

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA EN LA
EVALUACIÓN DEL SITIO Y PLATAFORMA DE
PERFORACIÓN – CRÁTER CHICXULUB,
PLATAFORMA DE YUCATÁN.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

VICTORIA HERNÁNDEZ ANGÉLICA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

OCTUBRE 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

Con toda mi gratitud a mis padres María Elena Hernández Villegas y Tomás Victoria Álvarez, por su paciencia, su dedicación, su apoyo y amor, este logro es especialmente para ustedes.

Con mucho cariño a mis hermanos Rocío Victoria y Luis Alberto Victoria, por el ánimo que siempre me dieron para seguir adelante.

A mi sobrina Ximena por todo el cariño incondicional que siempre me da.

A ustedes, Josué Roa, Karla Gayosso, Antonio Serapio, Yushet Inclán, Samantha Plandiura, porque siempre han estado a mi lado en las buenas y en las malas, muchas gracias por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de ser profesionalista, y desarrollarme como persona.

A la Facultad de Ingeniería, por prepararme y darme las armas para desarrollar mi profesión.

A todos los maestros que me dieron clase, gracias por sus consejos y por todo el conocimiento que me transmitieron.

Al Doctor Jaime Urrutia Fucugauchi, por tener la paciencia y brindarme su apoyo en esta investigación, sin su ayuda no hubiese sido posible, muchas gracias.

No te rindas, aún estás a tiempo
De alcanzar y comenzar de nuevo,
Aceptar tus sombras,
Enterrar tus miedos,
Liberar el lastre,
Retomar el vuelo.

No te rindas que la vida es eso,
Continuar el viaje,
Perseguir tus sueños,
Destruir el tiempo,
Correr los escombros,
Y destapar el cielo.

No te rindas, por favor no cedas,
Aunque el frío queme,
Aunque el miedo muerda,
Aunque el sol se esconda,
Y se calle el viento,
Aún hay fuego en tu alma
Aún hay vida en tus sueños.

Mario Benedetti

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	1
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	6
I. IMPORTANCIA DE LA INGENIERÍA GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA.....	9
1.1 Necesidad de estudiar ingeniería geofísica.....	9
1.2 Prospección geofísica	9
1.3 Métodos de prospección geofísica	10
1.3.2 Métodos gravimétricos	10
1.3.2 Métodos Sísmicos.....	11
1.3.3 Prospección Eléctrica.....	11
1.3.4 Prospección Magnética	12
1.3.5 Otros Métodos de Prospección	12
1.4 Aplicación de prospección geofísica	13
1.5 Estudios geofísicos para plataformas	14
1.6 Aplicación de la geofísica a cualquier problema geológico o geotécnico .	14
1.7 Necesidad de estudiar ingeniería geotécnica.	16
1.8 Geotecnología ambiental	17
1.9 Ingeniería geoambiental.....	17
1.10 Reconocimiento geotécnico	18
1.11 Planificación y fases del reconocimiento	18
1.12 Aplicaciones de la ingeniería geotécnica	19
1.13 Estudios geotécnicos para plataformas	20
1.14 Problemas geotécnicos.....	20
II. ANOMALÍAS GEOFÍSICAS EN EL CRÁTER DE CHICXULUB.....	22
2.1 Anomalías gravimétricas	24

2.2 Anomalías magnéticas.....	26
2.3 Anomalías electromagnéticas.....	27
2.4 Anomalías sísmicas.....	28
2.5 Modelos gravimétricos.....	29
2.6 Modelos magnéticos.....	32
III. CONSIDERACIONES Y REQUERIMIENTOS PARA SELECCIONAR EL SITIO DE PERFORACIÓN EN CHICXULUB.....	36
3.1 Perforación de pozos profundos en la parte marina, con fines científicos.....	36
3.2 Objetivos científicos del proyecto en Chicxulub.....	36
3.3 Impacto de Chicxulub da origen a brechas productoras de la Sonda de Campeche.....	37
3.4 Descripción del Cráter de Chicxulub Yucatán.....	41
3.5 Perforaciones previas realizadas en tierra en el área de Chicxulub.....	41
3.6 Perforación de la parte marina del cráter de Chicxulub.....	44
3.7 Estrategia de perforación.....	46
3.8 Estudios de riesgo en sitio para el posicionamiento de la plataforma.	47
3.9 Estudio geotécnico marino, para la evaluación del sitio de perforación en Chicxulub.....	48
3.10 Métodos para la extracción de núcleos.....	48
3.11 Mediciones científicas y registro de pozos.....	49
3.12 Después de la fase de perforación.....	50
IV. TIPOS Y SELECCIÓN DE PLATAFORMA, PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DEL CRÁTER DE CHICXULUB.....	51
4.1 Plataformas marinas de perforación, diseño y capacidades.....	51
4.2 Plataformas fijas.....	51
4.2.1 Plataformas fijas protectoras.....	54

4.2.2 Trípodes (tres patas).....	54
4.2.3 Tetrápodos (cuatro patas)	55
4.2.4 Estructuras aligeradas	55
4.3 Equipo flotante de perforación.	56
4.3.1 Barco perforador	56
4.3.2 Equipo Semisumergible	57
4.3.3 Plataformas con piernas tensionadas (TLP)	60
4.4 Plataformas autoelevables (jack-up)	62
4.5 Perforación rotativa direccional	65
4.5.1Las principales ventajas de este sistema respecto a los demás son las siguientes.....	68
4.6 Selección del tipo de plataforma para la perforación del cráter de Chicxulub.....	69
DISCUSIÓN	71
CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA.....	78

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURAS

Fig. 2	Cráter de Chicxulub, Yucatán.....	27
Fig. 2.1	Anomalías gravimétricas en la zona del cráter de Chicxulub.....	27
Fig. 2.2	Anomalías magnéticas, Chicxulub.....	27
Fig. 2.4	Imagen de alta resolución de las características estructurales del cráter y de las secuencias de brechas de impacto y la cubierta sedimentaria obtenida de datos sísmicos.....	29
Fig. 2.5	Los rasgos concéntricos revelan la estructura de Chicxulub y sus anillos interiores. Los puntos blancos indican los cenotes.	30
Fig. 2.6	Cráter de Chicxulub y gradiente horizontal del mapa de anomalía de Bouguer	32
Fig. 2.7	Anomalía aeromagnética del cráter de Chicxulub.....	35
Fig.3.3	Unidad (1) una brecha carbonatada de 40 a 300 m de espesor, unidad (2) una brecha carbonatada de 10 a 20 m de espesor, de grano medio a fino mezclado con escaso material de choque, unidad (3) una litofacies de arena calcárea, limo y arcilla de 9 a 30 m de espesor con abundante material de expulsión (vidrio alterado y cuarzo de choque); esta unidad culmina con material arcilloso casi puro (1 a 2 m) en la cima de la cual se encontró la anomalía de Iridio y la unidad (4) es una brecha conglomerática de 10 a 20 m de espesor con material de expulsión.	40
Fig.3.5	Pozos perforados por Petróleos Mexicanos, Universidad Nacional Autónoma de México y el programa integrado de perforación científica.	42
Fig.3.5.1	Pozos perforados por PEMEX (S-1, C-1,Y-6, T-1, Y-1, Y-2, Y-4, Y-5A) un pozo profundo perforado por ICDP (Yax-1) Yaxcopoil-1 perforado en 2002.....	43
Fig 3.6	Las líneas negras continuas representan el levantamiento sísmico marino en 2005 y las discontinuas en 1996. Los sismómetros en tierra y costa afuera se muestran 2005 (pequeños puntos blancos), 1996 (pequeños puntos negros). Los cuadrados amarillos grandes muestran los	

sitios perforados por PEMEX (C-1, S-1, Y-4, Y-5A, Y-6 T-1), UNAM U-5, IODP YAX-1. Los triángulos amarillos representan los sitios de perforación propuestos por IODP. El fondo de la imagen representa la gravedad de Bouguer.....	44
Fig. 3.6.1 Estructura del Cráter de Chicxulub propuesta por datos geofísicos y de perforación (Morgan et. al 2005). En amarillo se observa la roca fundida, en verde el depósito post-impacto en el cretácico, en rojo y anaranjado el levantamiento central de la estructura multianillos.....	45
Fig. 3.7.1 Chicx-03A A partir de los 500 m muestras de los sedimentos de carbonatos del paleoceno, tras el final del cretácico, brechas de impacto en el anillo de picos.	46
Fig. 3.7.2 Chicx-04A a 600 m muestras del límite térmico máximo del Paleoceno-Eoceno y los primeros sedimentos del paleoceno, luego los núcleos de los reflectores inclinados subyacentes del anillo de picos.....	47
Fig. 4.2 Plataforma fija de perforación.....	52
Fig. 4.2.1 Componentes de una plataforma fija	53
Fig. 4.3.1 Barco perforador	57
Fig. 4.3.2 Plataforma semisumergible	58
Fig. 4.3.3 Plataforma de piernas tensionadas (TLP).....	61
Fig. 4.4.1 Plataforma Autoelevable (Jack-up).....	63
Fig. 4.5. Sistema rotativo direccional.....	67
Fig. 4.6 Plataforma de perforación a utilizar en Chicxulub, L/B Kayd.....	69
Fig.4.6.1 Sitios de perforación en Chicxulub.....	70
Fig.5.1 Primera estrategia de perforación, el punto grande negro Chicx-03A, sería un pozo de 3km de profundidad.....	73
Fig. 5.2 Segunda Estrategia de perforación actual, los triángulos amarillos serán los pozos perforados con una profundidad de 1500m, Chicx-03A y Chicx-04.....	74
Fig. 5.3. Proyecciones de los sitios de perforación (a) Chicx-03A y (b) Chicx-04A en las imágenes sísmicas.	74

TABLAS

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	1
RESUMEN.....	4
Tabla 1.14.1 Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno.....	20
Tabla 1.14.2 Estructuras geológicas y problemas geotécnicos.	21
Tabla 1.14.3 Efecto de los procesos geológicos relacionados con el agua y su incidencia geotécnica.	21
Fig.4.6.1 Sitios de perforación en Chicxulub.....	70

RESUMEN

El cráter Chicxulub es una estructura de impacto única asociada a uno de los eventos geológicos mayores en el Fanerozoico, que marca el final de la Era Mesozoica. El cráter se encuentra sepultado por sedimentos carbonatados en el norte de la península de Yucatán, sureste de México. Tiene un diámetro de ~200 kilómetros en una estructura compleja de anillos múltiples. Chicxulub representa a la más joven y mejor preservada de este tipo de estructuras, con tres grandes impactos documentados en el registro geológico. El impacto que formó el cráter Chicxulub data de hace 65 millones de años y se relaciona con el evento de extinción masiva en el límite Cretácico/Terciario, que significó la desaparición del ~75 % de las especies, incluyendo a los dinosaurios.

Los estudios del cráter representan una gran oportunidad para obtener nueva información acerca de este tipo de impactos, así como sus efectos globales ambientales y climáticos e implicaciones en la evolución geológica y biológica. En este trabajo se presentan los resultados del estudio geofísico-geotécnico dentro de la nueva fase de investigaciones, con el programa de perforación marino.

El cráter de Chicxulub ha sido centro de numerosos estudios principalmente en la última década. Estos incluyen estudios geofísicos terrestres, aéreos y marinos, proyectos de perforación, análisis en laboratorios de las muestras obtenidas y modelados realizados por computadora. Parte de estos estudios fueron iniciados por el programa de exploración petrolera de PEMEX y más recientemente por la UNAM en los proyectos geofísicos y de perforaciones. Con el comienzo del programa internacional de perforación científica continental (ICDP por sus siglas en inglés) el interés por la perforación del cráter aumento siendo así financiado por este programa en coordinación con la UNAM. El ICDP ha financiado la perforación de un pozo profundo en la parte terrestre del cráter, (pozo Yaxcopoil-1). El programa de perforación marino, que entre sus objetivos tiene estudiar:

- 1) Las relaciones entre la estructura multianillos y las extinciones masivas del final del periodo Cretácico.
- 2) Los procesos de formación de cráteres multianillos, incluyendo la formación del levantamiento central y los anillos de picos.
- 3) Investigar los efectos en la evolución y ambiente antes, durante y después del impacto.
- 4) Proporcionar datos, observaciones y modelos sobre deformación y fracturamiento de la corteza debida a impactos meteoríticos.

El programa de perforación marino planea la perforación de dos pozos en la zona de la plataforma. La selección de los sitios de perforación se hace a partir de los análisis y modelos geofísicos y los objetivos científicos. En esta evaluación se consideran también los costos asociados a las diferentes alternativas. A partir de estos estudios se seleccionaron 4 áreas de interés, las cuales se han estudiado en mayor detalle con estudios geofísicos. El plan inicial contemplaba la perforación de un pozo con una profundidad de 3000 m. A partir de los estudios sísmicos se modificaron las profundidades de estudio reduciéndolas a 1500 m, lo que permite la perforación de dos pozos. Con la evaluación de las localizaciones se ha asignado una prioridad a los sitios, con las localizaciones Chicx-03A y Chicx-04A, localizados al noroeste de Puerto Progreso, como primera opción. Las localizaciones están dentro de los perfiles de sísmica de reflexión, lo que permite contar con imágenes sísmicas de alta resolución e información sobre la estratigrafía y estructuras. La integración de datos y la evaluación de las localizaciones se usa para el diseño de las perforaciones. Para la siguiente fase del proyecto se realizó la planeación y diseño de los estudios geotécnicos, que permitirán evaluar las características y propiedades del fondo marino. Las etapas de planeación del programa de perforación incluyen la evaluación de las plataformas de perforación, técnicas y sistema de recuperación de núcleos.

INTRODUCCIÓN

El norte de la península de Yucatán tiene todo para fascinar a geólogos, geofísicos, paleontólogos, astrónomos y científicos de otras disciplinas. Se piensa que el cráter gigantesco que yace debajo de esa región —en cuyo centro se localiza el pueblo pesquero de Chicxulub Puerto—, es el producto de uno de los impactos extraterrestres más grandes de los que se tenga noticia y tiene una edad clave: se produjo hace 65 millones de años, época en que ocurrió una extinción masiva de especies, entre otras, los dinosaurios.

El cráter, que después del impacto se fue llenando poco a poco con sedimentos hasta quedar completamente cubierto, no sólo puede aportar información valiosa sobre la caída de cometas y meteoritos a la Tierra (que no es tan rara como se creyó por muchos años), sino también contribuir al debate sobre las extinciones que ocurrieron en la transición entre dos épocas: del Cretácico al Terciario, conocida como límite K-T. Al tiempo que científicos de diferentes países armaban pieza por pieza el rompecabezas de la extinción masiva, con el hallazgo de Chicxulub se llegó a una explicación asombrosa sobre el origen de esa extinción que actualmente, no obstante el cúmulo de evidencias que la sostienen, sigue habiendo escépticos dentro de la comunidad científica.

El cráter de Chicxulub tiene un diámetro aproximado de 200 km, una profundidad estimada de 16 km y se calcula que fue causado por el impacto de un objeto de unos 10 km de diámetro.

La razón por la cual Chicxulub es relativamente desconocido es que después de millones de años de erosión y sedimentación no hay rastros visibles del cráter. Lo único que destaca en el paisaje plano yucateco es un anillo gigantesco de cenotes en la parte más al sur del cráter, que se formaron en sus orillas a causa del hundimiento y la erosión. La parte norte del cráter yace en el mar: hace 65 millones de años, toda la península estaba sumergida unos cien metros en el agua (razón por la cual se originaron olas gigantes, tsunamis) y en los años posteriores al impacto, el cráter se llenó con sedimentos marinos de caliza.

El cráter de Chicxulub ha sido centro de numerosos estudios principalmente en la última década. Estos incluyen métodos geofísicos terrestres, aéreos, marinos, proyectos de perforación, análisis en laboratorios de las muestras obtenidas y modelados realizados por computadora. Parte de estos estudios fueron iniciados por el programa de exploración petrolera de PEMEX y más recientemente por la UNAM en los proyectos geofísicos y de perforaciones. Con el comienzo del programa internacional de perforación científica continental (ICDP por sus siglas

en inglés) el interés por la perforación del cráter aumento siendo así financiado por este programa en coordinación con la UNAM.

En tierra existen varios pozos principalmente sin muestras de núcleos, pozos perforados por PEMEX (S-1, C-1, Y-6, T-1, Y-1, Y-2, Y-4, Y-5A Fig. 3.1) pozos poco profundos perforado por la UNAM (U-1, U-2, U-3, U-4, U-5, U-6, U-7 y U-8) y un pozo profundo perforado por ICDP (Yax-1) Yaxcopoil-1 perforado en 2002 en el sector sur del cráter, el estudio de este fue realizado con base en la integración de datos gravimétricos, magnéticos, magnetotelúricos y sísmicos.

Ahora se requiere perforar en la parte marina del cráter, para esto se colocara una plataforma, para la recuperación de núcleos y la toma de registros en el fondo de pozo para asegurar el máximo aprovechamiento científico.

La perforación marina, determinara características fundamentales por encima y debajo de los reflectores, la litología, el estado físico de la materia y la causa de la reflectividad. Estos datos servirán para corroborar como se desarrollo la formación de la estructura multianillos. Si el material del pico de la estructura se derrumbó como estiman algunos modelos numéricos estos reflectores pueden representar el límite entre la elevación central y el colapso externo ó el borde del cráter transitorio si se colapso hacia adentro.

Las características litológicas, geoquímicas y estructurales de los pozos de Chicxulub proporcionarán la primera herramienta de datos sobre la formación de estructuras complejas de este tipo multianillo tanto en la Tierra e incluso en el Sistema Solar.

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de evaluación geofísicos geotécnico y de planeación de la perforación. Los programas de perforaciones con fines académicos presentan varias características que difieren de los programas de perforación en la industria petrolera. La perforación es una herramienta básica en los programas de exploración y producción. En estudios académicos los costos altos de operación ocasionan que estos proyectos sean relativamente menos utilizados. En el caso de los proyectos de perforación en Chicxulub, se incluye el núcleo continuo, para obtener muestras para los estudios de laboratorio. Ello incrementa los tiempos de perforación y recuperación de núcleos, lo que eleva los costos considerablemente. Las etapas de selección de los sitios de perforación, evaluación geofísica y geotécnica de los sitios, selección de la plataforma y análisis de técnicas de perforación adquieren especial interés.

Las etapas de selección de sitios de perforación involucraron estudios geofísicos marinos, con perfilaje de sísmica de reflexión. En la zona de interés, dentro del sector central del cráter se obtuvo un cubo sísmico. El modelado inicial de los datos sísmicos ha permitido identificar 4 sitios posibles de perforación. Los sitios

seleccionados están sobre las líneas sísmicas, lo que permite contar con información sobre la estructura y estratigrafía.

Para que la plataforma pueda ser colocada, se necesitan estudios previos que son estudios geofísicos para obtener la descripción del fondo marino y del subsuelo correspondiente para definir la ubicación exacta en donde se deban instalar las estructuras marinas y estudios geotécnicos para obtener, a partir de pruebas de laboratorio y en sitio, las características físicas y mecánicas del subsuelo necesarias para el diseño de cimentaciones profundas o para el diseño de placas de apoyo temporal en el lecho marino, así como, para la evaluación de la respuesta de la estructura y cimentación ante las diversas cargas estáticas y dinámicas a las que deba estar sujeta durante su vida útil.

La Ingeniería geofísica y geotécnica trabajan en conjunto para analizar, el mejor sitio de asentamiento de la plataforma, evaluando los riesgos en el sitio de perforación, para evitar accidentes o daños al medio ambiente.

Por otra parte la selección de la plataforma es de suma importancia, ya que se debe hacer un análisis económico, una evaluación completa del sitio de perforación, se perforara en un tirante de agua de 17 m y se atravesaran 1500m de la estructura, al principio se perforaría en un solo sitio, ahora se perforaran dos pozos Chicx-03A y Chicx-04A, como estrategia de perforación para cumplir los objetivos científicos del programa.

La plataforma que se utilizara será un barco de perforación elevable debido a que es más económico que una plataforma Jack-up o una semisumergible, además de que este barco es más fácil de mover porque la movilización depende de su propio sistema.

Con la perforación en la parte marina se espera resolver tres incógnitas principales 1. Cuál es la naturaleza de la estructura del anillo de pico, 2. Cómo se debilitaron las rocas durante el gran impacto, para que puedan colapsar y formar cráteres relativamente anchos, planos, y 3. ¿Qué causó los cambios ambientales que llevaron a una extinción masiva?

Después de que las fases de evaluación de los sitios y de planeación de la perforación terminen, se pedirán los permisos necesarios a las autoridades, para exportar las muestras a la nucleoteca IODP de Bremen, Alemania, ahí se celebrara un taller científico donde se dividirán las muestras, para después dar un informe de los resultados, obtenidos de los núcleos.

Un año después del taller, se publicará un informe completo, gratuito en línea para el público como resultado de la expedición. Después de esto cualquier país, incluso no asociado al programa integrado de perforación en océanos (IODP), podrá solicitar muestras de núcleos para la investigación.

I. IMPORTANCIA DE LA INGENIERÍA GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA

1.1 Necesidad de estudiar ingeniería geofísica.

La Geofísica es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados a nuestro planeta. Es decir, que estudia la Tierra mediante métodos de la física, de carácter indirecto, a fin de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada).

Podría decirse que la geofísica es una rama común de la geología y la física. Comparte con la primera la búsqueda del conocimiento de las características de la Tierra y, con la segunda, la aplicación de métodos, técnicas y principios para la investigación de las características bajo superficie. En términos muy generales, el geólogo se sirve de la geofísica para investigar indirectamente el subsuelo, es decir, todo lo que se encuentra por debajo de la superficie y, consecuentemente, está oculto.

Por medio de la prospección geofísica se determinan, a partir de distintos aparatos, diferentes propiedades físicas y físico-químicas del subsuelo. El análisis de esas propiedades, la cuantificación de sus valores, la observación de la distribución de éstos, así como de la presencia o no de anomalías constituye, en conjunto, la investigación geofísica del subsuelo. Para poder “traducir” ese conjunto de valores físicos o físico-químicos a un modelo geológico será necesario contar con información geológica de contraste que, una vez integrada con los resultados geofísicos, permita conocer cómo es el subsuelo.

A la vista de lo aquí expuesto, la geofísica en sentido estricto sirve para tener conocimientos sobre las características físicas de los materiales que forman el subsuelo y sobre las formas de análisis e interpretación de los resultados obtenidos, tras la prospección geofísica de las diferentes propiedades de esos materiales. La prospección geofísica aplicada, como su propio nombre lo indica, no es más que la aplicación de la geofísica y los métodos geofísicos que permite efectuar un diagnóstico de la constitución del subsuelo por interpretación de unos documentos que son el resultado de unas mediciones y de unos cálculos.

1.2 Prospección geofísica

En geofísica, la noción de prospección entiende la exploración o búsqueda de una sustancia o estructura del subsuelo que sea utilizable para el hombre.

Es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimientos de sustancias útiles (petróleo, agua subterránea, minerales, entre otras), por medio de observaciones

efectuadas en la superficie terrestre. Para poder aplicar un método geofísico en una prospección, es necesario que se presente dos condiciones importantes:

- Que existan contrastes significativos, anomalías que se pueden detectar y medir.
- Que estos contrastes se puedan correlacionar con la geología del subsuelo

1.3 Métodos de prospección geofísica

1.3.1 Método gravimétrico

En el caso de estar en un terreno con topografía plana, tendremos que cualquier anomalía de gravedad se deberá a desviaciones de la densidad del subsuelo respecto de la “densidad base”. En otras palabras, las anomalías gravitatorias son originadas por variaciones en la distribución de la densidad másica punto a punto (3D). Por otro lado, si la topografía es compleja, las anomalías de gravedad podrán estar relacionadas ya sea con la geometría del terreno y/o con la distribución de densidades, dado que $g = g(r, \rho)$.

Típico levantamiento gravimétrico

A) Fase de Terreno.

Definir una malla y en cada nodo medir la aceleración de gravedad.

B) Correcciones.

- i) Deriva del instrumento: el gravímetro no es perfecto, razón por la cual se utiliza una estación de amarre para cuantificar la deriva del cero (se asume lineal). Mapa de anomalías gravitatorias.
- ii) Corrección topográfica: un cerro incrementa la aceleración de gravedad, mientras que una cuenca la hace disminuir. Todos los datos deben llevarse a topografía plana
- iii) Otras correcciones: por latitud, de Faye, de Bouguer, etc.

C) Mapa final: isoanómalas de gravedad.

El mapa resultante muestra las variaciones sufridas por la aceleración de gravedad como resultado exclusivo de las diferentes densidades de las rocas. Puede ser conveniente realizar un análisis estadístico de la gravedad y mostrar las desviaciones respecto del background (“gravedad residual”)

1.3.2 Métodos Sísmicos

El registro e interpretación de los sismos naturales motivó a los Geofísicos a adaptar la tecnología “pasiva” y convertirla en Prospección Sísmica, donde el microsismo puede ser generado por una explosión (“tronadura”), golpe de martillo, caída de un objeto muy masivo, etc.

El análisis de muchas curvas camino/tiempo permite encontrar las primeras llegadas de diversas ondas mecánicas. A partir de estos datos se puede deducir directamente:

- Rapidez de cada onda
- Espesor de cada estrato
- Subtopografía

En una “segunda iteración” basada en los cálculos anteriores, es posible encontrar los módulos elásticos:

- Módulo de Young
- Módulo de Poisson
- Módulo de Corte, etc.

