

Metodología para la exploración de impactos meteóricos y depósitos minerales asociados

METHODOLOGY FOR THE EXPLORATION OF METEORITE IMPACTS AND THEIR ASSOCIATED MINERAL DEPOSITS

SAIT **Khurama**¹

RESUMEN

En la actualidad se ha venido forjando una nueva conciencia acerca de la conexión que nuestro planeta tiene con respecto al cosmos. Como parte de esta pertenencia se han venido destacando fenómenos que hasta hace pocos años eran no menos que ignorados. Uno de estos es la posibilidad, no tan remota en el tiempo geológico, de ser impactados por un cuerpo externo a la Tierra. De hecho, históricamente han existido impactos que, además de establecer puntos de inflexión en el curso de la vida y de la historia geológica del planeta, han generado o favorecido condiciones para el emplazamiento de depósitos minerales que hoy en día pueden ser explotados económicamente. Con esta nueva perspectiva, es importante considerar una metodología apropiada para abordar, desde el punto de vista del potencial en recursos minerales, este tipo de estructuras de origen extraterrestre. En este artículo se expone este método de trabajo, de modo que sea una contribución para la exploración de recursos minerales no considerados entre los ambientes de depósito ortodoxos. Este trabajo aporta en dos sentidos: por un lado, se propone una metodología sistemática y sistémica para reconocer los impactos meteóricos, por el otro, se plantea la necesidad de abrir la mente hacia nuevas opciones de prospección en ámbitos geológicos no convencionales.

Palabras clave

Metodologías de exploración, cráter de impacto, levantamientos geofísicos, meteorito, depósitos minerales asociados a impactos.

ABSTRACT

There is a new awareness recently concerning the connection of our planet to the rest of the cosmos. Throughout geologic time this possibility of an external body impacting the Earth has many times been a reality. These impacts have historically changed the course of life on Earth and the geologic history of the planet. They have also generated and enhanced the conditions for mineral emplacement and concentration which can today be exploited economically. Therefore it is important to understand the appropriate methodology, from the view of potential mineral resources, for addressing these structures of extraterrestrial origin. These methodologies are reported in this article as a contribution to the exploration of unorthodox mineral resources. In fact, there is a double contribution: first, a systematic and systemic methodology to recognize these impacts, second, to propose the necessity for a more "open-minded" approach in nonconventional geologic environment prospecting.

Key words

Exploration Methodologies, Impact Crater, Geophysical Surveys, Meteor, Economic Mineral Deposits Associated to Impacts.

Artículo recibido el 19 de diciembre de 2008. Aprobado el 30 de diciembre de 2008.

Introducción

La creciente demanda de materias primas por parte de las economías emergentes y por países que hoy son motor de desarrollo mundial, como el caso de los países asiáticos, comparada con la tasa de explotación de los yacimientos minerales existentes, ha fomentado la necesidad de incrementar el conocimiento geológico del país para generar nuevos blancos de exploración y aumentar la oferta y, por tanto, las posibilidades económicas del sector minero nacional. Esta situación exige generar diferentes ideas exploratorias y emprender abordajes novedosos para encontrar nuevos depósitos minerales de importancia económica.

Como parte de estas ideas exploratorias innovadoras, en el presente artículo se expone un ejemplo de la metodología geofísica empleada para la determinación de impactos meteóricos, fenómeno geológico de origen extraterrestre que, como se verá en esta exposición, puede ser un blanco de exploración

interesante. Se presentan ejemplos de depósitos de tipo mundial con resultados económicos muy beneficiosos.

Antecedentes

En el trabajo realizado para optar al título de MSc en Geofísica (Khurama, 2007), se planteó como problema de investigación estudiar una estructura circular observable en un trayecto del río Vichada. Esta estructura, que llama la atención en las imágenes de sensores remotos, tiene aproximadamente 50 km de diámetro, y es contorneada por el río en un 50% en su sector sur. Es un rasgo muy llamativo por encontrarse en un área en que la mayoría de drenajes, dispuestos en una zona relativamente plana, de escaso relieve y orientados en dirección NW, desembocan en el río Orinoco, y donde las corrientes de agua no deberían mostrar ninguna perturbación en su recorrido. El río Tuparro al norte, paralelo al río Vichada, también presenta un cam-

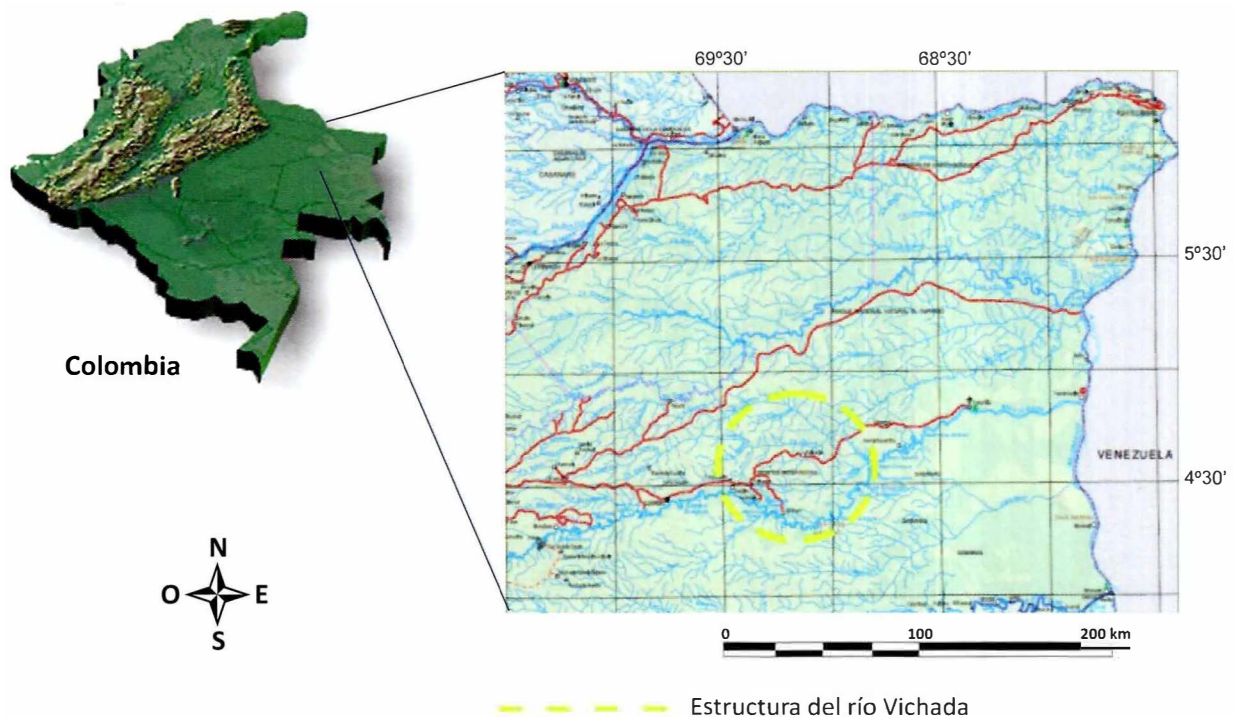


Figura 1. Mapa del departamento de Vichada. Resalta la estructura del río Vichada (adaptado del IGAC, *Mapa Digital Integrado*, 2003)

bio en su dirección, pero en sentido contrario. Los dos ríos delimitan un contorno ovoide que acentúa aún más la particularidad del área de estudio. En las figuras 1 y 2 se muestra, respectivamente, la localización del área investigada y una imagen extraída del Modelo Digital de la Nasa (DEM de la NASA en Resolución 90 x 90, tomado de la página de la Universidad de Maryland: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). En estas imágenes se observa con claridad la llamativa configuración de la estructura objeto de este estudio.

Desde la perspectiva económica, era clave la comprensión de la génesis de esta estructura ya que, sea cual sea su origen (intrusión, impacto meteórico, diatrema, maar o pliegue estructural), a cada uno de estos fenómenos se asocian depósitos económicos importantes, descritos en literatura de geología económica (Hawke & Dentith, 2006; Masaitis & Grieve, 1994; Masaitis, 1989; Pirajno, 2005; Westbroek & Stewart, 1996).

Para esclarecer la naturaleza de la estructura, esta investigación planteó cuatro objetivos específicos:

1. Llevar a cabo un reconocimiento geológico en un área aproximada² de 1970 km² para determinar la existencia o no de evidencias de campo que expliquen su génesis.
2. Analizar si se presentan contrastes en densidad o susceptibilidad magnética, por medio de levantamientos geofísicos terrestres (gravimetría y magnetometría).
3. Hacer una evaluación regional con el uso de herramientas geofísicas satelitales y aerotransportadas (a partir de gravimetría del Modelo EGM-96 [Lemoine et ál., 1998] y estudios aeromagnéticos previos).
4. Establecer si esta zona pudiese ser considerada un blanco de exploración (*target*) para proyectos económicos mineros.

En esta fase exploratoria se adoptó la denominación Estructura del río Vichada siguiendo la establecida por el analista de sistemas Maximiliano Rocca

(2004), quien realiza investigaciones relacionadas con asteroides e impactos meteóricos en la Tierra. Este autor describe la estructura a partir de imágenes LANDSAT a color (bandas 4, 5 y 7 del SSC-NASA, USA, figura 3). Con base en esta información, refiere características de anillos concéntricos de la estructura, descartando la posibilidad de que sea una intrusión o una caldera volcánica gigante. En cambio, propone que se trata de una estructura originada por el impacto de un meteorito.

