.S.A.	N 44° 43'	W 92° 14'	6	< 505		
Roter Kamm	Namibia	S 27° 46'	E 16° 18'	2.5	3.7 ± 0.3	Y	N
Rotmistrovka	Ukrania	N 49° 0'	E 32° 0'	2.7	120 ± 10	N	Y
Sääksjärvi	Finlandia	N 61° 24'	E 22° 24'	6	~ 560	Y	Y
Saarijärvi	Finlandia	N 65° 17'	E 28° 23'	1.5	> 600		Y
Saint Martin	Manitoba, Canada	N 51° 47'	W 98° 32'	40	220 ± 32	N	Y
Serpent Mound	Ohio, U.S.A.	N 39° 2'	W 83° 24'	8	< 320	Y	Y
Serra da Cangalha	Brasil	S 8° 5'	W 46° 52'	12	< 300	Y	Y
Shoemaker (formerly Teague)	W Australia, Australia	S 25° 52'	E 120° 53'	30	1630 ± 5	Y	N
Shunak	Kazakhstan	N 47° 12'	E 72° 42'	2.8	45 ± 10	Y	Y
Sierra Madera	Texas, U.S.A.	N 30° 36'	W 102° 55'	13	< 100	Y	Y
Sikhote Alin	Rusia	N 46° 7'	E 134° 40'	0.027	0.000055	Y	N
Siljan	Suecia	N 61° 2'	E 14° 52'	52	361.0 ± 1.1	Y	Y
Slate Islands	Ontario, Canada	N 48° 40'	W 87° 0'	30	~ 450	Y	N
Sobolev	Rusia	N 46° 18'	E 137° 52'	0.053	< 0.001	Y	Y
Söderfjärden	Finlandia	N 63° 2'	E 21° 35'	5.5	~ 600	N	Y
Spider	W Australia, Australia	S 16° 44'	E 126° 5'	13	> 570	Y	N
Steen River	Alberta, Canada	N 59° 30'	W 117° 38'	25	91 ± 7*	N	Y
Steinheim	Alemania	N 48° 41'	E 10° 4'	3.8	15 ± 1	Y	Y
Strangways	N Territorio, Australia	S 15° 12'	E 133° 35'	25	646 ± 42	Y	N
Suavjärvi	Rusia	N 63° 7'	E 33° 23'	16	~ 2400		

Estructuras de impacto (confirmadas): 171

12 de Mayo de 2004

CRÁTER	LOCALIZACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DIÁMETRO (km)	Edad (Ma)*	EXP	SOND
Sudbury	Ontario, Canada	N 46° 36'	W 81° 11'	250	1850 ± 3	Y	Y
Suvasvesi N	Finlandia	N 62° 42'	E 28° 10'	4	< 1000	N	Y
Tabun-Khara-Obo	Mongolia	N 44° 6'	E 109° 36'	1.3	150 ± 20	Y	N
Talemzane	Argelia	N 33° 19'	E 4° 2'	1.75	< 3	N	Y
Tenoumer	Mauritania	N 22° 55'	W 10° 24'	1.9	0.0214 ± 0.0097	Y	N
Ternovka	Ukrania	N 48° 08'	E 33° 31'	11	280 ± 10	N	Y
Tin Bider	Argelia	N 27° 36'	E 5° 7'	6	< 70	Y	N
Tookoonooka	Queensland, Australia	S 27° 7'	E 142° 50'	55	128 ± 5	N	Y
Tswaing (formerly Pretoria Saltpan)	Sudafrica	S 25° 24'	E 28° 5'	1.13	0.220 ± 0.052	Y	Y
Tvären	Suecia	N 58° 46'	E 17° 25'	2	> 455	N	Y
Upheaval Dome	Utah, U.S.A.	N 38° 26'	W 109° 54'	10	< 170	Y	Y
Vargeao Dome	Brasil	S 26° 50'	W 52° 7'	12	< 70	Y	N
Veevers	W Australia, Australia	S 22° 58'	E 125° 22'	0.08	< 1	Y	N
Vepriai	Lituania	N 55° 5'	E 24° 35'	8	> 160 ± 10	N	Y
Viewfield	Saskatchewan, Canada	N 49° 35'	W 103° 4'	2.5	190 ± 20	N	Y
Vredefort	Sudáfrica	S 27° 0'	E 27° 30'	300	2023 ± 4	Y	Y
Wabar	Arabia Saudi	N 21° 30'	E 50° 28'	0.116	0.00014	Y	N
Wanapitei	Ontario, Canada	N 46° 45'	W 80° 45'	7.5	37.2 ± 1.2	N	N
Wells Creek	Tennessee, U.S.A.	N 36° 23'	W 87° 40'	12	200 ± 100	Y	Y
West Hawk	Manitoba, Canada	N 49° 46'	W 95° 11'	2.44	351 ± 20	N	Y
Wetumpka	Alabama, U.S.A.	N 32° 31'	W 86° 10'	6.5	81.0 ± 1.5	Y	Y
Wolfe Creek	W Australia, Australia	S 19° 10'	E 127° 48'	0.875	< 0.3	Y	N
Woodleigh	Australia	S 26° 3'	E 114° 39'	40	364 ± 8	N	Y
Yarrabubba	W Australia	S 27° 10'	E 118° 50'	30.00	~ 2000	Y	N
Zapadnaya	Ukrania	N 49° 44'	E 29° 0'	3.2	165 ± 5	N	Y
Zeleny Gai	Ukrania	N 48° 4'	E 32° 45'	2.5	80 ± 20	N	Y
Zhamanshin	Kazakhstan	N 48° 24'	E 60° 58'	14	0.9 ± 0.1	Y	Y

*Tomado de Earth Impact Database, James Whitehead y John G. Spray, <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/CINameSort2.htm>.