1.3.3 Prospección Eléctrica

La Prospección Eléctrica puede ser pasiva o activa. Es pasiva cuando se estudian los potenciales eléctricos espontáneos que surgen debido a reacciones químicas naturales que ocurren en el subsuelo (generalmente en las interfaces de rocas distintas) y es activa cuando el potencial eléctrico estudiado surge como respuesta un estímulo aplicado (inyección de corriente).

A) Método Pasivo: Autopotencial

El Método del Potencial Espontáneo (“Self-Potential”) se basa en la recepción de las corrientes naturales que ocurren en la corteza terrestre debido a:

- Reacciones químicas espontáneas
- Presencia de agua subterránea (un flujo de agua siempre crea una corriente eléctrica)
- Iones libres que se desplazan por efecto del magnetismo terrestre, etc.

B) Métodos Activos

i) Método de la Resistividad

Es utilizado en minería, geología e hidrología y permite estudiar anomalías de resistividad eléctrica, lo que se correlaciona con la ausencia o presencia de

cuerpos mineralizados, agua subterránea, grado de fracturamiento de las rocas, etc.

ii) Método de la Polarización Inducida (“Efecto IP”)

Este método cuantifica las propiedades capacitivas de la corteza terrestre, ya que ciertas formaciones mineralizadas (como los sulfuros diseminados) actúan como “mini-condensadores”, lo que influye en el tiempo que tarda en descargarse el terreno (α [Capacidad Eléctrica]).

1.3.4 Prospección Magnética

Este método de prospección detecta anomalías o desviaciones del valor normal del Campo Geomagnético debido a la presencia de minerales ferromagnéticos, diamagnéticos y/o paramagnéticos. La mayoría de las rocas contiene pequeñas cantidades de óxidos de hierro, de modo que si cristalizan a partir de un magma y en presencia de un CM externo (el terrestre), los Momentos Magnéticos finalizarán orientados, lo que redundará en una anomalía magnética.

1.3.5 Otros Métodos de Prospección

A) Métodos Radiométricos

En este caso se utilizan sensores radiactivos (como un contador Geiger-Müller), lo que permite medir procesos radiactivos naturales y artificiales.

- Ejemplo de proceso radiactivo natural: desintegración del potasio 40 en suelos arcillosos.
- Ejemplo de proceso radiactivo artificial: estudio de los fotones reflejados vía interacción Compton cuando se utiliza una fuente radiactiva de Cs-137.

B) Métodos Geoquímicos

Estudio de muestras (normalmente extraídas de los nodos de una grilla) para su posterior análisis químico, lo que incluye la determinación de las concentraciones de los diversos elementos químicos.

Algunas pruebas:

- Estudios microscópicos de la estructura cristalina
- Cromatografía de gases
- Espectrógrafo óptico de emisión
- Determinación de la distribución isotópica mediante espectrómetros de gases.

C) Métodos Geotérmicos

Estudio de los gradientes de temperatura del terreno mediante sensores térmicos (efecto Seebeck y efecto Peltier)

D) Extracción y análisis de testigos

Perforación de pozos y extracción de muestras a distinta profundidad con el objetivo de caracterizar físicamente el terreno. Evidentemente si las perforaciones se realizan en los nodos de una grilla, será posible obtener una visión 3D del subsuelo.

1.4 Aplicación de prospección geofísica

Ingeniería petrolera:

- Determinación de la estructura del subsuelo. Se buscan estructuras propicias para el desarrollo de los hidrocarburos.
- Identificación de tipos de litología

Ingeniería Civil:

- Determinación del espesor de recubrimiento y del basamento.
- Localización de huecos
- Estudios anteriores y posteriores a la construcción de túneles.
- Detección y evaluación de fracturas.
- Determinación de resistividades para tomas de tierra.
- Análisis de estabilidad de taludes.
- Reconocimiento de macizos rocosos.
- Localización de objetos férreos (depósitos, canalizaciones, servicios, etc.).

Hidrogeología:

- Localización y delimitación de la geometría de acuíferos.
- Determinación del nivel freático.
- Análisis de calidad del agua.
- Prospección de fracturas.
- Estudio de zonas con geotermalismo.

Medio Ambiente:

- Localización de enclaves para almacenamiento de residuos.
- Contaminación de acuíferos (intrusión marina, contaminantes agrícolas, aguas de mina, etc.) y de suelos.
- Caracterización de vertederos.

- Detección de fugas de fluidos (embalses, gasolineras, tuberías, etc.).
- Valoración de riesgos geológicos.

Minería:

- Localización y caracterización de recursos minerales (áridos, rocas industriales, rocas ornamentales, yacimientos metálicos, formaciones radiactivas, etc.).
- Estudios de apoyo en obras a cielo abierto y minería subterránea.
- Estudio de vibraciones y seguridad minera.

Arqueología:

- Localización de restos de edificaciones
- Pasadizos, galerías, necrópolis, fosas, etc.

Geología:

- Geometría de estratos del terreno.
- Determinación del espesor de cuencas sedimentarias y de paleo relieves.

1.5 Estudios geofísicos para plataformas

El objetivo de los levantamientos geofísicos para plataformas es obtener la descripción del fondo marino y del subsuelo correspondiente para definir la ubicación exacta en donde se deban instalar las estructuras marinas. Se deben identificar anomalías tales como: fallas geológicas, cambios litológicos, formaciones coralíferas, cuerpos geológicos subsuperficiales, brotes o manifestaciones superficiales de gas, erosiones, socavaciones, deslizamientos internos, etc. Asimismo, hasta donde sea posible se deben medir sus dimensiones e identificar sus características físicas. Los levantamientos geofísicos deben complementarse y verificarse con la información obtenida del sitio particular.

1.6 Aplicación de la geofísica a cualquier problema geológico o geotécnico

1.-El arreglo: Establecer los objetivos de la geociencia, considerar la práctica convencional, e identificar cómo la geofísica podría contribuir. Los detalles de la preparación del problema dependen de los cuatro tipos de tareas que generalmente están envueltas:

- Situación del objetivo
- Trazado de las propiedades físicas "claras"
- Identificación de los límites dónde la propiedad física valora el cambio
- Trazado detallado del sitio y de los valores de propiedades físicas reales

2.-Las propiedades: Caracterizar los materiales involucrados y establecer los probables contrastes de propiedades físicas. Las propiedades físicas pertinentes más importantes son:

- Densidad
- Velocidad de onda
- Susceptibilidad magnética
- Conductividad eléctrica o resistividad
- Carga Eléctrica
- Permisividad Dieléctrica

3.-El sondeo: Determinación de un estudio geofísico conveniente, y diseño de un estudio de campo eficaz y eficiente. Identificación de las posibles fuentes de error. La aplicación exitosa de técnicas geofísicas depende de un plan de estudio cuidadoso y de la adquisición de los datos.

4.-Los datos: Tomar todas las acciones necesarias para asegurar que los procedimientos de campo deben permitir la adquisición de datos de alta calidad, baratos, seguros, y fiables.

5.-Procesado: Aplicar el proceso apropiado de análisis en el procesamiento de los datos. En casi todos los casos de interpretación no se puede proceder hasta que algún procesamiento de los datos ha sido aplicado. Esto puede ser tan simple como una calibración, o puede involucrar pasos numéricos múltiples o inversión de los datos.

6.-La interpretación: Interpretación de los resultados en lo que se refiere al objetivo geológico u objetivos geotécnicos. La meta de la interpretación es deducir conclusiones de los datos geofísicos. Se introducen dos tipos de conclusiones, la primera es una comprensión de distribuciones de propiedades físicas, y la segunda una comprensión geológica derivada de modelos de distribuciones de las propiedades físicas.

7.-La síntesis: Correlación de lo anterior con la información alternativa, y decisión de si los resultados son adecuados para el problema particular. La síntesis significa hacer que los resultados geofísicos estén de acuerdo con todo lo demás que es conocido sobre el problema. También debe hacerse un juicio sobre la efectividad e integridad de los resultados geofísicos.

1.7 Necesidad de estudiar ingeniería geotécnica.

La ingeniería geotécnica es la aplicación sistemática de principios y prácticas, que permiten la construcción en tierra. Prácticamente todas las infraestructuras civiles están en contacto directo o indirecto con el subsuelo y como tal dependen de las propiedades geotécnicas.

Con el desarrollo de las civilizaciones ha ido aumentando la necesidad de construir edificios, puentes, carreteras, presas, plataformas y otras estructuras. Su desarrollo inició como una prueba de ensayo y error sin ningún esfuerzo de cuantificar o predecir las propiedades del subsuelo, el primer enfoque o interés por la ingeniería geotécnica viene dado por Charles Coulomb en la construcción de muros de contención para el ejército de Francia, el primer libro de ingeniería geotécnica llamado “Erdbaumechnik” fue escrito por Karl Terzaghi's en 1925.

Recientemente la ingeniería geotécnica ha tomado mayor importancia como un campo muy específico que participa con otras ingenierías y profesiones, debido a que existe siempre la necesidad para conocer el comportamiento del subsuelo y así llevar a cabo un mejor diseño.

En los últimos años debido al crecimiento demográfico, el progreso industrial y los estándares progresivos de vida, los suelos que son de buena calidad en cuestión de compresibilidad, permeabilidad y que se encuentran libres de contaminantes, llegan a ser difíciles de encontrar, por lo tanto se necesita consultar la ingeniería geotécnica para trabajar con suelos que tienen alguna deficiencia y que necesitan ser estudiados desde una perspectiva más amplia y ambiental.

La ingeniería geotécnica es una ciencia interdisciplinaria que requiere una evaluación mecánica, así como la respuesta a las fluctuaciones del entorno local. Estas fluctuaciones pueden resumirse como químicas, físico-químicas o microbiológicas, incluyendo procesos tales como (1) Reacción de intercambio iónico en el sistema agua-suelo que es capaz de cambiar la disposición de las partículas del suelo; (2) La formación de grietas en el suelo las cuales fragmentan la superficie, y provienen de un desequilibrio de energía causado por variaciones naturales de humedad o temperatura, así como cambios de energía de compactación, estos patrones tienen un efecto significativo en las características previas de falla, y también intervienen en la saturación de zonas de grano fino; (3) Para el suelo que se encuentra en condiciones in situ, el comportamiento de la tensión y la deformación, puede cambiar de elástica a plástica o de ablandamiento a endurecimiento si ciertas condiciones ambientales locales cambian; (4) Las

bacterias pueden influir en el cambio de porosidad y también en el contacto entre partículas debido a la producción de sustancias exocelulares.

En el análisis del comportamiento del suelo para una aplicación práctica en el presente, la mayor parte del proyecto de diseño se realiza siguiendo los resultados de las pruebas de la Asociación Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) y Asociación Americana de Oficiales de Autopista Estatal y Transportación (AASHTO). Muchas de estas pruebas están basadas en condiciones controladas de temperatura, agua destilada o concentración baja de electrolitos y presión de poro, en parte para asegurar la uniformidad de resultados y repetibilidad de las pruebas. También, muchos análisis se concentran en las condiciones de carga probadas bajo condiciones de corta duración pero proyectadas a largo plazo. Dado que las condiciones de campo y las condiciones de control estándar son significativamente diferentes, muchos errores son difíciles de predecir en la base de pruebas controladas.

1.8 Geotecnología ambiental

La Geotecnología ambiental ha sido definida como una ciencia interdisciplinaria que incluye suelos, rocas y su interacción con varios ambientes, incluyendo la atmósfera, biosfera, hidrosfera, litosfera y geomicrobiosfera (Fang, 1986). Incluyendo árboles, vegetación y bacterias que influyen en el comportamiento del suelo. La definición de Geotecnología enfatiza ampliamente elementos de ingeniería civil, ingeniería geotécnica y geología, tales como el suelo, las rocas y los materiales. La Geotecnología ambiental también incluye (a) Control de residuos tóxicos peligrosos; (b) depósitos marinos y márgenes costeros; (c) Regiones áridas y desérticas; (d) Ambientes ecológicos, geológicos y arqueológicos.

1.9 Ingeniería geoambiental

La ingeniería geoambiental puede ser considerada como parte de la geotecnología ambiental que se relaciona con la geología, hidrogeología y la ingeniería geotécnica, tratando problemas de ingeniería ambiental. Existen ejemplos comunes referidos a la contención y solución de los residuos urbanos, peligrosos y nucleares en el suelo y en aguas subterráneas, incluyendo (a) Sistema de residuos tóxicos y peligrosos, tales como el control de barreras hidráulicas y diversos tipos de sistemas de contención; (b) Aspectos diversos de problemas de vertederos, incluyendo la selección de los sitios de rellenos sanitarios, control de compactación, análisis de estabilidad, predicción y solución de rellenos sanitarios, diseño y construcción de barreras, sello superior e inferior; (c) Consideraciones geológicas e hidrogeológicas, para el sistema de control de contaminación de acuíferos y agua subterránea; (d) Las tecnologías de

remediación de suelos y agua subterránea incluyen inmovilización y tratamiento in situ, tales como solidificación, estabilización y vitrificación y; (e) la utilización de materiales de desecho en obras de ingeniería civil.

1.10 Reconocimiento geotécnico

Antes de acometer cualquier proyecto u obra de ingeniería civil o edificación, es necesario conocer las características del terreno involucrado. Con este fin, se debe realizar un reconocimiento geotécnico del terreno, cuyos objetivos son:

Definición de la tipología y dimensiones de la obra, de tal forma que las cargas generadas por cimentaciones, excavaciones y rellenos, o las cargas soportadas por estructuras de contención, no produzcan situaciones de inestabilidad o movimientos excesivos de las propias estructuras o del terreno, que haga peligrar la obra estructural, o funcionalmente.

Determinación de problemas constructivos:

- Determinación del volumen, localización y tipo de materiales que han de ser excavados, así como la forma y maquinaria adecuada para llevar a cabo dicha excavación.
- Localización y caracterización de materiales para préstamos.
- Problemas relacionados con el agua:
 - Profundidad del nivel freático.
 - Riesgos debidos a filtraciones, arrastres, erosiones internas, sifonamiento, acción de la helada, etc.
 - Influencia del agua en la estabilidad y asiento de las estructuras.

1.11 Planificación y fases del reconocimiento

Las actividades y los objetivos de un reconocimiento geotécnico, así como su extensión y nivel de información resultante, dependen directamente del proyecto u obra a realizar, y de las características del terreno donde se sitúa. Como este último dato es el resultado de la campaña, el desarrollo de un reconocimiento geotécnico debería ser un proceso dinámico, no dimensionado rígidamente "a priori", sino, más bien, mediante una serie de aproximaciones sucesivas donde la necesidad y extensión de cada etapa fuera consecuencia de la extensión y resultados de las realizadas previamente.

Sin embargo, salvo en raras ocasiones, es necesario definir la campaña de reconocimiento inicialmente, y de una vez, aunque a lo largo de los trabajos realizados no es infrecuente variar la ubicación y tipo del reconocimiento.

Es prácticamente imposible dar reglas universales para el diseño y desarrollo de una campaña de reconocimiento, puesto que la casuística es variable y extensa. El grado de libertad con que se cuenta, unido a la variedad de procedimientos para la investigación del terreno, hace que el diseño de la campaña responda a un equilibrio entre la inversión económica, el plazo de ejecución del reconocimiento, la importancia de la obra, y las consecuencias de un fallo de diseño o construcción.

La amplitud y detalle del reconocimiento depende del nivel de conocimiento requerido. No tendrá la misma entidad una campaña realizada para un análisis de viabilidad o de manejo de soluciones, que otras establecidas para el proyecto, en el momento de la construcción, o investigación de fenómenos de patología.

Antes de proceder al diseño de una campaña, se ha de tener una idea lo más aproximada posible, de lo que se ha de encontrar en el reconocimiento, para saber buscarlo, y de los problemas que se pueden plantear en proyectos o en obra. Por eso, la primera fase ha de consistir en un estudio preliminar y una recopilación de la información disponible.

Una vez obtenida y procesada esta información, se define la cantidad, extensión y tipología de los reconocimientos para lograr el fin buscado. Durante su ejecución, esta definición es susceptible de experimentar modificaciones.

Este estudio finaliza con la redacción del informe geotécnico. En este documento se plasman los resultados de la campaña geotécnica realizada, su interpretación y las conclusiones que se derivan de su análisis, generalmente en forma de recomendaciones para el proyecto, y/o construcción de la obra.

1.12 Aplicaciones de la ingeniería geotécnica

Estructuras.- Se aplica al diseño de fundaciones, edificios, puentes, plataformas, etc.

Hidráulica.- En el diseño de obras hidráulicas (canales, presas, reservorios de almacenamiento, túneles, etc.), flujo a través de medios porosos, hidráulica de ríos, puertos etc.

Sanitaria.- Diseño de redes de alcantarillado sanitario y pluvial (zanjas, entibados), diseño de plantas de tratamiento de agua residual (estudio del suelo, permeabilidad de los estratos), diseño de rellenos sanitarios.

Carreteras.- Estudios geotécnicos de suelo en general de toda el área donde se pretende construir la carretera, estabilidad de taludes, compactación de suelos, etc.

Medio ambiente.- Estudios para conocer el grado de contaminación del subsuelo, permeabilidad de los estratos para conocer la velocidad de difusión de contaminantes.

1.13 Estudios geotécnicos para plataformas

El objetivo de los levantamientos geotécnicos es obtener, a partir de pruebas de laboratorio y en sitio, las características físicas y mecánicas del subsuelo necesarias para el diseño de cimentaciones profundas a base de pilotes de acero de punta abierta, trabajando por fricción y punta, para el diseño de placas de apoyo temporal en el lecho marino, así como, para la evaluación de la respuesta de la estructura y cimentación ante las diversas cargas estáticas y dinámicas a las que deba estar sujeta durante su vida útil.

El levantamiento se debe efectuar aplicando técnicas y equipo especial, tanto en el muestreo como en las pruebas de laboratorio, manteniendo la integridad del suelo durante su recuperación, envío y manejo en laboratorio. Se debe garantizar un buen manejo y selección de muestras de suelo, equipo de laboratorio adecuado, aplicación de procedimientos de pruebas establecidos en normas internacionales y la correcta interpretación de resultados. El personal de ingeniería debe contar con la experiencia y capacidad suficiente para definir, a partir de las pruebas in-situ y laboratorio, los parámetros geotécnicos para el diseño de las cimentaciones y estructuras.

1.14 Problemas geotécnicos

Tabla 1.14.1 Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno.

Litología	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Rocas duras	Minerales duros y abrasivos	Abrasividad Dificultad de arranque
Rocas blandas	Resistencia media a baja Minerales alterables	Rotura en taludes Deformabilidad en túneles Cambio de propiedades con el tiempo
Suelos duros	Resistencia media a alta	Problemas en cimentaciones con arcillas expansivas y estructuras colapsables
Suelos blandos	Resistencia baja a muy baja	Asientos en cimentaciones Roturas en taludes
Suelos orgánicos y biogénicos	Alta compresibilidad Estructuras metaestables	Subsidencia y colapso

Tabla 1.14.2 Estructuras geológicas y problemas geotécnicos.

Estructuras geológicas	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Fallas y fracturas	Superficies muy continuas Espesor variable	Roturas, inestabilidad, acumulación de tensión, filtración y alteración
Planos de estratificación	Superficies continuas poca separación	Roturas inestables y filtración
Discontinuidades	Superficies poco continuas, cerradas o poco separadas	Roturas inestables, filtración y alteración.
Pliegues	Superficies de gran discontinuidad	Inestabilidad, filtración y tensión condicionadas a la orientación
Foliación Esquistosidad	Superficies de poca continuidad y cerradas	Anisotropía en función de la orientación

Tabla 1.14.3 Efecto de los procesos geológicos relacionados con el agua y si incidencia geotécnica.

Procesos geológicos en relación con el agua	Efectos sobre materiales	Problemas geotécnicos
Disolución	Pérdida de materiales en rocas y suelos solubles Karstificación	Cavidades Hundimientos Colapsos
Erosión-Arrastre	Pérdida de materiales y lavado Erosión interna Acarcavamentos	Hundimientos y colapsos Asientos Sifonamiento y socavaciones Aterramientos
Reacciones químicas	Cambio de la composición química	Ataque a cementos, áridos, metales y rocas
Alteraciones	Cambio de propiedades físicas y químicas	Pérdida de resistencia Aumento de la Deformabilidad y permeabilidad

II. ANOMALÍAS GEOFÍSICAS EN EL CRÁTER DE CHICXULUB.

En el sector noroeste de la península de Yucatán, a partir de estudios de exploración geofísica, geológica y perforación de pozos se ha logrado documentar la presencia de un cráter de grandes dimensiones que yace sepultado debajo del nivel actual del terreno.

El cráter de Yucatán dada su preservación, es que guarda información del final de la era Mesozoica y que incluye la desaparición de numerosos grupos de organismos, entre ellos a los dinosaurios.

El cráter de la península de Yucatán tiene unos 200 kilómetros de diámetro, con su centro cercano a Chicxulub, puerto localizado a unos kilómetros al este de Puerto Progreso, y por ello se le conoce como el Cráter de Chicxulub. Las investigaciones realizadas sobre la estructura han permitido estimar la edad del impacto, la geometría y características del Cráter, así como sus relaciones con depósitos Cretácico-Terciario (K/T) en las regiones adyacentes al Golfo de México y Mar Caribe. Por sus dimensiones, el cráter de Chicxulub representa el registro de uno de los mayores impactos ocurrido en los últimos mil quinientos millones de años.

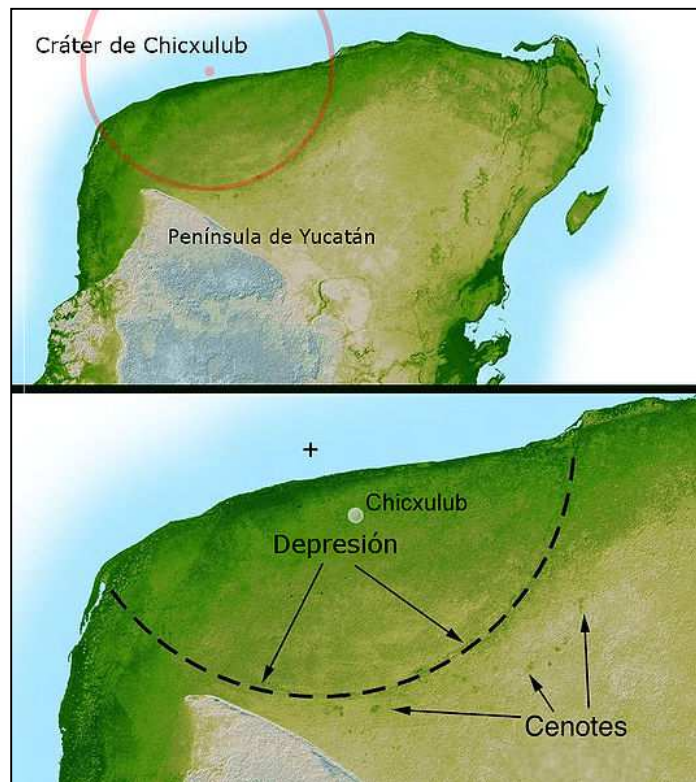


Fig. 2 Cráter de Chicxulub, Yucatán.

Los métodos geofísicos son una herramienta fundamental para el reconocimiento y estudio inicial de las estructuras de impacto terrestres, que aproximadamente en un 20% de los casos se encuentran sepultadas bajo sedimentos depositados con posterioridad al impacto. El activo ambiente geológico terrestre modifica y destruye parcialmente el registro de impactos. De esta forma las técnicas para el reconocimiento de cráteres en otros planetas difieren de las utilizadas en estructuras terrestres (Pilkington & Grieve, 1992).

Los cráteres terrestres poseen un conjunto de características geofísicas que son principalmente resultado de una onda de choque y del fracturamiento inducido por el impacto. Este conjunto incluye bajos gravimétricos y magnéticos, además de disminuciones en la velocidad de las ondas sísmicas. En los grandes cráteres complejos, la anomalía gravimétrica puede contener un alto central, debido al levantamiento central, y anomalías magnéticas centrales de corta longitud de onda, debido a una variedad de procesos. En el caso de los cráteres simples, los modelos con datos gravimétricos indican que la anomalía se debe principalmente a la presencia de una lente interior de brecha alóctona. En los cráteres complejos, la modelación sugiere que la contribución principal de la anomalía gravimétrica proviene de las rocas fracturadas para autóctonas ubicadas en el piso del cráter. La anomalía gravimétrica para ambos tipos de cráteres puede ser modelada satisfactoriamente utilizando parámetros morfométricos conocidos para estructuras de impacto.

El patrón de anomalías magnéticas es en general más complejo. El efecto dominante es un bajo magnético debido a una reducción en la susceptibilidad. Las estructuras grandes ($D > 40\text{km}$) tienden a exhibir anomalías centrales de alta amplitud, debido a cuerpos con magnetización remanente en las rocas golpeadas. Las fuentes de estos cuerpos son diversas e incluyen efectos de choque, calor y alteración química. Algunos estudios con métodos eléctricos en cráteres de impacto muestran bajos resistivos que coinciden con la extensión de las anomalías de campo potencial y se relacionan con el fracturamiento.