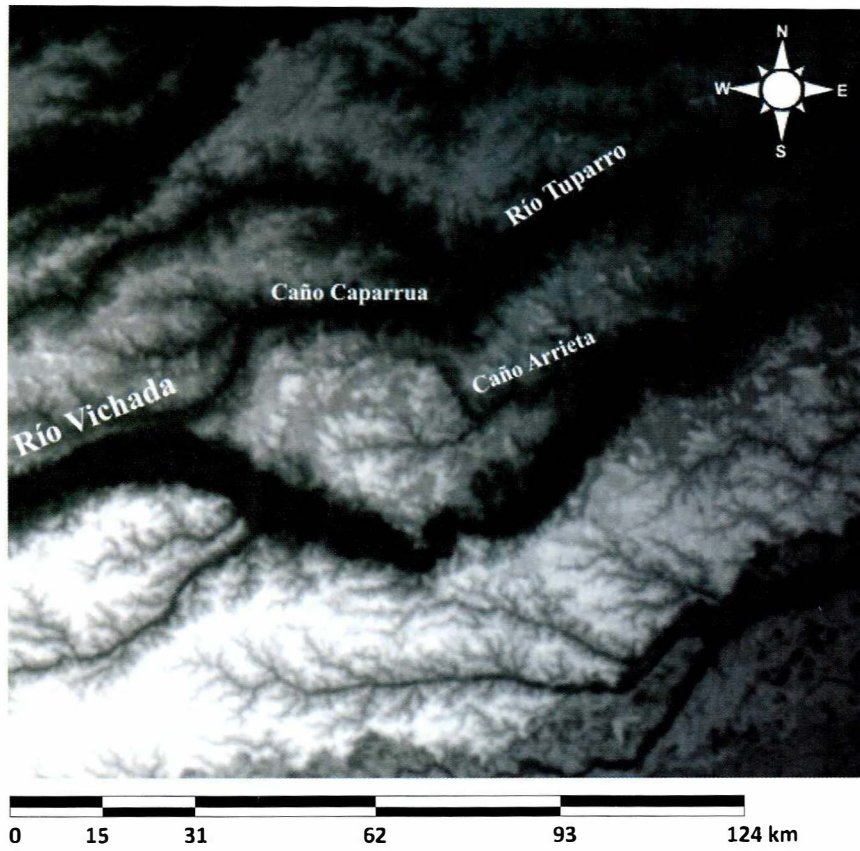
Autores como Melosh (1989) han deducido que existe una relación matemática que permite predecir las dimensiones de los multianillos. Por consiguiente, en la estructura del río Vichada se tendrían las dimensiones de 30 km para el anillo interno y 50 km para el anillo externo, con la posibilidad de que existan más anillos.

Técnicas geofísicas en la determinación de cráteres de impacto

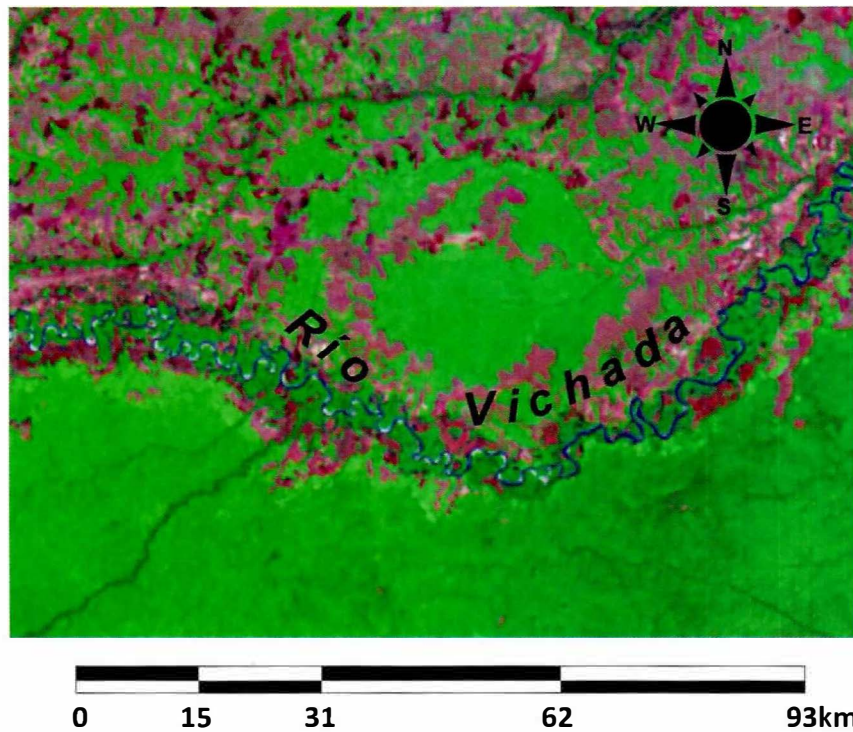
Hay razones de peso logísticas y técnicas para que en este tipo de investigaciones se proponga el uso de métodos que caen en la categoría de los sensores remotos. Entre estos, por definición, se incluyen las técnicas geofísicas, ya que la mayor parte de la evidencia de impacto se halla en el subsuelo y ha sido ensombrecida por los procesos dinámicos actuantes en la superficie terrestre. Otra razón para la utilización de estas herramientas es la dificultad de acceder a un área, ya sea por problemas de infraestructura (no existencia de vías de comunicación, desmejoramiento de estas por aspectos climáticos o desastres naturales) o por problemas sociales o de orden público.

El principal aporte de los levantamientos geofísicos es que permiten caracterizar la respuesta de las propiedades físicas detectables. Además, son un medio que aporta información arealmente distribuida de la geología del subsuelo, de manera relativamente rápida y con una favorable relación costo-beneficio (Kearey et ál., 2002). Los levantamientos geofísicos optimizan los programas de exploración maximizando las áreas de cubrimiento y minimizando el desgaste de recursos en análisis puntuales.

² El área es calculada por $\pi \times r^2$, donde r es el radio estimado de la estructura: ~ 25 km.



► Figura 2. Modelo digital de elevación SRTM de la NASA con resolución espacial 90 X 90 m (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>)



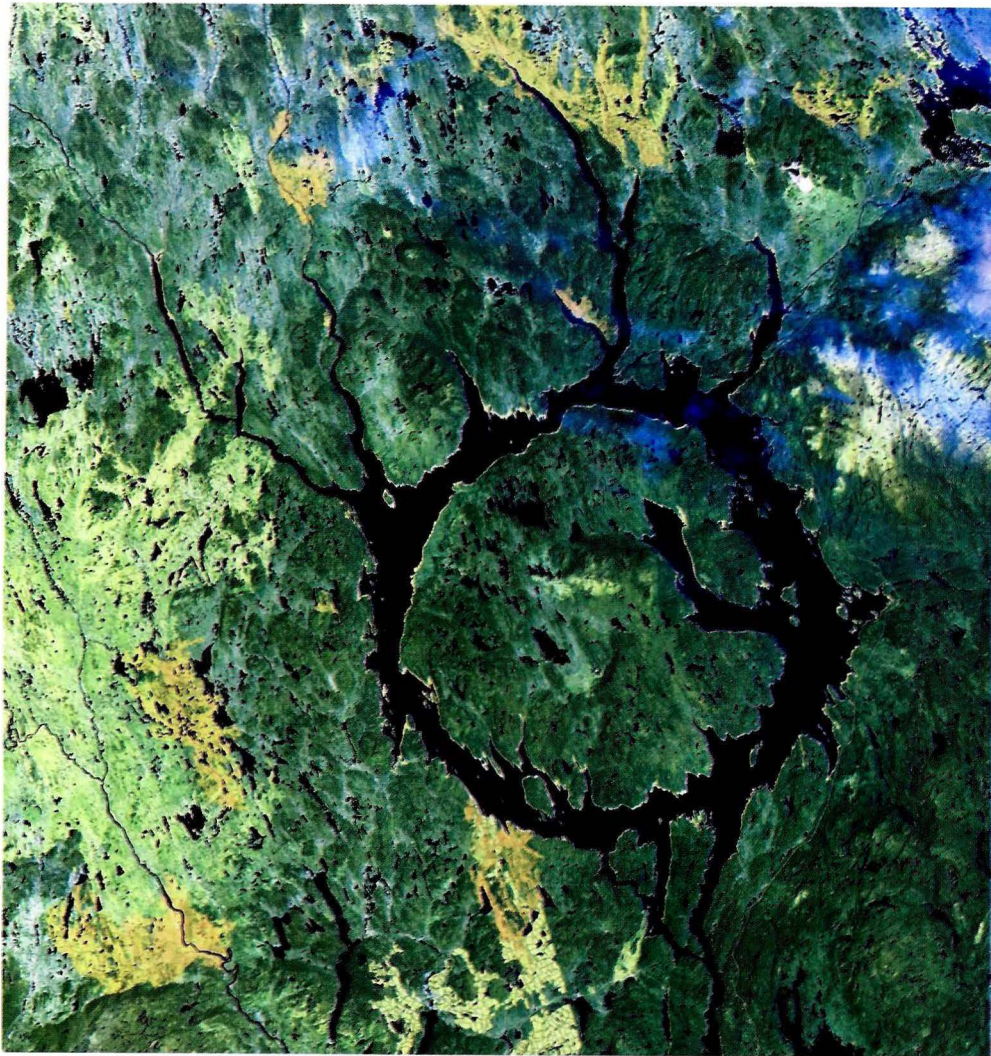
► Figura 3. Imagen Landsat de la estructura del río Vichada.

La interpretación de estas respuestas a la luz del conocimiento geológico del área de estudio (estilo estructural y tectónica, ambientes e historia geológica, estratigrafía y litología) constituye una herramienta invaluable en la comprensión de la evolución del fenómeno desde el momento en que se generó hasta la situación apreciable actualmente.

En este trabajo se enfatiza en que, además de la información obtenida por sensores remotos, nada reemplaza las observaciones hechas por la visita directa al sitio del probable impacto (Koeberl, 2004). En consecuencia, se plantean estudios geológicos y geofísicos de campo para conocer las características

de las rocas involucradas en la estructura, la geología del terreno y las anomalías geofísicas que puedan presentarse en el área de estudio.

En las últimas décadas, los estudios geofísicos y otros métodos, como los sensores remotos, han sido herramientas para el reconocimiento inicial de muchas estructuras de impacto (Pati & Reimold, 2007). Pueden enumerarse diversos casos en los que el primer acercamiento ocurrió gracias a una configuración especial detectada por medio de una imagen satelital. En el caso de la Estructura del río Vichada, esta fue la primera evidencia que llamó la atención acerca de la curiosa conformación del río. En la figura 4 puede observarse otro ejemplo



■ **Figura 4.** Imagen satelital que muestra el remanente del glaciar erodado de la estructura de impacto de Manicouagan en Quebec, Canadá (tomado de Pati & Reimold, 2007).

de imagen satelital: la Estructura Manicouagan en Quebec, Canadá.