Los métodos sísmicos, particularmente el de reflexión, han proporcionado detalles acerca de la estructura subsuperficial de los cráteres de impacto. Se observan reflexiones incoherentes y velocidades sísmicas reducidas debidas al brechado y fracturamiento.

2.1 Anomalías gravimétricas

El rasgo geofísico más característico de las estructuras de impacto es una anomalía residual negativa en los datos de gravedad, esto es, la anomalía resultante después de remover el campo regional. En planta estas anomalías son generalmente circulares, pero pueden tener formas más complicadas debido a la presencia de contrastes de densidad laterales intrínsecos a la roca objetivo.

La causa principal de las anomalías negativas es el material de baja densidad que resulta de los cambios litológicos y físicos asociados con el proceso de formación del cráter. Por ejemplo, los sedimentos con baja densidad relativa, que se forman después del impacto, pueden ocupar la presencia de una capa de rocas fundidas con densidades ligeramente menores realza el efecto negativo en los datos de gravedad. Sin embargo, estos cambios litológicos son menores comparados con los contrastes de densidad inducidos por el fracturamiento y brechamiento de la roca objetivo. La fragmentación y redistribución de las rocas afectadas durante el proceso de formación del cráter, conducen a un incremento en los niveles de porosidad para los depósitos de brechas alóctonas. En forma similar, por debajo de estos depósitos, el fracturamiento inducido por el impacto en la roca autóctona o in situ, produce un incremento en la porosidad y, por lo tanto, densidades menores las de las formaciones no perturbadas. También ocurre fracturamiento en la región cercana a la superficie y puede extenderse por afuera del borde, hasta una distancia equivalente al diámetro del cráter. Esta zona extendida es sin embargo, somera y con efectos despreciables sobre la anomalía observada. Generalmente el mínimo gravimétrico se extiende hasta el borde del cráter o muy ligeramente por afuera de este.

Aunque existen numerosas mediciones de densidades para las litologías encontradas dentro de los cráteres de impacto, existen relativamente pocas determinaciones de los contrastes de densidad entre las rocas fracturadas y no perturbadas por el impacto. Tampoco se conoce mucho acerca de la variación en los contrastes de densidad para diferentes cráteres exhiben un rango de valores de densidad, que en general se incrementan con la profundidad. Este incremento corresponde a una reducción en el nivel de esfuerzos inducidos por el impacto (y, por tanto, en el fracturamiento) con la profundidad.

La amplitud de la anomalía asociada con las estructuras de impacto aumenta con el diámetro del cráter (Pilkington & Grieve, 1992). Muchos factores afectan la forma final de la anomalía de gravedad asociada con una estructura particular. El tamaño de inicial y el contraste de densidad asociados a la zona fracturada

dependen del diámetro del cráter y de la distribución de densidades en las rocas objetivo antes del impacto. Modificaciones posteriores pueden resultar de otros procesos ocurridos después del impacto, como la erosión. Para evaluar la importancia de relativa de estos factores, se emplea el valor mínimo en la anomalía gravimétrica sobre el cráter, denominado D_g . El empleo de este único valor se justifica, debido a la forma similar y simétrica de las anomalías de gravedad en estructuras de impacto. Además, los cráteres son estructuras superficiales, pues su profundidad es relativamente pequeña, comparada con su área superficial. En un primer orden, su efecto gravitacional puede ser modelado como el efecto debido a un disco delgado. Consecuentemente, el mínimo en la anomalía de gravedad negativa sobre los cráteres de impacto está principalmente determinado por el constante de densidad y la profundidad de las zonas brechadas fracturadas.

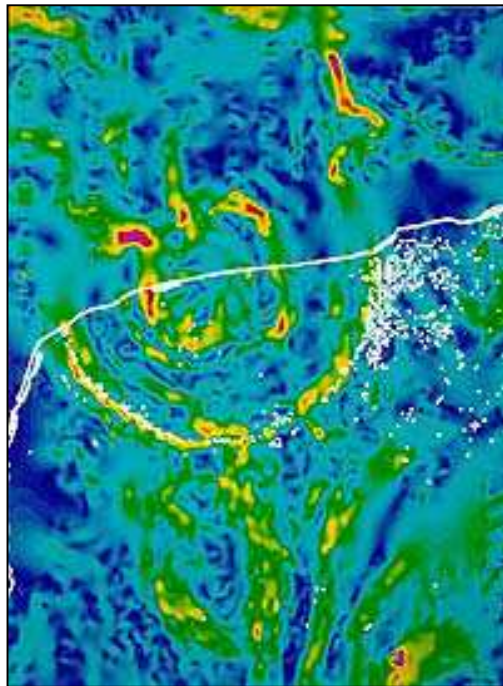


Fig.2.1 Anomalías gravimétricas en la zona del cráter de Chicxulub

La distinción morfológica entre los cráteres simples y complejos no se refleja directamente en la forma de sus anomalías de gravedad asociadas. En los cráteres simples, se observa una anomalía circular negativa con forma de tazón. También sucede así en los cráteres complejos de dimensiones menores. Sin embargo, en los grandes cráteres complejos, el mínimo gravimétrico se modifica por la presencia de un máximo central que, en el caso de cráteres erosionados

puede llegar a ser mayor que el campo de fondo. En algunos cráteres erosionados hasta por debajo del piso original, solamente permanece este máximo, y el cráter se caracteriza únicamente por una anomalía positiva.

2.2 Anomalías magnéticas

A pesar del creciente interés en las estructuras de impacto, tanto en la Tierra como en otros cuerpos del sistema solar, relativamente poca atención se le ha dado a la respuesta magnética de las rocas y minerales sometidos a impactos.

Shapiro & Ivanov (1966) y Nagata (1971) condujeron experimentos a bajas presiones acerca de los fenómenos de desmagnetización y remagnetización por efectos de un impacto. Pohl et al. (1975) extendieron estos experimentos a presiones de 1 Gpa, demostrando la adquisición de una intensa magnetización remanente por impacto en basaltos y encontraron que al incremento las presiones de choque, se efectúan mayores fracciones de coercitividad. Además demostraron la desmagnetización por impacto de las termoremanencias existentes. Hargraves & Perkins (1969), en experimentos con basaltos a presiones pico de 10 Gpa, encontraron remanencias por impacto paralelas y proporcionales a la intensidad del campo aplicado. Wasliewski (1973) llevó a cabo una discusión detallada de las remagnetizaciones por choque debidas a impactos meteoríticos y examinó los cambios mineralógicos y magnéticos inducidos por el impacto. Halls (1975) considera que una fracción de coercitividad baja de las rocas volcánicas precámbricas del probable sitio de impacto en las Islas Slate en el noroeste del lago Superior pudo haber sido un reajuste magnético debido al paso de una onda de choque. Cisowski & Fuller (1978) describen experimentos sobre magnetización en rocas artificial y naturalmente impactadas. Urrutia Fucugauchi et al. (1994) reportan características magnéticas para brechas de impacto y rocas andesíticas localizadas en la estructura de Chicxulub, México. En esta investigación se estudiaron las propiedades magnéticas de muestras de la roca fundida y de las brechas ricas en fragmentos del basamento y roca fundida. Los resultados paleomagnéticos para estas dos unidades concuerdan y sugieren un origen contemporáneo para los registros magnéticos. En este estudio se atribuye el origen al calentamiento generado en el momento de formación de la estructura (la polaridad reportada es consistente con un tiempo de formación dentro de la frontera Cretácico-Terciario). Las características de las anomalías magnéticas principales en el sector central del cráter apoyan la ocurrencia de magnetizaciones remanentes de polaridad reversa como fuentes magnéticas (figura 2.2). Una conclusión general de estos estudios, que las ondas de choque generadas en los eventos de impacto pueden provocar nuevas magnetizaciones en las rocas,

sugiere que las anomalías magnéticas medidas en las estructuras de impacto terrestres pueden mostrar (al menos en algunos casos) evidencias de tales fenómenos de remagnetización.

Otro resultado de los eventos de impacto es la formación de un levantamiento central de rocas deformadas y colisionadas, altamente fracturadas (Dence et al., 1977). Esta roca fracturada es susceptible a la alteración química resultante de la presencia de oxígeno y agua a las elevadas temperaturas posteriores al impacto. Si los minerales magnéticos son producidos durante estos procesos químicos, también pueden adquirir magnetizaciones que pueden manifestarse como anomalías magnéticas en las estructuras de impacto.

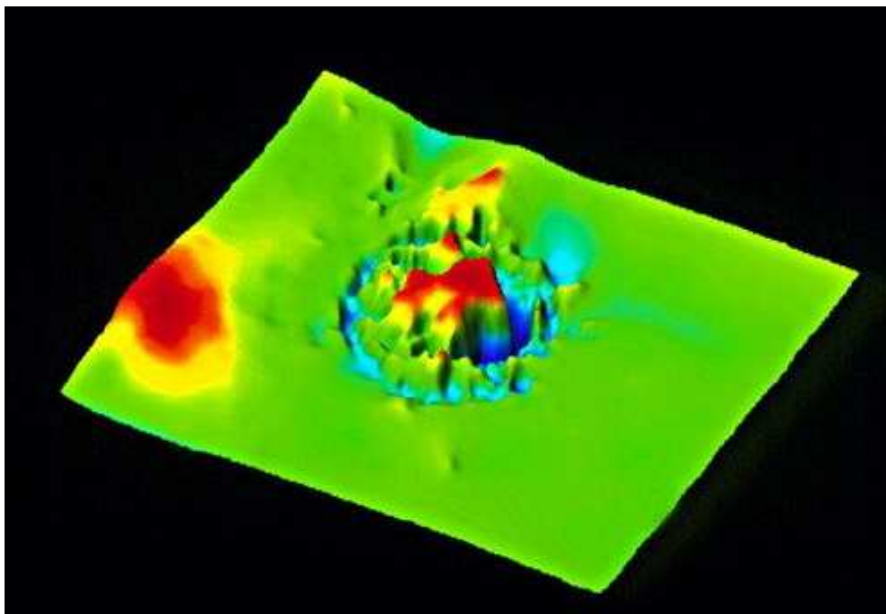


Fig. 2.2 Anomalías magnéticas, Chicxulub.

2.3 Anomalías electromagnéticas

El brechamiento y fracturamiento pueden producir también cambios en las propiedades eléctricas de las rocas, principalmente por dar origen a variaciones en la cantidad y distribución de fluidos. Un ejemplo lo da la definición del piso de un cráter en Razosinka empleando perfiles de resistividad (Vishnevsky & Lagutenko, 1986). Los valores de resistividad exhiben un decremento que puede asociarse con el fracturamiento inducido por el impacto, que se prolonga hasta un diámetro del cráter más allá del borde de algunas estructuras de impacto (Aaloe et al., Clark, 1980)

Se han realizado sondeos eléctricos más profundos empleando el método magnetotelúrico (MT). Las anomalías también han sido atribuidas al fracturamiento inducido por el impacto y a la distribución de fluidos (Campos et al., 1997). Por ejemplo, en Siljan se localiza una región conductiva en las proximidades del cráter de Chicxulub, los estudios MT han permitido documentar la estructura eléctrica y aportar información sobre la estructura del cráter (Delgado et al., 2001)

El radar de penetración ha sido empleado en Barringer para definir elementos correspondientes al banco de material expelido (ejecta) y los depósitos interiores (Pilón et al., 1991). Estos elementos están relacionados con cambios en las propiedades dieléctricas, siendo otra vez la distribución de fluidos la causa más importante de estos cambios.

2.4 Anomalías sísmicas

Existe también un cambio relativo en las velocidades sísmicas, debido al fracturamiento inducido por el impacto. Por ejemplo, en los sondeos por el método de refracción realizados en el cráter de Barringer, se observa una disminución del 50% en las velocidades sísmicas y la zona de baja velocidad se relaciona con los lentes de brecha alóctona interior y con el relleno sedimentario que le sobreyace (Ackerman et al., 1975). La extensión y el nivel de reducción de las velocidades sísmicas disminuyen con la erosión. Por ejemplo, en Charlevoix, donde el piso del cráter se encuentra expuesto, las velocidades sísmicas en las rocas golpeadas del basamento se encuentran reducidas solamente en un 3% (Lyons et al., 1980). En Vredefort, donde el subpiso del cráter se encuentra expuesto, las velocidades sísmicas, de hecho, se incrementan debido a la presencia del levantamiento central (Green & Chetty, 1990).

Los experimentos sísmicos de reflexión son una herramienta muy importante para caracterizar la estructura subsuperficial de los cráteres de impacto, particularmente en el caso de los grandes cráteres complejos. De tal forma han sido la principal herramienta para mapear algunas estructuras sepultadas, como Montagnais (Jansa et al., 1989) y Red wing (Brenan et al., 1975). En general, se observa una reducción en la coherencia de las reflexiones sísmicas, debido al brechamiento y a la interrupción de los horizontes sísmicos, observándose una mayor coherencia conforme crece la distancia y profundidad respecto al centro del cráter. En secciones con buenos reflectores, generalmente en ambientes sedimentarios, es posible determinar la extensión del levantamiento central (Brenan et al., 1975). Además el mapeo de los levantamientos centrales en cráteres complejos, la depresión anular con sus depósitos de brechas ha sido identificado como una zona sísmicamente transparente (Jansa et al., 1989). A mayor distancia del centro, existe un menor brechamiento y las fallas en el borde del cráter se definen bien en las secciones de reflexión sísmica (Anderson & Hartung, 1991).

En el cráter de Chicxulub se han realizados varios estudios de sismica de reflexión, que permiten investigar la morfología de la estructura, las relaciones con los rasgos superficiales, la deformación y estructura profunda en la corteza inferior. Los estudios sísmicos permiten obtener imágenes de alta resolución de las características estructurales del cráter y de las secuencias de brechas de impacto y la cubierta sedimentaria.

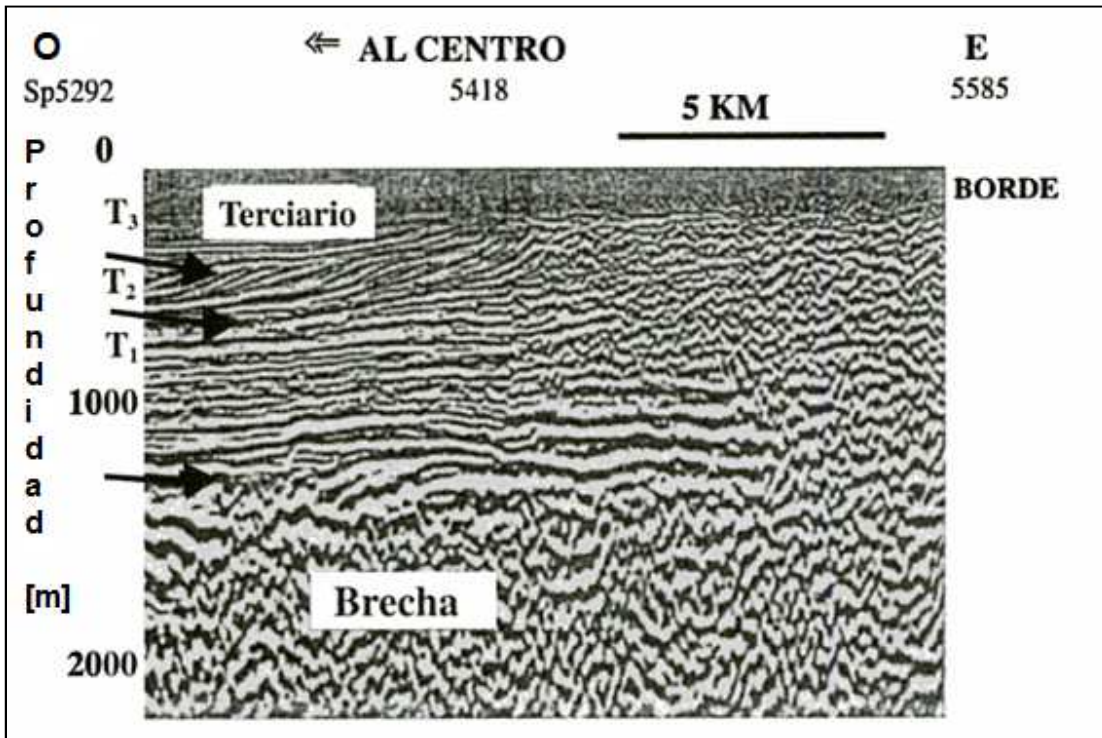


Fig. 2.4 Imagen de alta resolución de las características estructurales del cráter y de las secuencias de brechas de impacto y la cubierta sedimentaria obtenida de datos sísmicos.

El cráter de Chicxulub

2.5 Modelos gravimétricos

La modelación de la anomalía gravimétrica observada en un cráter complejo es razonablemente simple, particularmente cuando se cuenta con información del subsuelo para restringir la geometría y densidades de las unidades litológicas consideradas. En los estudios de exploración gravimétrica generalmente se emplea el modelado directo bidimensional, considerando geometrías muy simples de uno o dos componentes (Dence & Popelar, 1972; Thomas & Innes, 1977; Laurent et al., 1978; Henkel, 1982). La aparente preservación de todas las unidades que conforman el cráter de Chicxulub, la disponibilidad de un conjunto de datos gravimétricos de muy buena calidad y otras fuentes de información del

subsuelo que sirven para restringir rasgos estructurales a profundidad, han permitido la construcción de modelos bidimensionales relativamente complejos

(Ortiz Alemán et al., 1993; Sharpton et al., 1993; Pilkington et al., 1994; Hildebrand et al., 1995)

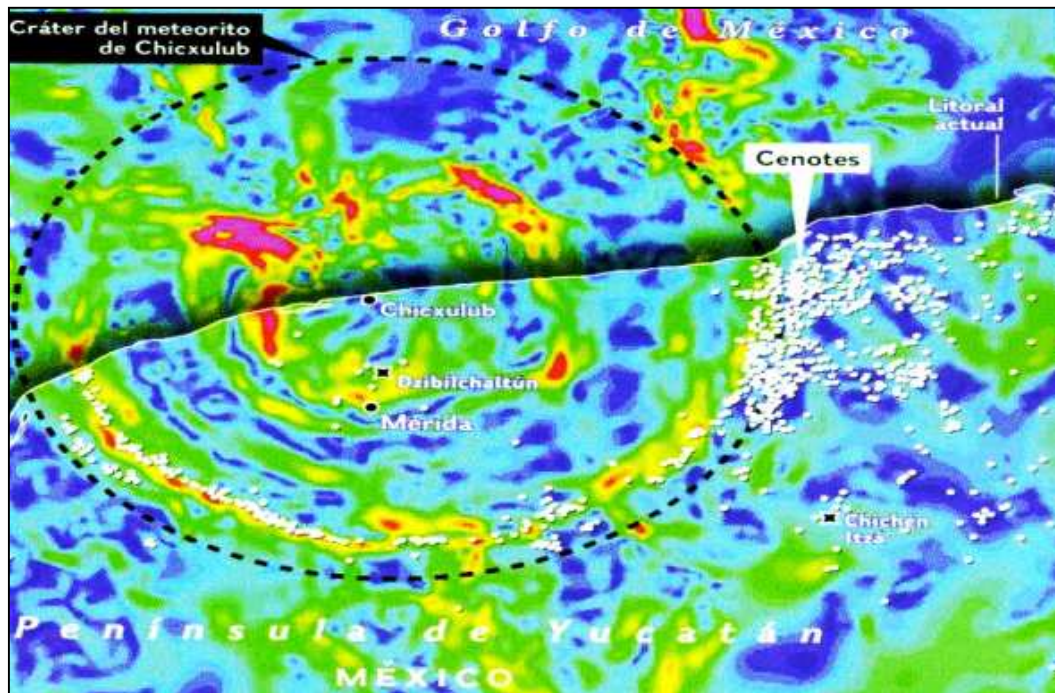


Fig. 2.5 Los rasgos concéntricos revelan la estructura de Chicxulub y sus anillos interiores. Los puntos blancos indican los cenotes.

La anomalía gravimétrica de Chicxulub ha sido modelada empleando únicamente contrastes de densidad entre las rocas circundantes y las litologías de impacto. La deficiencia de masa total asociada con el cráter se estima en $\sim 1.2 \times 10^{16}$ Kg, asumiendo un radio de 90 Km y un mínimo promedio de anomalía de Bouguer de 20 mGal (Pilkington et al., 1994). Una estimación más precisa (entre 1.06×10^{16} y 1.67×10^{16} Kg), aunque similar, fue obtenida por Campos et al. (1998) empleando un esquema de integración basado en el empleo del teorema de Gauss.

Hildebrand et al. (1995) y Connors et al. (1996) aplicaron el método del gradiente horizontal para canalizar los datos de anomalía de Bouguer. Esta técnica enfatiza el efecto de los cambios laterales de densidad y suprime los gradientes regionales que enmascaran la firma gravimétrica originada por la presencia de las litologías de impacto.

En la figura 2.6 se muestra el gradiente horizontal del mapa de anomalía de Bouguer y se aprecia una estructura circular con al menos seis rasgos concéntricos entre ~20 y ~90 de radio. En varios perfiles gravimétricos que cruzan el borde exterior de la estructura se observan gradientes de hasta 5mGal Km^{-1} (Hildebrand et al., 1995). Estas grandes variaciones en el gradiente horizontal de gravedad pueden atribuirse a contrastes laterales someros en los valores de densidad, a grandes contrastes de densidad en las litologías de impacto y a una extensa frontera casi vertical entre unidades con diferente densidad. De esta forma, los cuatro máximos exteriores en el mapa de gradiente, entre ~55 y ~99 km de radio, se interpretan como debidos a la existencia de un conjunto de fallas concéntricas, como puede también observarse en datos de reflexión sísmica (Morgan et al., 1997). Los datos de reflexión sísmica incluyen cinco perfiles a lo largo de la zona de fallamiento. Estos perfiles exhiben desplazamientos, asociados a fallas normales, hasta de 0.9 s en tiempo de viaje bidireccional, correspondiendo a un salto vertical de ~1.7km. De esta forma, Hildebrand et al., (1998) proponen un modelo basado en un conjunto de bloques fallados en las proximidades del borde exterior del cráter. El modelo reproduce los perfiles observados, incluyendo el gradiente principal y dos rasgos adyacentes con un gradiente menor. Los dos máximos interiores probablemente representan el límite entre el levantamiento central (a una distancia radial 20-25 km) y la cresta anular, y la frontera entre ésta y la cavidad de transición colapsada (a 40-45 km de radio). A distancias radiales mayores de 90 km, parece no existir ningún otro rasgo concéntrico. Los únicos rasgos apreciables se relacionan con altos y bajos gravimétricos regionales. En la figura 2.6 se distingue también la correlación espacial existente entre el prominente anillo de cenotes, asociado con el cráter de Chicxulub, y un máximo concéntrico en el mapa de gradiente horizontal. Esta correlación sugiere un nexo genético entre fallas en la periferia del cráter y la zona de intenso fracturamiento, a la cual presumiblemente corresponde el anillo de cenotes (Hildebrand et al., 1995)

Como parte del programa de cooperación Petróleos Mexicanos realizó dos perfiles de reflexión sísmica durante el año de 1992 para estudiar la estructura sepultada del cráter de Chicxulub. La línea sísmica se encuentra a 30 km de la costa (que es la distancia mínima para encontrar en la zona en estudio un tirante de agua de ~20 m, requerido para realizar un sondeo de reflexión sísmica de este tipo), corta la estructura de Chicxulub en su parte norte (a ~30 km del centro).

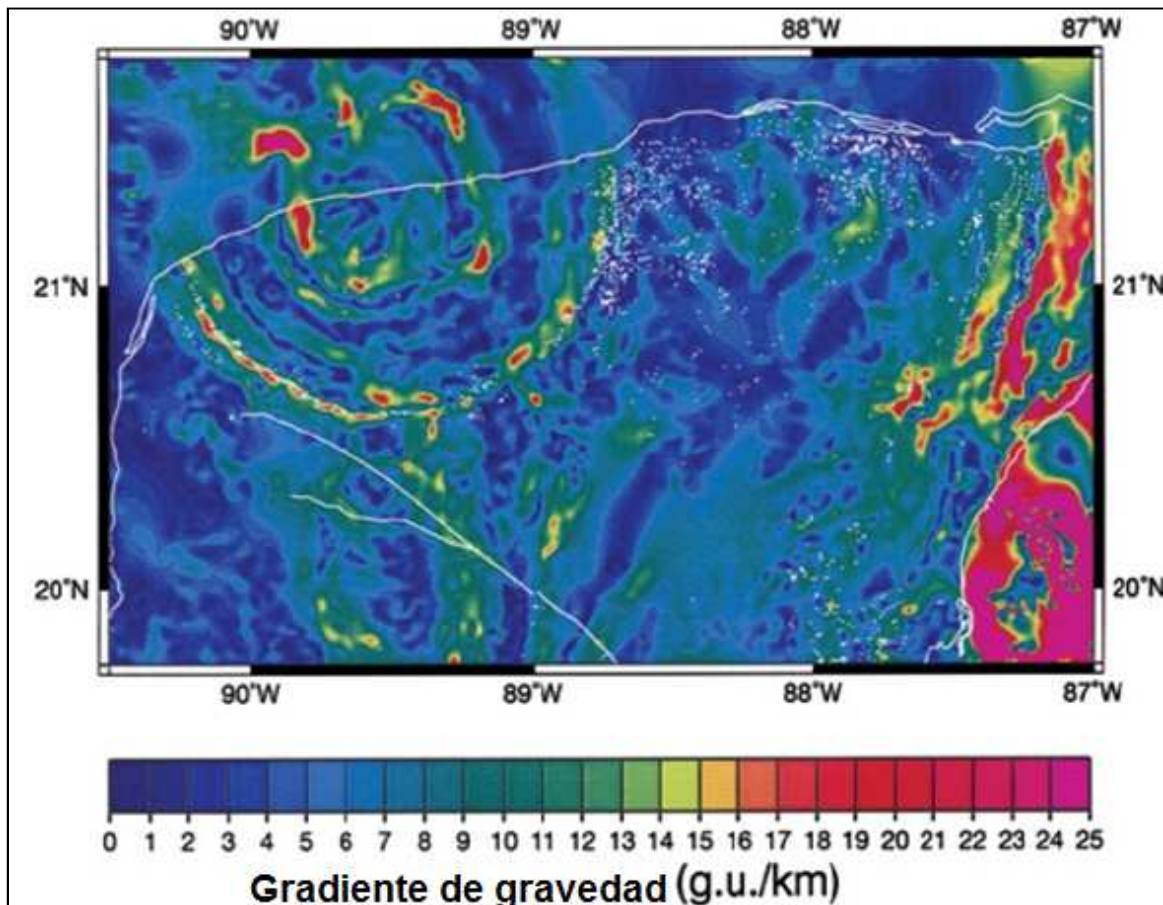


Fig. 2.6 Cráter de Chicxulub y gradiente horizontal del mapa de anomalía de Bouguer

2.6 Modelos magnéticos

La modelación de la anomalía magnética no es tan directa como en el caso gravimétrico. En trabajos anteriores, el interés principal se ha concentrado en las intensas anomalías centrales que se observan en las estructuras de impacto. Los trabajos que incluyen la modelación del conjunto completo de anomalías asociadas con las litologías de impacto son relativamente escasos (Regan & Hinze, 1975; Hearst et al., 1994). Las muestras disponibles y los modelos derivados de las anomalías centrales de muchos cráteres indican grandes radios de Königsberger, por lo que los efectos de la magnetización inducida se consideran despreciables y solamente se estiman los parámetros de la magnetización remanente.

Las anomalías dipolares que ocurren a una distancia radial de entre 20 y 45 km, a partir del centro del cráter de Chicxulub, generalmente exhiben polaridad reversa. Es decir, los mínimos magnéticos se encuentran al sur, sugiriendo que los

efectos de la magnetización remanente son claramente dominantes. Su apariencia y dimensiones físicas asemejan las anomalías producidas por brechas ricas en vidrio (suevita) y rocas fundidas, como las que se observan, por ejemplo, en Lake Mien (Henkel, 1992).

Los resultados de la aplicación del método de deconvolución de Werner, calculado sobre varios perfiles magnéticos de Chicxulub, indican profundidades para las fuente magnéticas de ~1100m (Penfiel & Camargo-Zanoguera, 1981), similares a las profundidades estimadas para el límite superior de las brechas y la unidad de rocas fundidas (Pilkington et al., 1994).

El enfriamiento del material fundido y suevítico da lugar a la adquisición de magnetismo termoremanente en la dirección del campo magnético terrestre al momento del impacto. Esa magnetización termoremanente medida en diversos cráteres de impacto muestra gran estabilidad y poca dispersión direccional, indicando una formación rápida (Pohl & Soffel, 1971).

El origen preciso de las anomalías magnéticas de Chicxulub no ha podido establecerse aún, debido a la ausencia de información suficiente proveniente de muestras de pozos. El banco de impacto fue una roca de composición mixta (sedimentaria y cristalina), que es favorable para la reproducción de suevita (Kiefer & Simonds, 1980). En el caso del cráter de Ries, se ha establecido que la suevita contiene una magnetización suficientemente grande para explicar las anomalías observadas. También se ha encontrado que, además de la magnetización termoremanente, la alteración hidrotermal inmediatamente posterior al impacto pudo dar origen a fases magnéticas que contribuyen a la magnetización total. Posiblemente ambos mecanismos originaron las anomalías asociadas con el cráter de Chicxulub.

La dirección de magnetización remanente puede ser estimada a partir del tiempo de impacto. La península de Yucatán ha permanecido en la misma posición, en relación con el resto de la placa de Norteamérica, desde el período Jurásico Tardío (Pindell, 1985). Empleando el paleopolo de Norteamérica para hacer 65 millones de años en 74°N, 190°E, se obtiene una inclinación de -41° y una declinación de 163°E. Sharpton et al., (1992) y Urrutia Fucugauchi et al., (1994) reportan una inclinación media de -43°, con base en muestras de núcleos orientados de la capa de rocas fundidas para el pozo Y-6, que coinciden con el valor estimado. La magnetización inversa porque la frontera K/T ocurrió en el periodo 29R.

Los modelos disponibles derivados a partir de la anomalía magnética de Chicxulub (Ortiz Alemán et al., 1993; Pilkington et al., 1994) intentan modelar la parte central de dicha anomalía, asociando su existencia con un posible levantamiento central y lentes de brecha ubicados a profundidades relativamente someras.

En Ortiz Alemán & Urrutia Fucugauchi (2002) se reportan los resultados conseguidos al aplicar el método de la señal analítica (Nabighian 1972, 1974). Roest et al. (1922) introdujeron la generalización de esta técnica al caso tridimensional. La amplitud de la señal analítica se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas verticales y horizontales del campo magnético. Los máximos de la envolvente se ubican sobre las posiciones de los contrastes magnéticos principales, independientemente del campo magnético ambiental y de las direcciones de magnetización de las fuentes. La profundidad de las fuentes se determina a partir de la distancia entre los puntos de inflexión de las anomalías en la señal analítica. De este modo, la forma y la amplitud de la envolvente están relacionadas con la profundidad y el tamaño de la fuente magnética asociada.

El método y algoritmo para el cálculo de la señal analítica para un campo potencial han sido desarrollados en Roest et al. (1992).

El cálculo de las derivadas del campo magnético se puede realizar en el dominio del número de onda, empleando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

Roest et al. (1992) determinan la ubicación de los máximos de la señal analítica, utilizando el método de Blakely & Simpson (1986), y posteriormente estiman la profundidad de las fuentes magnéticas a partir del ancho de la envolvente medido a la mitad de la amplitud máxima. Una forma mucho más sencilla propuesta por MacLeod et al. (1993) está basada en la convolución del mapa de amplitud de la señal analítica con un filtro Laplaciano normalizado.

Al configurar el contorno cero de la convolución resultante, se obtiene la ubicación de los puntos de inflexión, correspondientes a los máximos de la señal analítica. La profundidad de cada fuente es proporcional a la distancia entre dichos puntos de inflexión y la constante de proporcionalidad varía dependiendo de la geometría asociada a la fuente (Nabighian et al., 1974; Roest et al., 1922; MacLeod et al., 1993). En la tabla 2.7 se muestran las relaciones entre el ancho de la anomalía en la señal analítica y la profundidad de la fuente, para las geometrías más comunes (MacLeod et al. 1993).

Ancho de las anomalías en la señal analítica como función de la profundidad (h) (tomada de MacLeod et al. 1993)

Geometría de la fuente	Distancia entre puntos de inflexión	Ancho a la mitad de la amplitud
contacto	1.414h	3.46h
dique/sill	1.155h	2h
cilindro	1h	1.533h

Tabla 2.7 se muestran las relaciones entre el ancho de la anomalía en la señal analítica y la profundidad de la fuente.

El filtro Laplaciano fue aplicado al mapa de señal analítica para la anomalía magnética de Chicxulub. Existe un primer lineamiento exterior que delimita el contacto entre la zona de anomalías magnéticas de baja frecuencia, asociada con la existencia de una capa de rocas fundidas con polaridades predominantes inversas, y la zona exterior de rocas fundidas con polaridades predominantes inversas, y la zona exterior de rocas fracturadas cuya respuesta magnética es insignificante. Además se aprecia un lineamiento interior que puede estar relacionado con el contacto entre la capa de rocas fundidas y el levantamiento central, cuya forma es claramente irregular. Las amplitudes de la señal analítica en esta última región reflejan los efectos de la interferencia entre ambos tipos de fuentes magnéticas.

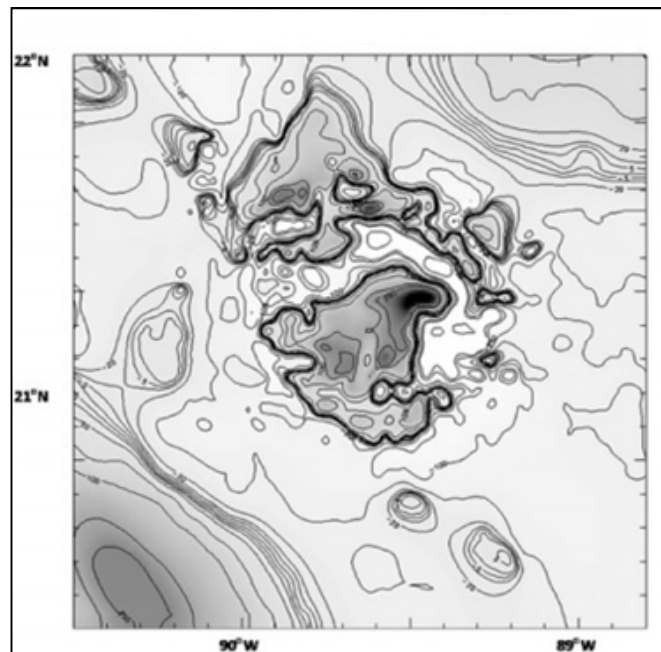


Fig. 2.7 Anomalía aeromagnética del cráter de Chicxulub

III. CONSIDERACIONES Y REQUERIMIENTOS PARA SELECCIONAR EL SITIO DE PERFORACIÓN EN CHICXULUB

3.1 Perforación de pozos profundos en la parte marina, con fines científicos

Los océanos, sus sedimentos y rocas subyacentes actúan como laboratorios naturales que registran los procesos dinámicos de la Tierra acaecidos desde el pasado hasta el presente. La perforación de pozos profundos en los océanos con fines científicos, el muestreo y las mediciones de pozos están mejorando nuestro conocimiento de la Tierra, aportando indicaciones acerca de la distribución de los recursos minerales, el cambio climático global y los desastres naturales potenciales. Si bien algunas tecnologías utilizadas en la industria del petróleo y el gas son desplegadas con fines de investigación científica, otros métodos y herramientas desarrollados específicamente para las operaciones de perforación de pozos profundos en los océanos también están encontrando aplicación en la industria energética.

Los avances registrados en la tecnología de perforación, extracción de núcleos y adquisición de registros han sido facilitadores importantes para grandes descubrimientos científicos. Las mediciones de pozos, obtenidas en forma rutinaria en los pozos de petróleo y gas, también desempeñan un rol fundamental en lo que respecta a la investigación científica del océano mediante la provisión de datos en secciones con recuperación de núcleos pobre o nula y en la vinculación de las mediciones de núcleos con los datos sísmicos de mayor escala.

A la vez que numerosas herramientas y técnicas desarrolladas para ser utilizadas en los campos petroleros están siendo aplicadas en la investigación científica, las tecnologías que experimentaron avances en virtud de los programas de perforación científica también resultan de utilidad en la perforación de hidrocarburos, particularmente las aplicaciones de perforación en aguas profundas y adquisición de registros durante la perforación (LWD, Logging while drilling).

3.2 Objetivos científicos del proyecto en Chicxulub

El cráter de impacto de Chicxulub, México, es único. Es la única estructura conocida de impacto terrestre que ha estado directamente vinculada a un evento de extinción masiva. Es el único de los tres grandes cráteres de impacto en la Tierra que está muy bien conservado. Es el único cráter terrestre con una capa de eyecta mundial. Es la única estructura conocida de impacto terrestre con una topografía inequívoca "anillo de pico." El papel de Chicxulub en la extinción masiva K-T y su excepcional estado de conservación la convierten en un importante laboratorio natural para el estudio de formaciones de cráter de impacto en la Tierra

y otros planetas, y los efectos de gran impacto en el medio ambiente y la ecología del planeta.

Nos proponemos profundizar en el estudio de Chicxulub para hacer frente a varias preguntas, entre ellas:

- 1.Cuál es la naturaleza de la estructura del anillo de pico,
2. Cómo se debilitaron las rocas durante el gran impacto, para que puedan colapsar y formar cráteres relativamente anchos, planos, y
3. Qué causó los cambios ambientales que llevaron a una extinción masiva.

Nuestra comprensión del proceso de impacto está lejos de ser completada, y las primeras dos preguntas fundamentales representan huecos en nuestro conocimiento. A pesar de casi 30 años de intenso debate, todavía estamos tratando de responder a la tercera cuestión.

3.3 Impacto de Chicxulub da origen a brechas productoras de la Sonda de Campeche

En la región del Golfo de México, dos tipos de depósitos sedimentarios de alta energía han sido descritos cerca del Cretácico-Terciario (KT) límite que se considera relacionado con el impacto de Chicxulub. La plataforma marina de Campeche es la zona con mayor producción en el sureste de México e incluye el campo Cantarell que produce aceite de tres diferentes niveles estratigráficos y se estima que el 70% de la producción total proviene de la brecha K-T. (Santiago-Acevedo, 1980).

Datos estratigráficos de campo y del subsuelo costa afuera documentan la presencia de una sucesión de litofacies carbonatadas, que incluye brecha calcárea, en yacimientos petroleros de la parte occidental de la plataforma de Yucatán (Sonda de Campeche) y en afloramientos de la plataforma de Chiapas-Tabasco. Esta secuencia carbonatada está asociada a materiales de expulsión (ejecta) con vidrio alterado, minerales de choque y lapilli acrecionario, derivados del evento de impacto en la Plataforma de Yucatán ocurrido en el límite Cretácico-Terciario (K/T). La sucesión sedimentaria del límite K/T se localiza de 300 a 500 km al oeste del centro de la estructura de Chicxulub en afloramientos de Guayal y Bochil en los estados de Tabasco y Chiapas, respectivamente, y en la Sonda de Campeche.

EL Guayal, Tabasco. La localidad de El Guayal ($17^{\circ} 32' 6,15''$ latitud norte, $92^{\circ} 36' 15,1''$ longitud oeste), se localiza en la Provincia Geológica del sureste de México. La sección de El Guayal está ubicada en las cercanías del límite entre la porción norte de la sub-provincia geológica de la Sierra de Chiapas (López Ramos, 1979), también denominada Área Mesozoica de Chiapas-Tabasco (Santiago *et al.*, 1984) y el límite sur de La Cuenca de Macuspana del Terciario (Salas y López Ramos, 1951). Los afloramientos de brecha de El Guayal fueron estudiados inicialmente por Salas y López-Ramos (1951), quienes midieron un espesor de 10 m en el Cerro Guayal y le asignaron una edad del Cretácico medio. Geólogos de PEMEX continuaron el estudio de la brecha carbonatada en localidades cercanas a El Guayal como aquéllas de Puxcatán y de Pasa Monos donde le asignaron edades del Maastrichtiano (Quezada-Muñetón, 1990).

Bochil, Chiapas. La localidad de Bochil, Chiapas ($17^{\circ} 00,32'$ de latitud norte y $92^{\circ} 55,38'$ longitud oeste) se ubica en la parte Norte de la Sub-provincia de la Sierra de Chiapas. La sucesión sedimentaria de carbonatos detríticos (brecha de grano grueso, brecha de grano fino, arenas y arcillas) de Bochil fue reportada originalmente en trabajos inéditos de PEMEX (Medina y Durán, 1991), y posteriormente Montanari *et al.* (1994) quienes reportaron una anomalía de Iridio en la cima de la secuencia y le asignaron una edad del límite K/T. Posteriormente Smith *et al.* (1996), reportaron también esta secuencia e interpretaron que se formó por un flujo de escombros iniciado por sacudimiento sísmico debido al impacto en Chicxulub.

Sonda de Campeche. En Campeche se estudiaron rocas del límite K/T en campos petroleros localizados costa afuera a ~80 Km al norte-noreste de Cd. del Carmen, en la denominada Sonda de Campeche. En investigaciones previas se definió la arquitectura estratigráfica, los mecanismos de depósito y se señaló que el origen de la brecha productora y su sello, la capa de expulsión (ejecta layer), estaban relacionados al impacto en Chicxulub (Grajales-Nishimura *et al.*, 2000; Murillo-Muñetón *et al.*, 2000).

La sucesión sedimentaria del límite K/T está compuesta, de base a cima, por cuatro unidades: (1) una brecha carbonatada de 40 a 300 m de espesor, (2) una brecha carbonatada de 10 a 20 m de espesor, de grano medio a fino mezclado con escaso material de choque y (3) una litofacies de arena calcárea, limo y arcilla de 9 a 30 m de espesor con abundante material de expulsión (vidrio alterado y cuarzo de choque); esta unidad culmina con material arcilloso casi puro (1 a 2 m) en la cima de la cual se encontró la anomalía de Iridio. Esta unidad es equivalente a lo que se ha denominado capa de expulsión (ejecta layer) en otras partes del

mundo. La unidad (4) es una brecha conglomerática de 10 a 20 m de espesor con material de expulsión y que en algunos pozos petroleros se ha identificado intercalada o sobreyaciendo a la unidad 3 (capa de expulsión). Las unidades 1, 2 y 3 en el subsuelo de la Sonda de Campeche están fuertemente dolomitizadas y el vidrio de la unidad 3 está alterado a minerales arcillosos (esmectita). Las unidades 1 y 2 son las litofacies almacenadoras de hidrocarburos y la unidad 3 corresponde a la capa sello del yacimiento. Regionalmente, la secuencia muestra una estructura gradada que parece representar un gran flujo de escombros, seguido por sedimentación balística y retrabajo de materiales depositados previamente por corrientes. Adicionalmente, los datos de registros de pozo, su distribución y las relaciones estratigráficas sugieren una geometría de “apron” de base de talud para la gruesa sucesión sedimentaria del límite K/T. Basados en la estratigrafía única, la sedimentología y la distribución de los materiales de impacto en la sucesión sedimentaria carbonatada, y a pesar de que la secuencia parece representar un solo depósito gradado, se puede visualizar la siguiente secuencia de eventos y sus productos, que tomaron lugar en minutos, horas o días después del impacto en Chicxulub: (A) mega sacudimiento sísmico que indujo el colapso del margen de la plataforma, dando lugar al depósito de la litofacies de brecha inferior (unidades 1 y 2); (B) emplazamiento balístico de material de expulsión (fragmentos de carbonatos, minerales chocados y vidrio) que aportó componentes para la unidad 2 y formó la capa de expulsión (unidad 3), sello del yacimiento petrolero de Cantarell y campos vecinos, y (C) retrabajo y mezcla de materiales de la capa de expulsión con materiales carbonatados de textura más gruesa a consecuencia del paso de una o más olas de tsunami generadas por el impacto y que formó la unidad de brecha conglomerática 4 intercalada en la unidad 3.

La principal roca generadora de hidrocarburos en la Sonda de Campeche es una lutita orgánica marina de edad Jurásico Tardío que generó hidrocarburos durante el Neógeno (Romero-Ibarra, 2001). Las brechas carbonatadas de las unidades 2 y 1 representan las litofacies almacenadoras de hidrocarburos de la secuencia del límite K/T en la Sonda de Campeche. Las brechas carbonatadas fueron afectadas en el Cenozoico por una historia compleja de deformaciones tectónicas y procesos diagenéticos que dieron lugar a la formación de un yacimiento carbonatado complejo con porosidad vugular y naturalmente fracturado.

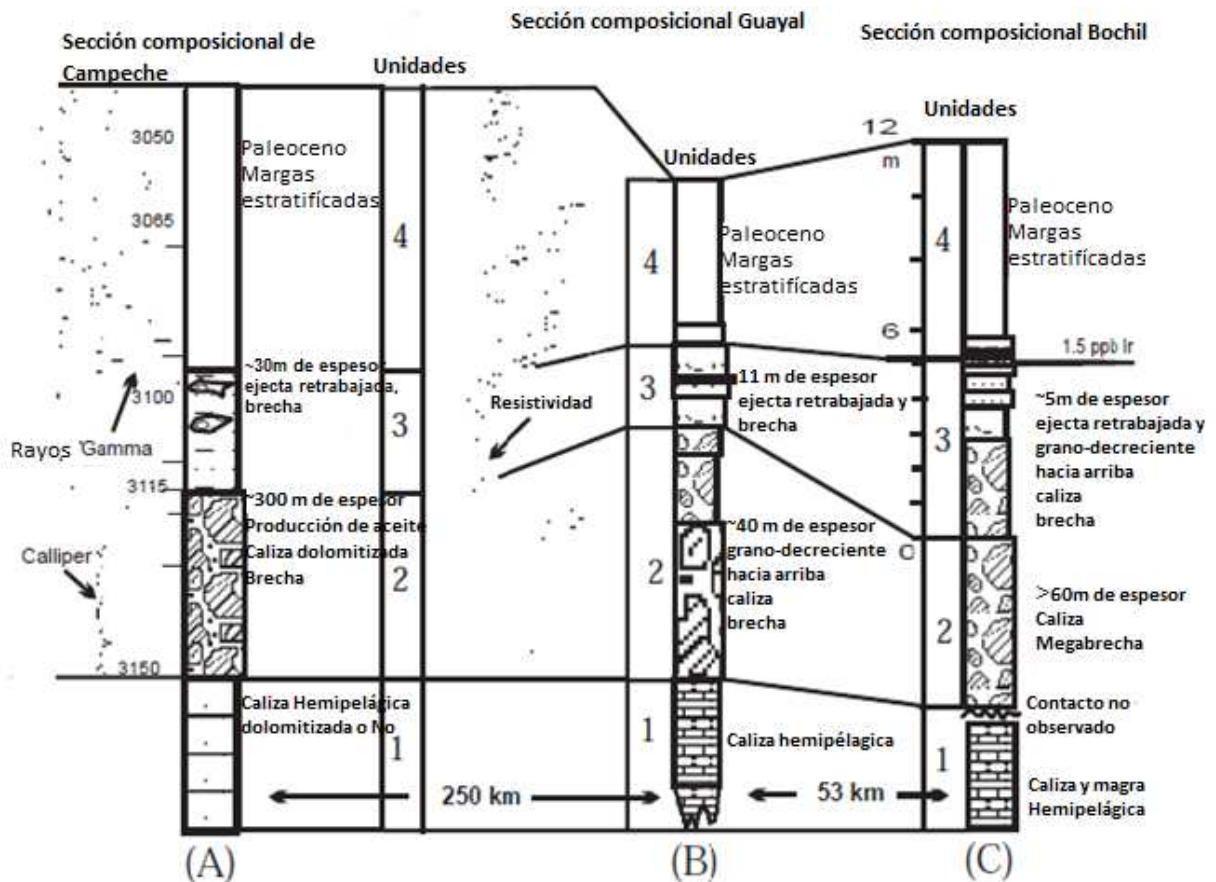


Fig.3.3 Unidad (1) una brecha carbonatada de 40 a 300 m de espesor, unidad (2) una brecha carbonatada de 10 a 20 m de espesor, de grano medio a fino mezclado con escaso material de choque, unidad (3) una litofacies de arena calcárea, limo y arcilla de 9 a 30 m de espesor con abundante material de expulsión (vidrio alterado y cuarzo de choque); esta unidad culmina con material arcilloso casi puro (1 a 2 m) en la cima de la cual se encontró la anomalía de Iridio y la unidad (4) es una brecha conglomerática de 10 a 20 m de espesor con material de expulsión.

(A) mega sacudimiento sísmico que indujo el colapso del margen de la plataforma, dando lugar al depósito de la litofacies de brecha inferior (unidades 1 y 2); (B) emplazamiento balístico de material de expulsión (fragmentos de carbonatos, minerales chocados y vidrio) que aportó componentes para la unidad 2 y formó la capa de expulsión (unidad 3), sello del yacimiento petrolero de Cantarell y campos vecinos, y (C) retrabajo y

mezcla de materiales de la capa de expulsión con materiales carbonatados de textura más gruesa a consecuencia del paso de una o más olas de tsunami generadas por el impacto y que formó la unidad de brecha conglomerática 4 intercalada en la unidad 3. Objetivos científicos

3.4 Descripción del Cráter de Chicxulub Yucatán

El cráter de Chicxulub es una estructura de impacto única asociada a uno de los eventos geológicos más dramáticos en el Fanerozoico. Este se encuentra sepultado por debajo de sedimentos carbonatados en el norte de la península de Yucatán, sureste de México. Tiene un diámetro de ~200 kilómetros en una estructura compleja de anillos múltiples.

Chicxulub es uno de los pocos cráteres en la Tierra con una cuenca multianillos y además tiene un pico en el centro del cráter.

Estos anillos centrales y el pico nos dicen que la energía que se generó tras el impacto fue muy grande, y esta es otra de las interrogantes que se busca responder con la perforación en el lecho marino.

Chicxulub representa a la más joven y mejor preservada de este tipo de estructuras de tres grandes impactos documentados en el registro geológico.

El impacto que ocasionó el cráter de Chicxulub data de hace 65 millones de años y se relaciona con el evento de extinción masiva en el límite Cretácico/Terciario, que significó la desaparición del ~75 % de las especies, incluyendo a los dinosaurios.