La anomalía gravimétrica de una estructura de impacto es muy característica y la relación entre los efectos del choque y la densidad son totalmente evidentes. Se estima que un quinto de los cráteres de impacto conocidos en la Tierra están cubiertos por sedimentos. La gravimetría ha sido la principal herramienta para identificar estas estructuras (Ahern, 1997). En la figura 5 se observa la firma gravimétrica del cráter Chicxulub, al norte de la península de Yucatán en México.

La magnetometría también es un método de campos potenciales que aporta trascendental información de las estructuras de impacto. El hecho de que esta herramienta muestre los contrastes en

los valores de susceptibilidad magnética, así como el espesor de cobertera sedimentaria permite, en combinación con otros métodos, ir delineando y definiendo la geometría, disposición y profundidad del impacto en superficie y en el subsuelo. En la figura 6 se observa la anomalía magnetométrica de la Estructura Ames, en Oklahoma, Estados Unidos

Metodología de investigación

En el trabajo de investigación de Khurama (2007), se aplicó el principio de la hipótesis nula, es decir, se contradice la hipótesis original que señala que la Estructura del río Vichada corresponde a un cráter de impacto. Por tanto, se partió del análisis de los probables fenómenos geológicos que podrían dar como resultado la geometría circular observable en

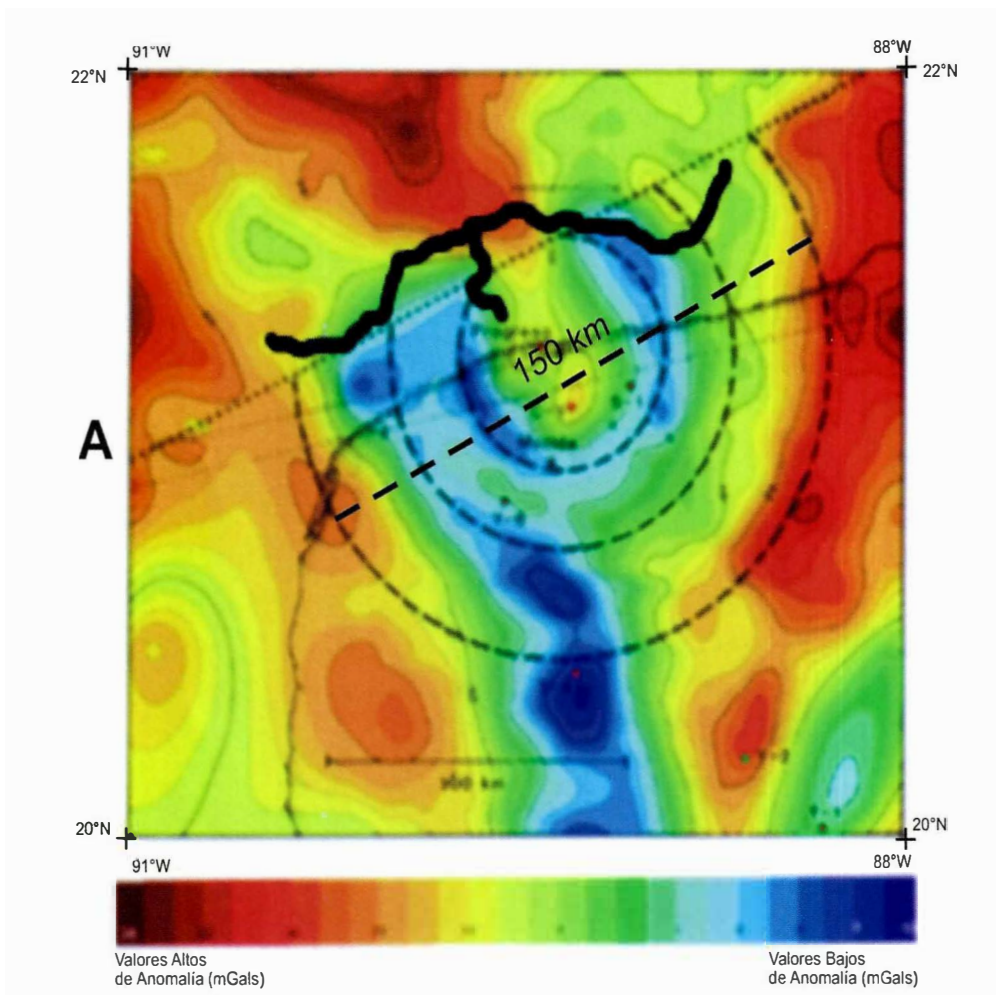
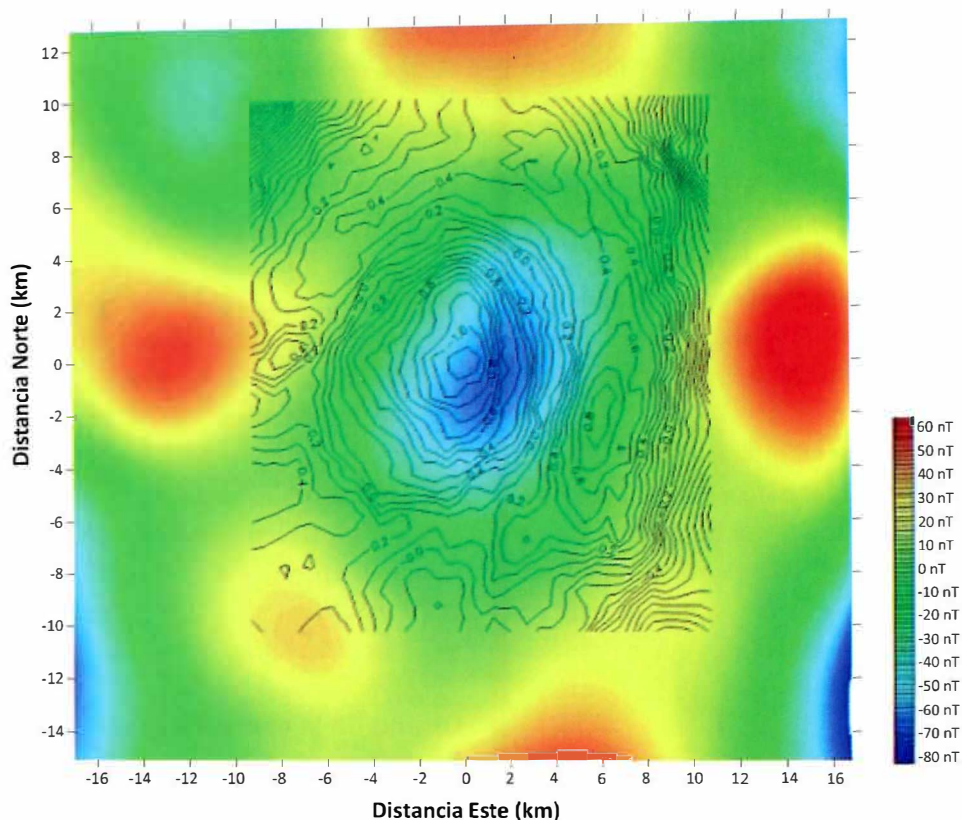


Figura 5. Anomalía gravimétrica de Bouguer en la esquina norte de la Península de Yucatán en México (tomado de Hildebrand et ál., 1991).



► **Figura 6.** Anomalía magnética observable en la estructura Ames, en Oklahoma, Estados Unidos. Los valores varían de decenas a cientos de nanoteslas, debido quizá a la desmagnetización, remagnetización y a los efectos de magnetización remanente por causas termales y químicas generadas por el impacto. En contornos se superpone la anomalía gravimétrica (tomado de Ahern, Judson L., 1997).

imágenes satelitales. Cada una de estas se examinó independientemente, estudiando sus causas y la respuesta geofísica que cada fenómeno puede generar. Las posibilidades varían desde un intrusivo ígneo, una diatrema, maar o, como lo ha propuesto Rocca (2002), puede ser causada por un impacto meteórico.

En este estudio se propone una metodología ordenada de manera tal que cada etapa se convierte en un insumo de la subsecuente. Se propone que en la determinación de estas estructuras se siga la metodología descrita a continuación.

Compilación de información existente

Se hace un inventario de la información disponible relacionada con el área de trabajo. Incluye bases topográficas, cartografía geológica previa, perfiles geológicos, columnas estratigráficas, pozos exploratorios, petrografía, dataciones isotópicas, líneas

sísmicas, aerogeofísica, e imágenes de sensores remotos. La información geofísica satelital utilizada en el caso de la Estructura del río Vichada fue tomada de la base de datos del EGM-96 (Torrence et ál., 1998).

Esta información se debe manejar en medio digital de manera tal que sea posible intercambiar archivos, superponer capas y generar bases de datos. Es recomendable utilizar un modelo digital de elevación como el de la NASA. Este ejercicio de compilación es muy importante, ya que permite conocer los trabajos previos para, en la etapa subsiguiente, cuestionar la validez de conclusiones precedentes formuladas por colegas que hayan estudiado el fenómeno.

Análisis y evaluación

Se evalúa la información compilada en la fase anterior. Se analiza qué otros fenómenos geológicos

pueden generar este tipo de estructuras. En el caso de estudio, se tuvieron en cuenta los intrusivos, como batolitos, diques anulares, lacolitos o stocks –los cuales pueden presentar formas circulares que al llegar a superficie, o al ser expuestas por la erosión, muestran formas radiales similares a un cráter de meteorito–. Otras estructuras que deben tenerse en cuenta son diatremas, maars o un cráter producido por un impacto meteórico. Algunas de estas se descartan por sus dimensiones o su geometría en el subsuelo.

A partir de estas posibilidades se decide qué instrumentos ayudan a esclarecer la génesis de la estructura y con ello reducir las hipótesis a un par de probables fenómenos geológicos. El objetivo de esta fase es filtrar los datos relevantes, determinar vacíos de información y establecer qué herramientas geofísicas se utilizarán.

Combinación de información preexistente

Con el material recopilado: artículos, libros, informes técnicos, tesis de grado, tablas generales y el componente gráfico correspondiente a mapas, columnas estratigráficas, perfiles geológicos, fotografías digitales de afloramientos e imágenes de sensores remotos, se genera un banco de datos digital y análogo.