Este cráter representa una gran oportunidad para obtener nueva información acerca de las características de este tipo de impactos así como sus efectos globales ambientales y climáticos y sus implicaciones en la evolución geológica y biológica.

3.5 Perforaciones previas realizadas en tierra en el área de Chicxulub

El cráter de Chicxulub ha sido centro de numerosos estudios principalmente en la última década. Estos incluyen métodos geofísicos terrestres, aéreos y marinos, proyectos de perforación, análisis en laboratorios de las muestras obtenidas y modelados realizados por computadora. Parte de estos estudios fueron iniciados por el programa de exploración petrolera de PEMEX y más recientemente por la

UNAM en los proyectos geofísicos y de perforaciones. Con el comienzo del programa internacional de perforación científica continental (ICDP por sus siglas en inglés) el interés por la perforación del cráter aumento siendo así financiado por este programa en coordinación con la UNAM.

En tierra existen varios pozos principalmente sin muestras de núcleos, pozos perforados por PEMEX(S-1, C-1, Y-6, T-1, Y-1, Y-2, Y-4, Y-5A Fig. 3.1) pozos poco profundos perforado por la UNAM (U-1, U-2, U-3, U-4, U-5, U-6, U-7 y U-8) y un pozo profundo perforado por ICDP (Yax-1) Yaxcopoil-1 perforado en 2002 en el sector sur del cráter, el estudio de este fue realizado con base en la integración de datos gravimétricos, magnéticos, magnetotelúricos y sísmicos.

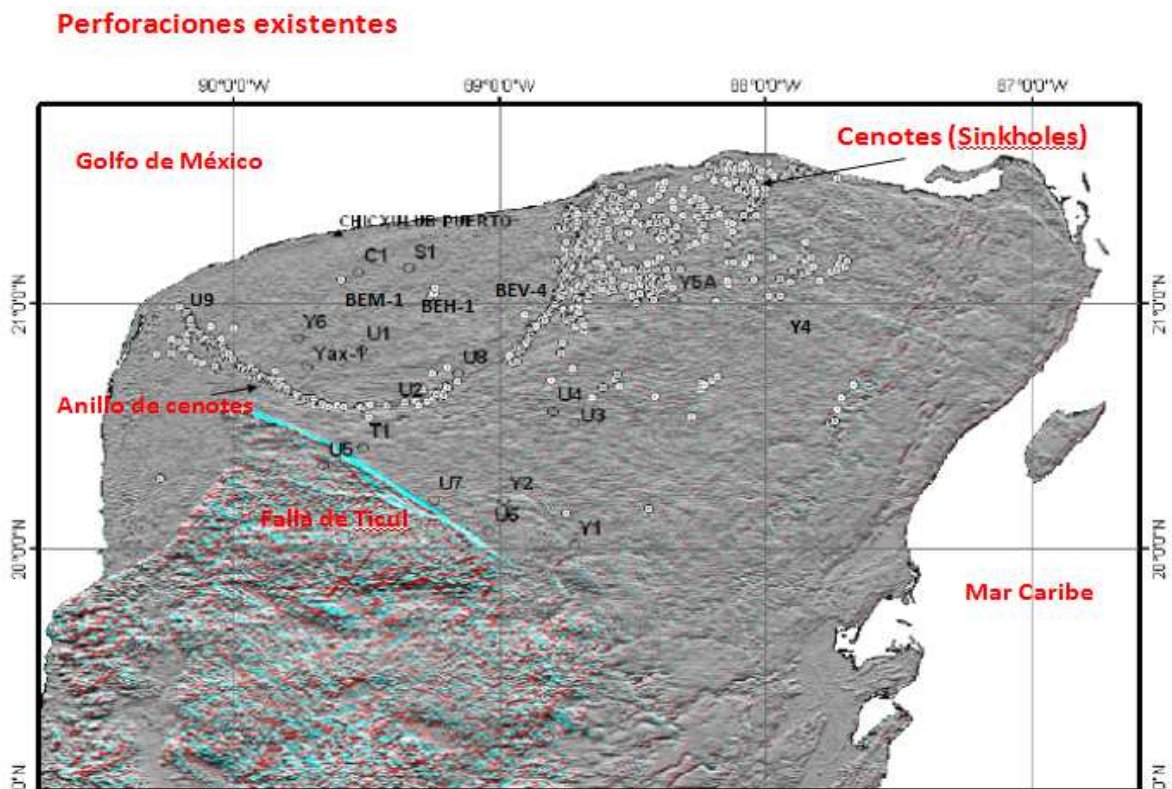


Fig.3.5 Pozos perforados por Petróleos Mexicanos, Universidad Nacional Autónoma de México y el programa integrado de perforación científica.

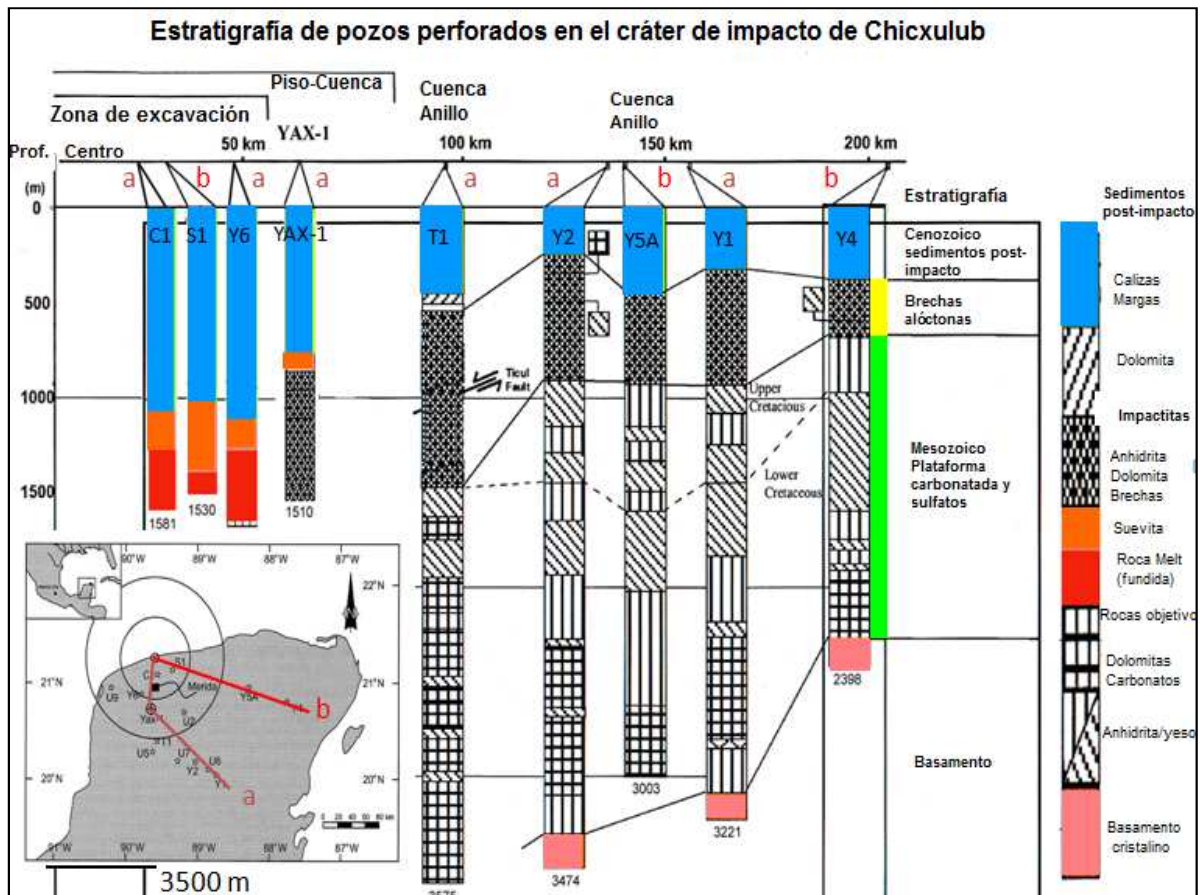


Fig.3.5.1 Pozos perforados por PEMEX (S-1, C-1, Y-6, T-1, Y-1, Y-2, Y-4, Y-5A) un pozo profundo perforado por ICDP (Yax-1) Yaxcopoil-1 perforado en 2002.

3.6 Perforación de la parte marina del cráter de Chicxulub.

La estructura de Chicxulub está situada parte en tierra y costa afuera, está sepultada bajo los sedimentos post-impacto así como se muestra en las imágenes de prospección geofísica.

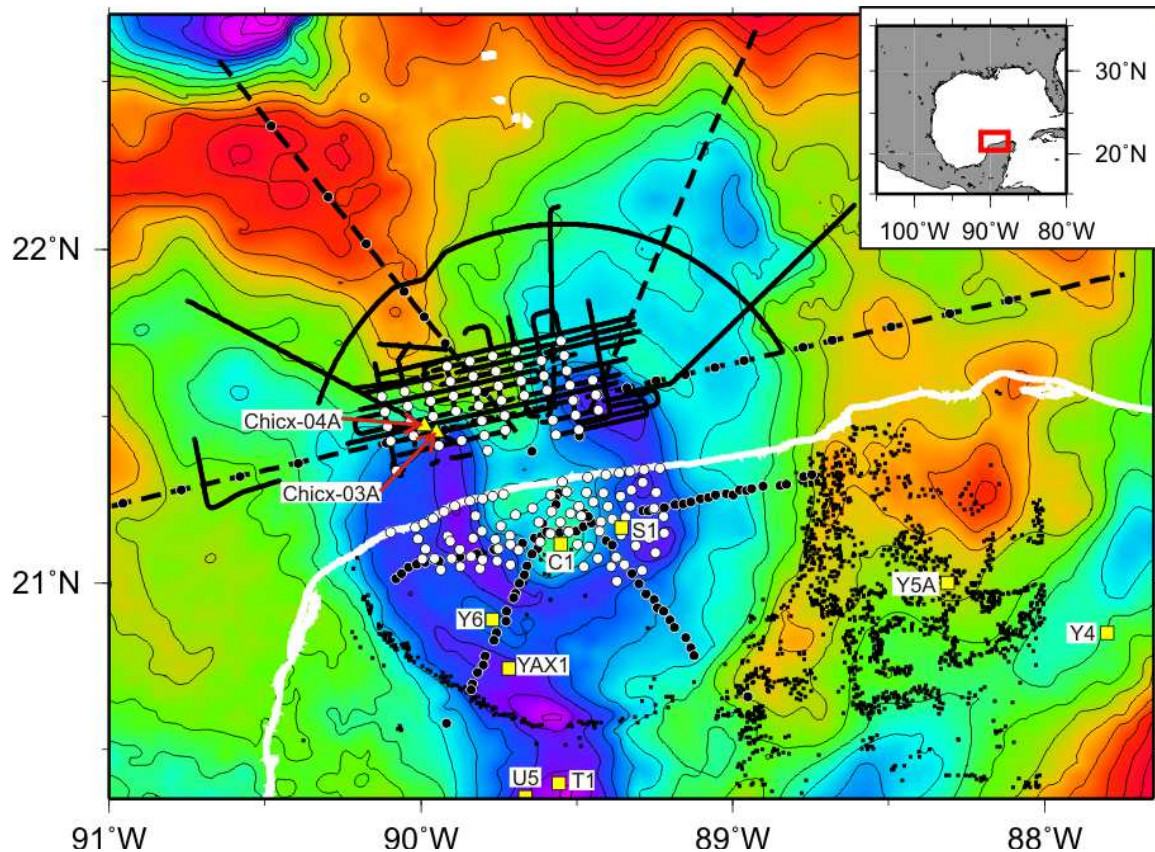


Fig. 3.6 Las líneas negras continuas representan el levantamiento sísmico marino en 2005 y las discontinuas en 1996. Los sismómetros en tierra y costa afuera se muestran 2005 (pequeños puntos blancos), 1996 (pequeños puntos negros). Los cuadrados amarillos grandes muestran los sitios perforados por PEMEX (C-1, S-1, Y-4, Y-5A, Y-6 T-1), UNAM U-5, IODP YAX-1. Los triángulos amarillos representan los sitios de perforación propuestos por IODP. El fondo de la imagen representa la gravedad de Bouguer.

Las litologías esperadas en la primera estrategia de perforación marina, eran ~700 m de material post-impacto y 2.3 km de material del anillo de picos (basamento fracturado, suevita y megabrecha). Aproximadamente a los 2.35 km

se toparía con reflectores inclinados que se pueden seguir del borde exterior de la estructura multianillos al interior de la misma. Fig.3.6.1

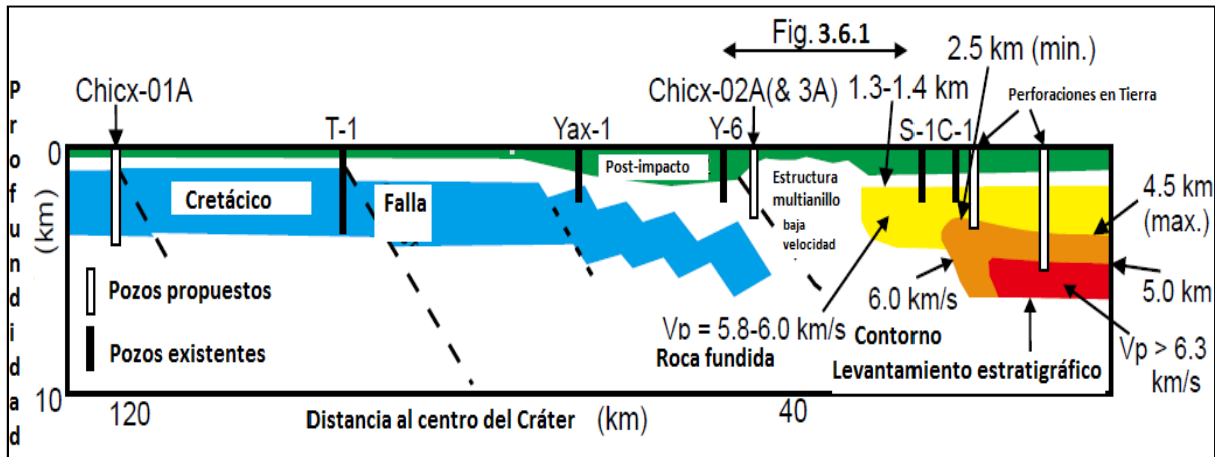


Fig. 3.6.1 Estructura del Cráter de Chicxulub propuesta por datos geofísicos y de perforación (Morgan et. al 2005). En amarillo se observa la roca fundida, en verde el depósito post-impacto en el cretácico, en rojo y anaranjado el levantamiento central de la estructura multianillos.

La perforación marina, determinara características fundamentales por encima y debajo de los reflectores, la litología, el estado físico de la materia y la causa de la reflectividad. Estos datos servirán para corroborar como se desarrollo la formación de la estructura multianillos. Si el material del pico de la estructura se derrumbó como estiman algunos modelos numéricos estos reflectores pueden representar el límite entre la elevación central y el colapso externo ó el borde del cráter transitorio si se colapso hacia adentro.

Las características litológicas, geoquímicas y estructurales de los pozos de Chicxulub proporcionará la primera herramienta de datos de este tipo tanto en la Tierra e incluso en el Sistema Solar.

Un grupo de discusión en procesos hidrotermales reconoció que los estudios recientes en los grandes cráteres de impacto terrestres indican que la actividad hidrotermal importante probablemente ocurrió dentro del pico de la estructura.

Los núcleos obtenidos durante la perforación pueden proporcionar información de las temperaturas y la composición de fluidos hidrotermales, la actividad hidrotermal también podría actuar como una celda con porosidad inducida por el

impacto para el desarrollo de bacterias hipertermófilas con apoyo de la translucidez por colonización de cianobacterias (Cockell et al., 2002).

Estos estudios por lo tanto pueden ayudar a comprender el desarrollo de la vida en la Tierra y posiblemente en Marte, donde los impactos fueron más frecuentes en el tiempo Arcaico temprano.

3.7 Estrategia de perforación

Chicx-03A (Fig. 11a) tomará muestras del material que forma el anillo topográfico de picos, con respecto al estado litológico y físico, incluyendo la porosidad, el grado de choque y fracturación. Se pondrá a prueba las hipótesis de trabajo que los anillos de pico se forman a partir de: 1) Un Colapso y levantamiento de rocas de la corteza superior, media o inferior del basamento, 2) las mega-brechas, o 3) un poco de otro material. Por ejemplo, los niveles de choque previsto dentro del anillo de pico son mucho más altos (cerca de las rocas fundidas) en el modelo por Head (2010), que en el modelo de Collins et al. (2002). este sitio también penetrará ~ 400 m de estratos del Paleoceno-Eoceno para examinar la recuperación de la vida y la paleoclimatología del Paleógeno.

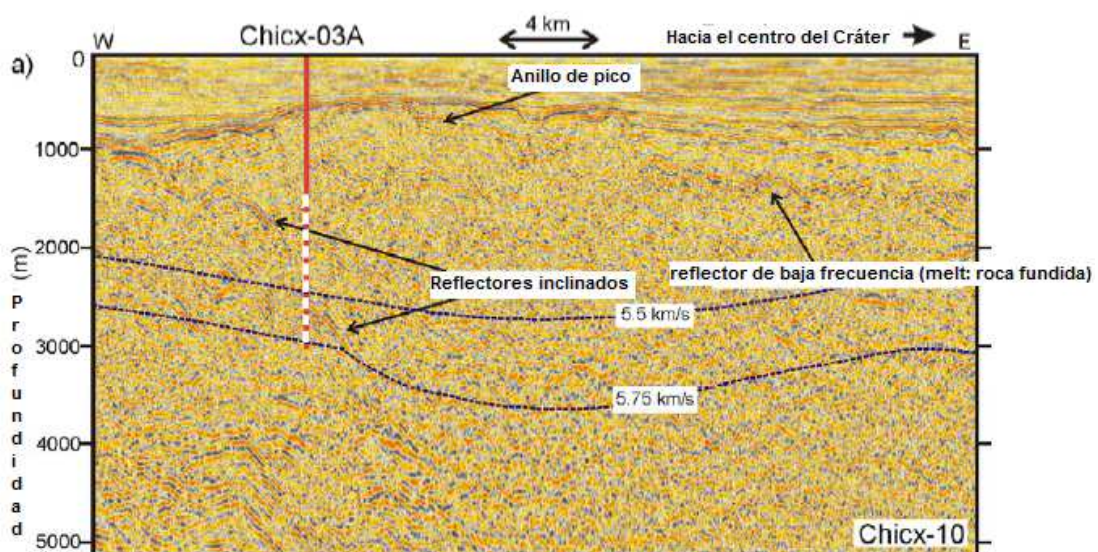


Fig. 3.7.1 Chicx-03^a. Este sitio permitirá investigar, a partir de los 500 m muestras de los sedimentos de carbonatos del Paleoceno, tras el final del Cretácico, brechas de impacto en el anillo de picos.

Chicx-04A (Fig. 11b) penetrará los reflectores inclinados que van desde el borde exterior del anillo de pico. Se pondrá a prueba si la reflectividad inclinada bajo el anillo de pico es: 1) un límite litológico entre litologías de basamento levantado y sedimentos más jóvenes del mesozoico (modelo 3a), 2) es una falla de empuje formado durante el emplazamiento anillo de pico (modelo 3b), 3) es el resultado de una vigorosa circulación hidrotérmica a raíz del emplazamiento anillo pico. El origen de esta reflectividad podría ser alguna combinación de éstos, tal como una falla formada durante emplazamiento del anillo de pico que luego sirvió como un conducto para fluidos post-impacto.

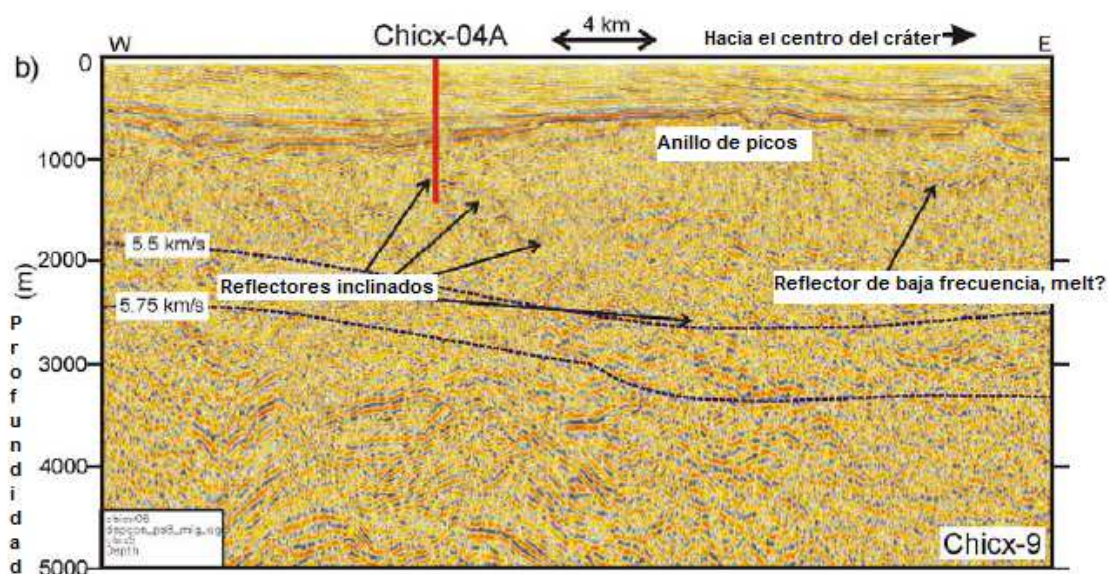


Fig. 3.7.2 Chicx-04^a. Este sitio permitirá investigar a 600 m muestras del límite térmico máximo del Paleoceno-Eoceno y los sedimentos basales del Paleoceno, luego los núcleos de los reflectores inclinados subyacentes del anillo de picos.

3.8 Estudios de riesgo en sitio para el posicionamiento de la plataforma

Antes de que una plataforma no flotante pueda ser colocada en los sitios de perforación, se deberá realizar una inspección de riesgo en el sitio para asegurar que el fondo del mar es seguro y libre de obstáculos. Este tipo de estudio es normalmente requerido por el propietario del equipo para satisfacer los requerimientos de seguridad, los cuales pueden diferir entre las diversas

compañías, reconocemos que puede haber requisitos adicionales de estudio del sitio, que habría que tener en cuenta para llevar a cabo dicho estudio.

Pruebas a realizar:

- 1.-Perfilador sísmico de subsuelo
- 2.-Ecosonda
- 3.-Sonar de barrido lateral
- 4.-Magnétometro
- 5.-Batimetría Multihaz

3.9 Estudio geotécnico marino, para la evaluación del sitio de perforación en Chicxulub.

Si la interpretación de los datos geofísicos revela, que existen cavidades llenas de sedimentos cerca de los sitios que serán perforados, y si el espesor de sedimentos esta presente dentro de los 100 m de perforación, se tomara tres pruebas de penetración cónica aproximadamente 10 m debajo del subsuelo, que consisten en hacer penetrar una punta cónica en el suelo y medir la resistencia que el suelo ofrece, para caracterizar los sedimentos, dependiendo del procedimiento para hincar los conos en el terreno, estos métodos se dividen en estáticos y dinámicos.

3.10 Métodos para la extracción de núcleos

La toma de muestras en Chicxulub se hará de manera similar que la toma de núcleos en New Jersey por IODP. La recuperación de nucleos se llevara a cabo utilizando un aparejo con un mástil capaz de manejar 6m de longitud de cuerda, para llevar a cabo el muestreo el sistema es accionado por el Top drive colocado en el mástil.

Un tubo conductor se ejecuta en el lecho marino para proteger la sarta de perforación del movimiento y la vibración excesiva, y para ayudar al reingreso del pozo si la sarta necesita ser recuperada. Se coloca un barril de extracción de núcleos en la sarta de perforación, la cual se ejecuta por medio de la línea conductora hacia el pozo. La sarta de perforación avanza 3m y el núcleo queda en el barril de extracción, el núcleo llega después a la plataforma por línea de acero, se vacía y se introduce de nuevo la sarta de perforación para la toma del siguiente núcleo. En este escenario el tamaño exterior del barril de núcleo será de 160mm y el diámetro del núcleo de 62mm, este es el tamaño estándar de los núcleos recuperados por IODP.

El lodo de perforación que será usado depende de las características del pozo y de las circunstancias de la perforación. El lodo utilizado a lo largo de la perforación en New Jersey fue usado para quitar los recortes del pozo. Se utilizaron diversas formulaciones, en general, bentonita con un biopolímero biodegradable (almidón) como suspensión potenciadora. Se espera que un programa de lodo similar sea utilizado para la perforación en Chicxulub, no se espera recibir los recortes en la plataforma, lo más probable es que sean llevados de vuelta a las proximidades del fondo del pozo y sean dispersados en el lecho marino, o en algunos casos empujado hacia la pared del pozo, por medio de la barrena de perforación. Los instrumentos adecuados para el monitoreo de gas se utilizan en todo la expedición. Tales instrumentos pueden detectar e identificar gas, pero son empíricos o semicuantitativos y no son instrumentos analíticos. Estos instrumentos emiten un sonido de alarma cuando existe la presencia de ácido sulfhídrico. Se llevan otros instrumentos portátiles para la medición de ácido sulfhídrico, oxígeno y gases inflamables (metano a pentano).

3.11 Mediciones científicas y registro de pozos

Además de la recuperación de núcleos, registro de los datos de las muestras, algunas mediciones científicas preliminares se hacen en los núcleos cuando se encuentran en el mar.

- La primera descripción litológica
- Agua intersticial geoquímica
- Toma de muestras para estudios de microbiología
- Propiedades físicas utilizando un registro de núcleos multi-sensor
- Registros de fondo de pozo

La toma de registros en el fondo de pozo a los núcleos permite asegurar el máximo aprovechamiento científico. Al término de la extracción de núcleos de un pozo, la sarta de perforación se retira en etapas, una serie de herramientas del fondo de pozo subirán y harán las siguientes mediciones.

- Rayos gamma naturales (en tubería y en agujero descubierto)
- Velocidad sónica (nota: esto no implica que emiten ondas de sonido en la columna de agua)
- Imagen acústica (nota: esto no implica que emiten ondas de sonido en la columna de agua)
- Formación de imágenes ópticas
- Resistividad eléctrica
- Susceptibilidad magnética
- Mediciones hidrogeológicas (PH,EH, temperatura)

- Perfil calibrador de agujero (caliper)
- Perfiles sísmicos verticales (nota: esto no implica que emiten ondas de sonido en la columna de agua)

3.12 Después de la fase de perforación

La fase de perforación costa afuera es la primera etapa de la Expedición. El análisis completo de los núcleos y la información científica subsiguiente se lleva a cabo en los meses y años posteriores a la perforación, se piensa seguir el método que a continuación se describe.

Después de que la fase de perforación termine, se pedirán los permisos necesarios a las autoridades, para exportar las muestras a la nucleoteca de Bremen, Alemania.

Aproximadamente 4 meses después de la perforación se realizará un taller científico, para analizar los núcleos obtenidos. Ahí los núcleos serán divididos y un grupo de científicos trabajará para dar los resultados iniciales de las muestras.

Los núcleos se enviarán a la Costa del Golfo, al depósito de IODP (programa integrado de perforación en océanos) en la universidad de Texas A&M, donde se archivarán.

Dos meses después del taller, se publicará un informe preliminar gratuito y en línea.

Un año después del taller, se publicará un informe completo, gratuito en línea para el público como resultado de la expedición. Después de esto cualquier país, incluso no asociado al programa integrado de perforación en océanos (IODP), podrá solicitar muestras de núcleos para la investigación.

IV. TIPOS Y SELECCIÓN DE PLATAFORMA, PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DEL CRÁTER DE CHICXULUB

4.1 Plataformas marinas de perforación, diseño y capacidades

En este capítulo se da una descripción técnica de las unidades marinas de perforación, sus ventajas, desventajas, capacidades y características operativas. Uno se puede preguntar ¿por qué hay tantos tipos, tamaños y capacidades de las unidades de perforación costa afuera? La respuesta tiene que ver con diferencias técnicas, requisitos de seguridad, economía y requisitos gubernamentales para lograr un determinado programa de perforación. Ningún tipo de plataforma puede satisfacer todos los requisitos para cada sitio de perforación, por lo que tenemos que entender todos los tipos para tomar una decisión correcta sobre cuál es la más apropiada para usar dependiendo del lugar de perforación.

4.2 Plataformas fijas

El desarrollo marino de la perforación se puede realizar a través de plataformas fijas. Están diseñadas de tal manera que puedan instalar equipos de perforación, terminación y reparación de pozos. La perforación del subsuelo se lleva a cabo en un tirante de hasta 100m, dependiendo de la configuración del mismo. Estos equipos pueden perforar en promedio 12 pozos.

Algunas plataformas son autosuficientes y albergan todos sus componentes tales como equipo y áreas de personal. Otras requieren utilizar un barco de apoyo.

Estos sistemas se caracterizan por encontrarse asentados sobre el suelo marino. Consisten en estructuras metálicas o de concreto, que se extienden desde el lecho marino hasta la superficie. Estas estructuras son estables con relación al fondo marino.

En los últimos años las plataformas fijas han representado la solución estructural más común para conjuntos de producción y perforación. Sin embargo, la experiencia en trabajos de perforación en profundidades marinas de más de 300 m, indican que las plataformas semifijas o flotantes pueden ser una mejor alternativa.

Los principales sistemas fijos hasta ahora desarrollados en el ámbito mundial son los siguientes:

- Plataforma de concreto por gravedad
- Plataforma convencional de acero o tipo jacket

Cuentan con dos cubiertas lo suficiente amplias para alojar, en su cubierta superior, la totalidad del equipo de perforación y su torre. Tienen grúas para maniobras de descarga, un modulo habitacional, un helipuerto y una zona para almacenaje de insumos en cantidad suficiente para mantener por varios días las operaciones de perforación. En caso de que se interrumpiese el abastecimiento regular por mal tiempo u otra causa; en su cubierta inferior están las instalaciones de producción, así como los tableros para control de pozos y lanzadores o recibidores de diablos.

Las 2 cubiertas se localizan a 16 y 21 m sobre el nivel medio del mar y están soportadas por 8 columnas. Estas plataformas tienen capacidad para perforar hasta 12 pozos aunque no siempre operan todos.

Las plataformas fijas de perforación están diseñadas con dimensiones adecuadas para instalar equipos fijos convencionales para la perforación y terminación de pozos, así como para efectuar intervenciones con equipos de mantenimiento de pozos. Dentro de estos equipos se encuentran las estructuras sujetas por ocho patas (octápodos) con pilotes de 48pg de diámetro y espesores de 2 a 2.5pg de acero ASTM-A-36 y ASTM-A-537 y una penetración aproximada en el lecho marino de 100m dependiendo de la configuración del terreno. Por su construcción, están preparadas para recibir 12 conductores de 30pg de diámetro; aunque no en todos los casos sean perforados en su totalidad.



Fig. 4.2 Plataforma fija de perforación.

Para su identificación, se tiene experiencia que el norte de la plataforma corresponde al área de conductores y al sur, al de la habitacional.

Están formadas por una subestructura, una superestructura y un modulo que según el caso, será de perforación, de producción o habitacional. Las partes se fabrican separadamente en tierra y más tarde, se trasladan y colocan en su ubicación definitiva.

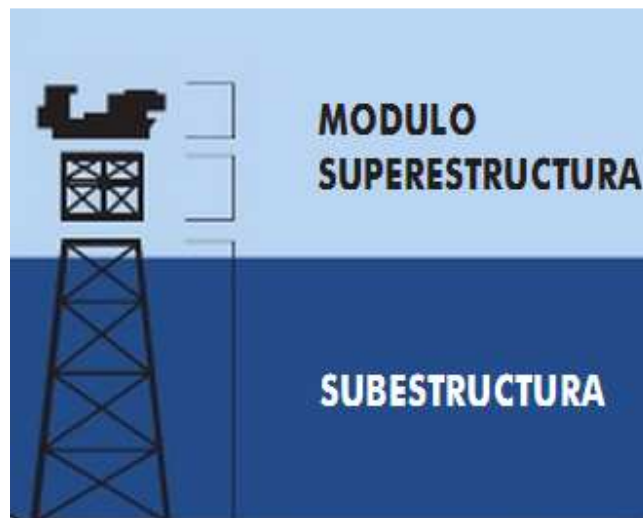


Fig. 4.2.1 Componentes de una plataforma fija

La superestructura tiene dos pisos:

1.- De producción: este piso se encuentra a un nivel de 15.9 m (52 pies) del nivel del mar. Contiene las conexiones superficiales de explotación tales como árboles de válvulas, bajantes, líneas de recolección, equipos de medición de producción, tableros de control etc.

2.- De trabajo: se encuentra a una altura de 20.7m (68 pies) del nivel del mar. En él se localiza los rieles de deslizamiento de la torre de perforación que parten paralelamente de norte a sur.

Es importante señalar que estos rieles también se utilizan como apoyo a la subestructura que ocasionalmente se usa para intervenciones con equipo Snubbing. En este piso, se instalan la mayor parte de las unidades de apoyo del equipo de perforación y mantenimiento de pozos, además de la unidad habitacional que se instala en el lado sur.

Área de embarcadero: Es un tendido de pasillos protegidos por barandales tubulares a una altura de 3.7m (12 pies) del nivel del mar. Comunica a los muelles ubicados en los lados este y oeste de la plataforma a una altura de 1.98m (6 pies, 6 pg) del nivel del mar.

En el área de muelles, se encuentran instaladas las conexiones para el agua y el combustible. Éstos se suministran a través de barcos abastecedores con mangueras flexibles. Para todos los pozos se tiene un control del sistema de cierre de emergencia general. También se encuentran instaladas dos líneas hidráulicas de alta presión, interconectadas al sistema que opera el preventor de arietes ciegos de corte y una línea para inyección de fluidos al espacio anular del pozo que se intervenga.

Capacidad de carga y dimensiones: La capacidad de carga de las plataformas varía de 2500 a 4000 toneladas.

4.2.1 Plataformas fijas protectoras

Las plataformas fijas protectoras son estructuras metálicas permanentes, construidas con dimensiones proporcionales. Para operar equipos con base deslizante (cantiliver) se preparan con tres o cuatro conductores de 30 pg de diámetro.

Se instalan al primer pozo perforado con equipo autoelevable, después de que haya concluido su etapa de perforación y el objetivo programado. Este tipo de plataformas, según su número de pastas, se clasifican en:

4.2.2 Trípodes (tres patas)

Son plataformas con estructuras y superestructuras de forma triangular sujetas por tres patas sobre pilotes de 36pg de diámetro con espesores de 1.5 a 2pg y tipo de acero ASTM-A-36 y ASTM-A-537. La perforación en el lecho marino de estos pilotes y conductores depende de la configuración del subsuelo que varía de 80 a 100m.

Generalmente, dentro de estas instalaciones se cuenta con preparación para tres pozos con conductores de 30pg de diámetro.

Debido a sus cortas dimensiones y capacidades de carga, no se pueden efectuar trabajos de mantenimiento de pozos con los equipos Snubbing que actualmente operan en el área. Se fabrican e instalan con el objeto de proteger

conductores, líneas de recolección y recepción a batería de los fluidos aportados por la formación. Este tipo de plataformas cuenta solamente con un nivel de trabajo donde se localizan el área de conductores y el helipuerto. En la parte inferior se localiza un muelle para embarcaciones.

Para ubicar el número de conductores, se toma como referencia que el norte de la plataforma sea el costado de conductores, y el sur el área del helipuerto. Progresivamente se numeran de izquierda a derecha.

4.2.3 Tetrápodos (cuatro patas)

Estas plataformas son fabricadas e instaladas con el mismo objetivo que las anteriores. Se diferencian en que están soportadas por cuatro patas con pilotes de 48pg de diámetro y espesores de 1.25 y 2.25pg de acero tipo ASTM-A-36 y ASTM-A-537. Tienen preparación para un máximo de seis conductores de 30pg de diámetro.

Por sus dimensiones en este tipo de plataformas no se puede efectuar intervenciones de mantenimiento de pozos con equipo Snubbing. Para la identificación del número correspondiente a cada conductor, se tienen como referencia que el norte de la plataforma sea el costado de conductores, y el sur el área del helipuerto. Ubicado frente a los conductores de espalda al helipuerto se numeran progresivamente.

4.2.4 Estructuras aligeradas

Son equipos de menor capacidad que los convencionales y su aplicación es para la perforación y reparación de pozos costa afuera.

Distribución del equipo: tren malacate-mástil-superestructura en tres niveles.

El primer nivel a 68 pies del nivel del mar, consta de dos tanques de pirámide con patines sobre las viguetas principales de la plataforma, cuando se requiere deslizar con auxilio de gatos hidráulicos, entre conductores de norte a sur o viceversa. En este nivel, se cuenta con 3 bombas de lodo, preventor de 13 5/8" 5M: Esférico, doble y de corte Camerón "U".

En el segundo nivel se tiene 3 presas de lodo con capacidad de 95m³ (600bls) con vibradores eléctricos, embudo, consola, línea de succión, desgasificador y vibradores de alto impacto, eliminador de sólidos y separador gas-lodo, eliminador de arcillas.

El tercer nivel cuenta con el equipo de perforación, malacate con unidad de potencia eléctrica, mástil telescópico de 3 etapas con Top drive instalado, manifold de estrangulación y bomba koomey.

El equipo auxiliar es un paquete de máquinas. Se divide en cuatro secciones. Las partes del paquete son el patio de tubería con 3 generadores Stewart Stevenson de 1875kvt, Marathon y cuarto de control; grúa de 80 toneladas, la cual se instala con apoyo de la grúa del complejo de producción, 4 contenedores con conexiones rápidas y mangueras.

Para efectuar los cambios de localizaciones de estos equipos entre plataformas, no se requiere el apoyo del barco grúa. Las unidades que componen el equipo se bajan a un barco abastecedor con el apoyo de la grúa del mismo equipo.

El tiempo de armado de la subestructura y el mástil M400 HUAT con capacidad de 400000 lbs. es de un día y el Top Drive de 750 HP es de 3 horas aproximadamente.

4.3 Equipo flotante de perforación.

4.3.1 Barco perforador

Como su nombre lo indica, es un barco sobre el cual se instala un equipo de perforación con todo lo necesario para efectuar trabajos de su tipo en el mar.

Los primeros barcos perforadores fueron unidades convertidas de: barcasas, barcos graneleros, barcos tanques o barcos abastecedores. Esta práctica casi desapareció para dar paso al nuevo diseño y construcción de barcos perforadores especializados, tales como el Glomar Challenger o el Discoverer de la Offshore.

Los barcos perforadores son los más móviles de todas las unidades de perforación marina. También son los menos productivos. La configuración que les permite alta movilidad, les resta eficiencia al perforar.

Los barcos perforadores se usaron extensamente para llenar el espacio de capacidad entre el jack-up y el semisumergible, y son los que han perforado en aguas más profundas.

El movimiento vertical es el mayor problema cuando se usa una unidad flotante. Debido a su superficie de contacto con el mar y comparado con el semisumergible, el barco perforador desarrolla respuestas muy grandes de

movimiento vertical. Ha sido posible reducir el rol en los barcos por medio de tanques estabilizadores. Pero no se ha podido reducir el movimiento vertical.

En 1999 se inició la perforación del pozo exploratorio Yumtsil-1 que se localiza en la División Marina Suroeste, con el barco perforador Discoverer 511.

El anclaje de los barcos perforadores es similar al empleado por los semisumergibles. Sin embargo, hay un sistema adicional que ha sido desarrollado en los barcos perforadores, el sistema de torreta.

Los barcos perforadores son herramientas versátiles. Pero deben ser considerados para usarse en áreas con olas de poca altura y vientos con bajas velocidades.



Fig. 4.3.1 Barco perforador

4.3.2 Equipo Semisumergible

Las plataformas Semisumergibles son flotantes y permanecen posicionadas con anclas o posicionamiento dinámico, se utilizan para perforar en tirantes de agua mayores de 100 metros, usando para ello conexiones submarinas.

Este tipo de plataforma evolucionó a partir de la sumergible. Varias se diseñaron para operar, ya sea descansando en el fondo del mar o totalmente a flote.

Estas plataformas realizan actividades relacionadas con la exploración y perforación de pozos. También apoyan operaciones de mantenimiento de instalaciones existentes. A pesar de la gran variedad de diseños de semisumergibles, pueden ser clasificadas en 2 grupos principales: 1) Con columnas conectadas a zapatas o pontones separadas, y 2) con pontones gemelos. Estas columnas soportan una sola cubierta, la cual aloja el equipo e instalaciones necesarias para realizar su función.

Estas plataformas cuentan con sistemas de propulsión propios ubicados en los pontones. En otras palabras, son autopropulsables.



Fig. 4.3.2 Plataforma semisumergible

Los miembros principales (pontones) se encuentran sumergidos. Esto permite incrementar el periodo fundamental en sustentación de la estructura y evitar la resonancia con el oleaje. También reduce las cargas laterales generadas por dicho oleaje. Esta reducción en la carga, se debe a que los miembros principales del casco se localizan a una elevación en la que la energía del oleaje es menor.

Una semisumergible posicionada dinámicamente puede operar en aguas mayores a 100m, pero el yacimiento tendría que ser muy productivo para justificar los gastos de combustible.

Los equipos semisumergibles están diseñados para operar tirantes de agua de 180, 305 y 457m. (600,1000, y 1500 pies) y son sometidos a condiciones de olas y vientos severos.

La configuración general de un semisumergible, consiste de dos cascos inferiores longitudinales. Éstos se usan como compartimientos de lastre que obtienen el calado para perforar. Cuando el equipo está en tránsito estos cascos inferiores son también los cascos primarios. En virtud de su tamaño y configuración, el semisumergible ofrece baja resistencia al remolque. Al mismo tiempo, tiene una gran estabilidad.

Existen otros diseños de semisumergibles, tales como: el diseño triangular, usado en la serie Sedco; el de cuatro cascos longitudinales de la serie Odeco; y el de 5 pontones del equipo Pentagone, diseñado por los franceses.

La unidad Pentagone es, posiblemente, la más exitosa de los cascos múltiples. Ofrece una simetría única y una uniformidad de características de estabilidad. Los semisumergibles permiten que la perforación se lleve a cabo en aguas muy profundas y se mantienen en localización, ya sea por sistemas convencionales de anclaje o por posicionamiento dinámico.

Normalmente, el sistema convencional de anclaje consiste de 8 anclas en un patrón abierto y conectadas al casco por medio de cadenas o cables de acero o una combinación de los dos.

El método de posicionamiento dinámico, es una evolución del sistema de sonar del barco, donde una señal es enviada desde la unidad flotante a un transductor colocado en el fondo del mar. Al incrementarse la profundidad del agua, el uso de este sistema se vuelve necesario. Generalmente, es considerado en tirantes de agua mayores a 305m. (1000 pies), aunque un semisumergible ha operado en 457m. (1500 pies) de profundidad usando la combinación de cable y cadena.

Debido a la masa sumergida del semisumergible, el rol y el cabeceo son de pequeña amplitud. El movimiento vertical es el que causa problemas a los semisumergibles. Por los esfuerzos a los que se somete la sarta de perforación cuando la unidad está moviéndose verticalmente, el semisumergible que tiene una respuesta pequeña al movimiento vertical es considerado como el más adecuado.

El movimiento vertical se genera como una respuesta al plano de flotación expuesto. Mientras más pequeño sea el plano de flotación, más pequeño será el

movimiento vertical. Esto se consigue en el semisumergible, hundiendo los cascos inferiores y flotando al nivel de las columnas.

Con la reducción de plano de flotación para disminuir el movimiento vertical, se reduce también la estabilidad de la unidad. Por lo tanto, los diseñadores deben llegar a establecer una relación adecuada entre los valores aceptables de estabilidad y de movimiento vertical.

Otra consideración en el diseño y operación de un semisumergible es la propulsión. La autopropulsión envuelve una inversión grande inicial, la cual se recupera en un periodo razonable, si lo que se requiere es tener movilidad. Pero si se considera que una vez que la unidad llega a su localización, permanece en esta área por largo tiempo, las unidades de propulsión, no solo no son necesarias, sino que además ocupan espacio y capacidad de carga muy valiosas.

Factores para seleccionar un semisumergible:

- a) Profundidad del agua
- b) Profundidades a las que se requiere perforar.
- c) Datos del medio ambiente
- d) Características de movimiento de la unidad
- e) Capacidad de almacenamiento de materiales de consumo.
- f) Movilidad de la unidad.

4.3.3 Plataformas con piernas tensionadas (TLP)

En campos de aguas profundas, las plataformas de patas tensionadas han sido desarrolladas para generar el potencial económico de los nuevos descubrimientos. Se emplean para la perforación en aguas con un tirante mayor de 600m. Están sujetas mediante cables de ancla fijados en el fondo marino y se mantiene en la superficie mediante columnas flotantes.

Su instalación es muy sencilla ya que no requiere barcasas grúa. Tiene una gran estabilidad en condiciones meteorológicas severas.

El costo de la TLP se incrementa al aumentar la profundidad, debido a los cables de anclaje.

Mientras que las unidades semisumergibles y los barcos de perforación se utilizan sólo para la perforación, las TLP's tienen mayor ventaja en cuanto a la versatilidad para perforar, recuperar y producir pozos, casi en forma simultánea.

La TLP (Tension Leg Platform) o plataforma de piernas tensionadas, es un sistema semejante a la plataforma semisumergible, sólo que ésta se encuentra anclada al fondo por medio de elementos verticales, los cuales se mantienen en tensión, debido al exceso de flotación en la plataforma.



Fig. 4.3.3 Plataforma de piernas tensionadas (TLP)

Los elementos verticales o tensores se anclan al fondo marino por medio de una estructura fabricada a partir de acero estructural y cemento mediante pilotes. Una parte esencial de la TLP son las juntas flexibles. Estas juntas (llamadas Flex-Joints), fabricadas con acero y material elastómero, permiten que la estructura se desplace horizontalmente sin provocar flexión en los tensores.

La aplicación de las TLP's se extiende paulatinamente. Ha sido considerada para el desarrollo de campos del Mar Mediterráneo y costas de Brasil, para usarla en aguas muy profundas. El mayor tirante en el que se ha instalado una TLP es de 536m.

Ventajas

- Pozos superficiales
- Cuenta con equipos de reparación y terminación de pozos

- Costo moderado
- Sistema recuperable en sus componentes principales.

Desventajas

- Soporta un solo equipo de perforación
- Tecnología compleja
- Costoso en aguas someras

4.4 Plataformas autoelevables (jack-up)

Las plataformas Autoelevables pueden ser de patas independientes y no independientes, las de patas independientes permanecen posicionadas hincando las patas en el lecho marino y las de patas no independientes asientan su pontón en el lecho marino, en los dos casos levantan la plataforma dejando un colchón de aire entre el casco y el nivel de agua. Estas plataformas se utilizan para perforar y dar mantenimiento a los pozos, en aguas someras hasta con un máximo de 100 metros de tirante de agua.

Este es un tipo de plataforma especial usada para perforación y reparación de pozos. Tiene la capacidad de moverse de una localización a otra, por medio de autopropulsión o por medio de remolcadores. Así, la perforación es su función principal, ya sea de pozos exploratorios o de desarrollo.

Una vez que se encuentra en la posición deseada, las piernas son bajadas hasta alcanzar el fondo marino. Cuando las columnas o piernas se encuentran asentadas en el lecho marino, la cubierta es elevada más allá del nivel de agua, hasta tener una plataforma de perforación estable.



Fig. 4.4.1 Plataforma Autoelevable (Jack-up)

Cuenta con una cubierta que tiene la capacidad de posicionarse a la elevación que se requiera. Ésta soporta sobre sí todo el equipo necesario para lograr su objetivo. Además de un módulo habitacional y un helipuerto. Para apoyarse en el lecho marino, esta cubierta se encuentra soportada por tres columnas de sección triangular o circular que tienen en su extremo inferior un sistema de “zapatas aisladas” o “losa de cimentación”.

Otra de sus características importantes es la torre de perforación ubicada en un cantiliver móvil. Esto permite el acercamiento de la misma a los pozos de las plataformas fijas.

El primer equipo Jack-up fue De Long Núm. 1, construido en 1950 y convertido en plataforma fija en 1953.

El primer jack-up móvil fue De Long-McDesmontt Núm.1, después llamado Offshore Co. Rig. Núm. 51.

En 1955 se construyó el primer jack-up de 3 piernas llamado Scorpion. Este equipo tenía piernas independientes y usaba un sistema de elevación de piñón y

cremalleras sobre las piernas de estructura reticular. Durante varios años trabajó con éxito y posteriormente se perdió en un accidente en el Golfo de México.

Siguieron otros equipos como el Mr. Guss II que tenía un casco inferior. Servía de soporte a las tres piernas tubulares y el casco superior era elevado con un sistema de gatos hidráulicos.

Debido a las longitudes de sus piernas, con estos equipos se puede perforar pozos en tirantes de agua máximo de 100 m. Sus capacidades de carga variable son de 1500 a 1800 toneladas cortas y su carga total varía entre 7200 y 7670 toneladas cortas.

La primera serie de jack-ups, se diseñó para operar en la porción americana del Golfo de México, en aguas de 60m de profundidad, con un criterio de diseño para ola de 6 a 9 m y vientos de 120km/hr. Cuando existía la amenaza de huracán estas unidades eran movidas hacia aguas protegidas.

Las jack-up actuales se usan en todo el mundo en condiciones ambientales muy severas. Por ejemplo, un equipo para 76m (250 pies) de profundidad, debe llevar el siguiente criterio de diseño:

- a) Costa del Golfo de México, porción americana olas de 16m.(55 pies), vientos de 200 km/hr (125mph)
- b) Mar del Norte, olas de 23m (75pies), vientos de 175km/hr. (115mph), corriente de 1.8 a 3.6km/hr)
- c) Sureste asiático-olas de 9m (30pies), viento de 160 km/hr. (100mph) y corriente mínima.

Así sucesivamente, al incrementarse la profundidad del agua, el criterio de diseño se vuelve más severo. Un punto muy importante es que el criterio actual debe establecerse, usando datos de meteorología del área donde se va a perforar.

El diseño de las plataformas autoelevables está clasificado en dos categorías: la plataforma de piernas independientes y la plataforma soportada por un casco inferior.