Es recomendable manipular coberturas cartográficas bajo plataforma tecnológica SIG, relacionadas con bases topográficas, información geológica, geofísica, geoquímica, índices de líneas de vuelo e imágenes de sensores remotos. Esto posibilita hacer cruces de coberturas técnicas y establecer correlaciones entre las diferentes fuentes de información.

Procesamiento de información geofísica regional existente

Esta fase es clave en el proceso de análisis, ya que parte de información geofísica existente. De preferencia, se deben tener como punto de partida los datos “crudos” para procesar con parámetros que se ajusten al problema en estudio, ya sea para descartar fenómenos similares o para realzar atributos

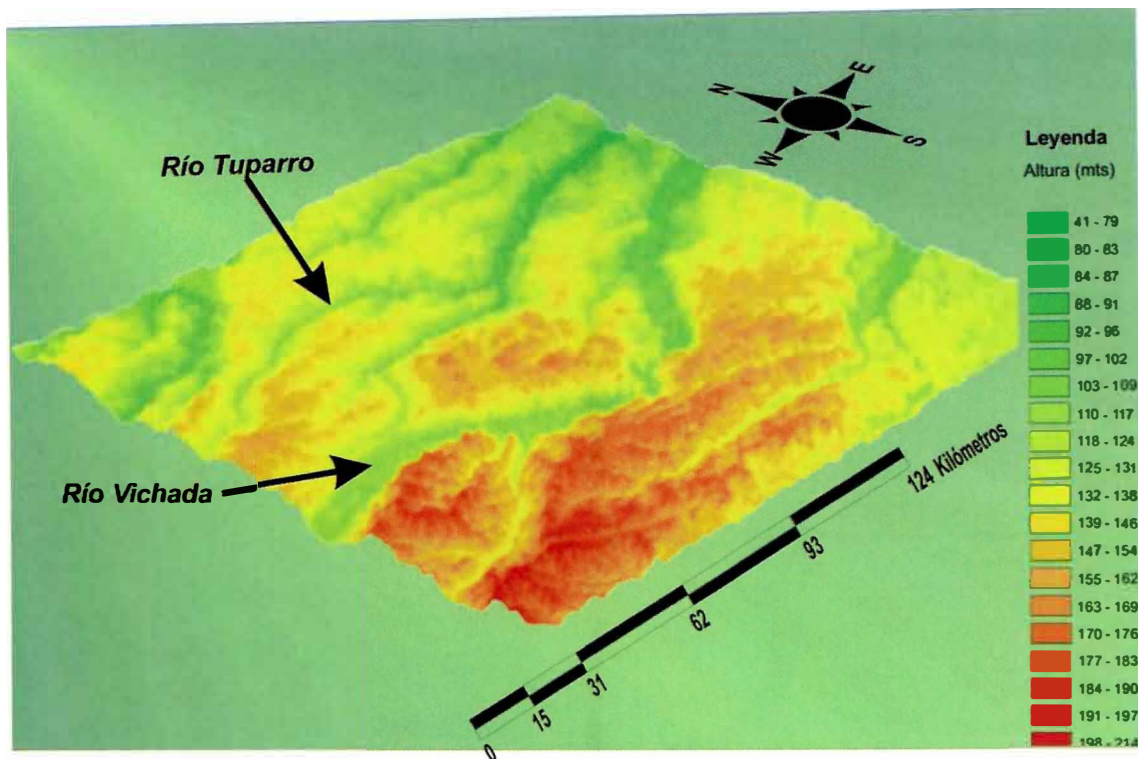
geométricos o contrastes entre litologías esperadas de acuerdo con la hipótesis planteada.

Para estudios regionales es muy interesante utilizar información satelital. En el caso de estudio se trabajó con el Earth Gravity Model 1996 (EGM96) (Torrence et ál., 1998) con resolución de 0,5 grados y con información aportada por la Misión Satelital GRACE con resolución aproximada de 50 km, complementado con datos de la Red Gravimétrica Nacional. Utilizando esta información, pueden hacerse modelamientos del sector, o sectores de interés, desde la corteza hasta discontinuidad de MOHO, aproximadamente a 35 km de profundidad. En su defecto, dependiendo de la calidad, resolución y profundidad alcanzada por los estudios geofísicos previos, se determinarán los parámetros técnicos y espaciales que se tendrán en cuenta.

Diseño de la campaña geológica y geofísica

Se elabora un diseño de la campaña de geología de campo para reconocer los principales rasgos geomorfológicos y las evidencias geológicas relacionados con la estructura, ubicación de perfiles óptimos para levantamiento geológico y predicción de sitios de muestreo. De acuerdo con Koeberl (2004), se esperaría encontrar evidencias de efectos de metamorfismo de impacto y, en algunos casos, meteoritos, o trazas de estos. De igual manera, se diseña la campaña de levantamiento geofísico. Este diseño es muy importante, pues deben ajustarse los parámetros de longitud y orientación de los perfiles, número de estaciones, toma de datos en campo (por ejemplo susceptibilidad magnética in situ).

De un buen diseño dependerá no sólo la calidad de los datos, sino que se ajusten a las necesidades particulares de la estructura que se quiere evaluar. En este caso, por razones técnicas y logísticas (de tiempo, accesibilidad y condiciones climáticas), se optó por utilizar gravimetría y magnetometría terrestre. Como ejemplo del caso de estudio, en la figura 7 se muestra una vista en perspectiva del Modelo Digital de Elevación proporcionado por la NASA. El tratamiento digital de la información con diferentes



► **Figura 7.** Vista en perspectiva de la misma imagen, modificada del Modelo Digital de Elevación de la NASA con resolución 90 X 90 m (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). La escala vertical se ha exagerado X 5 para resaltar los contrastes topográficos.

parámetros permite tomar mejores decisiones en el diseño de las campañas geológicas y geofísicas.

Adquisición

Se trata de la campaña de campo propiamente dicha. En esta se hace el reconocimiento geológico de las principales unidades litológicas presentes en el área de estudio, geformas predominantes y unidades litológicas que permitan caracterizar la estructura estudiada. Se colectan muestras de roca y se analizan cambios morfológicos y zonas de alteración. Se lleva a cabo el levantamiento geofísico diseñado.

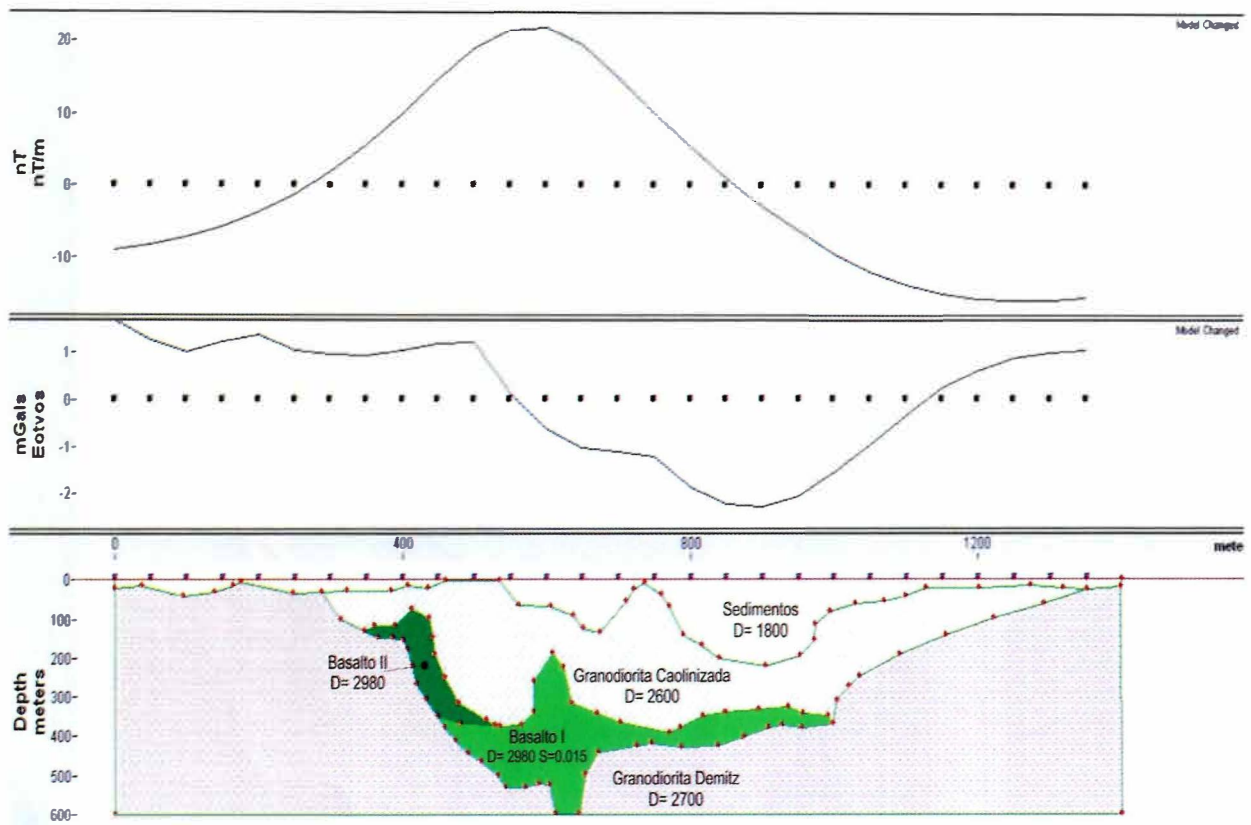
Procesamiento

Aquí se procesa la información adquirida en campo. Se elaboraron mapas y perfiles. Se hacen modelamientos utilizando software geofísico; por ejemplo el Oasis Montaj y el GM-SYS. El modelamiento directo sobre los probables causantes de la Estructura debe hacerse simulando características del área de

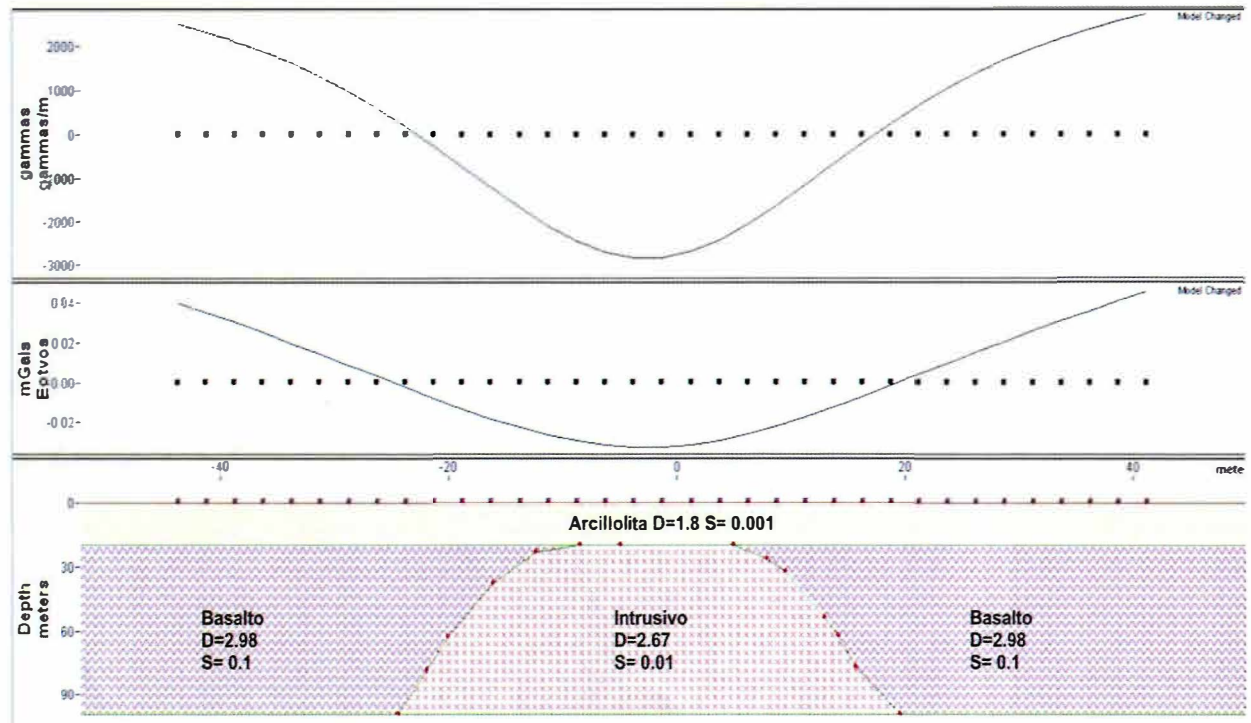
estudio. Deben asumirse valores de susceptibilidad magnética y densidades que deben corresponder con el conocimiento que se tiene de la litología y las propiedades físicas de las rocas presentes en el área de estudio.

Como ejemplo de modelamiento de fenómenos geológicos que podrían generar estructuras radiales como la presente en el río Vichada se muestran las respuestas idealizadas, tanto de anomalías gravimétricas como magnetométricas de una diatrema, un intrusivo y un impacto meteórico (figuras 8, 9, y 10, respectivamente).

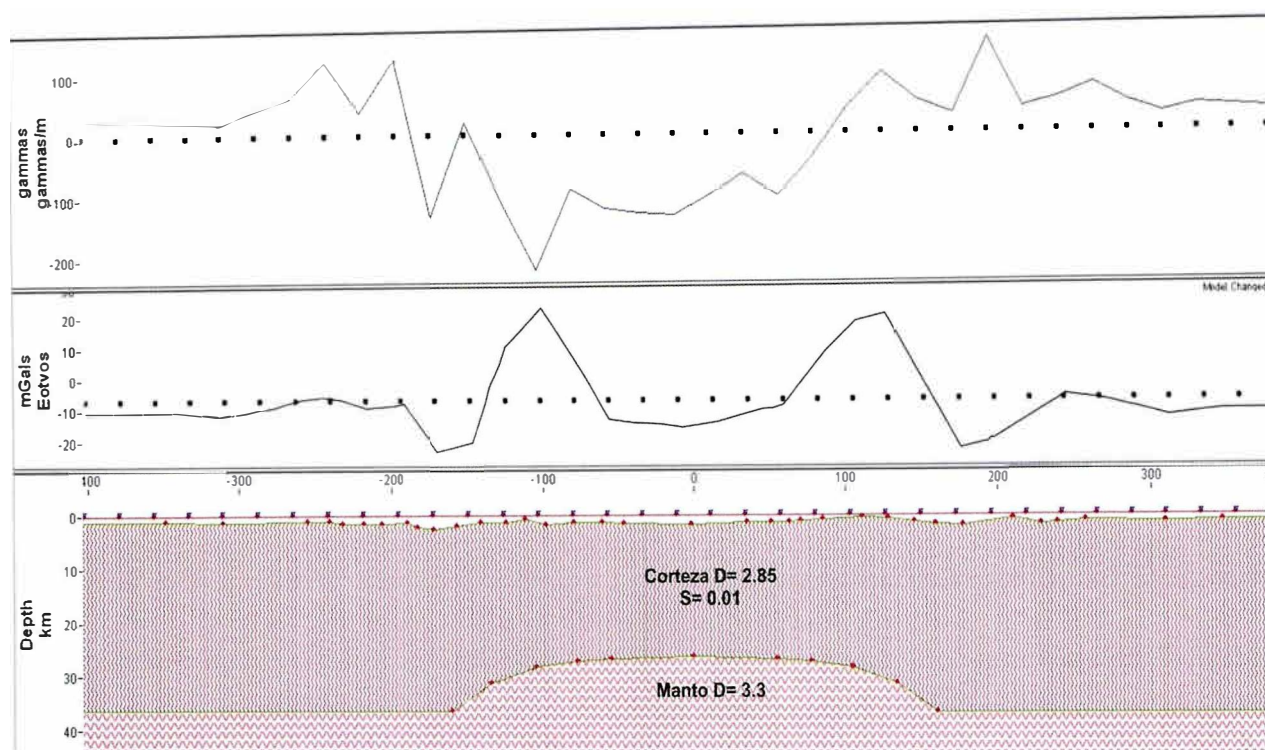
En el modelo que recrea un impacto meteórico se produce una concentración de masa (conocida como MASCON, por su sigla en inglés). Esta se forma por una respuesta elástica del manto después del impacto. La capa de manto, más densa, rebota empujando la corteza que lo cubre. Esta situación genera un resultado de contrastes gravimétricos –debido a las diferencias de densidades– y magnetométricos, causados por las propiedades mag-



► **Figura 8.** Ejemplo de la respuesta geofísica de una diatrema (modificado de Lindner et ál., 2006). La curva superior muestra la respuesta magnetométrica; la inferior, la gravimétrica. D = Densidad, S = Susceptibilidad magnética.



► **Figura 9.** Modelo idealizado de un intrusivo. La curva superior muestra la respuesta magnetométrica, la inferior, la gravimétrica. D = Densidad, S = Susceptibilidad magnética.



► **Figura 10.** Ejemplo idealizado de la respuesta geofísica en un área en la que hubo un impacto de un meteorito. La curva superior muestra la respuesta magnetométrica, la inferior la gravimétrica. D = Densidad, S = Susceptibilidad magnética.

néticas de los materiales constituyentes del manto, apreciable en las curvas modeladas. Estos perfiles también muestran los anillos concéntricos típicos de estas estructuras de impacto.

Interpretación

La interpretación de los datos colectados en campo involucra el conocimiento adquirido de la geología, de las hipótesis de trabajo planteadas y de las restricciones que establecen los modelos predefinidos (sin que esto involucre el forzar una respuesta deseada). Esta interpretación se relaciona con el modelo geológico y con la información procesada de las bases de datos globales existentes, y se generan conclusiones que explican satisfactoriamente la estructura.

Después de seguir metódicamente cada una de las etapas enunciadas anteriormente, se tendrán suficientes herramientas de juicio para descartar algunos fenómenos geológicos que podrían generar la

estructura y concluir, en caso de que sea un cráter de impacto, la causa extraterrestre del fenómeno.

Integración final de modelos

Al final de estas etapas es posible establecer modelos geológicos y geofísicos que aporten una explicación coherente del fenómeno analizado. Cuando la información geológica de superficie es insuficiente, resalta aún más la importancia de los datos obtenidos por medio de los sensores remotos (imágenes satelitales, de radar y fotografías aéreas), incluida la información aerogeofísica o satelital. En esta integración es importante utilizar el principio de economía de hipótesis, lo cual significa que no deben inventarse más estructuras ocultas (o más complejas) de las mínimas necesarias para explicar los datos, pues la explicación más sencilla que involucre la mayor cantidad de observaciones en un modelo coherente con seguridad será la más acertada.

A estas alturas del proceso investigativo deben haberse cubierto diversas escalas de trabajo: global, con la utilización de información gravimétrica satelital; regional, con el aprovechamiento de información aerogeofísica; y local, con levantamientos de geología de campo y perfiles geofísicos u otros datos colectados de acuerdo con las circunstancias técnicas y operativas de la zona de trabajo. Esta abundancia en el espectro de información recopilada permitirá generar un modelo armónico que esclarezca el fenómeno causante de la estructura, su génesis, caracterización geológica y geofísica.

¿Cuál sería entonces la lista de chequeo, de mínimo cumplimiento, para determinar una estructura generada por un impacto de meteorito?

Koeberl (2004) plantea algunos criterios para la identificación y confirmación de las estructuras de impacto en la Tierra. Las características más importantes son:

1. Morfología del cráter.
2. Anomalías geofísicas.
3. Evidencias de metamorfismo de contacto.
4. Presencia de meteoritos o evidencia geoquímica para trazas de proyectiles meteóricos.