La plataforma de piernas independientes puede operar en cualquier área, pero normalmente es usada en donde existen fondos firmes, arrecifes o fondos marinos irregulares.

La unidad de piernas independientes tiene una base en cada pierna para soportarse, son de forma circular, cuadrada o poligonal y de tamaño pequeño. La base más grande que se ha usado es de alrededor de 17m (56pies) de ancho. Estas bases son sometidas a presiones de soporte de alrededor de 2.44 a 3.93 kg/cm² (5000 a 6000 lb/pie²) aunque en el Mar del Norte esta presión puede llegar hasta 4.88 kg/cm² (10000 lb/pie²).

Consideraciones para determinar qué tipo de jack-up se debe usar:

- 1.-Profundidad del agua y criterio del medio ambiente.
- 2.-Tipo y resistencia del fondo marino
- 3.-Capacidad de profundidad de perforación
- 4.-Necesidad de moverse durante la temporada de huracanes.
- 5.-Capacidad de operar con soporte mínimo
- 6.-Qué tan a menudo es necesario mover la unidad
- 7.-Pérdida de tiempos en el movimiento
- 8.-Limites operacionales y de remolque de la unidad.

4.5 Perforación rotativa direccional

La perforación direccional apareció a comienzos de la década de 1970 como técnica para acceder a las reservas que de otro modo resultarían inaccesibles, especialmente aquellas perforadas desde plantillas de pozos marinos. La primitiva tecnología de perforación direccional implicaba el empleo de dispositivos tales como las cuñas de desviación que provocaban la deflexión de la barrena de perforación; método que ofrecía un control limitado y que con demasiada frecuencia se traducía en pérdida de los objetivos. La introducción del motor de desplazamiento positivo ofrecía capacidad de dirección y, junto con esa capacidad, control direccional, pero el motor carecía de la eficacia a la que aspiraban los perforadores. Con el tiempo, los motores direccionales permitieron la rotación y el deslizamiento de la columna de perforación desde la superficie, lo que mejoró aún más el control direccional. Sin embargo, esta tecnología siguió siendo ineficaz y riesgosa porque el esfuerzo de torsión y el arrastre extremos limitaban la capacidad de perforación en los modos de deslizamiento y rotación, impidiendo el acceso a algunos objetivos. Además, la tortuosidad del pozo producida por los motores direccionales en el modo de deslizamiento era inaceptable, en parte porque la tortuosidad dificulta aún más el deslizamiento futuro y porque puede impedir la ejecución de operaciones críticas para la evaluación de formaciones y la bajada de la tubería de revestimiento; la calidad de los registros también se deteriora en pozos rugosos.

La introducción de la tecnología rotativa direccional eliminó varias de las desventajas de los métodos de perforación direccional previos. Debido a que un sistema rotativo direccional perfora direccionalmente con rotación continua desde la superficie, no existe la necesidad de deslizar la herramienta, a diferencia de las perforaciones realizadas con motores direccionales. La rotación continua transfiere el peso a la barrena en forma más eficaz, lo que aumenta la velocidad de penetración. La rotación también mejora la limpieza del agujero porque agita el fluido y los recortes de perforación, permitiendo que fluyan fuera del pozo en vez de acumularse formando un colchón de recortes. Los sistemas rotativos direccionales de avanzada han sido concebidos para mejorar la circulación de los fluidos y la eliminación de los recortes. A su vez, la eliminación eficaz de los recortes reduce la posibilidad de que el arreglo de fondo de pozo (BHA, por sus siglas en inglés) se atasque o se obture.

La rotación continua y el mejoramiento de la limpieza del pozo reducen la posibilidad de atascamiento mecánico y diferencial de la columna de perforación. Ningún componente fijo contacta la tubería de revestimiento o el pozo. Además, la tecnología rotativa direccional mejora el control direccional en tres dimensiones. El resultado neto es un pozo más suave, más limpio y más largo, perforado en forma más rápida y con menos problemas de atascamiento de las tuberías y de limpieza del pozo. Cuanto mejor es la calidad del pozo resultante, menos complicada resulta la evaluación de formaciones y la bajada de la tubería de revestimiento. Además, se reduce el riesgo de atascamiento.

Esta amplia variedad de ventajas ha convertido a los sistemas rotativos direccionales en una parte esencial de muchos programas de perforación. Las compañías de exploración y producción, diseñan trayectorias de pozos desafiantes, en forma rutinaria, para interceptar objetivos distantes o múltiples y maximizar la producción de petróleo y gas. Otros desafíos comunes que enfrenta la perforación rotativa direccional incluyen los yacimientos compartimentalizados, los yacimientos de aguas profundas, los desarrollos con restricciones ambientales, las plataformas o las localizaciones de perforación distante, e incluso ciertos campos marginales en los que el éxito económico depende de la ubicación precisa de un pozo de alta calidad. Durante las operaciones, la robusta tecnología de adquisición de registros durante la perforación puede ayudar a las compañías a refinar las trayectorias para sacar provecho de las capacidades de ubicación de pozos de los sistemas rotativos direccionales. El éxito de la perforación requiere herramientas de fondo de pozo que toleren ambientes de alto impacto, altas temperaturas y rocas abrasivas, con frecuencia durante el incremento angular y la perforación de pozos de alcance extendido.

El módulo de generación de potencia suministra la potencia para la dirección y el control. La unidad de control contiene los dispositivos electrónicos y los sensores

que realizan las mediciones para controlar el arreglo direccional. La sección direccional orienta continuamente el eje de la barrena inclinada para controlar la dirección de la perforación y el incremento angular.

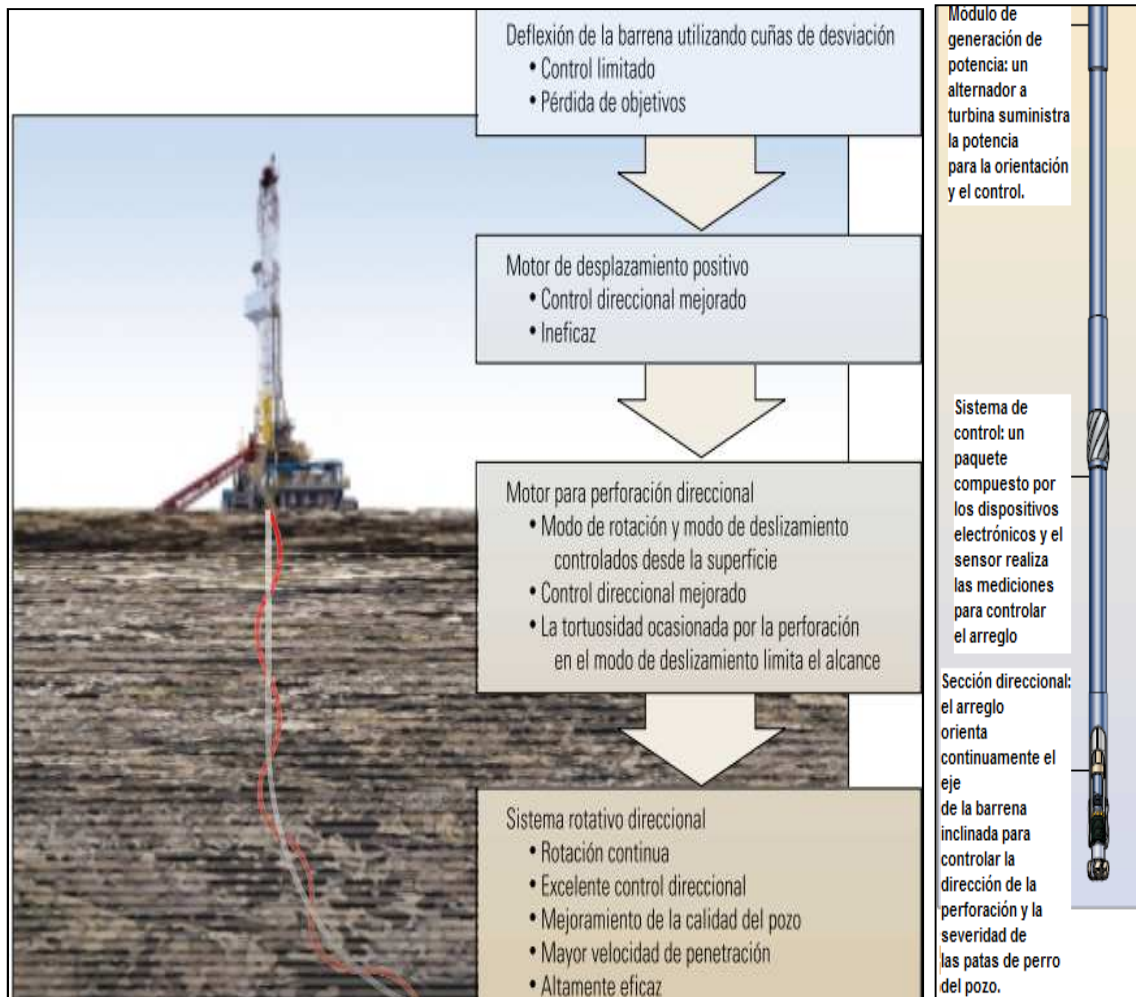


Fig4.5. Sistema rotativo direccional

4.5.1 Las principales ventajas de este sistema respecto a los demás son las siguientes

Se tiene mejor transferencia de peso al trepano, lo que aumenta la velocidad de penetración.

Mejora la limpieza del pozo porque mantiene en mayor movimiento el fluido y los recortes de perforación, permitiendo que fluyan fuera del pozo en vez de acumularse formando un colchón de recortes de perforación, lo cual puede llevar a un aprisionamiento mecánico.

Reduce el riesgo por aprisionamiento diferencial ya que la columna de perforación se mantiene en continuo movimiento.

Mejora el control direccional en tres dimensiones.

Mejora la colección de datos con los registros eléctricos debido a una mejor calidad de pozo, reduce el riesgo en las bajadas de revestimiento al no tener “microdoglegs” (microquebres) asociados.

Esta amplia variedad de ventajas ha convertido a los sistemas rotativos direccionales en una parte esencial de muchos programas de perforación.

4.6 Selección del tipo de plataforma para la perforación del cráter de Chicxulub

La propuesta inicial de perforación era atravesar 3000 m de la estructura multianillos, perforando en un solo sitio. Sin embargo para esa profundidad del pozo, en un tirante de 15 a 25 m, se requiere de una plataforma Jack-up o una plataforma semisumergible, que en el mercado actual cobraría aproximadamente 500 mil dólares por día. Una alternativa mucho más económica es perforar con un barco elevable, y tomar las muestras de núcleos como en la perforación realizada por IODP / ICDP en Nueva Jersey en el 2009. El sistema de perforación de este barco tiene la capacidad de penetrar 1500m y la ventaja de esta plataforma es que es fácil de mover mediante su propio sistema. Estos barcos operan en la Sonda de Campeche y en la costa del Golfo de México en Estados Unidos, estos equipos de perforación cobran de 28 mil a 40 mil dólares por día. La ubicación de Chicxulub dentro del Golfo de México provee gran facilidad y bajos costos para la movilizar dicho barco.



Fig. 4.6 Plataforma de perforación a utilizar en Chicxulub, L/B Kayd.

Capítulo 4 Tipos y selección de plataforma, para la investigación científica del Cráter de Chicxulub

Con esta propuesta, se perforarán dos pozos que alcanzan los objetivos científicos de perforación en aguas menos profundas y se reduce en gran parte el costo total. Chicx-03A alcanzará material de la estructura multianillos y Chicx-04A perforara los reflectores inclinados. Chicx-04A ha añadido beneficios de muestreo a través de una amplia sección sedimentaria, que incluye Paleoceno-Eoceno y también los primeros sedimentos del Terciario. Dos sitios menos profundos son más baratos que un sitio profundo y permiten un corte transversal a través del anillo de pico, que aumentará de forma significativa los datos sobre la actividad hidrotermal post-impacto y los cambios laterales en la litología, deformación y microbiología.

Nombre del sitio	Ubicación	Profundidad (m)	Penetración (m)
Chicx-04A	21 28.6578, N 89 57.4404 W	17 m	1500 m
Chicx-03A	21 27.0846, N 89 57.0648 W	17 m	1500 m

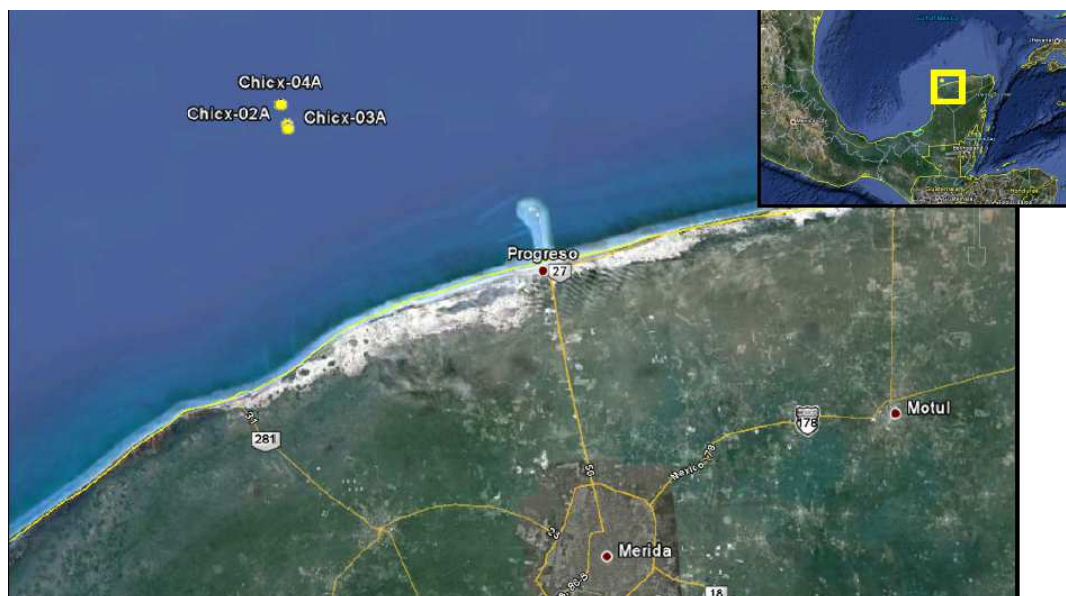


Fig.4.6.1 Sitios de perforación en Chicxulub.

DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos de la perforación marina del cráter de Chicxulub, se espera resolver principalmente, tres interrogantes, 1. Cuál es la naturaleza de la estructura del anillo de pico, 2. Cómo se debilitaron las rocas durante el gran impacto, para que puedan colapsar y formar cráteres relativamente anchos, planos, y 3. Qué causó los cambios ambientales que llevaron a una extinción masiva.

A pesar de casi 30 años de intenso debate, todavía se está tratando de responder a la tercera cuestión, la actual interpretación geológica de la estructura de Chicxulub, que está sepultada ~ 1 km bajo sedimentos del terciario, posteriores al impacto, se basa en comparaciones con otras estructuras de grandes impactos y la integración de magnetometría, sísmica, gravimetría y datos de perforación. Radialmente hacia el interior, la estructura tiene una serie de fallas y anillos, brechas de carbonatos y evaporitas del Cretácico, un anillo de pico topográfico y una cuenca central con rocas fundidas por el impacto, que cubre una elevación de basamento. Debajo del anillo de pico, hay una región de baja velocidad sísmica, que se extiende varios kilómetros en torno al centro del cráter. ¿Por qué el anillo de pico exhibe velocidades y densidades tan bajas? es una importante pregunta que sólo se responderá con la perforación marina en Chicxulub.

Por otra parte se evaluarán las propuestas de Brittan et al. (1999) y los modelos dinámicos (Collins et al., 2002, 2008). Estos estudios propusieron que el anillo de pico está formado por la interacción del colapso hacia el exterior de la elevación central y el colapso hacia el interior del borde transitorio del cráter, este modelo asegura que los reflectores desviados representan el límite entre los dos regímenes de colapso, y predice que el anillo de picos, está formado por material derivado de la profundidad, ya que la estratigrafía dentro de la estructura está volcada. Los minerales provenientes de la fuerte actividad hidrotermal post impacto podrían explicar el brillo de los reflectores inclinados debajo del anillo.

El impacto de Chicxulub fue devastador, la transferencia de energía al ambiente es poco conocida. El mecanismo de propagación fue como un modelo climático. Para modelar los efectos ambientales del impacto, es necesario limitar los contaminantes nocivos a la atmósfera. Especies volátiles de CO₂, SO_x y H₂O fueron expulsados por el choque del meteorito con la Tierra. En las atmósferas superiores, el intenso calentamiento del material expulsado (ejecta) en combinación con los gases liberados por el impacto desestabilizó la totalidad de la circulación atmosférica causando, entre otras cosas, la destrucción masiva del ozono estratosférico.

En la superficie, la radiación de IR y el calentamiento superior de la atmósfera pudo haber causado calentamiento intenso pero, posiblemente, no lo suficiente como para dar lugar directamente a los incendios forestales mundiales (Goldin and Melosh, 2009).

Después el impulso de calor, polvo y sulfatos en la atmósfera superior provocaron un extenso período de enfriamiento en la superficie de la Tierra, acompañado por lluvia ácida resultante del enrojecimiento de los aerosoles de sulfato de la atmósfera inferior.

EL CO₂ liberado por el evento esporádicamente aceleró la recuperación de la biosfera, causando un efecto de calentamiento mundial a largo plazo (Pierazzo et al., 2003; Lomax et al., 2001) para cuantificar los contaminantes, es necesario saber: 1) el volumen, la composición y la porosidad de las rocas de objetivo, 2) cómo las rocas objetivo respondieron durante el impacto, particularmente en relación a la liberación de compuestos volátiles (por ejemplo, Ohno et al., 2004) y la proporción relativa de material vaporizado y fundido (por ejemplo, Jones et al, 2000; Claeys et al, 2003.), 3) el tamaño del cráter transitorio, y, 4) la velocidad y la densidad del meteorito, y la dirección del impacto (por ejemplo, Pierazzo y Melosh, 1999). La perforación ofrecerá mejor información, para evaluar el tipo y la cantidad de material inyectado en la atmósfera, la composición de las litologías, especialmente cerca del centro, debe ser comparado con los materiales expulsados y depositados en todo el mundo.

Para los objetivos científicos del programa de perforación se requiere del uso de técnicas de recuperación continua de núcleos. Esta es una de las diferencias mayores con respecto a programas de perforación convencionales, que utilizan recuperación intermitente. En el caso de Chicxulub no se dispone de afloramientos en superficie y para el estudio de las litologías de impacto se necesita perforar y recuperar las muestras para los trabajos de laboratorio. El empleo de técnicas de recuperación continua incrementa los tiempos de perforación y eleva los costos del proyecto. Tras los resultados del levantamiento geofísico y geotécnico, se procederá a llevar a cabo la perforación y confirmar las hipótesis anteriores, cabe destacar que la propuesta inicial de perforación era atravesar 3000 m de la estructura multianillos, perforando en un solo sitio, ahora se perforarán dos pozos que alcanzan los objetivos científicos de perforación en aguas menos profundas y se optimiza en gran parte el costo total. Los sitios seleccionados se localizan sobre las líneas sísmicas Chicx-9 y Chicx-10. Para el análisis y evaluación del programa de perforaciones, los datos sísmicos se han migrado a profundidad. Chicx-03A alcanzará material de la estructura multianillos (Fig. 5.3 a) y Chicx-04A (Fig. 5.3 b) perforará los reflectores inclinados. Chicx-04A ha añadido beneficios de muestreo a través de una amplia sección sedimentaria, que incluye Paleoceno-Eoceno y

también los primeros sedimentos del Terciario. Dos sitios menos profundos permitirán optimizar los costos/beneficios del proyecto, en comparación con un sitio profundo y permiten un corte transversal a través del anillo de pico, que aumentará de forma significativa los datos sobre la actividad hidrotermal post-impacto y los cambios laterales en la litología, deformación y microbiología.

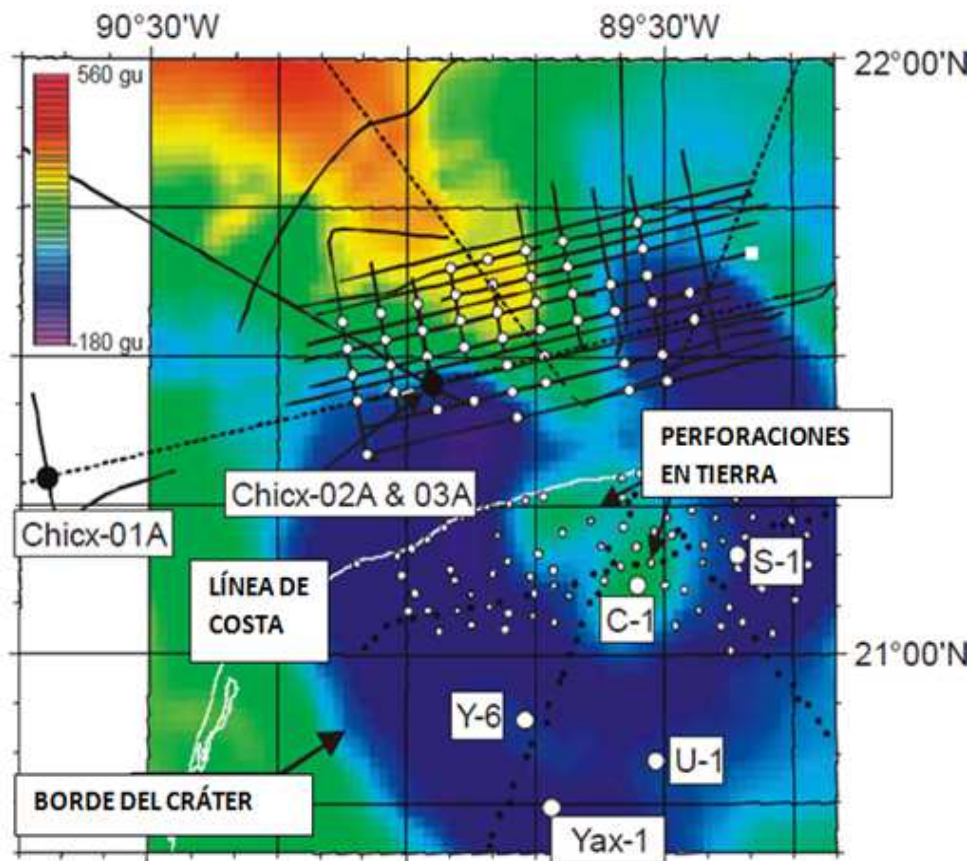


Fig. 5.1 Primera estrategia de perforación, el punto grande negro Chicx-03A, sería un pozo de 3km de profundidad

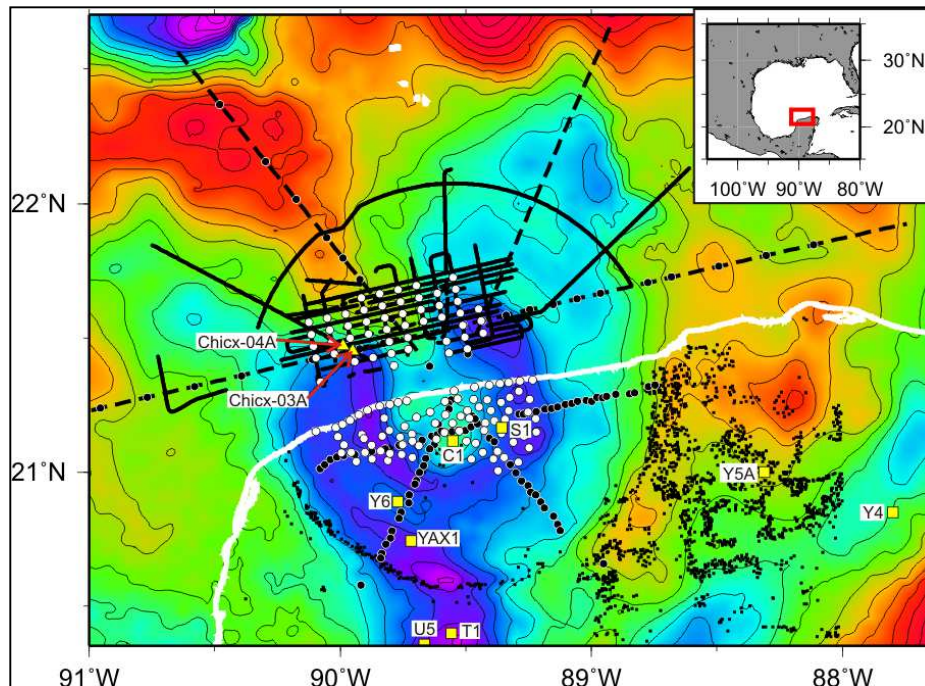
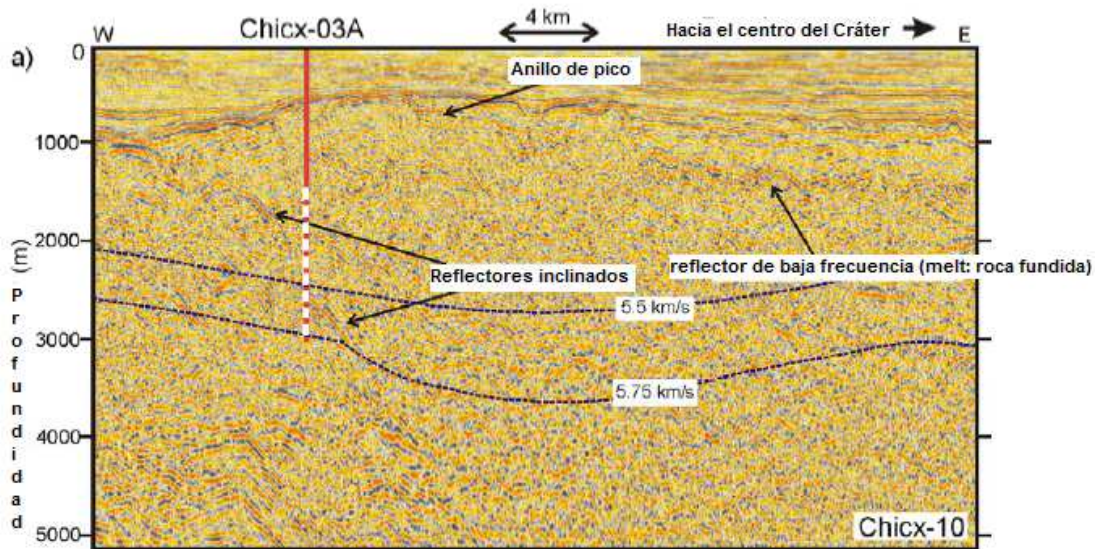


Fig.5.2 Estrategia de perforación actual, los triángulos amarillos serán los pozos perforados con una profundidad de 1500m, Chicx-03A y Chicx-04.