Koeberl sostiene que las observaciones morfológicas y geofísicas son importantes al proveer información suplementaria o inicial. Las estructuras geológicas con límites circulares, localizadas en sitios en que no hay otra causa obvia para producir características casi circulares, pueden indicar que son originadas por impactos de meteorito. Los métodos geofísicos son muy útiles en identificar estructuras potenciales de impacto, sobre todo en el esclarecimiento de su geometría y disposición en el subsuelo. En cráteres complejos, el levantamiento central consta de rocas densas del basamento y, generalmente, contiene material afectado con severidad por el impacto. Con frecuencia este levantamiento es más resistente a la erosión que el resto del cráter; por tanto, en estructuras antiguas erodadas, puede ser el único remanente identificable del cráter. Las características geofísicas medibles en los

cráteres de impacto incluyen gravimetría, propiedades magnéticas, sísmica de reflexión y refracción, resistividad eléctrica, gama espectrometría y otras. En la tabla 1 se muestra un resumen de las herramientas geofísicas que podrían ser utilizadas para analizar probables impactos meteóricos.

Importancia económica de los cráteres de impacto

En cuanto a la importancia económica de los impactos meteóricos, Westbroek & Stewart (1996) señalan que, desde un punto de vista más comercial, los cráteres de impacto se han ligado a depósitos económicos de varios materiales y, en algunos casos, estos depósitos son de importancia mundial (por ejemplo el depósito Cu-Ni en Sudbury, Ontario). De los 140 cráteres de impacto terrestres conocidos, aproximadamente 35 (25%) han sido asociados a depósitos económicos. Actualmente 17 (12%) son aprovechados activamente.

A continuación se enumeran, a manera de ejemplo, algunos de los depósitos minerales más importantes asociados a cráteres de impacto. Entre los ejemplos se mencionarán depósitos de minerales metálicos, diamantes generados por impacto, procesos hidrotermales, acumulación de hidrocarburos y shales generadores de hidrocarburos

Depósitos de minerales metálicos

Uno de los ejemplos más conocidos de depósitos de minerales metálicos es el cráter precámbrico de Sudbury en Canadá, cuyas 1,65 mil millones de toneladas métricas de mena con un promedio de 1,2% de níquel y 1,05% de cobre (Masaitis & Grieve, 1994). Los metales se encuentran en segregaciones de sulfuros que fueron inmiscibles dentro del magma generado por el impacto. De menor importancia en Sudbury es la mena hidrotermal en un carbonato delgado depositado en el cráter después del impacto. Este depósito contiene 6 millones de toneladas métricas con un promedio de 4,4% de zinc, 1,4% de cobre y 1,2% de plomo (Rosenfeld, 2002).

Tabla 1. Métodos geofísicos disponibles para determinación de cráteres de impacto.

| Método | Propiedad física | Ámbito de Adquisición | Aporte exploratorio | |
|-----------------------------------|--|--|--|---|
| Magnetometría | Susceptibilidad magnética y remanencia | Superficie, aérea y en pozo | Tectónica y patrones estructurales de los cuerpos rocosos afectados. Detección de intrusivos máficos con cromo, níquel, diamantes, hematita | |
| Gravimetría | Densidad | Superficie, aérea y en pozo | Tectónica de las cuencas. Diferenciación de domos salinos Cuerpos de cromita Sulfuros masivos | |
| Eléctricos | Potencial espontáneo | Conductividad | Superficie y en pozo | Detección de sulfuros masivos y fluidos en zonas de falla causadas por el impacto En depósitos de hidrocarburos "Electrofiltración" de movimiento de fluidos cerca de los pozos |
| | Resistividad | Resistividad o conductividad eléctrica | Superficie y en pozo | Para detectar fluidos conductivos en cercanías en presencia de hidrocarburos Mapeamiento en el subsuelo de características tectónicas, patrones de fracturas causadas por el impacto. Menas de minerales conductores Diferenciación de cuerpos resistivos: sal, calizas y carbón |
| | Polarización inducida | Polarización de Interfase iónica | Superficie y en pozo | Menas minerales diseminadas, incluidos cuerpos de pórfidos cupríferos. |
| | Electromagnetismo | Conductividad eléctrica e inductancia | Superficie, aérea y en pozo | Permite detectar depósitos de sulfuros masivos de baja resistividad (alta conductividad) Permite cartografiar características litológicas y estructurales de las cuencas. |
| | Radar | Constante dieléctrica | Superficie, aérea y en pozo | Geometría, continuidad, profundidad y disposición de los cráteres. Tectónica y fracturas. Tiene limitaciones de profundidad. |
| Sísmica de refracción y reflexión | Densidad y módulo de elasticidad que determinan velocidad de propagación de ondas sísmicas (P y S) | Superficie, y en pozo | Geometría, continuidad, profundidad y disposición de las estructuras. Es posible hacer inferencias de tectónica, incluso fracturas. Con técnicas de procesamiento, es posible conocer detalles internos de las litologías involucradas. | |
| Rayos Gamma | Espectrometría | Concentración emisión de U, Th y K | Superficie, aérea y en pozo | Alteraciones mineralógicas de los depósitos |
| | Centillometría | Concentración emisión de U, Th y K | Superficie, aérea y en pozo | Alteraciones mineralógicas de los depósitos |
| Estado termal | En pozo | Conductividad termal | En pozo | Mediciones de conductividad termal de sedimento inconsolidados. Aprovechamiento de recursos geotermales asociados a impactos. |
| | Por sensores remotos | Inercia termal | Superficie y en pozo | |
| Otros sensores remotos | Intensidad de radiación reflejada (UV, VIS, IR) | Reflectancia del espectro luminoso, Albedo | Superficie | Geometría superficial de los cuerpos Anomalías morfológicas superficiales |

El cráter Chicxulub, al norte de la península de Yucatán, en México, tiene tamaños similares y es posible que una cantidad de metal similar a la de Sudbury esté presente en el nivel ígneo profundo de Chicxulub (figura 11). En el caso de este cráter, el depósito es el producto de la mineralización hidrotermal en fracturas y mantos hospedados dentro de las rocas carbonatadas que rodean el cráter.

De acuerdo con Rosenfeld (2002), los elementos de este sistema incluirían:

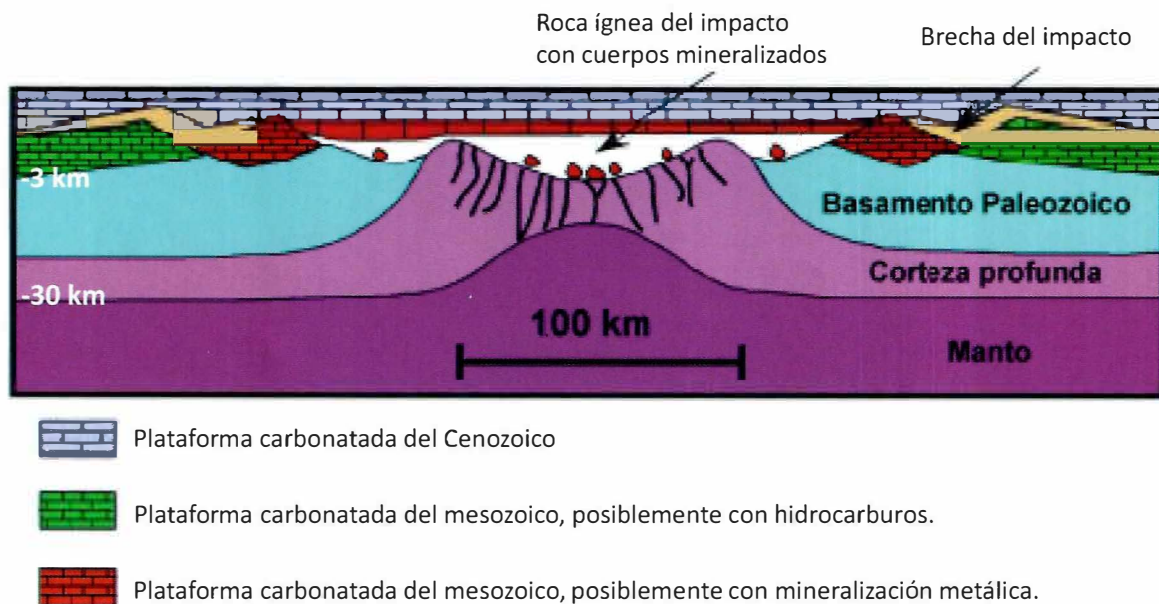
1. El levantamiento central de rocas sobrecalentadas de la corteza profunda (~25 km de profundidad) sobre un área de ~100 km de diámetro.
2. Una caldera remanente en la parte central del impacto, llena de magma y roca caliente, sujeta al ingreso constante de agua oceánica desde la orilla marina del cráter.
3. Una salmuera hidrotermal con alta concentración de cloruros provenientes, principalmente, del agua marina y de sulfuros derivados de los sulfatos del agua marina y de la anhidrita.
4. La convección profunda a través de abundantes fracturas formadas por el impacto y por el colapso subsiguiente de las paredes del cráter.

5. La lixiviación de iones metálicos por la salmuera desde las paredes del sistema hidrotermal, formando complejos metálicos solubles de cloruro y sulfuro.
6. La precipitación de sulfuros metálicos desde la salmuera al enfriarse y oxidarse en las partes distales del sistema hidrotermal.
7. La zonificación metalogénica durante al enfriamiento del sistema.

Diamantes de impacto

En el caso de un impacto producido por un meteorito, y contando con la presencia de suficiente carbón (por ejemplo grafito en rocas cristalinas graníticas), existe la posibilidad de generar yacimientos diamantíferos. Incluso, dada las presiones y temperaturas alcanzadas por el impacto, pueden generarse a partir de litologías ricas en materia carbonosa o simplemente mantos de carbón (Hawke & Dentith, 2006).

Un ejemplo de este tipo de yacimientos es el cráter de Popagai en Siberia (Lee, 2004). En la fase anterior al impacto, existía una depositación original de carbón biogénico acumulado en sedimentos



► **Figura 11.** Sección longitudinal esquemática que muestra posibles recursos económicos relacionados con el cráter de Chicxulub (adaptado de Sharpton et ál., 1994, en Rosenfeld, 2002).

pelíticos, que sufrió metamorfismo granulítico para formar grafito (en un periodo de 2,4 Ga). Este último aparece en una cantidad menor de 1 a 5% del gneis. La onda de presión del impacto transformó instantáneamente el grafito en diamante. Los diamantes se encuentran en una concha semiesférica de alrededor de 1,6 km de espesor, distribuidos dentro del granito de edad arqueano en una distancia radial que se extiende desde 12 hasta 13,6 km sobre el límite más externo del fundido, con un volumen de casi 1600 km³. En la figura 12 se observa la apariencia en afloramiento de esta estructura.