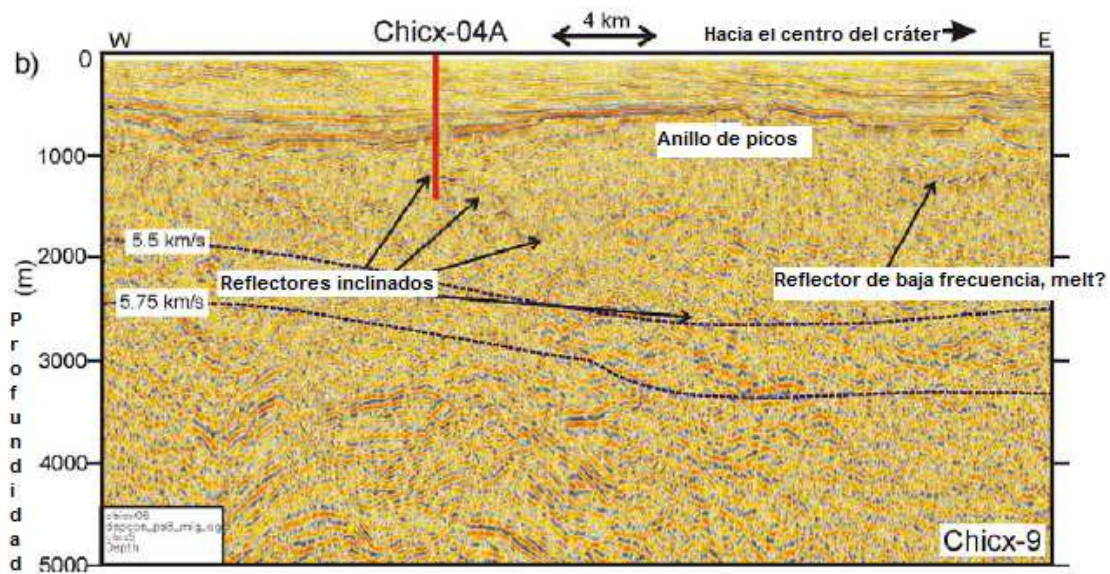


Fig. 5.3. Proyecciones de los sitios de perforación (a) Chicx-03A y (b) Chicx-04A en las imágenes sísmicas.

CONCLUSIONES

Se resalta la importancia de la ingeniería geofísica y geotécnica, para la instalación de una plataforma marina, ya que estas disciplinas en conjunto, proporcionan las características físicas y mecánicas del subsuelo para definir la ubicación del sitio de perforación, diseño de cimentaciones y programa de operaciones.

El proyecto de perforación marina del cráter Chicxulub incluye la recuperación continua de núcleos, que es parte de los requerimientos dentro de los objetivos científicos. El programa de recuperación continua incrementa los costos y los tiempos de perforación, lo que debe considerarse en el diseño de operaciones. Con el cambio de estrategia en la perforación del cráter Chicxulub, con dos perforaciones y programa de recuperación continua de núcleos a profundidades de 1500 m se disminuirá el costo del programa de perforación, y aumentara la calidad de la información obtenida.

Con esta investigación se conocerá la litología, estratigrafía y como ocurrió la formación del cráter de Chicxulub, verificando los modelos sugeridos por métodos de magnetometría, sísmica, gravimetría y datos previos de perforación.

La inclusión de recuperación continua de núcleos permitirá contar con una columna de referencia estratigráfica y litológica para las secuencias en esta parte de la plataforma carbonatada de Yucatán.

Por otra parte, se contribuirá a documentar la magnitud y la duración de tsunamis que fueron desencadenados tras el impacto en el área marina, y a comprender los sedimentos depositados en el límite K-T alrededor del Golfo de México y el Mar Caribe.

Se estudiara la importante influencia del cráter sobre la hidrogeología local, el anillo de cenotes y las aguas subterráneas, todos ligados espacialmente con el borde del cráter Chicxulub.

Los estudios geoquímicos, petrográficos, propiedades físicas e isotópicos que se realizaran en Chicx-03A and Chicx-04A, estudiaran la roca fundida y las brechas de impacto, poniendo especial cuidado en los elementos siderófilos.

Con las investigaciones resultantes del proyecto marino de perforaciones en el cráter Chicxulub, se investigará la evolución climática, el nivel del mar y la oceanografía. Tanto Chicx-03A y 04A proporcionarán una sección ampliada del Daniano-temprano hasta el Eoceno-Oligoceno tardío, registrando la recuperación biótica post-impacto y una serie de eventos híper térmicos en los que el máximo

térmico del paleoceno-Eoceno fue el más severo y la transición invernal del Eoceno-Oligoceno.

El estudio del depósito de sedimentos post impacto, en el cráter de Chicxulub también permitirá evaluar y comprobar los modelos y las teorías de cómo se formó la estructura del anillo topográfico de picos.

En general este trabajo aportara información científica, que apoyara a disciplinas como, la hidrogeología, geomicrobiología, geología, geofísica, micropaleontología, geoquímica, sedimentología, paleobiología.

BIBLIOGRAFÍA

- Ames, D.E., I.M. Kjarsgaard, K.O. Pope, B.O. Dressler, & M. Pilkington, (2004) Secondary alteration of the impactite and mineralization in the basal Tertiary sequence, Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Mexico. *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1145-1168.
- Aracil, E. (1995). Testificación geofísica: Una herramienta para la inspección de sondeos hidrogeológicos VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla.
- Aracil, E. (2000). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Olmo, M. y López-Geta, J. A. (eds.). Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, IGME, Madrid, 49-59.
- Aracil, E. (sin publicar). Registros geofísicos. Aspectos aplicados. Nuevas técnicas de construcción de pozos en terrenos no consolidados. Fermín Villarroya. Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español.
- Artemieva, N. & Morgan, J., (2009) Modeling the formation of the K-P boundary layer, *Icarus*, 201, 768-780.
- Arz, J. A., L. Alegret, & I. Arenillas (2004) Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction of Yaxcopoil-1 drill hole (Chicxulub crater, Yucatán Peninsula), *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1099-1112.
- Astier, J. L. (1975). Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo, Madrid.
- Beck, A. E. (1991). *Physical Principles of Exploration Methods*. (2ª ed.). Wuerz, Winnepeg. Bengt Sjöre (1984). *Shallow Refraction Seismics*. Chapman and Hall, Londres.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press.
- Brittan, J., J. Morgan, M. Warner, and L. Marin (1999) Near-surface seismic expression of the Chicxulub impact crater, in *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II*, edited by B. O. Dressler and V. L. Sharpton, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 339, 269-279.
- Bullen, K. E. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. (3ª ed.). Cambridge University Press, Nueva York.
- Cantos Figuerola, J. (1987). *Tratado de prospección geofísica aplicada*. (3ª ed.). Escuela de Minas, Madrid.

- Cave, R. R., G. E. Ravizza, C. R. German, J. Thomson, & R. W. Nesbitt (2003) Deposition of osmium and other platinum-group elements beneath the ultramafic-hosted Rainbow hydrothermal plume, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 210, 65-79.
- Claeys, P., W. Kiessling, & W. Alvarez (2002) Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary, in *Catastrophic events and mass extinctions; impacts and beyond*, edited by C. Koeberl and K. G. MacLeod, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 356, 55-68.
- Claeys, P., S. Heuschkel, E. Lounejeva-Baturina, G. Sanchez-Rubio, & D. Stöffler (2003), The suevite of drill hole Yucatan 6 in the Chicxulub impact crater, *Meteorit. Planet. Sci.*, 38, 1299-1317.
- Cockell, C. S., P. Lee, P. Broady, D. S. S. Lim, G. R. Osinski, J. Parnell, C. Koeberl, L. Pesonen, & J. Salminen (2005) Effects of asteroid and comet impacts on habitats for lithophytic organisms - A synthesis, *Meteorit. Planet. Sci.*, 40, 1901-1914.
- Collins, G. S., H. J. Melosh, J. V. Morgan, & M. R. Warner (2002) Hydrocode simulations of Chicxulub crater collapse and peak-ring formation, *Icarus*, 157, 24-33.
- Collins, G.S., J. Morgan, P. Barton, G.L. Christeson, S. Gulick, J. Urrutia Fucugauchi, M. Warner, K. Wünnemann (2008). Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 270, 221-230.
- Dahlheimer, S. R., C. R. Neal, & J. B. Fein (2007) Potential mobilization of platinum-group elements by siderophores in surface environments, *Environ. Sci. Tech.*, 41, 870-875.
- Ebel, D. & Grossman, L. (2005). Spinel-bearing spherules condensed from the Chicxulub impact vapor plume. *Geology* 33, 293-296.
- Gelinas, A., D. A. Kring, L. Zurcher, J. Urrutia-Fucugauchi, O. Morton, & R. J. Walker (2004) Osmium isotope constraints on the proportion of bolide component in Chicxulub impact melt rocks, *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1003-1008.
- Gohn, G. S., C. Koeberl, K. G. Miller, W. U. Reimold, J. V. Browning, C. S. Cockell, J. Horton, J.W., T. Kenkmann, A. A. Kulpecz, D. S. Powars, W. E. Sanford, & M. A. Voytek (2008) Deep drilling into the Chesapeake Bay impact structure, *Science*, 320, 1740-1745.

- Goldin, T., & H. J. Melosh (2009). Self-shielding of thermal radiation from Chicxulub impact ejecta, *Geology*, 37, 1135-1137.
- Goto, K., R. Tada, E. Tajika, T. J. Bralower, T. Hasegawa, & T. Matsui (2004) Evidence for ocean water invasion into the Chicxulub Crater at the Cretaceous/Tertiary boundary, *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1233-1247.
- Grajales-Nishimura, J.M. 2001. Origen, diagénesis e importancia petrolera de la secuencia carbonatada del límite Cretácico-Terciario en el Sureste de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Doctorado, 230 p.
- Grieve, R., & A. Therriault (2000) Vredefort, Sudbury, Chicxulub: Three of a kind?, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28, 305-338.
- Grieve, R. A. F., M. J. Cintala, and Tagle R. (2007) Planetary Impacts, in *Encyclopedia of the Solar System*, Second edition, edited by P. Weissman, L.-A. McFadden and T. Johnson, 813-828, Academic Press.
- Grieve, R. A. F., W. U. Reimold, J. Morgan, U. Riller, and M. Pilkington (2008) Observations and interpretations at Vredefort, Sudbury and Chicxulub: Towards an empirical model of terrestrial impact basin formation, *Meteorit. Planet. Sci.* 43, 855-882.
- Gulick, S. P. S., P. J. Barton, G. L. Christeson, J. V. Morgan, M. McDonald, K. Mendoza-Cervantes, Z. F. Pearson, A. Surendra, J. Urrutia-Fucugauchi, P. M. Vermeesch, & M.R. Warner (2008) Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater, *Nature Geosci.*, 1, 131-135.
- Head, J. W. (2010) Transition from complex craters to multi-ringed basins on terrestrial planetary bodies: Scale dependent role of the expanding melt cavity and progressive interaction with the displaced zone, *Geophys. Res. Lett.* 37, doi: 10.1029/2009GL041790.
- Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, D. A. Kring, M. Pilkington, A. Camargo, Z., S. B. Jacobsen, & W. V. Boynton (1991) Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico, *Geology*, 19, 867-871.
- Hodges, C.A. and Wilhelms, D. E. (1978) Formation of lunar basin rings, *Icarus* 34, 294-323.
- Ivanov, B. A. (2005) Numerical modeling of the largest terrestrial meteorite craters, *Solar Syst. Res.*, 39, 381-409.
- Jablonski, D. (1997), Progress at the K-T boundary, *Nature Geosci.*, 387, 354-355.

- Jones, A. P., P. Claeys, & S. Heuschkel (2000) Impact melting: A review of experimental constraints for carbonate targets and applications to the Chicxulub crater, in *Impact and early Earth*, edited by I. Gilmour and C. Koeberl, Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 91, 343-362, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Katz, M.E., K.G. Miller, J.D. Wright, B.S. Wade, J.V. Browning, B.S. Cramer, & Y. Rosenthal (2008) Stepwise transition from the Eocene greenhouse to the Oligocene icehouse, *Nature Geoscience*, 1, 329–334, doi: 10.1038/ngeo179.
- Kettrup, B., A. Deutsch, M. Ostermann, & P. Agrinier (2000) Chicxulub impactites: Geochemical clues to the precursor rocks, *Meteorit. Planet. Sci.*, 35, 1229-1238.
- Koeberl, C. (1993) Chicxulub crater, Yucatan: Tektites, impact glasses, and the geochemistry of target rocks and breccias, *Geology*, 21, 211-214.
- Koeberl, C., & K. MacLeod (Eds.) (2002) *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 356, 746 pp.
- Kring, D.A. & B.A. Cohen (2002) Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system 3.9-4.0 Ga, *J. Geophys. Res.* 107(E2), doi: 10.1029/2001JE001529.
- Kyte, F. T. (1998) A meteorite from the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, 396, 237-239.
- Lieger, D., Riller, U., & Gibson, R. (2008) Generation of fragment-rich pseudotachylite bodies during central uplift formation in the Vredefort impact structure, *Earth Planet. Sci. Lett.* In review.
- Lomax, B., D. Beerling, G. Upchurch, Jr., & B. Otto-Bliesner (2001) Rapid (10-yr) recovery of terrestrial productivity in a simulation study of the terminal Cretaceous impact event, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192, 137-144.
- López Ramos, E. 1979. *Geología de México*, 3, 446 pp. México, D.F.
- Lüders, V., & K. Rickers (2004) Fluid inclusion evidence for impact-related hydrothermal fluid and hydrocarbon migration in Cretaceous sediments of the ICDP-Chicxulub drill core Yaxcopoil-1. *Meteoritics and Planetary Science* 39, 1187-1197.
- Matsui, T., F. Imamura, E. Tajika, Y. Nakano, & Y. Fujisawa (2002) Generation and propagation of a tsunami from the Cretaceous-Tertiary impact event, in *Catastrophic events and mass extinctions: Impacts and beyond*, edited by C. Koeberl and K. G. MacLeod, 69-77, *Geol. Soc. Am, Spec. Pap.* 356.

- Medina de la Paz, J. & Duran Rodríguez, V. 1991. Sección estratigráfica Bochil-Soyaló-1, Prospecto Bochil, PEMEX, Zona sureste (Villahermosa) (Inédito).
- Melosh, H.J. (1979) Acoustic fluidization: A new geologic process? *J. Geophys. Res.*, 84, 7513-7520.
- Melosh, H. J. (1989), *Impact Cratering: A Geological Process*, 245 pp., Oxford Univ. Press, New York.
- Melosh, H. J. (1997) Multi-ringed revelation, *Nature*, 390, 439-440.
- Melosh, H. J., & B. A. Ivanov (1999) Impact crater collapse, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 27, 385-415.
- Miller, K.G., M.A. Kominz, J.V. Browning, J.D. Wright, G.S. Mountain, M.E. Katz, P.J. Sugarman, B.S. Cramer, N. Christie-Blick, & S.F. Pekar (2005) The Phanerozoic record of global sea-level change, *Science*, 310, 1293–1298, doi: 10.1126/science.1116412.
- Montanari, S., Claeys, P., Asaro, F., Bermudez, J. & Smit, J. 1994. Preliminary stratigraphy and iridium and other geochemical anomalies across the KT boundary in the Bochil section (Chiapas, southeastern Mexico). In *New Developments Regarding the KT Event and Other Catastrophes in Earth history: Lunar and Planetary Institute, Contribution 825*, 84-85. Houston, Texas.
- Morgan, J., M. Warner, and Chicxulub Working Group (1997) Size and morphology of the Chicxulub impact crater, *Nature*, 390, 472-476.
- Morgan, J., & M. Warner (1999), Chicxulub: The third dimension of a multi-ring impact basin, *Geology*, 27, 407-410.
- Morgan, J. V., M. R. Warner, G. S. Collins, H. J. Melosh, & G. L. Christeson (2000) Peakring formation in large impact craters: Geophysical constraints from Chicxulub, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 183, 347-354.
- Morgan, J., M. Warner, J. Urrutia-Fucugauchi, S. Gulick, G. Christeson, P. Barton, M. Rebolledo-Vieyra, and J. Melosh (2005), Chicxulub Crater seismic survey prepares way for future drilling, *Eos Trans. AGU*, 86, 325, 328.
- Morgan, J., G. Christeson, S. Gulick, R. Grieve, J. Urrutia, P. Barton, M. Rebolledo, and J. Melosh (2007). Joint IOP/ICDP scientific drilling of the Chicxulub impact crater, *Research Drilling*, 4, 42-44.
- Murillo-Muñetón, G., Grajales-Nishimura, J.M., Cedillo-Pardo, E., García Hernández, J., & Hernández-García, S. 2002. Stratigraphic Architecture and Sedimentology of the Main Oil-Producing Stratigraphic Interval at the Cantarell

- Oil Field: the K/T Boundary Sedimentary Succession. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE-7431.
- Ohno, S., S. Sugita, T. Kadono, S. Hasegawa, and G. Igarashi (2004) Sulfur chemistry in laser- simulated impact vapor clouds: implications for the K/T impact event, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 218, 347-361.
- Ortiz Aleman, C., Urrutia Fucugauchi, J., 2010. Aeromagnetic anomaly modeling of central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub crater. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 179, 127-138
- Perry, E., L. Marin, J. McClain, & G. Velázquez (1995) Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater, *Geology*, 23, 17-20.
- Pierazzo, E., & H. J. Melosh (1999) Hydrocode modeling of Chicxulub as an oblique impact event, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 165, 163-176.
- Pierazzo, E., A. N. Hahmann, & L. C. Sloan (2003) Chicxulub and Climate: Effects of Stratospheric Injections of Impact-Produced S-bearing Gases, *Astrobiology*, 3, 99-118.
- Pilkington, M., A. R. Hildebrand, & C. Ortiz-Aleman (1994) Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub Crater, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 99, 13147- 13162.
- Pope, K. O., A. C. Ocampo, G. L. Kinsland, & R. Smith (1996) Surface expression of the Chicxulub crater, *Geology*, 24, 527-530.
- Pope, K. O., K. H. Baines, A. C. Ocampo, & B. A. Ivanov (1997) Energy, volatile production, and climatic effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact, *J. Geophys. Res.*, 102, 21645-21664.
- Riller, U., D. Lieger, R. L. Gibson, R. A. F. Grieve, & D. Stöfler (2010) Origin of largevolume pseudotachylite in terrestrial impact structures, *Geology*, 38, 619-622. doi: 10.1130/G30806.1
- Pszczolkowski, A. 1986. Megacapas del Maestrichtiano en Cuba occidental y central. *Polish Academy of Sciences Bulletin (Earth Sciences)*, 34, 81-94.
- Quezada-Muñetón, J.M. 1990. El Cretácico medio-Superior y el límite Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Sierra de Chiapas. *Boletín Asociación Mexicana Geólogos Petroleros*, 39, 1, p. 3-98.
- Romero-Ibarra, M.A., Medrano-Morales, L. & Maldonado-Villalón, R. 2001. Subsistemas generadores del área marina de Campeche, México. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos y Petroleros*, 49, 1.-2, 105-115.
- Salas, G.P. & López-Ramos, E. 1951. Geología y Tectónica de la región de Macuspana, Tabasco y parte norte de Chiapas. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 3, 1-2, 3-56.

- Santiago-Acevedo, J., Carrillo-Bravo, J., & Martell-Andrade, B. 1984. Geología Petrolera de México. En Evaluación de Formaciones de Formaciones en México (D. Marmissolle-Daguerre, ed). Schlumberger, México, DF. P.I-1-I-36.
- Senft L.E. & S.T. Stewart, (2009), Dynamic fault weakening and the formation of large impact craters, *Earth and Planetary Science Letters* 287, 471–482.
- Schulte, P. et al. (40 co-authors) (2010) The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary, *Science*, 327, 1214-1218.
- Sharpton, V. L., L. E. Marín, C. Carney, S. Lee, G. Ryder, B. C. Schuraytz, P. Sikora, & P.D. Spudis (1996) A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs, and drill core samples, in *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history*, edited by G. Ryder, D. Fastovsky and S. Gartner, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 307, 55-74.
- Shulolyukov, A., & G.W. Lugmair (1998) Isotopic evidence for the Cretaceous-Tertiary impactor and its type, *Science*, 283, 927-929.
- Smit, J. (1999) The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 27, 75-113.
- Smit, J., Roep, T. B., Alvarez, W., Montanari, A., Claeys, P., Grajales-Nishimura, J. M. & Bermúdez-Santana, J. 1996. Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: Deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact?. In Ryder, G., et al.. (eds). *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of America, Special Paper*, 307, 151-186.
- Söffler, D., N. A. Artemieva, B. A. Ivanov, L. Hecht, T. Kenkmann, R. T. Schmitt, R. A. Tagle, & A. Wittmann (2004) Origin and emplacement of the impact formation at Chicxulub, Mexico, as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling, *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1035-1067.
- Tagle, R., J. Erzinger, L. Hecht, R. T. Schmitt, D. Stöffler, & P. Claeys (2004) Platinum group elements in impactites of the ICDP Chicxulub drill core Yaxcopoil-1: Are there traces of the projectile?, *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1009-1016.
- Tagle, R., & L. Hecht (2006), Geochemical identification of projectiles in impact rocks, *Meteorit. Planet. Sci.*, 41, 1721-1735.
- Takayama, H., Tada, R., Matsui, T., Iturralde-Vinent, M.A., Oji, T., Tajika, E., Kiyokawa, S., Garcia, D., Okada, H., Hasegawa, T., & Toyoda, K. 2000. Origin of the Peñalver Formation in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact event. *Sedimentary Geology*, 135, 295-320.

- Tripati, A., & H. Elderfield (2005) Deep-Sea temperature and circulation changes at the Paleocene-Eocene thermal maximum, *Science*, 308, 1894-1898.
- Urrutia-Fucugauchi, J., D. Morán Zenteno, V. L. Sharpton, R. Buffler, D. Stöffler, & J. Smit (2001) The Chicxulub Scientific Drilling Project. *Infraestructura científica y desarrollo tecnológico 3*, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 45 p.
- Urrutia-Fucugauchi, J., J. Morgan, D. Stöffler, & P. Claeys (2004) The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP), *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 787-790.
- Urrutia Fucugauchi, J., Chavez Aguirre, J.M., Perez Cruz, L., de la Rosa, J.L., (2008) Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of Chicxulub Crater. *Comptes Rendus Geosciences*, 341, 801-810.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Perez-Cruz, L., Perez Cruz, G., (2011) The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional* 50, 99-127.
- Vermeesch, P. M., & J. V. Morgan (2008) Structural uplift beneath the Chicxulub impact structure, *J. Geophys. Res.*, 113, doi: 10.1029/2007JB005393.
- Whalen, M. T., Z. F. Pearson, & S. P. S. Gulick (2007), Toward a Sequence Stratigraphy of the Chicxulub Impact Basin Infill: Integration of Lithostratigraphy, Biostratigraphy, and Seismic Stratigraphy, Final Report of Pre-drilling Activity Proposal to the Joint Oceanographic Institutions, 27 pp.
- Wünnemann, K., J. V. Morgan, & H. Joedicke (2005) Is Ries Crater typical for its size? An analysis based upon old and new geophysical data and numerical modeling, in *Large Meteorite Impacts III*, edited by T. Kenkmann, F. P. Hörz and A. Deutsch, *Geol. Soc.*
- Zachos, J. C., M. W. Wara, S. Bohaty, M. L. Delaney, M. R. Petrizzo, A. Brill, T. J. Bralower, & I. Premoli-Silva (2003) A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, *Science*, 302, 1551-1554.
- Zurcher, L. & D.A. Kring (2004) Post-impact hydrothermal alteration in the Yaxcopoil-1 hole, Chicxulub impact structure, Mexico, *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1199-1221