Procesos hidrotermales

De acuerdo con Hawke & Dentith (2006), existen dos criterios clave para que se formen depósitos epigenéticos: 1. Que el enriquecimiento metálico esté presente previamente, en las rocas que serán impactadas (rocas carbonatadas o metasedimentarias). 2. Que el impacto sea suficientemente importante para que genere una celda hidrotermal capaz de alterar o removilizar este enriquecimiento para formar un depósito.

Pirajno (2005) muestra evidencia de sistemas hidrotermales formados por impactos en Australia. Pirajno et ál. (2003) infieren la removilización de mineralización menor de Pb-Zn de carbonatos hospedados, a partir de la estructura Shoemaker, hasta una distancia de dos diámetros del cráter. Sugieren que un segundo evento hidrotermal con temperaturas de 300 a 360 °C opacó el primer evento hidrotermal.

Acumulaciones de hidrocarburos

Otro potencial económico de los impactos meteoríticos es el favorecimiento de acumulación de hidrocarburos. En Norteamérica, prácticamente la mitad de los cráteres están asociados a campos petrolíferos explotados económicamente. El impacto de un meteorito impulsa diferentes procesos geológicos que favorecen la generación y potencial acumulación de crudo (Hawke & Dentith, 2006). El estrés causado por el choque produce una alta densidad de rocas fracturadas que se constituirían en excelentes rocas reservorio. La posterior erosión y depositación de capas finas generaría sellos que



► **Figura 12.** Fotografía que muestra la exposición del cráter Popagai. Se observan brechas masivas alogénicas causadas por el estrés del impacto. Tomado de Keenan Lee, The Colorado School of Mines: <http://geology.mines.edu/faculty/klee/docs/Popigai.pdf>.

Tabla 2. Comparación de importantes yacimientos de petróleo asociados a cráteres de impacto.

| Estructura | Diámetro y Morfología | Edad | Acumulación de Hidrocarburos | Asociación Estructural |
|------------------------|-----------------------|----------------------|---|--|
| Ames, OK | 14 km | 450 Ma | 50 MMbbl aceite 20-60 BCFG Roca fuente controlada por la estructura | Dolomitas en anillo kárstico Brechas granito-dolomíticas del levantamiento central y fondo del cráter |
| Red Wing Creek, N.D. | 9 km - C | 200 Ma | 40-70 MMbbl aceite recuperable 100 BCFG recuperable 12.7 MMbbl aceite y 16.2 BCFG producción total Trampa disponible para hidrocarburos migrantes | Reservorio misisipiano Brechamiento en el levantamiento central |
| Avak, Alaska | 12 km - C | 3-100 Ma | 37 BCFG reservas Trampa disponible para hidrocarburos migrantes | Fallas lítricas en el anillo, las cuales forman trampas estructurales en bloques competentes |
| Márquez, Tx | 22 km - C | 58 Ma | Alguna producción de gas | ? |
| Newporte, N.D. | 3.2 km - C | 500 Ma | | Basamento altamente fracturado |
| Calvin, Mich. | ? | ? | 600 MMbbl aceite | ? |
| Oteen, AB | 22 km - C | 95 Ma | 600 bbl por día | Anillos complejos |
| Viewfield, Sask | 2.4 km - S | Triásico Jurásico | 400 bbl por día 20 MMbbl aceite recuperable Trampa disponible para hidrocarburos migrantes | Brecha carbonatada misisipiana Misisipiano en el anillo |
| Tookoonooka, Australia | 55 km | ? | Forma una zona somera para hidrocarburos migrantes desde la Cuenca Eromanga | Potencial para trampas estratigráficas |

favorecerán el cierre de la trampa y permitirán la acumulación del yacimiento.

Un ejemplo de este tipo de depósito es la provincia de Tookoonooka, en Australia, que es una importante acumulación de aceite y gas. La tabla 2 muestra un resumen de algunas de las principales estructuras petrolíferas asociadas a impactos meteóricos.

En la figura 13 se observa el ejemplo de un perfil de la Cuenca Entreplataforma en el Bloque Yucatán. Los objetivos exploratorios de este play serían las areniscas syn-rift y del post-rift temprano sobre los flancos y crestas de los pilares, y los carbonatos depositados durante y después de la inundación ocasionada por el evento postorogénico de la apertura del golfo de México y del Proto-Caribe (Rosinfeld, 2002).

Shales generadores de hidrocarburos

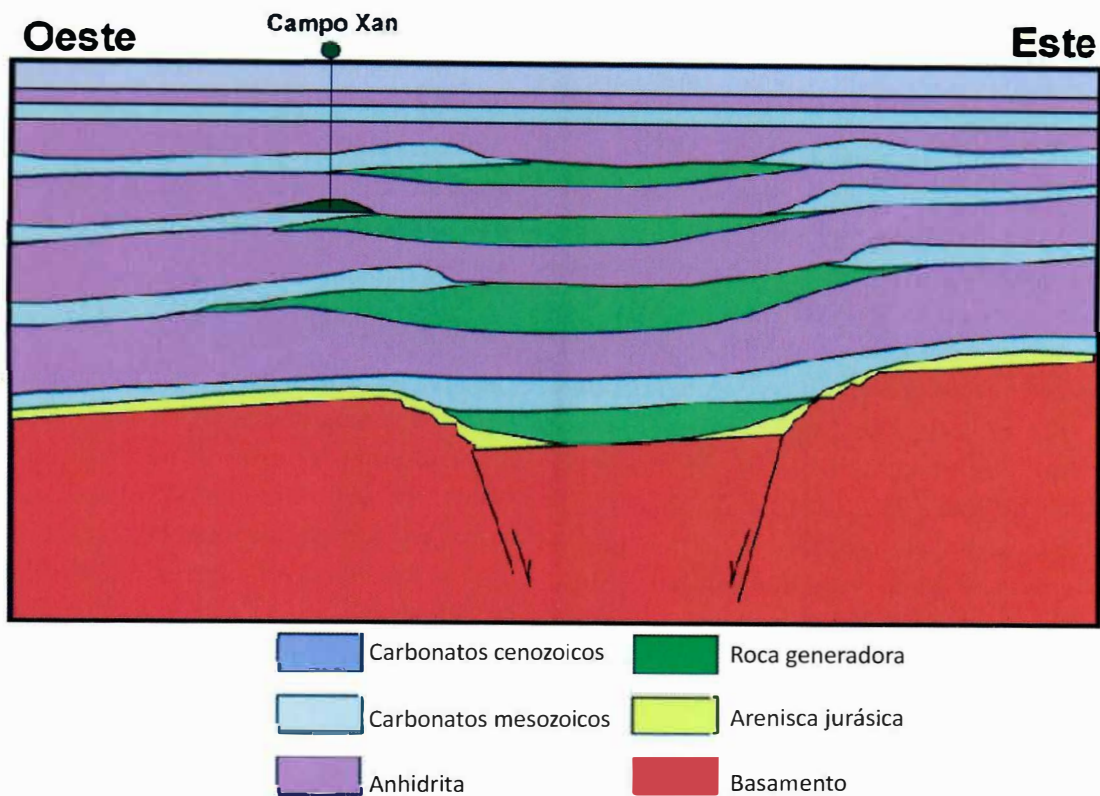
Un impacto meteórico puede generar una cuenca aislada. Si se estimula la actividad orgánica, por ejemplo a partir de algas, se obtiene el suministro orgánico suficiente para desarrollar shales generadores de hidrocarburos. Entre los casos típicos descritos por Westbroek & Stewart (1996) tenemos los cráteres de impacto en Boltysh (25 km de diámetro, 88 Ma), Obolon (15 km de diámetro, 215 Ma) y Rotmistrovka (2,7 km de diámetro, 140 Ma) en Ucrania. Estos contienen, según estos autores, shales portadores de alrededor de 90 millones de barriles de aceite inmaduro. Solo Boltysh contiene 4,5 billones de toneladas métricas de shale, en una secuencia productiva de 400-500 m de espesor.

Discusión

Demostrar la existencia de un cráter producido por un impacto meteórico tiene consecuencias prometedoras desde el punto de vista económico. Existen cráteres de importancia mundial relacionados con depósitos. Ejemplos de estos son el cráter Chicxulub (al norte de la península de Yucatán), que al encontrarse enterrado ha tenido que ser descrito por mediciones indirectas; el cráter Sudbury (Canadá), muy deformado; el Vredefort (Sudáfrica), deformado y altamente erodado, y el Popigai (Siberia), cuya exposición y preservación es muy apta para llevar a cabo estudios detallados acerca de la composición y mecánica de este tipo de eventos catastróficos.

Los depósitos de materiales formados en los cráteres de impacto o al rededor de estos se han dividido en tres categorías: depósitos progenéticos, singenéticos y epigenéticos (Masaitis, 1989). Los depósitos progenéticos o preimpacto, se originan en procesos geológicos endógenos. Estos depósitos ya existían antes del impacto. En este caso, el

impacto tiene el efecto de redistribuir el depósito (haciéndolo más fácilmente explotable), o hacerlo visible. Los ejemplos incluyen depósitos de oro y uranio de la estructura Vredefort en África del Sur (7 mil millones de dólares por año) y el depósito de uranio de Carswell en Saskatchewan, Canadá (quizás mil millones de dólares en mena de uranio). Los depósitos singenéticos se originan durante un evento de impacto o poco después de este. Estos son atribuidos generalmente a la depositación directa de energía en las rocas causando un cambio de fase y fundición. El depósito Cu-Ni en Sudbury, Ontario, es de este tipo (2 mil millones de dólares durante los últimos cinco años). Otro ejemplo de este tipo de depósitos son los diamantes descubiertos en la estructura Popigai (Masaitis et ál, 1972; Masaitis 1989). Los depósitos epigenéticos se forman después del impacto y generalmente se atribuye a la alteración termal o hidrotermal inducida por el choque. Por ejemplo, formación de cuencas cercanas con sedimentación aislada o flujo de líquidos



► Figura 13. Sección longitudinal esquemática de la cuenca entreplataforma al norte del Arco de La Libertad (tomado de Rosenfeld, 2002).

en trampas estructurales asociadas al cráter. A esta tipología corresponden algunas acumulaciones de hidrocarburos. Ejemplos de este tipo de depósitos son las estructuras Crooked Creek, Decaturville y Serpent Mound en Estados Unidos, y la de Kara en Rusia (Reimold et ál., 2005).

Como se deriva de los ejemplos mencionados, encontrar un impacto meteórico es un objetivo potencial para nuevos blancos de exploración. La importancia económica de identificar este fenómeno es que permite generar nuevas perspectivas para la prospección de grandes depósitos de:

- Minerales metálicos.
- Diamantes.
- Procesos hidrotermales.
- Acumulaciones de hidrocarburos.
- Shales como roca generadores de hidrocarburos.

Una vez identificado un cráter meteórico, es esencial establecer la edad del impacto. Con esta información se determinarán las características del entorno geológico sobre el cual impactó el cuerpo, la litología de rocas afectadas, el sincronismo con otros fenómenos actuantes, las características tectónicas y paleoambientales. Estos elementos permitirán establecer qué potencialidad hay de depósitos minerales y las características de estos.

Reimold et ál. (2005) resume los principales depósitos económico-minerales relacionados con estructuras de impacto, enuncia otras ventajas de tipo comercial o económico derivadas de estas estructuras. Así mismo, señala el uso de materiales de construcción en las iglesias de Nördlingen, a partir de bloques de suevita³ de brechas de impacto procedentes de cráter de Ries al sur de Alemania, y en la de Rochechouart, procedentes del cráter del mismo nombre en la provincia de Haut-Limousin del suroccidente francés. Menciona otros usos curiosos, como el caso del reservorio Manicouagan en la estructura de impacto de 100 km de ancho en Quebec (Canadá), parte de un gigante proyec-

to de desarrollo hidroeléctrico, así como otro tipo de aprovechamiento turístico: el museo en el cráter meteórico de Arizona. Describe otros ejemplos de cráteres que son o están convirtiéndose en museos naturales de gran importancia turística.

Conclusiones

En la búsqueda de prospectos para fuentes minerales es de vital importancia plantear ideas novedosas que permitan encontrar nuevos depósitos no convencionales. Se trata de retomar fenómenos geológicos que solo han sido tenidos en cuenta desde un punto de vista meramente científico, y aproximarse a ellos desde una nueva perspectiva: su potencial económico. El trabajo en el que se basa este artículo (Khurama, 2007) abre las puertas a esas nuevas posibilidades; en este caso la importancia económica y la prospectividad de los depósitos minerales generados por impactos meteóricos. Como se mostró en esta breve exposición, son variados e interesantes los tipos de depósitos que pueden estar asociados a estas estructuras de impacto.

Un cráter producido por un impacto meteórico tiene importantes consecuencias desde el punto de vista económico. Existen cráteres de clase mundial relacionados con depósitos. Entre otros se encuentran el cráter Chicxulub (México), el cráter Sudbury (Canadá), el Vredfort (Sudáfrica) y el Popigai (Siberia).

En este tipo de trabajo resalta la importancia de la aplicación de sensores remotos y las técnicas geofísicas regionales para llegar áreas de difícil acceso. En una geografía como la colombiana, con un gran porcentaje de territorio aislado de los grandes centros urbanos y con vías de comunicación deficientes, este tipo de herramientas son óptimas para, con una relación costo beneficio favorable, cubrir grandes superficies de terreno e identificar zonas anómalas para llevar a cabo posteriores estudios detallados. Los métodos geofísicos aerotransportados y satelitales proveen información que pueden utilizarse como valioso insumo para diferentes fines, desde los económicos hasta el manejo de zonas de riesgo geológico e interés científico. ▀

³ Es una brecha polimictica de impacto con matriz clástica que contiene fragmentos de impacto y partículas congénitas de la fusión.

Glosario

Asteroide. Cuerpo sideral más pequeño que un planeta; orbita alrededor del Sol. También se le ha denominado planetoide o planeta menor, ya que la mayoría puede ser restos de planetas antiguos o en formación. Los más cercanos se encuentran en nuestro sistema solar, orbitando entre Marte y Júpiter. Ocasionalmente, algunos abandonan esta órbita. Su composición puede ser metálica, carbonácea o, los más alejados, de hielo.

Cráter de Impacto. Depresión, generalmente de geometría circular, sobre un planeta o satélite natural. Es causado por el choque de un cuerpo externo, de menor tamaño, que viaja a alta velocidad. La depresión puede ser causada por el cuerpo mismo o por la onda de choque, que puede generar miles de megatones de energía.

Meteorito. Meteoroides que ha penetrado en la atmósfera terrestre, que no se ha desintegrado o vaporizado por el roce con la atmósfera. En otras pa-

labras, es la muestra física, el fragmento de roca de origen extraterrestre que se encuentra en el suelo terrícola.

Meteoro. Su raíz griega significa “fenómeno celeste” y es el término utilizado para describir el destello luminoso producido por un meteoroides al atravesar las capas atmosféricas. Cuando este cuerpo externo traspasa la atmósfera terrestre, su fricción produce incandescencia y luminosidad. Un meteoro puede generar un cráter de impacto por su misma onda de choque, sin que alcance a quedar una muestra física del material original, ya que este se vaporiza y desintegra.

Meteoroides. Cuerpo sideral que se halla en el espacio dentro o fuera del sistema solar, y que tiene una gran probabilidad de entrar en la atmósfera terrestre. Su tamaño es menor que el de un cometa o un asteroide.

Referencias Bibliográficas

- Ahern, J. L. (2003). The potential of potential fields for detecting buried impact structures: Earth and Mars school. *The Leading Edge*, 22(8), 776-778.
- Hawke & Dentith. (2006). The exploration potential of Australia's meteorite impact craters. *Petroleum Exploration Society of Australia*, 1-6. Melbourne, Australia.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, N., Camargo, A., Jacobsen, S. B. & Boynton, W. V. (1991). Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867-871.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2003). *Mapa digital integrado*. En http://ssiglims.igac.gov.co/ssigl/mapas_de_colombia/galeria/IGAC/dep-tales-pdf/Vichada_Nov9.pdf
- Kearey, P., Brooks M. & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*. 3rd edition. Cambridge: Blackwell Science.
- Khurama, S. (2007). *Caracterización geológica y geofísica de la estructura del río Vichada. Inspección de Palmarito, departamento de Vichada*. Tesis de maestría en Geofísica. Bogotá: Universidad Nacional Colombia.
- Koeberl, C. (2004). Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. *Mineralogical Magazine*, 66(5), 745-768.
- Lee, K. (2004). Popigai impact structure. En [http://www.mines.edu/academic/geology/faculty/klee/PopigaiImpact.pdf](http://www.mines.edu/academic/geology/faculty/ klee/PopigaiImpact.pdf)
- Lemoine, F. G., Chinn, D. S., Cox, S. M., Factor, J., Kenyon, K. S. C., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Olson, T. R., Pavlis, E., Pavlis, C. N. K., Rapp, R. H., Torrence, M. H., Trimmer, R. G., Wang, Y. M. & Williamson, R. G. (1998). The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM 96. NASA Technical Paper NASA/TP-1998-206861. Goddard Space Flight Center, Greenbelt.
- Lindner, H., Gabriel G., Götze H., Kaeppler R., Suhr P. (2006). Geophysical and Geological Investigations of Maar Structures in The Upper Lusatia Re-

- gión (East Saxony). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*. Band 157, Heft 3. Stuttgart, 355-372.
- Masaitis, V. L. (1989). The economic geology of impact craters. *Internat. Geol. Rev.*, 31, 922-933.
- Masaitis, V. L. & Grieve, R. A. F. (1994). The economic potential of terrestrial impact craters. *International Geology Review*, 36, 105-151.
- Masaitis, V. L., Mikhailov, M. V. & Selivanovskaya, T. V. (1972). Popigai Basin. An Explosion Meteorite Crater. *Meteoritics*, 7(1), 39-46.
- Melosh, H. J. (1989). *Impact Cratering A Geologic Process*. New York: Oxford University Press.
- Melosh, H. J. (2003). Can impacts induce volcanic eruptions? (abstract). Lunar and Planetary Science Institute Conference: 3144.
- Patil, J. K. & Reimold, W. U. (2007). Impact cratering-fundamental process in geosciences and planetary science. *Journal of Earth System Science*, 116 (issue 2), 81-98.
- Pirajno, F., Hawke, P., Glikson, A., Haynes, P. & Uysal, T. (2003). The Shoemaker impact structure, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 50, 775-796.
- Pirajno, F. (2005). Hydrothermal processes associated with meteorite structures: evidence from three Australian examples and implications for economic resources. *Australian Journal of Earth Sciences*, 52, 587-606.
- Reimold, W. U., Koeberl, C., Gibson, R. L. & Dressler, B. O. (2005). Economic mineral deposits in impact structures: A review. In C. Koeberl and H. Henkel (eds.). *Impact Tectonics*. Impact Studies Series, vol. 6, Springer-Verlag, pp. 479-552. ICRG N.º 66.
- Rocca, M. C. L. (2004). A possible 50 km wide impact structure in Colombia, South América. *Meteorics and planetary science (MAPS)*, 39(8), Supplement, A90.
- Rosenfeld, J. H. (2002). El potencial económico del bloque de Yucatán en México, Guatemala y Belice. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LV(1), 30-37.
- Sharpton, V. L., Dressler, B. O. & Schuraytz, B. C. (1994). The Chicxulub multiring impact basin: Evaluation of geophysical data, well logs, and drill core samples: Lunar and Planetary Institute, *Contribution*, 825, 108-110.
- Torrence, M. H., Trimmer, R. G., Wang, Y. M. & Williamson, R. G. (1998). The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery Mapping Agency (NIMA) Geopotential model EGM96, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Scientific and Technical Office, NASA Technical Paper, 0148-8341; NASA/TP-1998-206861.
- Westbroek, H. & Stewart R. (1996). The formation, morphology, and economic potential of meteorite impact craters, CREWES Research Report. 8(34). Calgary, Alberta 1-26.